

Universität Stuttgart

Institut für Feuerungs- und
Kraftwerkstechnik



Pfaffenwaldring 23 • 70569 Stuttgart • Germany • T +49 (0) 711 685-63487 • E-mail: ifk@ifk.uni-stuttgart.de

Abschlussbericht

„Durchführung eines NO₂-Messprogramms mit Passivsammlern zur Ermittlung der Verbesserung der Luftqualität in der Marienschule - Grundschule Stuttgart-Süd“

Im Auftrag des

Schulverwaltungsamts der Landeshauptstadt Stuttgart

Stand 15.09.2020

Bearbeitet von

Dr.-Ing. Ulrich Vogt, Ulrich.vogt@ifk.uni-stuttgart.de

M.Sc. Miriam Chacón Mateos, Miriam.chacon-mateos@ifk.uni-stuttgart.de

B. Sc. Clémence Aubert

Universität Stuttgart

Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik

Abteilung Reinhaltung der Luft

Pfaffenwaldring 23

70569 Stuttgart

Inhalt

1	Einleitung.....	3
1.1	Ausgangssituation in der Grundschule Süd	3
1.2	Optimierungsmaßnahmen nach Abschluss der Luftmessungen in der Marienschule Grundschule Stuttgart Süd.....	4
1.3	Aufgabenstellung	5
2	Methoden.....	6
2.1	Grundkenntnisse über Stickstoffdioxid (NO ₂).....	6
2.2	Passivsammler.....	6
2.3	Schätzung der Jahresmittelwerte	8
3	Messstrategie	9
3.1	Messgebiet.....	9
3.2	Messstellen	9
	Messzeiträume.....	11
4	Ergebnisse.....	12
4.1	Zeitliche Entwicklung	12
4.2	Interpretation der Vertikalprofile.....	15
4.3	Vergleich straßenzugewandte Fassade/Klassenräumen im alten Gebäudeteil und straßenabgewandte Fassade/ Klassenräume im neuen Gebäudeteil	16
4.4	Jährliche Mittelwerte der Messungen im Jahre 2019 im Vergleich zu den Messungen die im Jahr 2017 stattfanden	17
5	Diskussion der Untersuchungsergebnisse.....	19
6	Zusammenfassung.....	20
7	Literatur	21
8	Anhang A	23
8.1	Fotos der Passivsammlerstandorte innerhalb des Gebäudes	23
8.2	Fotos der Passivsammler außerhalb des Gebäudes	25
9	Anhang B – Passivsammlerstandorte in den verschiedenen Stockwerken und außerhalb der Gebäude der Marienschule	29

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation in der Grundschule Süd

Zwei Stuttgarter Schulen, die Heusteigschule und die Grundschule Süd, wurden im Gebäude der ehemaligen Römerschule, der heutigen Marienschule, zusammengelegt. Aufgrund von Protesten der Elternschaft, welche erhöhte Lärmbelastung und Schadstoffkonzentrationen in der Grundschule Süd erwarteten, wurden im Jahr 2017 vom IFK der Universität Stuttgart umfangreiche Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse und die daraus gezogenen Schlüsse liegen in Berichtsform vor [1]. Zusammenfassend kann festgehalten werden:

Die Grundschule Süd im Gebäude der ehemaligen Römerschule besteht aus zwei Gebäudeteilen, von denen einer direkt an der viel befahrenen Bundesstraße B 14 liegt. In diesem Bereich des Gebäudes können die Fenster nicht geöffnet werden; die Belüftung erfolgt dort über ein Zwangsbelüftungssystem. Angesaugt wird die Luft an der Rückseite des Gebäudes zum Schulhof hin in maximaler Entfernung zur Straße. Die Räume im zweiten Gebäudeteil, der sich von der Bundesstraße 14 aus gesehen hinter dem ersten befindet, können je nach Bedarf durch Öffnen der Fenster belüftet werden.

Extremmessungen für den ungünstigsten Fall erfolgten während der Sommermonate, in denen die Fenster häufig geöffnet werden und Luftschadstoffe ungehindert von außen ins Gebäude gelangen können. Während der Wintermonate sind zwar höhere Luftschadstoffkonzentrationen in der Außenluft zu erwarten, doch insbesondere bei niedrigen Außentemperaturen wird seltener durch Öffnen der Fenster gelüftet.

Nach der Analyse der im Sommer- und Winterzeitraum im Jahre 2017 erhobenen Daten konnte eine Auswirkung der nahegelegenen Bundesstraße B 14 auf die Schadstoffwerte im Schulgebäude festgestellt werden. Dabei blieb die festgestellte Schadstoffbelastung innerhalb der Schule jedoch konstant unterhalb der als gesundheitsschädlich angesehenen Grenzwerte (beim Vergleich der mithilfe von Passivsammlern gewonnenen Jahreswerte).

Außerdem konnte eine Abhängigkeit der Schadstoffkonzentrationen von der Höhe nachgewiesen werden. In den meisten Fällen gilt: Je höher der Klassenraum liegt, desto niedriger ist dort die Belastung durch verbrennungsbedingte Schadstoffe (Ruß, NO₂, NO, UFP). Bei der kontinuierlichen Überwachung der NO₂- und NO_x-Konzentrationen im Belüftungssystem wurde ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den NO₂-Konzentrationen am Fahrbahnrand und im Lufterlassrohr festgestellt, da die Spitzenwerte zu denselben Zeiten auftraten. Ein ähnliches Muster konnte auch während der Nachtmessungen nachgewiesen werden, bei denen die Hauptverkehrszeiten einen Einfluss auf die verbrennungsbedingten Schadstoffwerte innerhalb und außerhalb des Schulgebäudes besaßen. Zudem konnten höhere NO₂-Konzentrationen in der Abluft des Belüftungssystems gemessen werden als in der Zuluft, was auf eine unzureichende Abdichtung der Fenster zur Hauptstraße hin hindeutet.

Die Kurve der Luftschadstoffkonzentrationen im Tagesverlauf zeigt einen deutlichen Einfluss des Verkehrs auf die Luftbelastung, die während der Hauptverkehrszeiten am höchsten ist und bei niedrigem Verkehrsaufkommen in der Nacht sinkt. Dies konnte bei der Analyse des Belüftungssystems festgestellt werden. Die gemessenen NO₂-Konzentrationen blieben jedoch immer unterhalb der gültigen Stunden- und Jahresgrenzwerte.

Es wurden folgende Maßnahmen zur weiteren Verbesserung der Luftqualität im Schulgebäude empfohlen:

- Eine kurzfristig umsetzbare Maßnahme stellt eine Einstellung des Lüftungssystems dar. Durch eine Drosselung des Absaugstroms und eine Erhöhung der Luftzufuhr entsteht in den Räumen ein leichter Überdruck. Somit kann eine Ansaugung von Abgasen über undichte Fenster umgehend vermieden werden.
- Es wurde empfohlen, die Isolierung der Klassenräume im Altbau entlang der Hauptverkehrsstraße zu verbessern, indem beispielsweise die Dichtungen der Fenster erneuert werden.
- Es wurde dringend empfohlen, die Fenster in den Klassenräumen entlang der Bundesstraße B 14 stets geschlossen zu halten.
- Weitere nützliche Maßnahmen bestehen in einer Optimierung des Belüftungssystems:
 - Einsetzen eines besseren Filters, der evtl. neben Feinstaub auch Stickstoffoxide abscheiden kann.
 - Geeignete Position des Lufteinlasses. Eine Verlagerung des Lufteinlasses bodennah in größere Höhen, z. B. auf Dachniveau, sollte geprüft werden.
 - Veränderte Betriebsbedingungen: Ein Betrieb der Belüftung während den Hauptverkehrszeiten sollte vermieden werden. Die Belüftung sollte auf nächtliche Stunden bzw. Stunden während des Tages verschoben werden, an denen, aufgrund geringerer Emissionen und guter Austauschbedingungen in der Atmosphäre, üblicherweise niedrigere Konzentrationen in der Außenluft herrschen.

