

DER EINFLUSS VON BÄUMEN AUF DAS STRÖMUNGS- UND KONZENTRATIONSFELD IN STRASSENSCHLUCHTEN

Gromke, C., Ruck, B.

Laboratorium für Gebäude- und Umweltaerodynamik, Institut für Hydromechanik,
Universität Karlsruhe, Kaiserstr. 12, 76128 Karlsruhe, Germany
<http://www.gebaeudeaerodynamik.de/>

Zusammenfassung

Windgeschwindigkeits- und Konzentrationsmessungen an einem Windkanalmodell einer typischen innerstädtischen Straßenschlucht mit einer mittig angebrachten Baumreihe bei gleichzeitiger Beachtung einer verkehrsinduzierten Luftbewegung werden vorgestellt. Bei den Versuchen wurde der Baumkronendurchmesser und somit der Versperrungsgrad des Straßenraumvolumens ebenso wie die Stärke der turbulenzinduzierenden Verkehrsbewegung variiert.

Einleitung

Der Abtransport bzw. die Verdünnung von in Innenstadtbereichen freigesetzten Kfz-Emissionen ist für die Lebensqualität und Gesundheit der Anwohner von grundlegender Bedeutung. Der dazu notwendige Luftaustausch in innerstädtischen Straßenschluchten wird hauptsächlich durch die natürliche Belüftung gewährleistet. Ob eine ausreichende, natürliche Belüftung vorhanden ist, hängt entscheidend von der Bebauungsstruktur des umliegenden Straßenraumes und des dadurch geprägten lokalen Strömungsfeldes ab. Experimentelle (im Windkanal oder in situ) sowie numerische Studien dazu wurden bereits mehrfach in der Vergangenheit ausgeführt und ein guter Überblick ist in Ahmad et al. 2005 zu finden. Der Einfluss von im Straßenraum angebrachten Körpern wie parkenden Autos, Kioske, Bäume u.v.m. auf den Luftaustausch ist hingegen nur in einigen wenigen Untersuchungen behandelt worden. So sind lediglich in einer experimentellen Arbeit von Gayev & Savory 1999 das Strömungsfeld in einer im Boden eingelassenen Vertiefung mit versetzt angebrachten, senkrecht stehenden zylinderförmigen Rohren als Hindernissen und in einer numerischen Arbeit von Ries & Eichhorn 2001 mit dem CFD-Code MISKAM unter Verwendung eines $k-\epsilon$ -Turbulenzmodells das Strömungs- und Konzentrationsfeld in Gegenwart zweier seitlich befindlicher Baumreihen untersucht worden. Welche Wirkung speziell eine Baumreihe in der Mitte der Straße zwischen den Fahrbahnen auf das Windfeld und somit auf die natürliche Belüftung einer Straßenschlucht ausübt, ist Gegenstand des vorliegenden Artikels.

Die Untersuchungen werden an einem Modell einer idealisierten innerstädtischen Straßenschlucht, bestehend aus zwei parallelen Häuserreihen, bei zur Straßenachse senkrechter Anströmung in einem atmosphärischen Grenzschichtwindkanal durchgeführt. Es werden kugelförmige, impermeable Baumkronen simuliert, deren Kronendurchmesser bei konstantem Pflanzabstand variiert werden. Zusätzlich wird die verkehrsinduzierte Turbulenz verändert. Gemessen werden die mittleren Konzentrationen an den Häuserwänden der durch den Kfz-Verkehr in Bodennähe freigesetzten Abgase und die aus den Kreuzungsbereichen in

den Straßenschluchtraum horizontal in Richtung der Straßenlängsachse einströmenden Volumenströme. Die Messung des Geschwindigkeitsfeldes erfolgt mit einem 2-Komponenten LDA und die der Konzentrationsverteilung mit einem ECD (Elektroneneinfangdetektor). Als Spurengas wird Schwefelhexafluorid (SF_6) eingesetzt, das aus einer Linienquelle im Modellboden längs der Straße emittiert, s. Meroney et al. 1996. Die verkehrsinduzierte Turbulenz wird durch auf rotierenden Riemen angebrachten Plättchen simuliert, s. Kastner-Klein et al. 2001.

