

02.12

Immissionsschutz

17. Jahrgang
Juni 2012

www.IMMISSIONSSCHUTZdigital.de

Zeitschrift für Luftreinhaltung,
Lärmschutz, Anlagensicherheit, Abfall-
verwertung und Energienutzung

- | | |
|------------------|---|
| Luftreinhaltung | Zuteilung für Bestandsanlagen im Emissionshandel
Saubere Luft dank Photokatalyse |
| Abfallverwertung | Umsetzung von REACH und GHS in der Recyclingindustrie |
| Luftreinhaltung | Der Umgang mit Geruchsmissionen bei der Aufstellung
von Bebauungsplänen
Ausbreitung von Gerüchen in Kaltluftabflüssen |

Saubere Luft dank Photokatalyse

Messbarer Beitrag photokatalytisch aktiver Bauprodukte zur Luftreinhaltung

Gerd Bolte / Dr.-Ing. Thomas Flassak



Gerd Bolte
HeidelbergCement
Technology Center



Dr.-Ing. Thomas Flassak
Ingenieurbüro Lohmeyer
GmbH & Co. KG

In der Verordnung über Immissionswerte (22. BImSchV) [1] werden für Stickstoffdioxid Grenzwerte zum Schutz der menschlichen Gesundheit vorgegeben. An straßennahen Messstationen wird der seit 2010 gültige Jahresgrenzwert von $40 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$ vielerorts noch immer deutlich überschritten. Es sind demzufolge in Zukunft weitere Maßnahmen notwendig um die Vorgaben einzuhalten.

Der wissenschaftliche Nachweis der photokatalytischen Oxidation der Stickstoffoxide (NO_x) in der Luft wurde inzwischen mehrfach erbracht. Eine Überprüfung der Schadstoffreduzierung in einer Freilandanwendung ist aber aufgrund der Vielzahl an Einflussparametern nicht immer möglich.

Es bestand nun die Aufgabe Labor- und Freilandexperimente mit numerischen Modellen zu simulieren um verlässliche Aussagen für die praktische Anwendung abzuleiten. Die Berechnung der Konzentrationsverteilung der Stickoxide unter Berücksichtigung der Wirkung der photokatalytisch aktiven Betonoberfläche entstand mit dem dreidimensionalen mikroskaligen Strömungs- und Ausbreitungsmodell MISKAM.

1. Einleitung

In vielen Großstädten ist die Luftqualität mittlerweile ein Problem. Neben dem vieldiskutierten Feinstaub sind vor allem Stickstoffoxide (NO , NO_2) die relevantesten Schadstoffe. Stickstoffoxide entstammen vorwiegend der Verbrennung fossiler Energieträger (z. B. Verkehr, Kleinfeuerungsanlagen). Stickstoffdioxid greift die Atemwege an und begünstigt chronische Bronchitis. Aus diesem Grund gibt eine EU-Richtlinie [1] den maximalen Jahresdurchschnittswert von $40 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$ verbindlich vor. In den meisten Großstädten wird dieser Grenzwert jedoch deutlich überschritten. Aus heutiger Sicht ist die Einhaltung der Grenzwerte in der Nähe verkehrsreicher Straßen auch in naher Zukunft nicht möglich. Es müssen also zusätzliche Maßnahmen erfolgen.

Die Grenzwerte für die Emissionen von Personenkraftwagen sollen in den kommenden Jahren weiter gesenkt werden. Daher müssen die Automobilhersteller immer neue Anstrengungen unternehmen, um für ihre Fahrzeuge eine wirkungsvolle Abgasreinigung zu entwickeln. Für die Ottomotoren ist dies mit Hilfe des Drei-Wege-Katalysators bereits weitestgehend gelungen. Der Anteil von Stickstoffdioxid (NO_2) nimmt aber in den letzten Jahren an vielen verkehrsnahen Messstellen zu. Dies ist dem erhöhten Direktausstoß von Stickstoffdioxid durch Dieselfahrzeuge mit Oxidationskatalysator zuzuschreiben. Und selbst nach der Einführung umweltfreundlicherer Dieselfahrzeuge werden noch viele Jahre vergehen, bis alle Altfahrzeuge ausgetauscht sind.

Eine sinnvolle Ergänzung, um den Abbau der Schadstoffbelastung in unseren Städten voranzutreiben, ist die Photokatalyse. Viele Verbindungen werden durch Lichteinstrahlung, insbesondere von energiereicher UV-Strahlung, zersetzt. Dieser natürliche Vorgang der Photolyse läuft in der Regel sehr langsam ab. Die Reaktion lässt sich aber durch sogenannte Photokatalysatoren beachtlich beschleunigen. Durch Energiezufuhr aus dem Sonnenlicht bilden sich auf deren Oberfläche hochreaktive Verbindungen, die in der Lage sind z. B. Stickstoffoxide (NO_x) zu oxidieren und somit der Umgebungsluft zu entnehmen.

