

Stickstoffdioxid im Innenraum: Aktueller Kenntnisstand

Indoor nitrogen dioxide: Current state of knowledge

ZUSAMMENFASSUNG

Befinden sich im Innenraum keine Quellen für Stickstoffdioxid (NO_2), stellt die Außenluft die Haupteintragsquelle für NO_2 in den Innenraum dar. In verschiedenen umfangreichen Feldstudien wurde gezeigt, dass die NO_2 -Konzentration im Innenraum statistisch gesehen etwa halb so groß ist, wie in der Außenluft. Die Korrelation zwischen der Konzentration im Innenraum und in der Außenluft hängt von Faktoren wie dem Eintrag von außen, der Emission durch Quellen im Innenraum und dem Abklingverhalten von NO_2 im Innenraum ab. Durch das Kochen und Backen mit Gasherden oder das Rauchen in der Wohnung können kurzzeitig hohe NO_2 -Belastungen entstehen, die in Abhängigkeit der Belüftung der Räume aber schnell wieder absinken. Im Gegensatz zur Außenluft können Bewohnerinnen und Bewohner selbst Einfluss auf die NO_2 -Konzentration im Innenraum nehmen, um die Belastungen mit NO_2 so gering wie möglich zu halten. Bei der Beurteilung der Belastungssituation für die Gesundheit der Menschen ist es wichtig, zwischen Langzeit- und Kurzzeitexpositionen zu unterscheiden.

ANJA DANIELS,
PHILIPP EICHLER,
WOLFRAM BIRMILI

ABSTRACT

In the absence of specific indoor sources of nitrogen dioxide, ambient air is the main source of NO_2 occurring indoors. Various field studies have shown that the indoor concentration of NO_2 is approximately half of the corresponding outdoor air concentration. The correlation between the concentrations indoors and outdoors depends on factors such as the infiltration from outside emissions from indoor sources and the decay behavior of NO_2 in the room. Cooking and baking with a gas stove or smoking in an apartment can cause high levels of NO_2 for short time periods which, however, decrease quickly depending on the ventilation of the rooms. In contrast to the ambient air residents can influence their indoor NO_2 concentrations themselves in order to keep NO_2 pollution as low as possible. When assessing health-related exposure, it is important to distinguish between long-term and short-term exposure.

EINLEITUNG

Unter Stickstoffoxiden fasst man gasförmige Verbindungen zusammen, die aus den Atomen Stickstoff (N) und Sauerstoff (O) aufgebaut sind. Bei der Betrachtung der gesundheitlichen Wirkungen von Stickstoffoxiden (NO_x) nimmt Stickstoffdioxid (NO_2) eine besondere Rolle ein (UBA 2019). NO_2 ist ein

Reizgas und wirkt als reaktive Verbindung (Oxidationsmittel) besonders an den unteren Atemwegen. Aus der Reizwirkung und dem damit verbundenen oxidativen Stress entstehen entzündliche Prozesse, die auch in anderen Organen schädigende Wirkungen entfalten können. NO_2 hat in der Luftreinhaltung, und damit für den Gesundheitsschutz der Bevölkerung, eine wichtige Indikatorfunk-



© Ponsulak Kunsub/
EyeEm, GettyImages.

tion für den Mix aus Luftschadstoffen, dem der Mensch in städtischen Gebieten ausgesetzt ist. Zuletzt ist NO_2 auch eine Vorläufersubstanz für die Bildung von sekundärem Feinstaub (PM) und Ozon (O_3) in bodennahen Luftschichten.

Stickstoffoxide entstehen hauptsächlich bei Verbrennungsprozessen in Anlagen und Motoren, das heißt vor allem durch Kfz-Verkehr, aber auch bei bestimmten Industrieprozessen und in der Landwirtschaft. Im Innenraum stellen der Gebrauch von Gasherden und das Rauchen von Tabak die bedeutendsten Emissionsquellen dar. Es wird daher oft gefragt, ob nicht das Kochen und Backen mit Gasherden oder das Heizen mit Gasthermen einen ähnli-

chen Einfluss auf die Raumluftbelastung haben wie Diesel-Pkw in der Außenluft.

Im vorliegenden Artikel werden die Ergebnisse ausgewählter Studien zusammengefasst, die das Vorkommen von NO_2 in Innenräumen, das Verhältnis der NO_2 -Konzentration zwischen der Innenraumluft und Außenluft, sowie die Abhängigkeit der NO_2 -Konzentration in der Raumluft vom Betrieb von gasbetriebenen Geräten untersucht haben.