Das zuständige Schulverwaltungsamt hat die Ergebnisse der Untersuchungen zum Anlass genommen, die formulierten Empfehlungen bestmöglich umzusetzen und auf eine weitere Verbesserung der Luftqualität in den Schulräumen hinzuwirken. U. a. sollen Gummidichtungen in den Fenstern erneuert werden. Die Fa. RWG wurde beauftragt Vorschläge zu erarbeiten, wie die bestehende Lüftungsanlage ertüchtigt werden kann, so dass die erhoffte Verbesserung der Luftqualität, aufgrund der Ertüchtigung der Lüftungsanlage erreicht wird. Die Anlage soll künftig mit leichtem Überdruck gefahren werden, so dass mehr Luft ins Schulgebäude transportiert wird, als wieder abgesaugt wird. Somit soll verhindert werden, dass über Undichtigkeiten in der Gebäudehülle (z.B. undichte Fenster) verunreinigte Luft vom Straßenraum der B 14 direkt ins Gebäude gelangt. Zudem soll die Lüftungsanlage mit einem Staubfilter der Güteklasse F9 eingebaut werden. In der bestehenden Anlage wird ein Filter der Klasse F7 verwendet.

1.2 Optimierungsmaßnahmen nach Abschluss der Luftmessungen in der Marienschule Grundschule Stuttgart Süd

Im Bereich der Hauptstätter Straße wurden die Fensterdichtungen komplett erneuert. Zusätzlich wurden die Dichtungen der großen „ehemaligen“ Eingangstüre zum Gebäude ausgetauscht, sodass die gesamte Straßenseite nahezu luftdicht verschlossen wurde. Weiterhin wurde die vorhandene Belüftungsanlage optimiert. Der Einbau von zwei neuen Filterstufen inklusive neuer Motorentechnik sollte ebenso zur zusätzlichen Verbesserung der Luftqualität beitragen, wie die Optimierung der Betriebszeiten sowie der Regelungstechnik. Durch Schaffung eines leichten Zuluftüberdruckes wird sichergestellt, dass keine zusätzliche Außenluft ins Gebäude gesaugt wird, welche nicht die Lüftungsanlage mit ihren

verschiedenen Filterstufen durchläuft. Uns wurde mitgeteilt, dass dies durch sogenannte Rauchproben in jedem Klassenzimmer erprobt und bestätigt wurde.

1.3 Aufgabenstellung

Um die Auswirkung der getroffenen Maßnahmen auf die Innenluftqualität quantitativ zu untersuchen, werden weitere Kontrollmessungen stattfinden.

Es werden NO₂-Passivsammler der Firma Passam zum Einsatz kommen, die der Auftragnehmer schon mehrfach erfolgreich eingesetzt hat. Ein Expositionszeitraum von jeweils zwei Wochen wird vorgeschlagen, entsprechend der Expositionszeit während der Messungen im Jahre 2017. Um eine genügend große Datenbasis zu erhalten und um Vergleiche mit den Messungen aus dem Jahre 2017 durchführen zu können wird zudem vorgeschlagen zwei Messperioden herauszugreifen. Eine winterliche Messperiode von zwei Monaten Dauer von Mitte November bis Ende Januar. Die Weihnachtsferien seien aufgrund einer geänderten Emissionsstruktur und aufgrund des fehlenden Schulbetriebs ausgenommen. Die zweite, sommerliche Messperiode, welche bei sommerlicher Ozonchemie im Gegensatz zur unterdrückten Ozonchemie während der winterlichen Messperiode, soll in den Monaten Mai und Juni stattfinden.

Analog dem Vorgehen bei den Messungen im Jahre 2017 soll eine Abschätzung der Jahreswerte, aus den Messungen die über den genannten Zeitraum von zweimal zwei Monaten durchgeführt werden, erfolgen. Die Passivsammler sollen sowohl im Außenbereich des Schulgebäudes als auch in verschiedenen Räumen des Gebäudes durchgeführt werden.

Die Messpunkte wurden möglichst analog den Messpunkten der Messungen, die im Jahre 2017 durchgeführt wurden, ausgewählt. Dies führt zu einer besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse beider Untersuchungen. Einerseits wurden Messpunkte im Außenbereich gewählt, andererseits im Gebäude. Da eine Verminderung der NO₂-Konzentrationen hauptsächlich im älteren Gebäudeteil erwartet wird, da nur dieser Teil zwangsbelüftet wird, konzentrieren sich die Messaktivitäten auf diesen Gebäudeteil. Allerdings werden drei Messpunkte für den neuen Gebäudeteil vorgeschlagen, aus Gründen der Vergleichbarkeit der gewonnenen Ergebnisse beider Untersuchungen.

Für den Außenbereich wurden zusätzlich zu den beiden Messpunkten an der B 14, ein Messpunkt auf dem vorderen Schulhof und einer auf dem hinteren Schulhof, weitere Messpunkte werden sowohl an der straßenabgewandten als auch an der straßenzugewandten Fassade des alten Gebäudeteils in verschiedenen Höhen vorgeschlagen. Ein Ergebnis der Untersuchungen im Jahre 2017 war, dass die Luftverunreinigungskonzentrationen im Gebäude für einige Komponenten mit der Stockwerkhöhe abnahmen. Dies wird auch sehr stark für die Außenluftkonzentrationen vermutet. Allerdings wurde dies nicht durch konkrete Messungen an der Fassade belegt. Dies soll in dieser zweiten Untersuchung nachgeholt werden. Bestätigt sich diese Vermutung, so könnte auch eine Verlegung der Ansaugung der Zwangsbelüftung in eine größere Höhe in Erwägung gezogen werden.

2 Methoden

2.1 Grundkenntnisse über Stickstoffdioxid (NO₂)

NO₂, Stickstoffdioxid, ist ein Gas, welches in der Atmosphäre vorkommt. In hohen Konzentrationen ist es ein braun-rotes Gas mit einem spezifischen Geruch. Die Konzentrationen an NO₂ in der Außenluft sind normalerweise nicht hoch genug, um eine Verfärbung zu erkennen, aber sein Geruch kann in Straßen mit viel Verkehr nachgewiesen werden [2]. Die Hauptquelle von NO₂ stellt die Verbrennung von Kraftstoff in Kraftfahrzeugen dar. Bei der Hochtemperaturreaktion von Kraftstoffen mit N₂ aus der Verbrennungsluft wird N₂ zu NO_x (NO + NO₂) oxidiert. Bei diesem Verbrennungsvorgang wird Stickstoffmonoxid NO (ca. 90 %) und NO₂ (ca. 10 %) freigesetzt. NO wandelt sich in der Atmosphäre [3] durch die Reaktion mit O₃ zu NO₂ um:



Diese Reaktion ist eine schnelle und quantitative Reaktion. D. h. früher oder später, abhängig hauptsächlich vom Vorhandensein von O₃, wird das gesamte NO in NO₂ umgewandelt.

NO₂ hat schädigende Auswirkungen auf die Gesundheit und die Umwelt. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) hat Maximalwerte empfohlen, welche nicht überschritten werden sollen. Werden diese Werte überschritten, können sich Herz-Kreislaufkrankheiten oder Reizungen der Lunge und Schleimhäute entwickeln. Die Empfehlungen der WHO (40 µg/m³ für die jährliche Konzentrationen und 200 µg/m³ für den Stundenmittelwert) wurden ab 2010 von der EU als gesetzlicher Grenzwert übernommen [4] und in der 35. BImSchV in deutsches Recht übertragen [5].

In Deutschland waren 2018 die Mittelwerte an NO₂ folgende [6]:

- 38 µg/m³ in verkehrsnaher Umgebung
- 20 µg/m³ in städtischen/vorstädtischen Gebieten
- 9 µg/m³ in ländlichen Gegenden

Diese Werte zeigen auch, welchen Einfluss der Verkehr auf die NO₂-Konzentrationen hat. Die Werte, welche an verkehrsnahen Standorten gemessen werden, sind sehr nahe am Grenzwert von 40 µg/m³, allerdings sind sie seit 2003, wo sie noch bei 55 µg/m³ lagen, konstant rückläufig. Nicht nur die gemessenen Mittelwerte sind rückläufig, sondern auch die Anzahl der Messstationen, welche die Grenzwerte überschreiten. Aufgrund der Gefährlichkeit hoher NO₂-Konzentrationen ist es nötig, die Konzentrationen an möglichst vielen Orten gleichzeitig zu messen, um die räumliche Verteilung des NO₂ zu ermitteln. Kontinuierlich arbeitende Messstationen sind teuer und aufwändig zu betreiben. Kostengünstige Passivsammler stellen eine brauchbare Alternative dar und kamen in dieser Untersuchung zum Einsatz.