Werden mineralische Baustoffe wie Beton mit solchen Photokatalysator-Partikeln hergestellt, wirken deren Oberfläche wiederum wie Photokatalysatoren und tragen aktiv zum Abbau von Luftschadstoffen bei. Prinzipiell kann jedes Betonprodukt so hergestellt werden, denn die Photokatalysatorpartikel haben keinen Einfluss auf die Gebrauchseigenschaften des Betons [2]. Besonders lohnenswert ist der Einsatz in der Nähe von hoch belasteten Verkehrsadern mit entsprechend hoher Luftschadstoffbelastung. Dort können Betonpflastersteine und Fahrbahndecken aus photokatalytisch aktiven Beton für eine bessere Luftqualität sorgen.

2. Photokatalyse als Lösungsansatz zum Schadstoffabbau

Den wissenschaftlichen Nachweis des nachhaltigen Abbaus der Stickstoffoxidbelastung unter praxisnahen Bedingungen hat unter anderem das von der EU geförderte PICADA Projekt (*Photocatalytic Innovative Coverings Applications for Depollution Assessment*) erbracht [6].

Versuchsanordnungen im Labormaßstab, bei denen ein Gemisch aus Luft und Stickstoffoxiden ($\text{NO} + \text{NO}_2$) in einer Prüfkammer über einen Probekörper strömen und die Konzentration der Stickstoffoxide am Eintritt und Austritt gemessen werden, ermöglichen die gezielte Simulation unterschiedlicher Umweltbedingungen durch Variation einzelner Parameter, wie Lichtintensität sowie die Konzentration und Zusammensetzung der Stickstoffoxide in der Aufgabeluft.

Es bestand nun die Aufgabe, Labor- und Freilandexperimente mit numerischen Modellen zu simulieren, um verlässliche Aussagen für andere Anwendungsfälle ableiten zu können.

Die Berechnung der Konzentrationsverteilung der Stickoxide unter Berücksichtigung der Wirkung der photokatalytisch aktiven Betonoberfläche erfolgte mit Hilfe des prognostischen, dreidimensionalen, mikroskaligen Strömungs- und Ausbreitungsmodell MISKAM [4]. MISKAM wird verwendet zur Prognose von Schadstoffkonzentrationen in Straßen bis hin zu ganzen Stadtteilen und ist validiert nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 9 [9]. Die in die Modellierung eingehende photokatalytische Abbaugeschwindigkeit kann nicht direkt gemessen werden, sondern muss aus Messungen abgeleitet werden. Dazu wurde im Laborversuch die NO_x Abbaugeschwindigkeit ($v_{a, BK}$) bestimmt und bereinigt um den Strömungswiderstand der Laborprobenkammer. Diese abgeleitete photokatalytische NO_x Abbaugeschwindigkeiten (v_{pk}) wurden für die Simulation mit MISKAM verwendet.

Für die Modellierung der Wirkung der photokatalytisch aktiven Betonoberflächen wurde ein Widerstands-

modell zur Modellierung der bodennahen Strömungen integriert. Die Modellierung der bodennahen Flüsse basiert auf einem in der VDI Richtlinie 3782 Blatt 5 [10] beschriebenen Widerstandsmodell. Der Fluss zum Boden ergibt sich aus dem Produkt der Konzentration und der Depositionsgeschwindigkeit. Die Depositionsgeschwindigkeit (v_d) setzt sich zusammen aus dem Kehrwert von drei Widerständen, dem turbulenten (r_a), dem quasi-laminaren (r_b) und einem Widerstand bedingt durch Adsorption und Photokatalyse (r_{pk})

$$v_d = \frac{1}{r_a + r_b + r_{pk}} \quad (F1)$$

In der Modellierung wird der aerodynamische Widerstand (r_a) und der quasi-laminare Widerstand r_b aufgrund der fahrzeuginduzierten turbulenten Strömung auf null gesetzt. Der Widerstand bedingt durch Adsorption und Photokatalyse (r_{pk}), bzw. der Kehrwert, der die Abbaugeschwindigkeit v_{pk} darstellt, wurde aus Labormessungen abgeleitet. Tab. 1 zeigt exemplarisch für verschiedene photokatalytisch wirksame Proben die Ein- und Ausgangskonzentration, die prozentuale Minderungswirkung für NO_x sowie die berechnete und um die Strömungswiderstände der Prüfkammer bereinigte NO_x -Abbaugeschwindigkeit v_{pk} .