QUELLEN FÜR NO₂ IM INNENRAUM

Die Luftqualität im Innenraum setzt sich immer aus Beiträgen aus der Außenluft und Beiträgen von Quellen aus dem Innenraum zusammen. Je nach Schadstoff und dem Vorhandensein von Quellen im Innenraum können sich die relativen Anteile stark unterscheiden. Bei NO₂ ist generell zu beobachten, dass es durch Lüftung in relevanten Mengen aus der Außenluft in den Innenraum gelangt.

Zu den wichtigsten Quellen für NO₂ im Innenraum gehören offene Flammen beziehungsweise Geräte und Anlagen, in denen Verbrennungsprozesse ablaufen. Technische Anlagen wie Heizungsboiler und Kaminöfen müssen so ausgelegt sein, dass Abgase nicht in den Innenraum gelangen, sondern über den Kamin nach außen abgeleitet werden. Bei korrekter Funktionsweise ist kein wesentlicher Beitrag für den Innenraum zu erwarten. Bei offenen Flammen, wie sie zum Beispiel beim Kerzenabbrand, bei Gasherden oder bei Ethanolöfen auftreten, tritt das NO₂-haltige Abgas jedoch direkt in die Raumluft ein.

Cyrus et al. (2000) beschreiben in ihrer umfassenden Feldstudie in über 400 deutschen Wohnungen in Erfurt und Hamburg folgende Einflussfaktoren als bedeutsam für die NO₂-Konzentration:

- das Kochen mit einem Gasherd,
- die Art der Belüftung des Haushalts,
- die Höhe der NO₂-Konzentration in der wohnungsnahen Außenluft,
- Tabakrauch.

Bei Cyrus et al. (2000) traten die höchsten Konzentrationswerte an NO₂ in Haushalten auf, in denen mit einem Gasherd gekocht wurde und/oder geraucht wurde.

Zahlreiche weitere Feldstudien, die teilweise bis in die 1970er Jahre zurückgehen, belegen die Effekte von Gasherden auf die NO₂-Konzentration im Innenraum. Nach Alberts et al. (1994) besteht in Haushalten mit Gasherd ein Überschuss von 15 bis 25 ppb (28 bis 47 µg/m³) zum jeweils üblichen Hin-

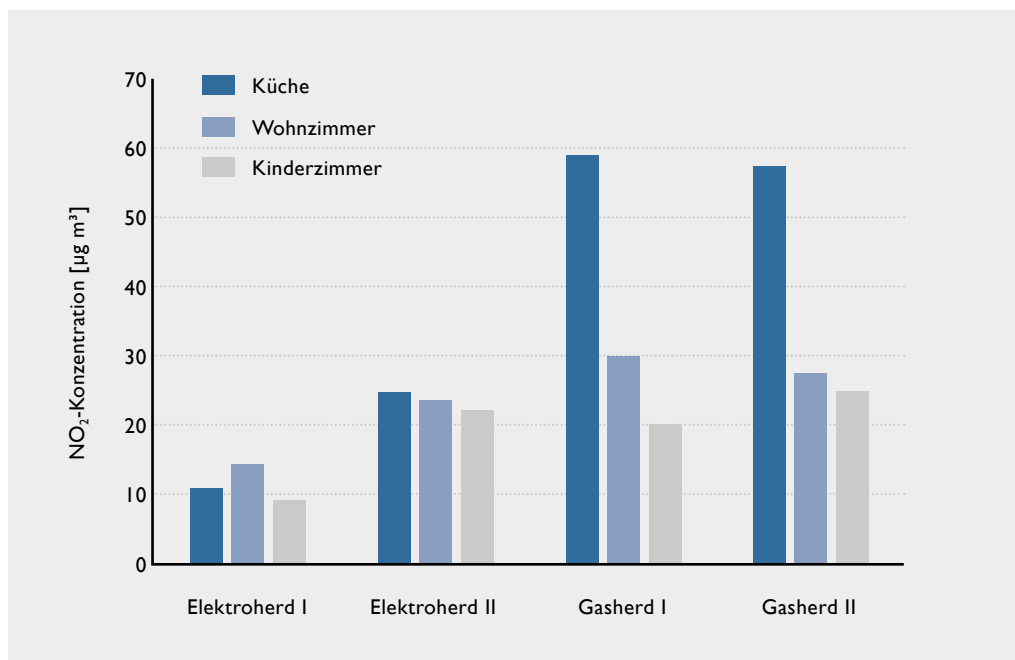
tergrundwert von NO₂. Dieser Hintergrundwert liegt bei entsprechenden Häusern ohne Gasherd zwischen 25 und 75 ppb (47 bis 141 µg/m³). In Haushalten mit Gasherd können die Spitzenwerte in der Küche 200 bis 1.000 ppb (376 bis 1.880 µg/m³) erreichen. Die Studie von Marbury et al. (1988) zeigt, dass die NO₂-Konzentrationen in Aktivitätsräumen, die an die Küche angrenzen, und im Kinderzimmer in Häusern mit Gasherden um das Fünffache höher waren als in Häusern, in denen mit einem Elektroherd gekocht wurde.