2.2 Passivsammler

Diskontinuierliche Messungen mithilfe von Passivsammlern eignen sich zur Bestimmung eines Mittelwerts über einen längeren Zeitraum von ein bis vier Wochen. So lassen sich Langzeitwerte der jeweiligen Luftverunreinigungen auf kostengünstige Weise ermitteln, ohne dass Elektrizität etwa für eine Pumpe benötigt wird, bzw. teure Messgeräte nebst einem Messcontainer notwendig sind [7].

Die punktuellen Messungen im Rahmen dieses Projekts waren auf NO₂ ausgerichtet. Die Technik beruht auf der passiven Diffusion von NO₂-Molekülen durch ein Röhrchen, dessen Durchmesser und Länge bekannt sind. Die Luftschadstoffe werden von einem Metallnetz absorbiert, das zuvor mit Triethanolamin behandelt wurde [8-13]. Die Passivsammler werden mit einer Abdeckung geschützt (siehe Abbildung 1).



Abb. 1: Links: NO₂-Passivsammlerröhrchen. Rechts: Abdeckung

Abbildung 1 zeigt die auch an der Marienschule verwendeten Röhrchen zur Messung von NO₂. An einem Ende der Röhrchen befindet sich zum Schutz vor Windeinfluss eine grüne Membran aus porösem Glasmaterial, welche bei Messungen im Freien verwendet werden sollen. Tabelle 1 listet einige Eigenschaften dieser Passivsammler auf.

Tabelle 1: Eigenschaften der Passivsammler für NO₂ [14] [15]

Bezeichnung	Langzeit-Passivsammler für NO ₂
Typ	Röhrchen
Sammelrate (ml/min)	0,7432 (mit Membran); 0,8536 ml/min (ohne Membran)
Expositionszeit (Wochen)	1 – 4
Messbereich (µg/m³)	1 –150
Nachweisgrenze (µg/m³)	1,5
Erweiterte Messunsicherheit	18,4% im Bereich von 20 - 40 µg/m ³
Lagerzeit (Monate)	6

Die Proben aus den Passivsammlern werden im Labor gemäß der VDI-Richtlinie 2453 Blatt 1 analysiert [16]. Dazu werden die NO₂-Moleküle, die im Passivsammler mit Hilfe des Triethanolamins adsorbiert wurden, mit der sogenannten Saltzman-Reagenz in die flüssige Phase überführt. Die ursprünglich transparente Saltzman-Reagenz verfärbt sich violett, je nach NO₂-Gehalt im Triethanolamin, mehr oder weniger stark. Anschließend wird die Lösung mit einem Spektralphotometer bei 550 nm analysiert [16].

Die Massenkonzentration kann nun auf Grundlage des Absorptionsmaßes der jeweiligen Probe ausgerechnet werden. Die Bewegung der Moleküle im Röhrchen bis zur Adsorption am Trietanolamin folgt dem Fick'schen Gesetz. Nach dem Integrieren und Umstellen kann Gleichung 2 zur Berechnung der Schadstoffkonzentration verwendet werden [16].

$$C \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right) = \frac{Q}{SR \cdot t} \quad \text{Gleichung 2}$$

C: Konzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Q: absorbierte Menge in μg

t: Expositionsdauer in s
SR: Sammelrate in ml/min

Die Sammelrate berücksichtigt den Diffusionskoeffizienten, der abhängig ist von der Temperatur sowie dem Durchmesser und der Länge des Röhrchens. Dieser Parameter ist für jeden Passivsammlertyp gleichbleibend und stellt somit eine Konstante dar, die der Literatur entnommen werden kann.

2.3 Schätzung der Jahresmittelwerte

Die Jahresmittelwerte für NO_2 können für jeden Standort durch Berücksichtigung der Sommer- und Winterwerte sowie der an den Referenzstationen in Baden-Württemberg gemessenen Werte (siehe dazu Gleichung 3) hochgerechnet werden.

$$\frac{\text{Jahresmittelwert am Standort X 2019}}{\text{Mittelw. am Standort X während der Messperiode}} = \frac{\text{Jahresmittelwert an der Referenzmessstation 2019}}{\text{mittelw. an der Ref. Messstation während der Messperiode}} \quad \text{Gleichung 3}$$

Der arithmetische Mittelwert der gemessenen luftverunreinigenden Komponente an Standort X (jeder beliebige Standort) während des Messzeitraums entspricht dem an dem jeweiligen Standort gemessenen Mittelwert aus Sommer- und Wintermesszeitraum (von 13.05. bis 22.07.2019 und von 14.10. bis 16.12.2019).

Zu Vergleichszwecken wurden die folgenden fünf LUBW-Stationen, analog dem Vorgehen in 2017, ausgewählt [1]:

- Stuttgart Am Neckartor
- Stuttgart Arnulf-Klett-Platz
- Stuttgart Hohenheimer Straße
- Freiburg
- Heilbronn

3 Messstrategie

3.1 Messgebiet

Begrenzt wird das Schulgelände im Nordwesten durch die Hauptstätter Straße und das Montessori-Kinderhaus, im Nordosten durch die Römerstraße, im Südwesten durch die Rückseite der Gebäude der Heusteigstraße und im Südwesten durch die Rückseite der Gebäude der Kolbstraße. Das gesamte Gebiet umfasst etwa 4.400 m². Abbildung 2 zeigt das Gebiet der Schule, innerhalb dessen die Messungen durchgeführt wurden.

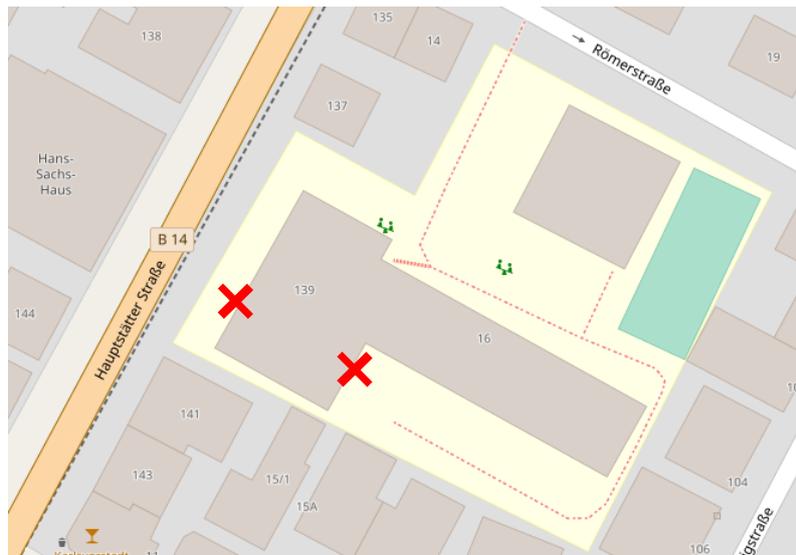


Abb. 2: Messgebiet an der Marienschule; *Quelle: OpenStreetMaps*. In rot markiert: Orte an denen Vertikalprofile an der Fassade aufgenommen wurden

Die Messungen wurden innerhalb des Hauptgebäudes sowie auf dem Schulhof (Vorder- und Rückseite) durchgeführt. Außerdem zwei Vertikalprofile an der Fassade des alten Gebäudeteils

3.2 Messstellen

Mithilfe von Passivsammlern wurden Messungen an 24 Stellen innerhalb und außerhalb der Schule durchgeführt. Die Messpunkte wurden möglichst analog den Messpunkten der Untersuchungen von 2017 ausgewählt. Dies führt zu einer besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse beider Untersuchungen. Einerseits wurden Messpunkte im Außenbereich gewählt, andererseits im Gebäude.

Für den Außenbereich wurde zusätzlich zu dem Messpunkt an der B14, einem Messpunkt auf dem vorderen Schulhof und einem auf dem hinteren Schulhof, ein Messpunkt je Stockwerk an der straßenzugewandten und an der straßenabgewandten Fassade des alten Gebäudeteils ausgewählt (siehe Abbildung 3). Aus Qualitätssicherungsgründen wurde ein Messpunkt an der IFK-Messstation am Marienplatz gewählt, wo der Vergleich mit einem kontinuierlich betriebenen NO_x-Messgerät vorgenommen werden konnte.

In Tabelle 2 sind die Standorte aller Passivsammler verzeichnet. Im Anhang A sind Fotos von jedem Messpunkt zu finden und im Anhang B die Karten in die die Messpunkte eingezeichnet sind.