Windkanalmodell, Messgenauigkeit und verkehrsinduzierte Turbulenz

Die Versuche werden an einer Modellstraßenschlucht (Abb. 1) im Maßstab 1:150 in einem atmosphärischen Grenzschichtwindkanal durchgeführt. Im Bereich der Messstrecke liegt eine sich im Gleichgewicht befindliche Anströmung mit einem Profilparameter $\alpha = 0,30$ gemäß dem Potenzgesetz vor. Weitere Kenngrößen und Einzelheiten des Anströmprofils sind in Gromke & Ruck 2005 dokumentiert.

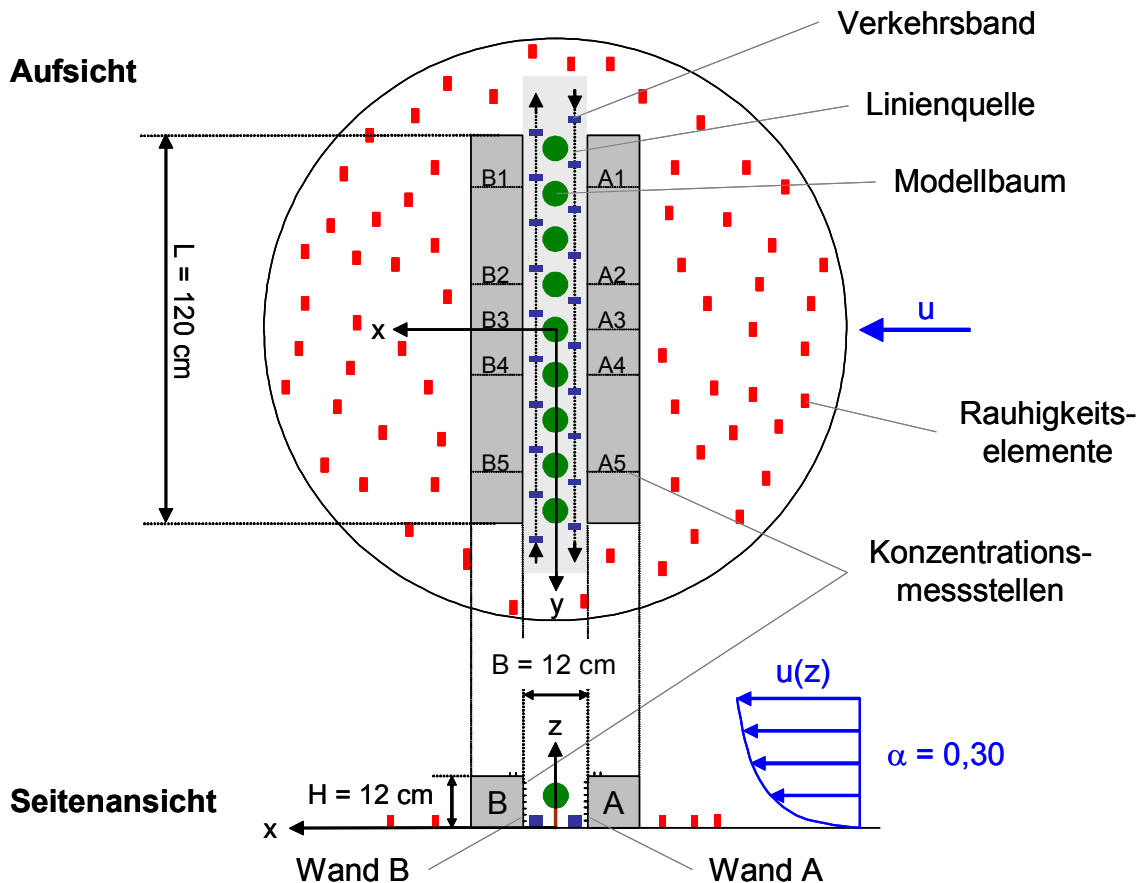


Abb. 1: Modellskizze der innerstädtischen Straßenschlucht

Als dominierende Strömungsphänomene lassen sich bei einer solchen, senkrecht angeströmten Gebäudeanordnung der so genannte Straßenschluchtwirbel (Canyon Vortex) und die Eckenwirbel (Corner Eddies) diskretisieren. Wie in Abb. 2 zu sehen, ist im vorliegenden Fall einer langen Straßenschlucht ($L/W > 7$, s. Kastner-Klein 1999) im mittleren Bereich allein der Canyon Vortex und zu den kreuzungsseitigen Gebäudeflanken hin zunehmend der Corner Eddy für den Luftaustausch wirksam.