Für die Laborprüfkammer beträgt der Maximalwert der photokatalytischen NO_x -Abbaugeschwindigkeit (v_{pk}) 0,41 cm/s für Probe A2. Es wird daher bei den folgenden Simulationen mit einer photokatalytischen NO_x -Abbaugeschwindigkeit (v_{pk}) 0,4 cm/s gerechnet, sowie (v_{pk}) 0,3 cm/s was einem Wirkungsgrad von 75 % entspricht.

Vergleichbare Abbaugeschwindigkeiten wurden auch in anderen Studien gefunden. So gibt Bruse, Droll [3] die Abbaugeschwindigkeit mit 0,28 cm/s, Laufs et al. [7] ~0,3 cm/s an.

3. Validierung des Rechenmodells durch die Simulation einer realen Anwendung

Im nächsten Schritt wurde mit dem Ausbreitungsmodell MISKAM die Ergebnisse einer praktischen Anwendung der italienischen Stadt Bergamo simuliert, um zu überprüfen, ob sich mit den aus den Labormessungen gefundenen Abbaugeschwindigkeiten die in der Praxis gemessenen Minderungen einstellen.

In der Via Borgo Palazzo in Bergamo wurde auf eine Länge von 500 m photokatalytisch aktives Pflaster verlegt (siehe Abb. 1 und 2). So entstand eine zusammenhängende photokatalytisch aktive Oberfläche von 7.250 m². Wenige Wochen nach Abschluss der Bauarbeiten erfolgte eine erste Messreihe zur Erfassung der Luftqualität. Ein Messpunkt (69-TX) befand sich 160 cm über dem photokatalytischen Straßenbelag, der Referenz-Messpunkt (103-Asphalt) lag im weiteren Verlauf der Straße im Bereich des konventionellen Asphaltbelages. Parallel wurden auch Wetterdaten, UV-A Strahlungsintensität und Verkehrszahlen erfasst.

Die Wirksamkeit der photokatalytisch aktiven Betonpflastersteine in der Via Borgo Palazzo wurde messtechnisch erstmals vom 6. bis 17. November 2006 untersucht. Für diese Messperiode zeigt Abb. 3 den Mittelwert der NO_x -Konzentrationen im Straßenabschnitt mit dem photokatalytisch aktiven Belag (69-TX) und

Probe	(NO) _{ein}	(NO) _{aus}	(NO ₂) _{ein}	(NO ₂) _{aus}	Prozentuale Minderungswirkung NO _x	NO _x -Abbaugeschwindigkeit v _{pk}
	[ppb]	[ppb]	[ppb]	[ppb]	[%]	[cm/s]
A1	397,6	214,5	150,3	133,6	36,5	0,23
A2	403,2	162,6	149,7	117,8	49,3	0,41
A3	399,8	177,9	152,7	124,0	45,4	0,34
A4	400,7	246,7	153,6	159,4	26,7	0,14
A5	401,0	193,1	146,7	120,2	42,8	0,30

Tabelle 1: Gemessene Ein- und Austrittskonzentrationen, prozentuale Minderungswirkung und NO_x -Abbaugeschwindigkeit v_{pk} , bereinigt um die Strömungswiderstände der Prüfkammer

am Referenz-Messpunkt (103-Asphalt) zwischen 9:00 und 17:00 Uhr. In der Abbildung wird auch die prozentuale Differenz der NO_x -Konzentrationen tages- bzw. wochenweise angegeben. Die NO_x -Konzentration ist tagsüber am Messpunkt im Straßenabschnitt mit dem photokatalytisch aktiven Belag im Mittel 44 % niedriger als am Referenzmesspunkt.

Mit Hilfe von Simulationen mit dem Ausbreitungsmodell MISKAM und den gefundenen photokatalytischen Abbaugeschwindigkeiten soll gezeigt werden, inwieweit die in Abb. 3 dargestellten prozentualen Differenzen der NO_x -Konzentrationen durch die photokatalytisch wirksamen Betonpflastersteine bewirkt werden.