Auch Wade III et al. (1975) konnten zeigen, dass die NO₂-Werte in Innenräumen in direktem Zusammenhang mit der Verwendung des Gasherdes stehen. Die Ergebnisse der zeitaufgelösten Messungen zeigen rapide ansteigende NO₂-Konzentrationen in den Küchen der untersuchten Häuser, wenn der Gasherd in Gebrauch ist. NO₂ wurde von den Gasherden in den Häusern in ungefähr gleichen Mengen erzeugt. Die gemessenen Konzentrationen in den Innenräumen waren ausnahmslos höher als in der wohnungsnahen Außenluft. Der normale Betrieb des Gasherdes führte häufig zu NO₂-Konzentrationen in der Küche, die im Durchschnitt während einer zweiwöchigen Probenahmezeit über 100 µg/m³ lagen.

Auch Kaulbach und Hough (1991) konnten den Effekt von Gasherden auf die Innenraumkonzentration an NO₂ bestätigen (ABBILDUNG 1). Bei einer Feldstudie untersuchten sie die NO₂-Konzentration im Kinderzimmer von 581 Wohnungen. In einer Unterstichprobe von 87 Haushalten wurde neben dem Kinderzimmer auch das Wohnzimmer und die Küche beprobt. Hier war festzuhalten, dass die Küche am deutlichsten von der NO₂-Quelle beeinflusst wurde. Andere Räume der Wohnungen wie Wohn- und Kinderzimmer waren bereits weit weniger betroffen.

Beim normalerweise zeitlich begrenzten Betrieb eines Gasherdes entstehen im Raum hohe, kurzzeitige Spitzenbelastungen an NO₂. Lebrecht et al. (1987) bestimmten entsprechende Konzentrationswerte von bis zu 3.800 µg/m³ in der Küche. Doch bereits nach

ABBILDUNG I
NO₂-Konzentration in
Innenräumen, getrennt
nach Nutzungsart und
verwendetem Herdtyp.



Die Erhebung beruht auf insgesamt 87 Haushalten in 5 Städten der ehemaligen DDR (Kaulbach, Hogh 1991).

einer Stunde konnte ein Abfall der Konzentrationswerte beobachtet werden (TABELLE I). Zwar lagen die NO₂-Werte über 24 Stunden nach dem Kochvorgang teilweise noch im erhöhten Bereich vor, doch stellten sie nur noch einen Bruchteil der Ausgangskonzentration dar.

Moriske und Turowski (2000) weisen darauf hin, dass Stickstoffoxide auch beim Abbrand von Kerzen oder beim Gebrauch von Lampenölen in die Raumluft abgegeben werden. Gerade in der vorweihnachtlichen Zeit, in der häufig auch weniger gelüftet wird, können in kleineren Räumen kurzfristig erhöhte NO₂-Gehalte entstehen.

DAS VERHÄLTNISS VON NO₂ IM INNENRAUM ZUR AUSSENLUFT

Cyrus et al. (2000) untersuchten in ihrer Feldstudie in 405 deutschen Wohnungen auch das Verhältnis der NO₂-Konzentration zwischen Innenraum und Außenluft. Demnach kommt NO₂ im Wohn- und Schlafzimmer statistisch betrachtet in weniger als der halben Konzentration verglichen mit der Außenluft vor. Kein einziger Wochenmittelwert in einer Wohnung lag oberhalb 40 µg/m³, dem Jahresmittelwert des EU-Außenluftgrenzwerts. Eine Fortsetzung dieser Studie in 631 Wohnungen konnte diese Verhältnisse der Konzentrationen von NO₂ in der Innen-

TABELLE I
Spannweite der maximalen 1-Minuten-, 1-Stunden- und 24-Stunden-Mittelwerte in 12 niederländischen Haushalten (nach Lebre et al. 1987).