Um die Messgenauigkeit der Konzentrationsmessungen einschätzen zu können, werden Wiederholungsmessungen durchgeführt. Die Analyse ergibt für die Wand A eine durch-

schnittliche Abweichung der Messwerte von $m_A = 4,1\%$ und eine Standardabweichung von $\sigma_A = 2\%$. Für die mit geringeren Konzentrationen belastete Wand B betragen die Werte $m_B = 6,4\%$ und $\sigma_B = 5,1\%$. Um im Folgenden eine Konzentrationsänderung ursächlich einer Baumpflanzmaßnahme und nicht der Messungenauigkeit zuordnen zu können wird eine prozentuale Abweichung von $m_i + \sigma_i$, d.h. von $6,1\%$ für Wand A und $11,5\%$ für Wand B, gefordert.

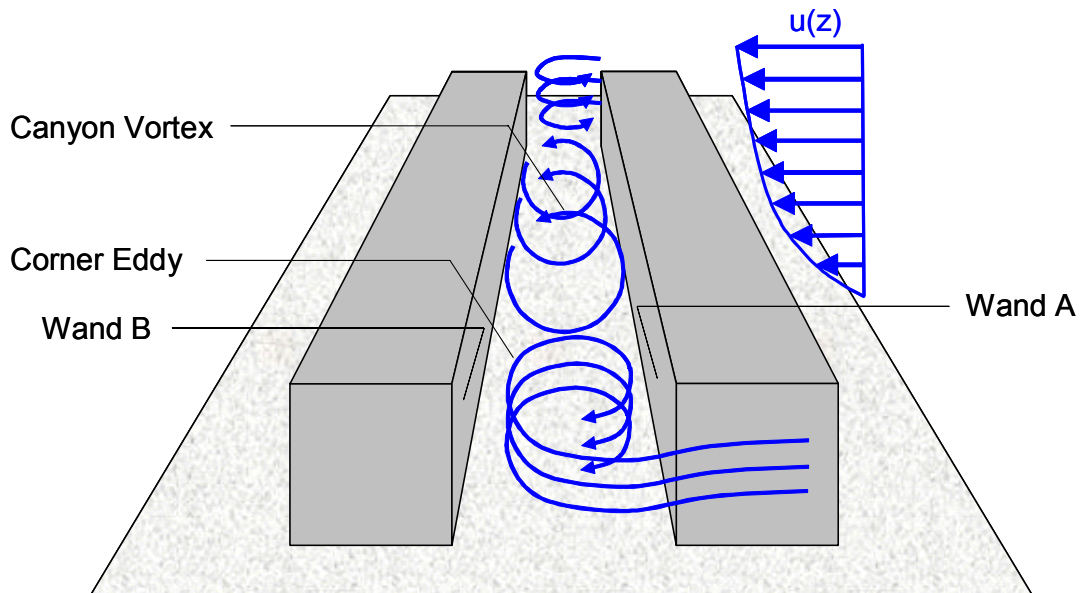


Abb. 2: Strömungsverhältnisse in einer Straßenschlucht

Für die im Windkanalversuch zu simulierende verkehrsinduzierte Turbulenz wird das Ähnlichkeitskriterium von Plate 1982 herangezogen, das auf einer Turbulenzproduktionszahl T_P als Ähnlichkeitskennzahl beruht. Diese Kennzahl gibt das Verhältnis der durch die Kfz-Bewegung generierten Turbulenz P_V zu der Turbulenzproduktion P_W wieder, die durch die Atmosphäre bei der Überströmung der Bebauung hervorgerufen wird. Die Ähnlichkeit zwischen Modell und Natur wird erreicht, wenn die Turbulenzproduktionszahlen T_P für die Natur- und Modellausführung gleich sind, wobei für T_P gilt

$$T_P = P_V/P_W = \frac{\rho c_D u_v^3 n_v F_v}{BH} \bigg/ \frac{\rho c_f u_\delta^3}{H} \quad (1)$$

mit ρ Dichte der Luft, c_D Widerstandsbeiwert der Fahrzeuge, u_v Verkehrsgeschwindigkeit, F_v Frontfläche der Fahrzeuge, n_v Verkehrsdichte, c_f Widerstandsbeiwert der Bebauung, u_δ Windgeschwindigkeit in Grenzschichthöhe, B Breite der Straßenschlucht und H Höhe der Bebauung. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die gesamte kinetische Energie der Kfz-Bewegung in kleinskalige turbulente Luftbewegungen umgesetzt wird.