Tabelle 2. Beschreibung der Messpunkte für die NO₂-Passivsammler im Außenbereich und innerhalb des Schulgebäudes

Innerhalb des Schulgebäudes	
Untergeschoss	Raum 002
Erdgeschoss	Speiseraum
	Foyer
	Klassenzimmer 015
Erste Stock	Lehrerzimmer 123
	Klassenzimmer 128
Zweite Stock	Klassenzimmer 234
	Klassenzimmer 236
	Klassenzimmer 240
Dritte Stock	Klassenzimmer 349
	Klassenzimmer 348
Außerhalb des Schulgebäudes	
Außenbereich	Vertikalprofil im hinteren Hof
	Vertikalprofil an der B14 (Nottreppe)
	Hinterer Hof
	Vorderer Hof
Qualitätssicherung	Marienplatz Messstation



Abb. 3. Vertikalprofile an der Fassade des alten Gebäudeteils. Links: straßenzugewandte Fassade. Rechts: straßenabgewandte Fassade

Messzeiträume

Die Messungen wurden nach Umbau der Lüftungsanlage und der Erneuerung der Dichtungen im April 2019 mit der Vorbereitungsphase begonnen.

Die Durchführung der diskontinuierlichen NO₂-Messungen mit Hilfe von Passivsammlern an 24 Messpunkten wurde in zwei Zeiträume aufgeteilt: der Sommermesszeitraum erstreckte sich vom 13.05.2019 bis 22.07.2019 und der Wintermesszeitraum vom 14.10.2017 bis 16.12.2019. Der Sommer- und der Winterzeitraum für die Passivsammlermessungen wurde jeweils in vier Abschnitte aufgeteilt (jeweils zwei Messwochen, Schulferien wurden ausgenommen)

4 Ergebnisse

4.1 Zeitliche Entwicklung

Um die Ergebnisse im Detail interpretieren zu können, wurden die Messstellen in vier Gruppen unterteilt: (I) Vertikalprofil an der vorderen, straßenzugewandten Fassade des alten Gebäudes, (II) Vertikalprofil an der hinteren, straßenabgewandten Fassade des alten Gebäudes, (III) Innerhalb der Schule und (IV) auf dem Schulhof.

(I) Vertikalprofil an der vorderen Fassade des alten Gebäudes

In Abbildung 4 sind die verschiedenen Höhen dargestellt, an denen an der straßenzugewandten Fassade Passivsammler platziert wurden.



Abb. 4. Straßenzugewandte Seite der Fassade der Marienschule

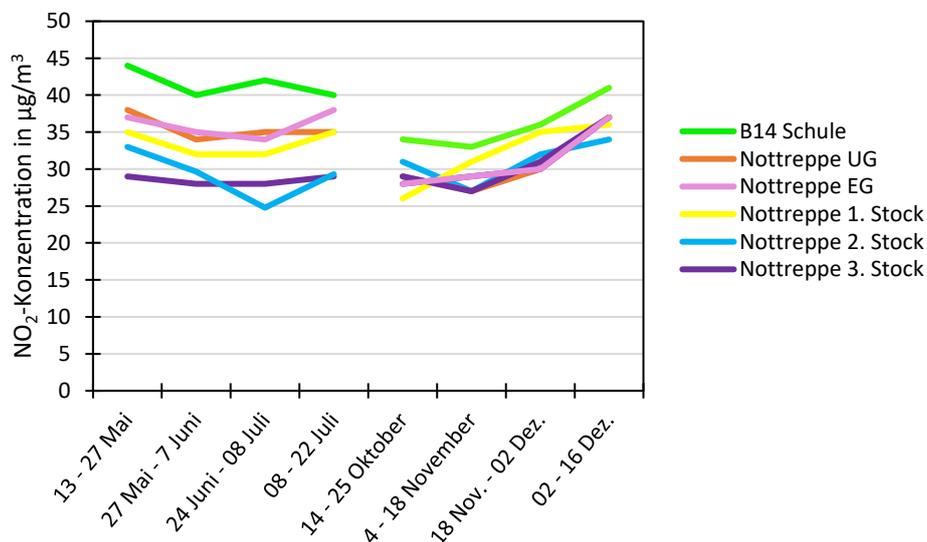


Abb. 5. Verlauf der Konzentrationen an der straßenzugewandten Fassade der Marienschule während des sommerlichen und winterlichen Messzeitraums im Jahre 2019

Wie in Abbildung 5 zu sehen ist, waren die NO₂-Konzentrationen über die Sommermonate im Messzeitraum fast konstant. Die höchsten Konzentrationen von 40 – 45 µg/m³ wurden an der Messstelle

gemessen, die sehr nahe an der B 14 und in geringer Höhe von ca. 1,5 m lag (B 14 Schule, grüne Linien). Die niedrigsten NO_2 -Konzentrationen ($28 - 29 \mu\text{g}/\text{m}^3$) wurden am 3. Stockwerk gemessen.

In den Herbst-/Wintermonaten stiegen die NO_2 -Konzentrationen im Verlauf des Messzeitraums von Werten zwischen $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Oktober bis auf Werte von $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Dezember an. Dies lässt sich über stabilere meteorologische Bedingungen und damit verbunden, mit ungünstigeren Ausbreitungsbedingungen erklären.

(II) Vertikalprofil an der hinteren Fassade des alten Gebäudes

Der Verlauf der NO_2 -Konzentrationen an der hinteren, straßenabgewandten Fassade des Schulgebäudes ist in Abbildung 6 zu sehen.

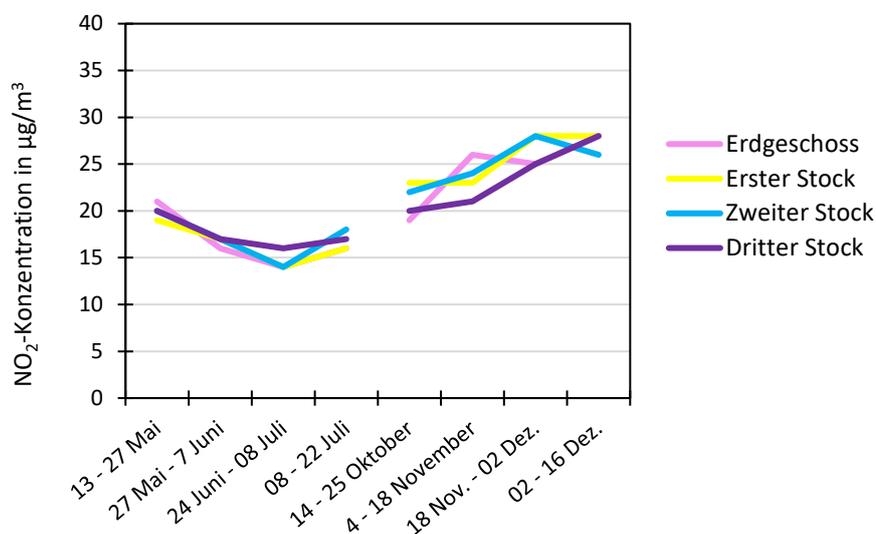


Abb. 6. Zeitlicher Verlauf der NO_2 -Konzentrationen auf der straßenabgewandten Fassade der Marienschule in unterschiedlichen Stockwerken während des sommerlichen und winterlichen Messzeitraums im Jahre 2019

Wie in der Grafik zu sehen ist, sanken die Konzentrationen von Mai bis Juni und stiegen danach von Juni bis November/Dezember wieder an. Diese zeitliche Entwicklung lässt sich erklären: in den Sommermonaten herrschen oftmals bessere Austauschbedingungen in der Atmosphäre mit mehr Konvektion und Bewegung. Die freigesetzten Luftverunreinigungen werden besser mit unbelasteten Luftmassen vermischt und schneller von der Quellregion, in diesem Fall der vielbefahrenen Bundesstraße B 14, abtransportiert und verdünnt. Die gemessenen Außenluftkonzentrationen sind deshalb im Sommer i.a. geringer als im Winter. Die Stabilität der Atmosphäre ist aber bei der Betrachtung von NO_2 in der Atmosphäre nicht der alleinige Faktor der die Konzentrationen bestimmt. Es spielt in diesem Fall auch noch die Ozonchemie eine Rolle, d. h. es ist entscheidend wie viel Ozon in der Atmosphäre für die Oxidation von NO zu NO_2 zur Verfügung steht. In den Sommermonaten ist aufgrund der stärkeren Sonneneinstrahlung das Ozonniveau höher und somit ist die Wahrscheinlichkeit, dass NO zu NO_2 in Quellnähe aufoxidiert wird höher und somit sind die dort gemessenen NO_2 -Konzentrationen höher. Diese beiden Effekte, die bessere Durchmischung und der schnellere Abtransport freigesetzter Emissionen im Sommer aufgrund der labileren Atmosphäre und die schnellere Reaktionsgeschwindigkeiten im

Sommer haben gegenläufigen Einfluss auf die herrschenden NO₂-Konzentrationen. Die NO₂-Konzentrationen stiegen entsprechend obiger Erklärung in der Winter-Periode wieder an. Auf der straßenabgewandten Seite der Schule lagen die NO₂-Konzentrationen unter 30 µg/m³ und damit deutlich niedriger als auf der straßenzugewandten Seite. Das Schulgebäude wirkt als Barriere für die Luftverunreinigungen und auf ihrem Weg von der Straße zur rückwärtigen Seite des Schulgebäudes werden sie durch Vermischung mit unbelasteten Luftmassen verdünnt und niedrigere Konzentrationen sind das Resultat.