Messstandort	Maximum NO ₂ -Konzentration (µg/m ³)		
	1-min-Mittelwert	1-h-Mittelwert	24-h-Mittelwert
Küche	400–3.808	230–2.055	53–478
Wohnzimmer	195–1.007	101–879	49–259
Schlafzimmer	57–806	48–718	22–100

beziehungsweise Außenluft bestätigen (Topp et al. 2004).

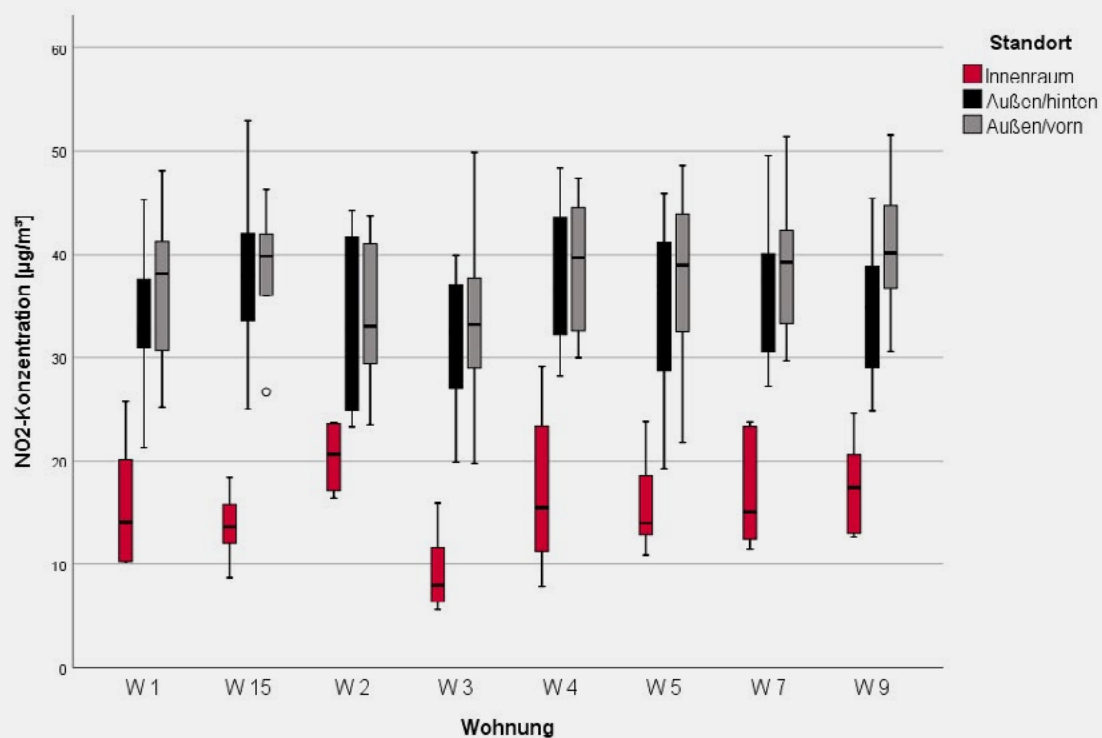
Die Tatsache, dass NO_2 im Innenraum am häufigsten in etwa der halben Konzentration auftritt wie in der Außenluft, bestätigte auch die Studie von Meier et al. (2015). Hier wurden 80 Wohnungen in der Schweiz aus vier überwiegend städtischen Bereichen untersucht. Auch hier war die Höhe der Innenraumkonzentration im Median gleich oder weniger als die Hälfte der Konzentration in der Außenluft. Bei dieser Feldstudie wurde bei 198 Messungen nur ein einziges Mal ein Wochenmittelwert von mehr als $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen.

Wie stark der Außenlufteintrag die Innenraumluftkonzentration beeinflusst, hat 2010 das Umweltbundesamt in einer Studie mit acht Berliner Wohnungen untersucht (Fiedler et al. 2010; ABBILDUNG 2). Befinden sich im Innenraum keine weiteren NO_2 -Quellen, so stellt der Eintrag aus dem Straßenverkehr in die Außenluft die wesentlichste Quelle für NO_2 im Innenraum dar. Deshalb wurden

Wohnungen im Innenstadtbereich, in der Nähe der Stadtautobahn – einem „Bereich der durch örtlichen Verkehrsbeitrag geprägten NO_2 -Belastungen“ – ausgewählt. Fiedler et al. (2010) bestätigten ebenfalls, dass die NO_2 -Konzentration im Innenraum deutlich geringer war als in der wohnungsnahen Außenluft. Die einzige Ausnahme stellte eine Wohnung dar, in der aktiv geraucht wurde. Bei dieser Wohnung wurden unter sommerlichen Witterungsverhältnissen vergleichbare Werte im Innenraumbereich wie in der Außenluft gemessen.