Abbildung 1: Fotos des Straßenabschnittes der Via Borgo Palazzo in Bergamo (Italien) mit photokatalytisch wirksamen Betonpflastersteinen

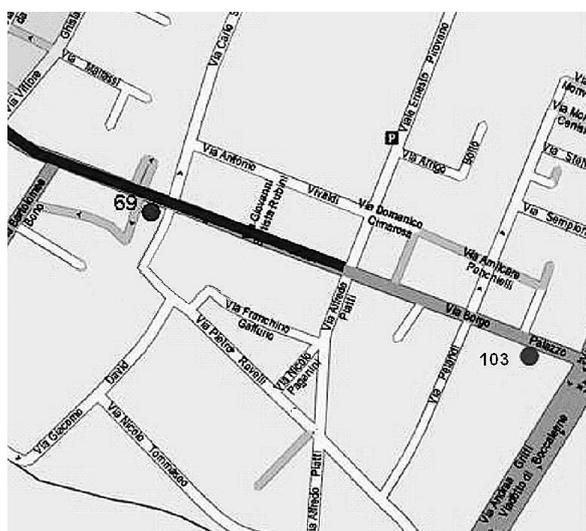


Abbildung 2: Übersichtsplan der Via Borgo Palazzo in Bergamo, Italien. Dunkelgrau: Straßenabschnitt mit photokatalytisch wirksamen Betonpflastersteinen, Messstation bei Hausnummer 69. Weiß und Mittelgrau: konventioneller nicht photokatalytisch aktiver Straßenbelag, Referenzmessstation bei Hausnummer 103 [5]

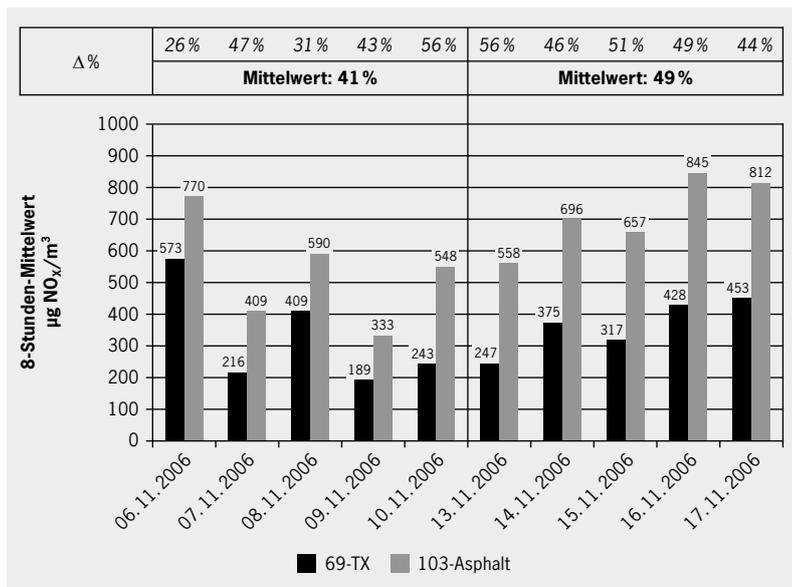


Abbildung 3: Gemessener 8-h-Mittelwert (9:00 und 17:00) der NO_x-Konzentrationen an den Messstellen „69-TX“ und „103-Asphalt“ sowie die prozentuale Differenz der NO_x-Konzentrationen tageweise bzw. wochenweise [5]

Die dazu notwendige Simulation erfolgte auf Basis der digitalisierten Gebäudeumrisse mit abgeschätzten Gebäudehöhen. Die eingerechneten Emissionen der Kraftfahrzeuge basieren auf den durchgeführten Verkehrszählungen. Diese fanden im Messzeitraum vom 6. bis 17. November 2006 an Werktagen zwischen 9:00 und 16:30 Uhr statt. Die mittlere Verkehrsstärke betrug 1.206 Kraftfahrzeuge pro Stunde im Bereich des photokatalytisch aktiven Straßenbelages und 1.632 pro Stunde im Referenzbereich. Der Anteil an schweren LKW wurde nicht erhoben. Für die Emissionsbestimmung wurde ein Erfahrungswert von 3 % angesetzt. Da die kraftfahrzeugbedingten Emissionsfaktoren für Italien nicht bekannt sind wurden ersatzweise die NO_x-Emissionsfaktoren für Deutschland des Handbuchs für Emissionsfaktoren [8] angesetzt – Leichtverkehr 0,56 g/(km Fzg) und Schwerverkehr 7,12 g/(km Fzg). Mit diesen Angaben ergeben sich in dem Straßenabschnitt mit photokatalytisch aktiven Betonpflastersteinen kraftfahrzeugbedingte NO_x-Emissionen von 0,252 mg/(m s) und 0,340 mg/(m s) im Referenzstraßenabschnitt. Die Querstrassen im Untersuchungsgebiet sind hinreichend entfernt, weshalb deren Emissionen nicht in die Rechnung eingehen.

Die NO_x-Vorbelastung ergibt sich durch Bildung der Differenz der Messwerte der NO_x-Gesamtbelastung an der Referenzmessstelle (103-Asphalt) und der simulierten NO_x-Zusatzbelastung des Kraftfahrzeugverkehrs an gleicher Stelle. Diese ist im besonderen Maße abhängig von der angesetzten mittleren Windgeschwindigkeit im Messzeitraum.