(III) Innerhalb der Schule

Die gemessenen NO₂-Konzentrationen innerhalb der Schule sind Abbildung 7 zu sehen.

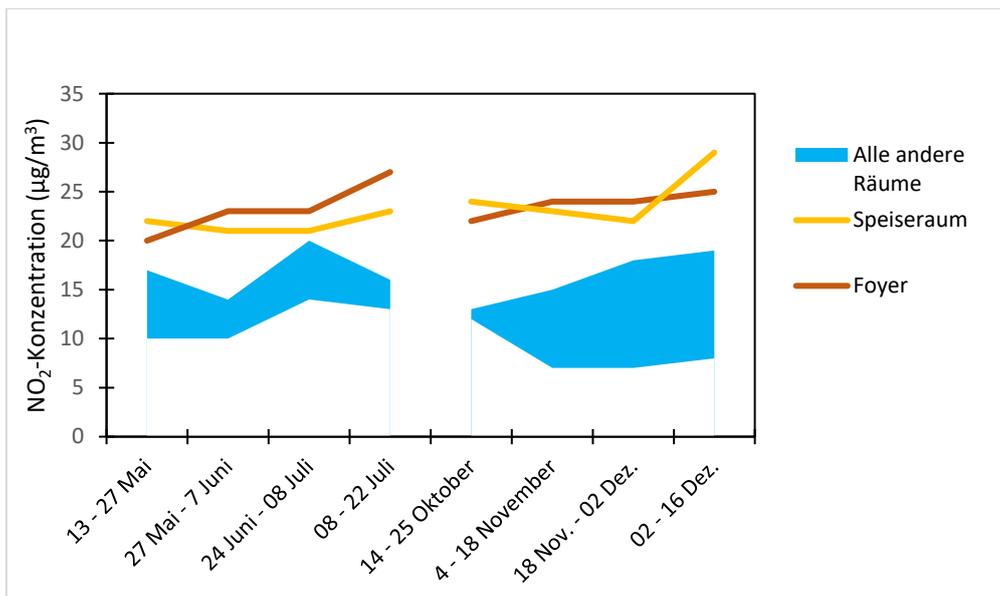


Abb. 7. Zeitlicher Verlauf der NO₂-Konzentrationen innerhalb der Schule während des sommerlichen und winterlichen Messzeitraums im Jahre 2019

Die NO₂-Konzentrationen in allen Klassenräumen wurden zusammengefasst und als blaue Bänder in Abbildung 7 dargestellt. Die Konzentrationen bewegten sich in beiden zwei Monatszeiträumen zwischen 5 und 20 µg/m³. Wesentlich höher lagen die NO₂-Konzentrationen im Speiseraum und im Foyer davor, mit Werten zwischen 20 und 30 µg/m³

Es ist ein leichter Anstieg der NO₂-Konzentrationen von Mai bis Juli und auch in der zweiten betrachteten Periode ist ein leichter Anstieg von Oktober bis Dezember zu beobachten.

(IV) Schulhof

Der zeitliche Verlauf der NO₂-Konzentrationen auf dem Schulhof ist in Abbildung 8 dargestellt.

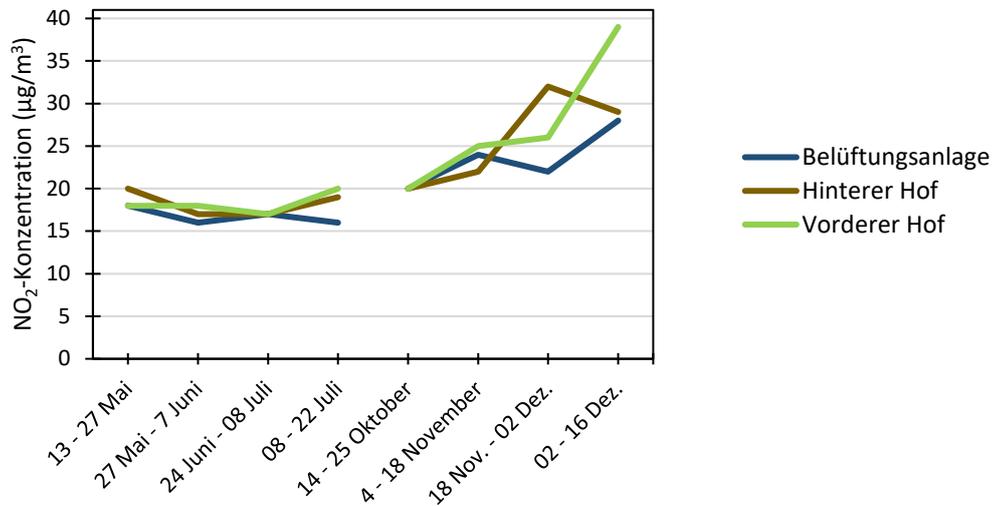


Abb. 8. Zeitlicher Verlauf der NO₂-Konzentrationen innerhalb der Schule während des sommerlichen und winterlichen Messzeitraums im Jahre 2019

In den Sommermonaten lagen die NO₂-Konzentrationen mit Werten zwischen 15 und 20 µg/m³ ohne große zeitliche Änderungen an allen drei betrachteten Messstellen auf den Schulhöfen auf relativ konstantem Niveau. In den Wintermonaten stiegen die NO₂-Konzentrationen an, von 20 µg/m³ im Oktober und erreichten im Dezember fast 40 µg/m³.

4.2 Interpretation der Vertikalprofile

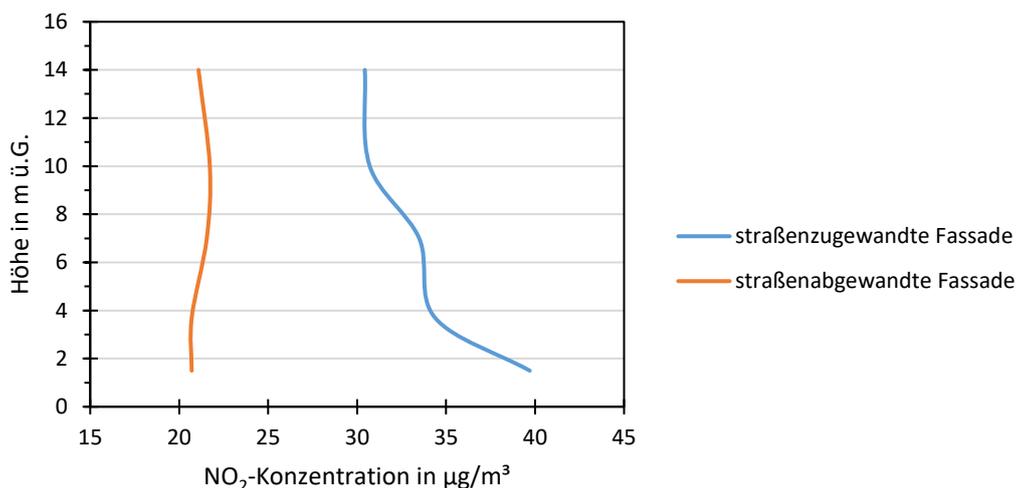


Abb. 9. Mittlere jährliche Vertikalprofile der NO₂-Konzentrationen an der Fassade des alten Gebäudeteils der Marienschule. Messzeitraum: Mitte Mai bis Mitte Juli und Mitte Oktober bis Mitte Dezember 2019 und Hochrechnung auf Jahresmittelwerte