Die Korrelation zwischen der Konzentration im Innenraum und in der Außenluft hängt von Faktoren wie dem Schadstoffeintrag von außen, der Emission von Quellen im Innenraum und dem Abklingverhalten von NO_2 im Innenraum ab. So sind zum Beispiel die Korrelationen zwischen den Werten im Innenraum und in der Außenluft im Sommer höher, bedingt durch die Tatsache, dass während der warmen Jahreszeit häufiger über

ABBILDUNG 2
Verteilung der NO_2 -Konzentration in bzw. an Wohnungen in der Nähe der Berliner Stadtautobahn (nach Fiedler et al. 2010).



die Fenster gelüftet wird. Fiedler et al. (2010) konnten bestätigen, dass aufgrund der unterschiedlichen Belüftung in den beiden Jahreszeiten die Differenz der Außenluft- und Innenraumkonzentration in den Sommermonaten geringer ist als in den Wintermonaten. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse dieser Studie, dass die Lage der Wohnung – zur Straßenseite zu- oder abgewandt („vorne“ bzw. „hinten“ in [ABBLIDUNG 2](#)) – und auch örtliche Winde und Windrichtungen die NO_2 -Konzentration im Innenraum beeinflussen können.

Im Gegensatz zu den anderen vorgestellten Studien, bei denen Mittelwerte aus Passivmessungen über mehrere Tage ermittelt wurden, gehören Krause et al. (2019) zu den wenigen Studien, die tatsächlich auch das zeitaufgelöste Verhalten von NO_2 im Innenraum untersucht haben. Diese Studie untersuchte drei exemplarische Wohnungen in Berlin über je eine Woche. Zum Einsatz kamen im Innenraum und in der Außenluft zwei tragbare Messsysteme. Die zeitlichen Konzentrationsverläufe in [ABBLIDUNG 3](#) zeigen starke zeitliche Schwankungen, wobei Innenraum- und Außenluftwerte zeitlich eng aufeinander folgten. Dies ist ein klarer Hinweis, dass in solchen Fällen die Außenluft die Quelle für NO_2 im Innenraum darstellt.

Auch in dieser Studie war das Verhältnis NO_2 (Innenraum) / NO_2 (Außenluft) (I/O-Verhältnis) letztlich im statistischen Mittel unter 1. Generell ist diese Tatsache erklärbar

durch den Abbau des reaktiven NO_2 an den Oberflächen von Innenräumen (Spicer et al. 1989). Die Absorption an Oberflächen, die offenbar auch stark materialabhängig ist, entzieht der Raumluft NO_2 und sorgt somit bei Abwesenheit von Innenraumquellen für systematisch niedrigere Konzentrationen im Innenraum. Numerische Simulationen der NO_2 -Konzentration in Innenräumen führen bei den in Deutschland typischen Luftwechselraten ebenfalls zu I/O-Verhältnissen in der Größenordnung von 0,5 und weniger (Salt-hammer et al. 2018).

GRENZ- UND RICHTWERTE FÜR NO_2

Zum Schutz der menschlichen Gesundheit wurden von einigen Organisationen Grenz- und Richtwerte abgeleitet, anhand derer beurteilt werden kann, ob in einem konkreten Fall eine gesundheitliche Gefährdung vorliegt ([TABELLE 2](#)).

Für die Einschätzung einer Belastungssituation ist es wichtig, die zutreffende Belastungsdauer (d. h. den Betrachtungszeitraum) zu kennen. Denn für die Ableitung der Langzeit-Richt- und Grenzwerte wurden zum Teil andere Studien verwendet als für die Ableitung der Kurzzeitwerte. Deshalb dürfen „Kurzzeitwerte nicht für die Beurteilung der

ABBILDUNG 3
Zeitlicher Verlauf der NO_2 -Konzentration im Innenraum und in der angrenzenden Außenluft in einem ruhigen Wohngebiet (nach Krause et al. 2019).