Tabelle 2: Simulierte NO_x-Gesamtbelastung an den Messstellen „69-TX“ und „103-Asphalt“ für photokatalytische Abbaugeschwindigkeiten v_{pk} = 0,3 cm/s und 0,4 cm/s in Kombination mit mittleren Windgeschwindigkeiten U von 1,0 m/s und 0,5 m/s

U	v _{pk}	Vorbelastung	103-Asphalt	69-TX	Differenz	
[m/s]	[cm/s]	[µg/m³]	[µg/m³]	[µg/m³]	[µg/m³]	[%]
0,5	0,3	109	618	336	-282	-46
0,5	0,4	109	617	326	-291	-47
1,0	0,3	366	618	479	-139	-22
1,0	0,4	366	618	473	-145	-23

Der Messwert der NO_x-Gesamtbelastung beträgt 621 µg/m³. Die simulierte NO_x-Zusatzbelastung beträgt bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 1,0 m/s 255 µg/m³ und 512 µg/m³ bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 0,5 m/s. Die Angaben der Windgeschwindigkeit beziehen sich immer auf eine Höhe von 10 m. Somit ergibt sich rechnerisch eine NO_x-Vorbelastung von 366 µg/m³ bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 1,0 m/s bzw. von 109 µg/m³ bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 0,5 m/s. Anhand der Messwerte einer städtischen Hintergrund-Messstelle in Bergamo lässt sich folgern, dass eine mittlere Windgeschwindigkeit zwischen 9:00 und 17:00 Uhr von 0,5 m/s plausibel ist.

Mit diesen Eingangsdaten wurden Simulationen der Strömung und der Ausbreitung mit dem Modell MISKAM durchgeführt. Die Fahrbewegungen der Kraftfahrzeuge in der Via Borgo Palazzo bewirken eine fahrzeuginduzierte turbulente Strömung, die in den unteren Metern über Grund die Luftmassen „durchrührt“. In der Simulation wird angenommen, dass infolge der fahrzeuginduzierten turbulenten Strömung die atmosphärischen Widerstände r_a + r_b daher vollständig verschwinden, d. h. es bleibt als bestimmender Widerstand bei der Simulation des photokatalytisch bedingten NO_x-Abbaus nur der photokatalytische Widerstand (r_{pk}) in Gleichung (F1) übrig.

Bei einer angenommenen Windgeschwindigkeit (U) von 0,5 m/s liegt der Rechenwert für den Messpunkt „69-TX“ mit 336 µg/m³, nahe am Messwert von 346 µg/m³. Außerdem ergibt sich bei dieser Windgeschwindigkeit eine Differenz zwischen den beiden Messpunkten von rund 47 %, was ebenfalls mit den Messwerten übereinstimmt (Vergleiche Abb. 3).

Mit Hilfe des nun validierten Simulationsmodells ist es möglich die NO_x-Konzentration für einen Ort mit und ohne photokatalytischen Abbau vergleichend zu berechnen. D. h. mit dem Modell lässt sich ermitteln, welche NO_x-Konzentration im Bereich mit photokatalytischem Straßenbelag ohne diesen geherrscht hätte. Basierend auf der Annahme einer Windgeschwindigkeit (U) von 0,5 m/s ergibt sich in der Simulation bei ausgeschaltetem photokatalytischen Abbau am Messpunkt „TX69“ eine um 39 % geringere NO_x-Konzentration gegenüber dem Referenzmesspunkt „103-Asphalt“. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass es sich hier um zwei unterschiedliche Orte mit unterschiedlichen Durchlüftungsverhältnissen und Verkehrszahlen handelt. Am Messpunkt „TX69“ ergibt sich somit für eine mittlere Windgeschwindigkeit (U) von 0,5 m/s und einer photokatalytischen Abbaugeschwindigkeit (v_{pk}) von 0,4 cm/s im Mittel eine Minderung der Schadstoffkonzentration von 14 %

Die Schadstoffverteilung innerhalb einer Straßenschlucht ist nicht homogen. Abb. 4. zeigt die flächige Verteilung der prozentualen photokatalytischen NO_x-Minderungswirkung bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 0,5 m/s und einer photokatalytischen Abbaugeschwindigkeit von 0,4 cm/s unter Vernachlässigung der atmosphärischen Widerstände r_a + r_b. In der Straßenschlucht mit photokatalytisch aktivem Straßenbelag ist die prozentuale NO_x-Minderung zum Teil deutlich höher als an der gewählten Mess-



Abbildung 4:
Prozentuale Minderung der NO_x -Konzentration im Bereich der Via Borgo Palazzo mit photokatalytisch aktivem Betonpflaster bei einer mittleren Windgeschwindigkeit U von 0,5 m/s und einer photokatalytischen Abbaugeschwindigkeit v_{pk} von 0,4 cm/s. Pfeil: Messstelle „69-TX“

stelle. Es ergeben sich mancherorts Minderungen von 30 bis 40 % und mehr.