Die NO₂-Vertikalprofile, welche in Abbildung 9 dargestellt sind, stellen eine Zusammenfassung der Messwerte der Abbildungen 5 und 6 dar. Dort wurden sie als Zeitreihen für die einzelnen Stockwerke

dargestellt, in Abbildung 9 als mittlere Vertikalprofile, welche die NO_2 -Konzentrationsänderung mit der Höhe darstellt. Die Werte wurden außerdem, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, einer Anpassung an Messwerte durchgeführt, welche an weiteren Messstationen in Baden-Württemberg erhoben wurden, so dass ein Vergleich mit den Jahresgrenzwerten möglich ist. Zwei Dinge sind sehr deutlich zu erkennen: Erstens sind die Konzentrationen in der Straßenschlucht, an der straßenzugewandten Fassade mit Konzentrationen zwischen 30 und 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sehr viel höher als an der straßenabgewandten Fassade im Schulhof, wo die Konzentrationen mit ca. 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sehr viel niedriger waren. Zweitens konnte nur an der straßenzugewandten Fassade ein Vertikalgradient beobachtet werden. Die Konzentrationen waren in geringen Höhen mit ca. 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ am höchsten und nahmen auf 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ am obersten Stockwerk in 10 bis 14 m ab. An der straßenabgewandten Fassade konnte kein Vertikalgradient beobachtet werden, die Konzentrationen änderten sich mit zunehmender Höhe nicht. Die Hauptquelle für NO_2 im untersuchten Messgebiet stellt eindeutig die stark befahrene Bundesstraße B 14 dar. In deren unmittelbarer Nähe sind die gemessenen Konzentrationen am höchsten. Das Schulgebäude stellt eine Barriere für die freigesetzten Luftverunreinigungen auf der Bundesstraße dar. Wenn sie die Barriere des Schulgebäudes überwunden haben, dann sind sie schon stark verdünnt und sie weisen bis zur Gebäudehöhe keinen Vertikalgradienten mehr auf.

4.3 Vergleich straßenzugewandte Fassade/Klassenräumen im alten Gebäudeteil und straßenabgewandte Fassade/ Klassenräume im neuen Gebäudeteil

Abbildung 10 vergleicht die NO_2 -Konzentrationen innerhalb und außerhalb der Schule für jedes Stockwerk separat. Die jährlichen NO_2 -Mittelwerte wurden dafür benutzt.

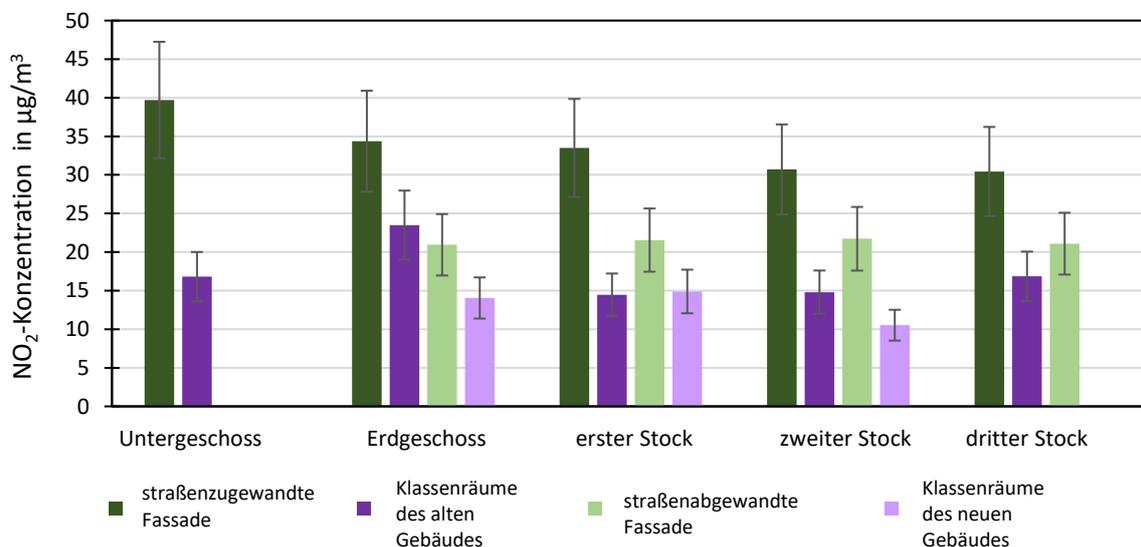


Abb. 10. Vergleich der Jahresmittelwerte der NO_2 -Konzentrationen vor dem Schulgebäude an der straßenzugewandten Fassade (dunkelgrün), der straßenabgewandten Fassade (hellgrün) im Schulhof, im alten Gebäudeteil (dunkelviolett) und im neuen Gebäudeteil (hellviolett)

Wie in Abbildung 10 zu sehen ist, sind die NO_2 -Konzentrationen außerhalb der Schule höher als innerhalb des Schulgebäudes. Eine Ausnahme bilden die Ergebnisse, welche im Erdgeschoss im alten Gebäudeteil der Marienschule gemessen wurden, sie liegen höher als die entsprechenden Werte, welche

im Schulhof an der straßenabgewandten Fassade gemessen wurden. Diese etwas erhöhten Werte im Schulgebäude werden von den Messwerten die im Speiseraum und im Foyer (EG) gemessen wurden, beeinflusst. Dort wurden, wie in Abbildung 7 dargestellt, die höchsten Konzentrationen im Gebäude festgestellt. Die niedrigsten Werte wurden im neuen Gebäudeteil ($<15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) gemessen. Der Vergleich der beiden Gebäudeteile lässt sich nur im Erdgeschoss, im 1. und im 2. Stock durchführen. Im Untergeschoss und im dritten Stock befinden sich im neuen Gebäudeteil keine Klassenräume, so dass dort auch keine Messungen durchgeführt wurden. Im Erdgeschoss und im zweiten Stock waren die Konzentrationsunterschiede zwischen den beiden Gebäudeteilen signifikant, im 1. Stock waren sie annähernd gleich groß. Die größte Konzentrationsdifferenz zwischen Innenraummessungen ($\sim 16 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und Außenluftmessungen ($\sim 40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) konnte im Untergeschoss festgestellt werden.

4.4 Jährliche Mittelwerte der Messungen im Jahre 2019 im Vergleich zu den Messungen die im Jahr 2017 stattfanden

Die berechneten Mittelwerte der Messungen des Jahres 2019 werden in Abbildung 11 dargestellt und den Messergebnissen aus dem Jahre 2017 gegenübergestellt. Die Fehlerindikatoren, welche im Diagramm ebenfalls enthalten sind, stellen die erweiterte Messunsicherheit der Passivsammler von 19% dar.