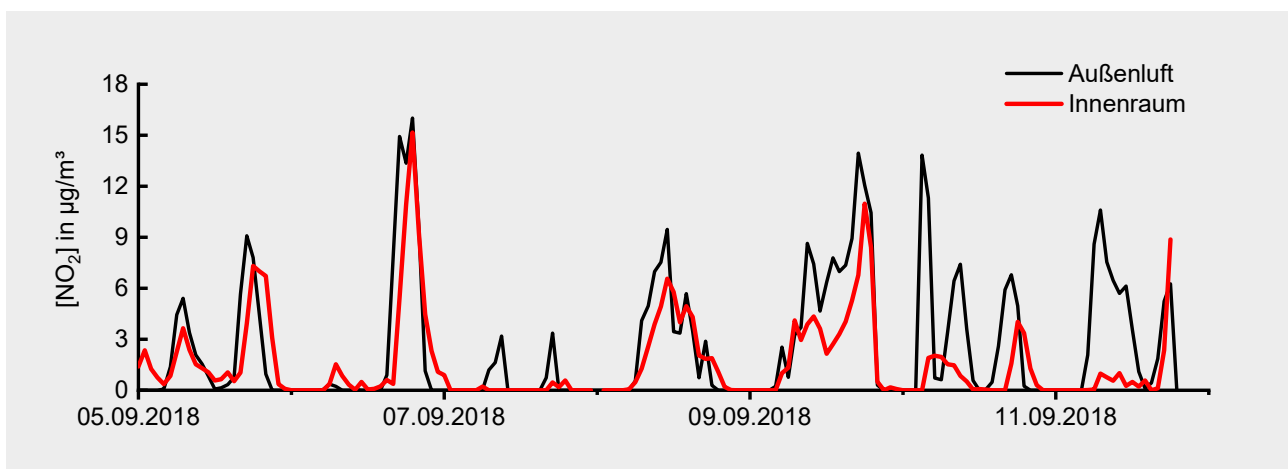


TABELLE 2

Beurteilungswerte; Auszug aus "Häufig gestellte Fragen (FAQ) zum Thema Stickstoffdioxid – gesundheitliche Bedeutung und die Rolle von Grenzwerten" (UBA 2019).

	EU-Außenluftgrenzwerte	Arbeitsplatzgrenzwerte	Innenraumrichtwerte
Langzeitwerte	Immissionsgrenzwert 40 µg/m ³ Jahresmittel	-	40 µg/m ³ Jahresmittel ¹
Kurzzeitwerte	Immissionsgrenzwert 200 µg/m ³ Einstundenmittel ² Alarmschwelle 400 µg/m ³ 3 Stundenmittel ³	-	Kurzzeitrichtwert I Vorsorgewert 80 µg/m ³ Einstundenmittel ⁴ Kurzzeitwert II Gefahrenwert 250 µg/m ³ Einstundenmittel ⁴
Arbeitsschicht	-	950 µg/m ³ Schichtmittel (meist 8 Stunden)	-
Schützt:	Gesamtbevölkerung	Arbeitnehmende an speziellen Arbeitsplätzen	Gesamtbevölkerung

1 Der Langzeitwert basiert auf einer Empfehlung der Weltgesundheitsorganisation. Dieser ist für die Außenluft und Innenraumluft identisch.

2 Darf nicht mehr als 18-mal pro Jahr überschritten werden.

3 Messungen in drei aufeinander folgenden Stunden.

4 Ableitungen durch den Ausschuss für Innenraumrichtwerte (AIR).

Langzeitbelastung und umgekehrt herangezogen werden" (UBA 2019).

Bei den EU-Außenluftgrenzwerten handelt es sich um gesetzlich festgelegte Werte, auf deren Grundlage die Luftqualität kontinuierlich überwacht und Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität durchgeführt werden. Bei Einhaltung dieser gesetzlich bindenden Grenzwerte geht man davon aus, dass die Gesundheit der Bevölkerung durch diesen Luftschadstoff nicht beeinträchtigt wird, auch wenn man diesem ein Leben lang ausgesetzt ist. Basierend auf den Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO) hat die EU einen Jahresmittelwert von 40 µg/m³ für NO₂ in der Außenluft festgelegt. Für die Bewertung einer Kurzzeitbelastung hat die EU einen Einstundenmittelwert von 200 µg/m³ festgelegt, der – entgegen den WHO-Empfehlungen – nicht öfter als 18-mal im Kalenderjahr überschritten werden darf. Die WHO hingegen erlaubt keine Überschreitung des Stundenmittelwertes. Um eine akute Belastungssituation durch erhöhte NO₂-Konzentrationen zu erkennen, wurde von der EU der Alarmschwellenwert von 400 µg/m³ als 3 Einstundenmittel abgeleitet. Das heißt: In drei aufeinanderfolgenden Stunden darf der Stundenmittelwert 400 µg/m³ nicht überschreiten. Andernfalls müssen die zuständigen Behörden Reduzierungsmaßnahmen ergreifen.