Übersicht zu den Messungen und Darstellung der Konzentrationsverteilungen

In Tab. 1 ist eine Übersicht über die im Weiteren diskutierten Modellkonfigurationen gegeben. Es handelt es sich jeweils um kugelförmige, impermeable Baumkronen mit Kronendurchmesser K_D und 3 cm freier Stammhöhe, die im gegenseitigen Abstand von 10 cm in der Straßenmitte angebracht wurden. Die beiden Verkehrsfälle „stehender Verkehr“ (OV00) so-

wie „Gegenverkehr mit 40 km/h“ (GV40) bei einer Verkehrsdichte von 10 Kfz/m (entspricht 6,7 Kfz/100 m in Natur) werden simuliert.

K _D [cm] Modell	K _D [m] Natur	Verkehr	Abb.	Besetztes Straßenraum- Volumen [%]	Durchschnitt Wand A		Durchschnitt Wand B	
					absolut [-]	relativ [%]	absolut [-]	relativ [%]
-	-	OV00	3	0	17,2	-	7,3	-
-	-	GV40	4	0	17,3	+0,3	5,8	-20,1
6	9	OV00	5	8,5	19,0	+10,6	6,8	-6,1
6	9	GV40	6	8,5	16,6	-4,0	5,8	-0,3
8	12	OV00	12	20,1	19,1	+11,1	6,7	-8,7
8	12	GV40	12	20,1	18,1	+4,5	5,2	-10,8
10	15	OV00	7	39,4	23,3	+35,5	5,9	-19,7
10	15	GV40	8	39,4	18,7	+8,2	4,7	-19,7

Tab. 1: Übersicht über die Baumkonfigurationen

Die Ergebnisse der Konzentrationsmessungen werden üblicherweise als dimensionslose Konzentrationswerte c^+ gemäß der Formel

$$c^+ = \frac{c_{\text{gem}} u_{\text{ref}} L_{\text{ref}}}{Q_T/l} \quad (2)$$

angegeben. Hierbei sind c_{gem} die gemessene Konzentration, u_{ref} die Windgeschwindigkeit der freien Anströmung in Dachhöhe H , L_{ref} die Dachhöhe H und Q_T/l die Emissionsstärke der Linienquelle.

Der besseren Überschaubarkeit wegen sind jedoch in den nachfolgenden Abbildungen, bis auf die Basisfälle in Abb. 3 und Abb. 4, die Konzentrationswerte als relative Abweichungen zu ihrem Referenzfall (gleiche Modellkonfiguration nur ohne Bäume) in Prozent aufgetragen und die Längenskalen der Wände mit der Dachhöhe H normiert. Die kreuzungsseitigen Randbereiche der Straßenschlucht zwischen $\pm 3,75 < y/H < \pm 5$ sind aufgrund fehlender Messstellen nicht abgebildet. In den nebenstehenden Zahlen in Klammern sind die jeweiligen Wanddurchschnittswerte angegeben (Absolutwerte bei Abb. 3, prozentuale Veränderungen bei Abb. 4-8).

Ergebnisse der Konzentrationsmessungen

Für das Verständnis der Konzentrationsverteilungen in den Abb. 4-8 ist es sehr hilfreich, die Straßenschlucht gedanklich in Abschnitte aufzuteilen. Zum einen in einen mittleren Bereich - hier ist der Canyon Vortex das beherrschende Strömungsphänomen - und zum anderen in die äußeren Bereiche, in denen die Corner Eddies vorherrschen (s. Abb. 2).

In Abb. 3 sind die Konturbilder der dimensionslosen Konzentrationsverteilungen sowohl an der Wand A als auch an der Wand B für den Basisfall mit stehendem Verkehr dargestellt. Die Konzentrationen sind an Wand A ca. um den Faktor 2,5 höher als an der Wand B. Diese Verteilung ist mit dem Wirken des Canyon Vortex und der Corner Eddies zu erklären. Die unbelastete Luft der freien Anströmung überstreicht das Dach des Gebäudes A und gelangt zum Teil in den in der Straßenschlucht rotierenden Canyon Vortex. Vor Wand B erfährt ein

mitbewegtes Luftvolumen eine Abwärtsbewegung, bevor es bei der Rückströmung unmittelbar über der Straße Kontaminationen aus dort freigelassenen Autoabgasen aufammelt.