4. Numerische Simulation des Schadstoffminderungspotentials in einfachen Straßenschluchtgeometrien

Mit dem nun validierten Modell MISKAM besteht die Möglichkeit exemplarisch das Minderungspotential photokatalytisch aktiver Flächen in einfachen Straßenschluchtgeometrien zu simulieren. Das Minderungspotential ist nicht nur von der photokatalytischen Fläche sondern von den geometrischen Verhältnissen wie z. B. vom Höhen-Breiten-Verhältnis einer Straßenschlucht abhängig. Die Veränderung des Höhen-Breiten-Verhältnisses verändert nicht nur das Verhältnis der photokatalytisch aktiven Oberflächen zum Luftvolumen, sondern nimmt auch Einfluss auf die Durchlüftung der Straßenschlucht was im besonderen Maße Einfluss auf die Schadstoffminderungsrate nimmt. Abb. 5 zeigt das Modell der einfachen Straßenschluchtgeometrie für die Simulationen.

Die angenommenen Schluchtbreiten, Gebäudehöhen, photokatalytische Abbaugeschwindigkeiten und mittlere Windgeschwindigkeiten der untersuchten Fälle sind in Tab. 3 angegeben. In der Straßenschlucht befinden sich zwei Fahrspuren. Jede Fahrspur ist mit 25.000 Fahrzeugen pro Tag bei einem LKW-Anteil von 5 % belegt. Die Berechnung der NO_x -Emissionen erfolgt auf Basis des Handbuchs für Emissionsfaktoren [8].

Es wird angenommen, dass in der 105 m langen Straßenschlucht sowohl Fahrbahn als auch Gehweg photokatalytisch aktiv sind. Die photokatalytisch wirksame Fläche beträgt, wenn nicht anders angegeben, Schluchtlänge mal Schluchtbreite. In einer zusätzlichen Simulation wurde angenommen, dass nur der Gehweg mit einer Breite von 4 m photokatalytisch aktiven Betonbelag enthält. Tab. 3 zeigt die prozentuale NO_x -Minderungswirkung 1,5 m über Grund. Abb. 6 zeigt exemplarisch die prozentuale NO_x -Minderungswirkung in einem horizontalen Schnitt jeweils für eine mittlere Windgeschwindigkeit von 0,5 m/s und 1,0 m/s.

Die Minderungen sind bei der niedrigen Windgeschwindigkeit höher. In der Abb. 6 ist zu erkennen,

dass die größte prozentuale Minderung im Gehwegsbereich zu beobachten ist. Dies liegt zum einen daran, dass die lokale Windgeschwindigkeit in Richtung zur Wand abnimmt, wodurch die Verweilzeit zunimmt. Zum anderen ist die Minderungswirkung ausgedrückt in Prozent im Straßenbereich kleiner, da die Konzentrationen dort höher sind. Die Simulation ergibt eine maximale Minderungswirkung bei einem Verhältnis von Gebäudehöhe zu Schluchtbreite von 1,5 : 1 trotz der im Vergleich kleineren photokatalytisch aktiven Flächen.

Wenn nur der Gehweg photokatalytisch ausgestattet ist, verringert sich die maximale prozentuale NO_x -Minderungswirkung auf 13,6 % gegenüber 23,5 % bei einer photokatalytisch ausgestatteten Straße samt

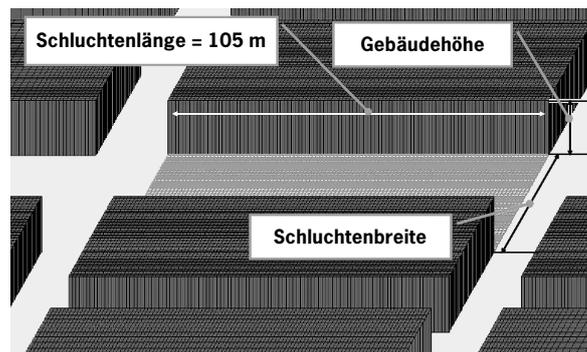


Abbildung 5:
Modell der einfachen Straßenschluchtgeometrie. Schluchtbreite und Gebäudehöhe sind variabel, Schluchtlänge beträgt 105 m. Hellgrau: Photokatalytisch wirksame Fläche