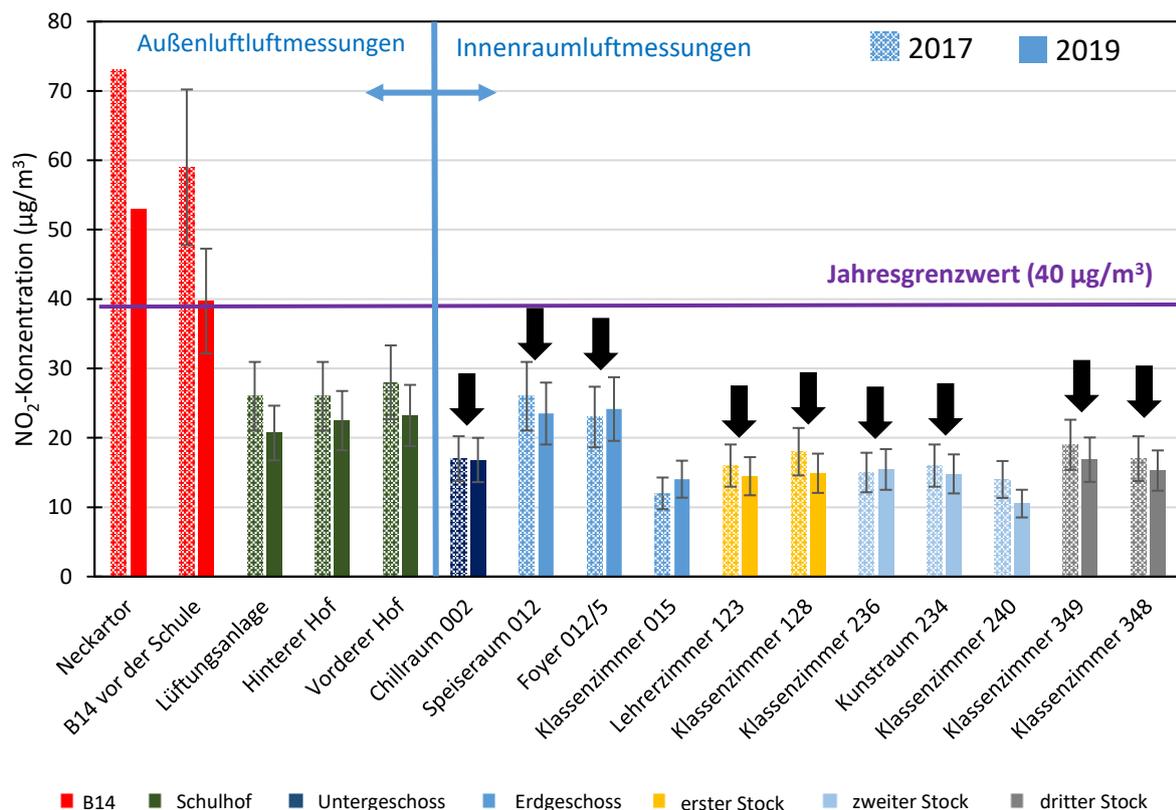


Abb. 11. Vergleich der NO_2 -Konzentrationen zwischen den Messungen im Jahre 2017 (gestrichelte Balken) und im Jahre 2019 (massive Balken). Mit schwarzen Pfeilen markiert: Räume im alten Schulgebäude mit Zwangsbelüftung

An den beiden linken Balkenpaaren, welche die Konzentrationen an der LUBW-Messstation „Am Neckartor“ und an der IFK-Messstation auf dem Gelände der Römerschule, in unmittelbarer Nähe zu den Fahrbahnen der Bundesstraße B 14 darstellen, ist zu erkennen, dass die NO₂-Konzentrationen im Jahre 2019 (massive Balken) sehr viel niedriger waren als im Jahre 2017 (gestrichelte Balken). Auch auf den Pausenhöfen konnten etwas niedrigere NO₂-Konzentrationen im Jahre 2019 im Vergleich zum Jahre 2017 gemessen werden. Dieser Rückgang der NO₂-Konzentrationen der seit dem Jahre 2005 insbesondere an den Stuttgarter Messstationen, aber auch an vielen anderen Messstationen in Deutschland, zu beobachten ist, scheint sich weiter fortzusetzen. Dies ist positiv zu bewerten, auch wenn die gemessene NO₂-Konzentration am Stuttgarter Neckartor immer noch über dem erlaubten Jahresgrenzwert von 40 µg/m³ liegt. Die Innenraummessungen geben in dieser Hinsicht kein so eindeutiges Bild ab, wie die Außenluftmessungen. In einigen Räumen lagen die Messergebnisse 2019 auch etwas niedriger als 2017, es gab aber ein paar Räume in denen die Konzentrationsdifferenzen anders waren oder exakt dieselben Konzentrationen in den beiden Jahren gemessen wurden. Ganz besonders bemerkenswert ist allerdings die Verteilung der Konzentrationen in den einzelnen Räumen des Schulgebäudes. Die Konzentrationen variierten in den beiden Vergleichsjahren exakt in der gleichen Weise. In beiden Jahren wurden die höchsten Konzentrationen im Speisesaal und im Foyer davor gemessen. Das Niveau lag so hoch wie auf den straßenabgewandten Pausenhöfen. Sehr viel niedriger, teilweise nur halb so hoch, lagen die Konzentrationen in allen anderen Räumen. In Stuttgart wurden im Laufe der Jahre verschiedene Maßnahmen zur Reduktion der Luftverunreinigungskonzentrationen ergriffen. U.a. Einrichtung der Umweltzone, LKW-Durchfahrtsverbot, Temporeduzierung teilweise von 60 auf 40 km/h, Verkehrsverflüssigungsmaßnahmen, etc. Zuletzt wurde ein Dieselfahrverbot für ältere Dieselnormen mit höheren Emissionen erlassen. All diese Maßnahmen scheinen ihre Wirkung zu entfalten. Der Trend der sinkenden NO₂- und auch Feinstaubkonzentrationen ist eindeutig und auch eindeutig auf die ergriffenen Maßnahmen zurückzuführen, wobei es zwischen den einzelnen Jahren zu Schwankungen der Konzentrationen kommen kann, welche hauptsächlich auf die herrschenden meteorologischen Bedingungen zurückzuführen sind. Die Emissionsminderung ist also von Schwankungen der meteorologischen Bedingungen überlagert.

5 Diskussion der Untersuchungsergebnisse

Die schwarzen Pfeile in Abbildung 11 markieren die Räume mit Belüftung im alten Gebäudeteil. Trotz der Ertüchtigung der Belüftungsanlage wurde keine Verringerung der NO₂-Konzentrationen im Inneren der Schulgebäude festgestellt. Es ist möglich, dass es Verbesserungen bei anderen Schadstoffen gibt (z.B. Feinstaub, da bessere Filter in die Belüftungsanlage eingebaut wurden). Das wurde aber nicht im Rahmen dieses Messprogramms untersucht. Es wurden ausschließlich die NO₂-Konzentrationen betrachtet. Nach Bekanntgabe der Messergebnisse der ersten Messungen im Jahre 2017 wurden noch weitere Maßnahmen ergriffen. Die Lüftungsanlage wurde dahingehend ertüchtigt, dass sie mit leichtem Überdruck betrieben wird. Dies wird realisiert, indem die Zuluftmenge über der abgesaugten Luftmenge liegt. Diese Maßnahme wurde gekoppelt mit dem Austausch der Dichtungen in den Fenstern der Räume, welche sich in Richtung zur Bundesstraße B 14 befinden. Ganz offensichtlich verfehlten die ergriffenen Maßnahmen ihre Wirkung. An der Höhe der NO₂-Konzentrationen und deren Verteilung in den Schulgebäuden hat sich im Jahre 2019 im Vergleich zum Jahre 2017 nichts geändert.

Im Abschlussbericht der Messungen des Jahres 2017 wurde eine weitere mögliche Maßnahme zur Verbesserung der NO₂-Situation im Schulgebäude diskutiert. Es wurde in Erwägung gezogen, die Ansaugung der Belüftungsanlage, welche sich momentan in einer Höhe von ca. 2 m vom Erdboden befindet auf Dachniveau zu verlegen, da dort evtl. die Konzentrationen geringer sind. Diese These wurde mit den Messungen des Jahres 2019 widerlegt. Die Vertikalprofilmessungen, die in Abbildung 9 dargestellt sind, haben eindeutig ergeben, dass die NO₂-Konzentrationen auf dem Pausenhof keinen vertikalen Gradienten aufweisen. D. h. die Konzentrationen auf Dachniveau weisen vergleichbare Werte auf wie sie in geringen Höhen im Pausenhof gemessen wurden. Eine Verlegung der Ansaugung in größere Höhen würde nicht zur gewünschten Verringerung der NO₂-Konzentrationen im älteren Gebäudeteil führen und sollte als Maßnahme verworfen werden.

Sollte eine Absenkung der NO₂-Konzentrationen in den Räumen der Marienschule gewünscht werden, dann sollte über den Einbau von Aktivkohlefilter in das Belüftungssystem nachgedacht werden. Stickstoffdioxid adsorbiert an Aktivkohle und kann daher abgeschieden werden, bevor die Luft in die Klassenräume eingebracht wird. Da nur der ältere Gebäudeteil, der der Bundesstraße B 14 zugewandt ist, eine Belüftungsanlage besitzt, hätte diese Maßnahme auch nur Auswirkungen auf die dortigen Räume. Allerdings ist Abbildung 11 auch zu entnehmen, dass die Räume mit Belüftung höhere NO₂-Konzentrationen aufweisen, die Räume im neueren Gebäudeteil weisen geringere NO₂-Konzentrationen auf, sowohl bei den Messungen im Jahre 2017 als auch im Jahre 2019. Es muss aber auch erwähnt werden, dass in keinem der Räume der Jahresgrenzwert von 40 µg/m³ überschritten wird.