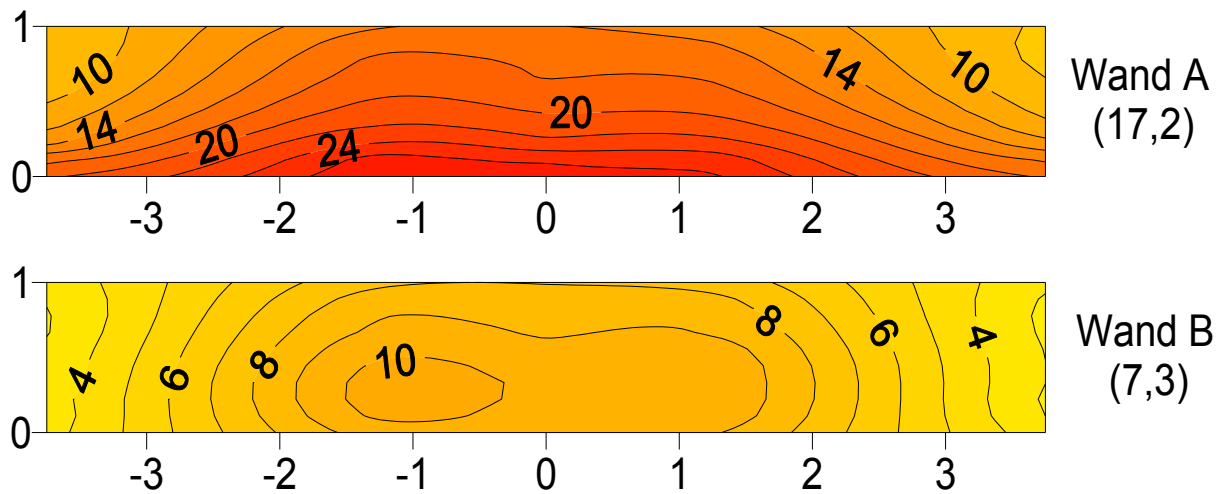


Abb. 3: Konzentrationsverteilung für den Basisfall ohne Bäume und stehender Verkehr

Dieses hoch belastete Luftvolumen erfährt vor Wand A eine Aufwärtsbewegung und vermischt sich im Dachniveau zumindest teilweise mit der Frischluft der Anströmung. Der Konzentrationsabfall zu den kreuzungsseitigen Rändern hin ist mit dem zusätzlichen Agieren der Corner Eddies zu erklären, die ebenfalls ein Lieferant für unbelastete Luft darstellen.

Abb. 4 zeigt die Konzentrationsverteilungen in der gleichen Straßenschluchtkonfiguration wie zuvor nur mit der zusätzlichen Wirkung des fahrenden (Gegen-)Verkehrs. Aufgetragen sind prozentuale Abweichungen zum Referenzfall mit stehendem Verkehr aus Abb. 3.

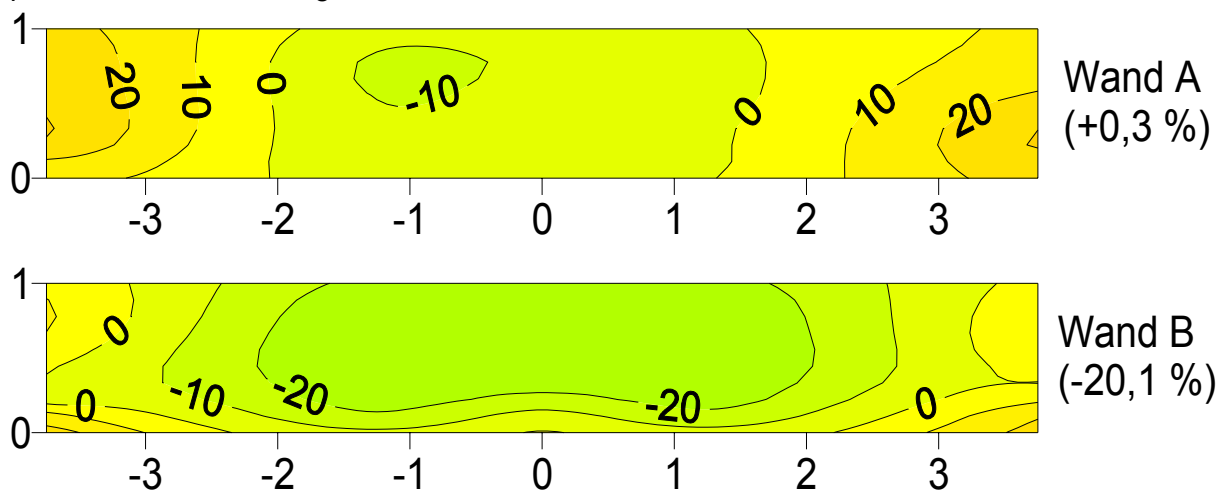


Abb. 4: Relative Konzentrationsänderungen zum Basisfall infolge Verkehrstroms mit 40 km/h (GV40)