Höhen/ Breiten- Verhältnis	Höhe [m]	Breite [m]	F_{pk} [m ²]	v_{pk} [cm/s]	Prozentuale Minderungswirkung bei U	
					0,5 m/s	1,0 m/s
1,5 : 1	30	20	2100	0,4	26,6%	15,5%
1 : 1	30	30	3150	0,4	25,4%	14,8%
1 : 2	30	60	6300	0,4	24,1%	13,6%
1 : 1	20	20	2100	0,4	23,5%	n. b.
1 : 1	20	20	840*	0,4	13,6%	n. b.
1 : 1	10	10	1050	0,4	19,8%	n. b.

*) Nur der Gehweg ist als photokatalytisch aktive Fläche ausgebildet; Gehwegsbreite 4 m

Tabelle 3:
 NO_x -Minderungswirkung in der Straßenschlucht für verschiedene Werte von Schluchtbreite B , Gebäudehöhe H , mittlerer Windgeschwindigkeit U und photokatalytisch wirksamer Fläche F_{pk}



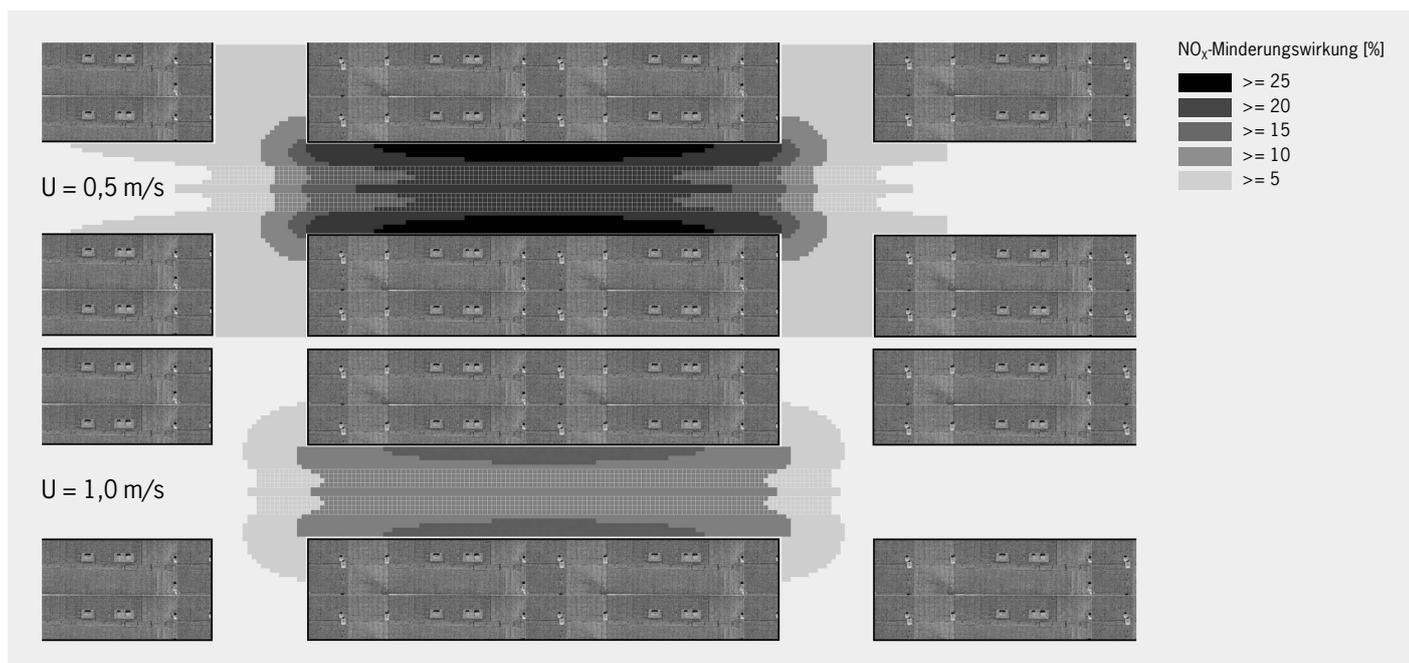


Abbildung 6:
Prozentuale Minderung der NO_x -Konzentration in einer Straßenschlucht (Schluchtbreite: 20 m und Gebäudehöhe 30 m) bei einer mittleren Windgeschwindigkeit U von 0,5 m/s (oben) bzw. 1,0 m/s (unten) und einer photokatalytischen Abbaugeschwindigkeit v_{pk} von 0,4 cm/s

Gehweg. Alleine der Einsatz im Gehwegsbereich ermöglicht also bereits einen signifikanten Schadstoffabbau.