Für die Bewertung der Innenraumbelastung durch NO₂ werden die Innenraumrichtwerte angewendet. Diese Beurteilungswerte werden vom Ausschuss für Innenraumrichtwerte (AIR) abgeleitet, einem Gremium von Fachleuten des Bundes und der Länder (AIR 2019). Die Innenraumrichtwerte haben im Gegensatz zu den Außenluftgrenzwerten keinen gesetzlichen Charakter. Für die Beurteilung einer langfristigen Belastungssituation hat der AIR als Jahresmittelwert einen Richtwert von ebenfalls 40 µg/m³ abgeleitet.

Für die Beurteilung der kurzfristigen Belastungen wurde zum einen ein Vorsorgewert, auch Richtwert I genannt, von 80 µg/m³, einem Einstundenwert abgeleitet. Bei Unter-

schreitung dieses Wertes ist davon auszugehen, dass auch bei lebenslanger Exposition mit NO₂ keine Beeinträchtigung der Gesundheit, insbesondere bei empfindlichen Personen, zu erwarten ist. Zum anderen gibt es den Gefahrenwert, auch Richtwert II genannt, von 250 µg/m³ ebenfalls ein Einstundenwert. Bei NO₂-Konzentrationen ab 250 µg/m³ kann eine gesundheitliche Beeinträchtigung von empfindlichen Personen nicht mehr ausgeschlossen werden und es müssen Reduzierungsmaßnahmen ergriffen werden.

Neben den EU-Außenluftgrenzwerten und den Innenraumrichtwerten wurden zum Schutz der Gesundheit von Beschäftigten Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW) abgeleitet. Diese Werte werden für die Beurteilung der Belastungssituation am Arbeitsplatz herangezogen. Für NO₂ wurde ein AGW von 950 µg/m³ als Mittelwert einer Arbeitsschicht (in der Regel 8 Stunden) festgelegt. Bei Unterschreitung dieses Wertes sind bei einer 8-stündigen Schicht und einer Wochenarbeitszeit von 40 Stunden keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen zu erwarten.

FAZIT

Feldstudien unter Berücksichtigung einer großen Zahl an Wohnungen zeigen, dass die NO₂-Konzentration im Innenraum im statistischen Mittel etwa halb so hoch ist wie in der Außenluft, sofern keine bedeutenden NO₂-Quellen im Innenraum vorhanden sind. Zeitauflösende Studien, welche die NO₂-Konzentration während und nach Gebrauch einer NO₂-Quelle gemessen haben, zeigen teils sehr hohe kurzzeitige Spitzenwerte für NO₂. Diese fallen je nach Grad der Belüftung des Raumes aber in aller Regel wieder relativ schnell ab.

Werden NO₂-Quellen im Innenraum genutzt, sollte aus Vorsorgegründen auf eine ausreichende Belüftungsmöglichkeit geachtet werden. Beim Einbau eines Gasherdes kann zum Beispiel eine Dunstabzugshaube mit einer Abluftführung nach draußen planarisch berücksichtigt werden.

Erhöhte Konzentrationen aufgrund der Nutzung von Innenraumquellen stellen zwar kurzfristig erhöhte Belastungen mit NO₂ dar, sie sind aber nicht mit den Auswirkungen einer lebenslangen niedrigen Belastung zu vergleichen. Kurzfristige und seltene Belastungen bleiben im Allgemeinen ohne gesundheitliche Folgen. Liegt beim Menschen bereits eine Erkrankung vor, so können diese Belastungen zu einer Verschlechterung des Gesundheitszustandes führen.