6 Zusammenfassung

Aufgrund von Protesten von Eltern, welche sich gegen eine Zusammenlegung der beiden Schulen Heusteigschule und Römerschule im Gebäude der Römerschule zur Grundschule Süd – Marienschule ausgesprochen hatten, wurden im Jahre 2017 umfangreiche Luftverunreinigungsmessungen durch das Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik der Universität Stuttgart (IFK) im Gebäude der Marienschule und in der näheren Umgebung durchgeführt. Die Messungen ergaben höhere Werte im älteren Gebäudeteil, der der viel befahrenen Bundesstraße B 14 zugewandt ist und mit einer Belüftungsanlage ausgerüstet ist im Vergleich zum neueren Gebäudeteil, der von der Bundesstraße aus gesehen hinter dem älteren Gebäudeteil in größerer Entfernung zur Bundesstraße B 14 steht und über das Öffnen der Fenster belüftet wird.

Aufgrund der Messergebnisse und den Empfehlungen des IFK, wurden verschiedene Maßnahmen vorgeschlagen und vom zuständigen Schulverwaltungsamt teilweise umgesetzt, um die Luftqualität in den Gebäuden noch weiter zu verbessern.

Im Jahre 2019 wurden die NO₂-Messungen mit Hilfe von Passivsammlern, entsprechend den Messungen im Jahre 2017, an 24 Messpunkten in den Gebäuden und im Umfeld der Schule wiederholt. Die Messungen ergaben stark gesunkene NO₂-Konzentrationen in der Außenluft der Straßenschlucht vor dem älteren Gebäudeteil an der Bundesstraße B14. Auch an der straßenabgewandten Fassade des älteren Gebäudeteils, wo sich auch die Pausenhöfen befinden, wurden im Jahre 2019 etwas geringere NO₂-Konzentrationen gemessen als zwei Jahre zuvor. Allerdings ergaben die Messungen im Jahre 2019 in den Räumen der beiden Gebäudeteile keinerlei Änderungen im Vergleich zu den Messungen in 2017. Selbst die Verteilung der NO₂-Konzentrationen im Inneren der Gebäude war fast identisch zu den Messungen zwei Jahre zuvor. In 2017 wurden erhöhte Konzentrationen im Speiseraum und im davor liegenden Foyer ermittelt. Damals wurde vermutet, dass leichter Unterdruck im Gebäude erhöhte Konzentrationen verursacht und über Undichtigkeiten in der Gebäudehülle und über undichte Fenster Luftverunreinigungen in diese Räume gelangen können und erhöhte NO₂-Konzentrationen verursachen können. Allerdings hätten dann die neuerlich durchgeführten Messungen zu niedrigeren NO₂-Konzentrationen führen müssen. Da dies nicht der Fall ist, war entweder die aufgestellte These falsch, oder die Regelung der Luftzu- und -abfuhr sorgt immer noch nicht in jedem Lastzustand der Lüftung für einen leichten Überdruck im Gebäude.

Des Weiteren wurde aufgrund der Messergebnisse von 2017 vorgeschlagen, dass u. U. die Luftansaugung der Lüftungsanlage für den älteren Gebäudeteil von ca. 2 m Höhe auf Dachniveau angehoben werden sollte, da vermutet wurde, dass dort niedrigere NO₂-Konzentrationen herrschen. Vertikalprofilmessungen, welche in 2019 durchgeführt wurden, haben nun bewiesen, dass an der straßenabgewandten Fassade des älteren Gebäudeteils, wo sich die Luftansaugung für die Lüftungsanlage befindet, keinerlei Vertikalgradienten der NO₂-Konzentrationen vorhanden sind. Eine Verlegung der Luftansaugung würde zu keiner Verbesserung der Situation führen, sie sollte somit nicht weiter verfolgt werden.

Sollte weiterhin eine Verbesserung der Luftqualität in den Räumen des älteren Gebäudeteils in Bezug auf NO₂ angestrebt werden, dann erscheint die einzige wirksame Maßnahme, der Einbau von Aktivkohlefiltern in die Lüftungsanlage darzustellen.

7 Literatur

- [1] U. Vogt, M. Chacón Mateos, N. Rincón Soto: Bewertung der Innen- und Außenluftqualität an der Grundschule Süd (Gebäude Römerschule) mittels Passivsammlermessungen und mobilen Messungen. Abschlussbericht. Universität Stuttgart, Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik im Auftrag der Landeshauptstadt Stuttgart, Schulverwaltungsamt. 06.07.2018
- [2] PubChem. Nitrogen dioxide <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/3032552> (accessed Jan 7, 2020).
- [3] Nitrogen Oxides: Your Environment, Your Health | National Library of Medicine <https://tox-town.nlm.nih.gov/chemicals-and-contaminants/nitrogen-oxides> (accessed Jan 30, 2020).
- [4] Richtlinie 2008 50 EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa. Abl EU, 2008, Nr. L152, S. 1- 44
- [5] Bundesregierung (2010): Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen - 39. BImSchV). 39. BImSchV (39. BImSchV).
- [6] Wilke, S. Stickstoffdioxid-Belastung <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/stickstoffdioxidbelastung> (accessed Jan 7, 2020).
- [7] Baumbach, G. (1996): Air Quality Control. Kapitel 7. Springer editions, Deutschland.
- [8] Passam ag (2007): Assessment of air quality. Passam ag, Männedorf
- [9] EN 13528-1:2002: Passivsammler zur Bestimmung der Konzentrationen von Gasen und Dämpfen - Anforderungen und Prüfverfahren Teil 1: Allgemeine Anforderungen
- [10] EN 13528-2:2002: Passivsammler zur Bestimmung der Konzentrationen von Gasen und Dämpfen - Anforderungen und Prüfverfahren Teil 2: Spezifische Anforderungen und Prüfverfahren
- [11] EN 13528-3:2002: Passivsammler zur Bestimmung der Konzentrationen von Gasen und Dämpfen - Anforderungen und Prüfverfahren Teil 3: Anleitung zur Auswahl, Anwendung und Handhabung
- [12] DIN EN 16339:2013-11, Außenluft – Bestimmung der Konzentration von Stickstoffdioxid mittels Passivsammler
- [13] DIN EN 14412:2004-12: Innenraumluftqualität - Passivsammler zur Bestimmung der Konzentrationen von Gasen und Dämpfen - Anleitung zur Auswahl, Anwendung und Handhabung; Deutsche Fassung EN 14412:2004
- [14] Passam ag (2007): Working range for passive samples. Passam ag, Männedorf

[15] Passam ag (2004): Sampling rate of NO₂ sampler. Passam ag, Männedorf

[16] VDI-Richtlinie 2453, Blatt 1 (1990): Messen gasförmiger Immissionen. Messen der Stickstoffdioxid-Konzentration. Manuelles photometrisches Basis-Verfahren (Saltzman). Beuth-Verlag

8 Anhang A

8.1 Fotos der Passivsammlerstandorte innerhalb des Gebäudes



Raum 002



Speisesaal



Foyer



Klassenraum 015



Klassenraum 128



Klassenraum 236



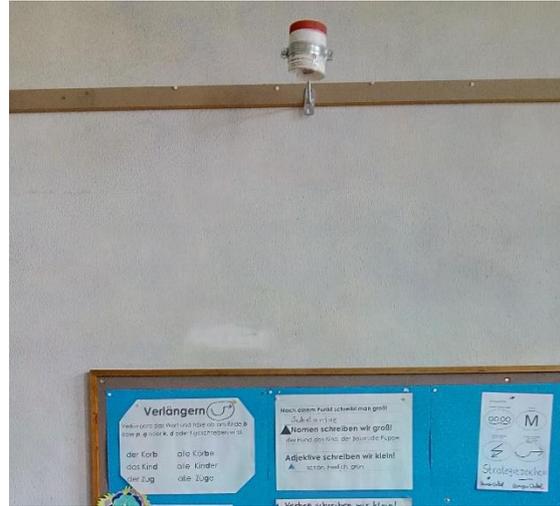
Klassenraum 234



Klassenraum 240



Klassenraum 349



Klassenraum 348

8.2 Fotos der Passivsammler außerhalb des Gebäudes



An der B14



Nottreppe UG



Nottreppe EG



Nottreppe 1. Stock



Nottreppe 2. Stock



Nottreppe 3. Stock



Hinterer Hof



Vorderer Hof



Lüftungsanlage



Hinterer Hof EG



Hinterer Hof 1. Stock



Hinterer Hof 2. Stock



Hinterer Hof 3. Stock



Messwagen

9 Anhang B – Passivsammlerstandorte in den verschiedenen Stockwerken und außerhalb der Gebäude der Marienschule

Passivsammler ●