5. Fazit

Es lässt sich zusammenfassen, dass mit der angepassten Version von MISKAM die Konzentrationsverteilung der Stickstoffoxide mit und ohne Berücksichtigung der photokatalytischen Wirkung der Oberflächen simuliert werden kann. Durch Differenzbildung kann die prozentuale Minderungswirkung abgeleitet werden. Die Simulation einer Anwendung aus der Praxis belegt eindeutig die Verringerung der NO_x -Konzentration in der Luft infolge des photokatalytischen NO_x -Abbaus. Aufgrund der schnellen Oberflächenreaktion zeigt sich, dass die klimatischen Bedingungen der entscheidende Faktor hinsichtlich der möglichen photokatalytischen Stickstoffoxidminderung sind. Deshalb kann es selbst innerhalb eines Straßenzuges mit der üblichen heterogenen Bebauung zu extremen Unterschieden in den Schadstoffkonzentrationen und der Durchlüftung und somit auch der Schadstoffminderungsrate infolge der Photokatalyse kommen. Die prozentuale NO_x -Minderungswirkung nimmt mit abnehmender Windgeschwindigkeit zu. Niedrige Windgeschwindigkeiten korrelieren in der Regel mit hohen Schadstoffkonzentrationen. Daher können photokatalytisch aktive Betonoberflächen dazu beitragen, Immissionsspitzen zu „kappen“. Durch diese Eigenschaft können die aktiven Flächen effektiv helfen die Anzahl der Überschreitungen des Stickstoffdioxid-Einstundenmittelwertes über $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zu reduzieren.

Die numerische Simulation zeigt auch den Einfluss des Verhältnisses der photokatalytisch aktiven Oberflächen zum Luftvolumen auf die Schadstoffminderungsrate. Photokatalytisch aktive Bauprodukte haben damit das Potential, langfristig und nachhaltig die Luftreinhaltestrategien in den Städten zu unterstützen.

Literatur

- [1] 39. Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) vom 2. August 2010 bzw. Luftqualitätsrichtlinie 2008/50/EG des Rates vom 21. Mai 2008.
- [2] Bolte, G.: Innovative Baustoffe – Luftschadstoffreduktion mit TioCem®. In: BFT International, Betonwerk + Fertigteil-Technik 01/2009, S. 4–13.
- [3] Bruse, M./Droll, K. (2011): Betonbauteile mit photokatalytisch aktivierten Oberflächen – eine Chance zur Reduzierung des NO_x -Gehaltes in Städten: Untersuchungsergebnisse und Modellierungsansätze: BAST Kolloquium Luftqualität an Straßen 2011, Bergisch Gladbach 30–31.03. 2011, S. 236–258.
- [4] Eichhorn/Kniffka (2010): The numerical flow model MISKAM: State of development and evaluation of the basic version. Meteorologische Zeitschrift, Vol 19, No. 1, S. 81–90.
- [5] Guerrini, G. L. Peccati, E.: Photocatalytic cementitious roads for depollution: International RILEM Symposium on Photocatalysis, Environment and Construction Materials: 8–9 Oktober 2007, Florenze, Italien.
- [6] <http://www.picada-project.com>
- [7] Laufs, S./Burgeth, G. et al. (2010): Conversion of nitrogen oxides on commercial photocatalytic dispersion paints. In: Atmospheric Environment 44, S. 2341–2349.
- [8] UBA (2010): Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Version 3.1/Februar 2010. Dokumentation zur Version Deutschland, erarbeitet durch INFRAS AG Bern/Schweiz in Zusammenarbeit mit IFEU Heidelberg. Hrsg.: Umweltbundesamt Berlin. <http://www.hbefa.net/d/start.html>.
- [9] VDI (2005): VDI-Richtlinie 3783 Blatt 9. Umweltmeteorologie. Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle. Evaluierung für Gebäude- und Hindernisströmung. Hrsg.: Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN - Normenausschuss, Düsseldorf, November 2005.
- [10] VDI (2006): VDI Richtlinie 3782 Blatt 5. Umweltmeteorologie. Atmosphärische Ausbreitungsmodelle. Depositionsparameter. Hrsg.: Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN, Düsseldorf, April 2006.

Anschriften der Verfasser

Gerd Bolte

HeidelbergCement Technology Center
Rohrbacher Str. 95, 69181 Leimen
E-Mail: gerd.bolte@htc-gmbh.com

Dr.-Ing. Thomas Flassak

Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG
An der Rosswald 3, 76229 Karlsruhe
E-Mail: thomas.flassak@lohmeyer.de