Insgesamt ist es aus Vorsorgegründen wichtig, bei Anwesenheit von Innenraumquellen für eine ausreichende Belüftung zu sorgen. Im Gegensatz zur Außenluft kann jeder Bewohner selbst Einfluss auf die NO₂-Konzentration im Innenraum nehmen. ●

LITERATUR

- AIR – Ausschuss für Innenraumrichtwerte (2019): Richtwerte für Stickstoffdioxid (NO₂) in der Innenraumluft. Mitteilung des Ausschusses für Innenraumrichtwerte (AIR). Bundesgesundheitsbl. 62(5): 664–676. DOI: 10.1007/s00103-019-02891-4.
- Alberts WM (1994): Indoor air pollution: NO, NO₂, CO, and CO₂. Journal of Allergy and Clinical Immunology 94(2): 289–295. DOI: 10.1016/0091-6749(94)90088-4.
- Cyrys J, Heinrich J, Richter K et al. (2000): Sources and concentrations of indoor nitrogen dioxide in Hamburg (West Germany) and Erfurt (East Germany). Science of the Total Environment 250(1-3): 51–62. DOI: 10.1016/S0048-9697(00)00361-2.
- Fiedler J, Lüdecke A, Moriske HJ (2010): NO₂-Konzentrationen in der Innenraumluft von Wohnungen in verkehrsbelasteten Stadtgebieten. Eine Fallstudie in Berlin. UMID: Umwelt und Mensch – Informationsdienst, 1: 12–18.
- Kaulbach S., Hogg HJ (1991): Stickstoffdioxid-Belastung der Raumluft in Wohnungen. Gesundheits-Ingenieur, Haustechnik, Bauphysik, Umwelttechnik 112(3): 129–133.
- Krause A, Zhao J, Birmili W (2019): Kostengünstige Sensoren und Innenraumluftqualität: Eine Testuntersuchung in drei Privathaushalten in Berlin (Low-cost sensors and indoor air quality: A test study in three residential homes in Berlin, Germany). Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft 79 (3): 87–92.
- Lebret E, Noy D, Boleij J et al. (1987): Realtime concentration measurements of CO and NO₂ in twelve homes. Indoor Air '87, Berlin, Vol. 1: 435–439.
- Marbury MC, Harlos DP, Samet JM et al. (1988): Indoor residential NO₂ concentrations in Albuquerque, New Mexico. Journal of the Air & Waste Management Association 38(4): 392–398. DOI: 10.1080/08940630.1988.10466388.
- Meier R, Eeftens M, Phuleria HC et al. (2015): Differences in indoor versus outdoor concentrations of ultrafine particles, PM_{2.5}, PM absorbance and NO₂ in Swiss homes. Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology 25(5): 499–505. DOI: 10.1038/jes.2015.3.
- Moriske HJ (2000): Chemische Innenraumverunreinigungen. Kapitel III-4.2 aus: Moriske HJ und Turowski E: Handbuch für Bioklima und Lufthygiene, 3. Erg. Lfg. 3/2000: 6–7.
- Salthammer T, Schieweck A, Gu J et al. (2018): Future trends in ambient air pollution and climate in Germany – Implications for the indoor environment. Building and Environment 143: 661–670. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.07.050.
- Spicer CW, Coutant RW, Ward GF et al. (1989): Rates and mechanisms of NO₂ removal from indoor air by residential materials. Environment International 15 (1–6): 643–654. DOI: 10.1016/0160-4120(89)90087-1.
- Topp R, Cyrys J, Gebefügi I et al. (2004): Indoor and outdoor air concentrations of BTEX and NO₂: correlation of repeated measurements. Journal of Environmental Monitoring 6(10): 807–812. DOI: 10.1039/B405537C.
- UBA – Umweltbundesamt (2019): Häufig gestellte Fragen (FAQ) zum Thema Stickstoffdioxid – gesundheitliche Bedeutung und die Rolle von Grenzwerten. Hrsg.: Umweltbundesamt und Kommission Umweltmedizin und Environmental Public Health. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschaedstoffe-im-ueberblick/stickstoffoxide/stickstoffdioxid-gesundheitliche-bedeutung-von>, Stand vom 31.01.2019 (Zugriff am 12.02.2020).
- Wade III WA, Cote WA, Yocom JE (1975): A study of indoor air quality. Journal of the Air Pollution Control Association 25(9): 933–939. DOI: 10.1080/00022470.1975.10468114.

KONTAKT

Dr. Wolfram Birmili
Umweltbundesamt
Fachgebiet II 1.3 "Innenraumhygiene, gesundheitsbezogene Umweltbelastungen"
Corrensplatz 1
14195 Berlin
E-Mail: wolfram.birmili[at]uba.de

[UBA]