Die Wirkung der verkehrsinduzierten Turbulenz zeigt sich in einer Vergleichmäßigung der Konzentrationsverteilungen an beiden Wänden. Höher belastete Luft aus dem Bereich der Schluchtmitte wird zu den Rändern hin transportiert und führt dort zu einem relativen Konzentrationsanstieg, weniger belastete Luft strömt von den Rändern in den Straßenschluchtraum hinein, wodurch die Konzentrationen in der Mitte abfallen. Die Gesamtmenge der Schadstoffkonzentration an Wand A ändert sich mit +0,3 % praktisch nicht, s. Tab. 1.

Der Unterschied in der Konzentrationsverteilung aufgrund einer mittig gepflanzten Baumreihe mit 6 cm Kronedurchmesser (9 m in Natur) und Pflanzabstand von 10 cm (15 m in Natur) wird in Abb. 5 dargestellt. Während in der Straßenschluchtmitte an beiden Wänden nur geringfügige, im Bereich der Messgenauigkeit liegende, Konzentrationsunterschiede zu erkennen sind, ist an den Rändern ein deutlicher Anstieg erkennbar.

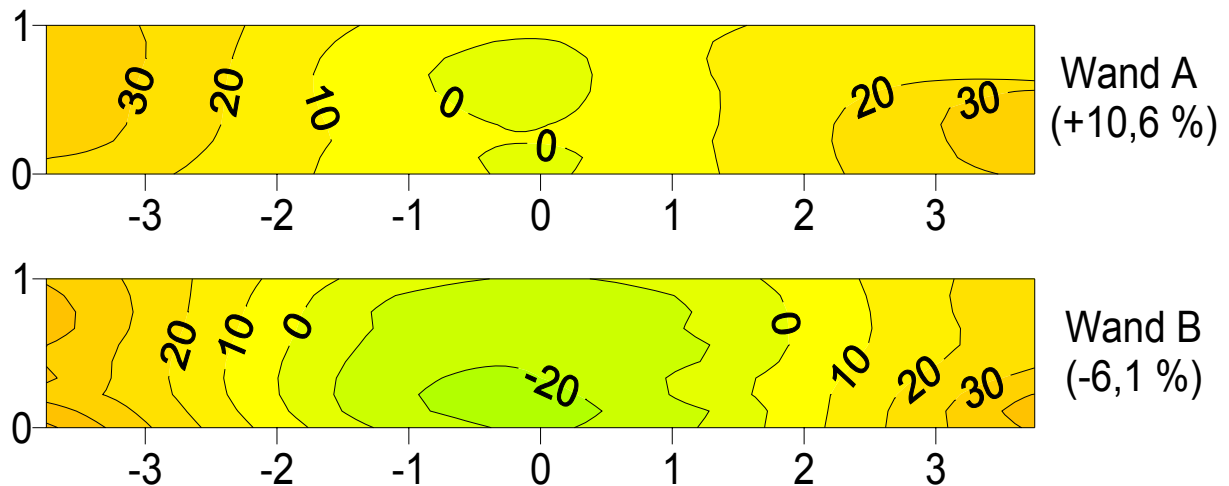


Abb. 5: Baumreihe mit 6 cm Kronendurchmesser, OV00

Dies legt die Vermutung nahe, dass sich im inneren Straßenschluchtraum noch ein Canyon Vortex zwischen den Baumkronen und Häuserwänden bzw. in den freien Räumen zwischen den Bäumen ausbilden kann und für den Luftaustausch sorgt, die seitlichen Corner Eddies aber am Eindringen in den Straßenschluchtraum gehindert werden und somit ein Mechanismus der Frischluftzufuhr in den Straßenrandbereichen unterbunden oder zumindest reduziert wird.

Die Verteilungen für den analogen Fall wie zuvor, jedoch zusätzlich mit fahrendem Gegenverkehr, werden in Abb. 6 dargestellt. Den entsprechenden Referenzfall, auf den sich die prozentualen Abweichungen beziehen, stellt die Straßenschluchtkonfiguration mit Gegenverkehr bei 40 km/h ohne Baumreihe dar.

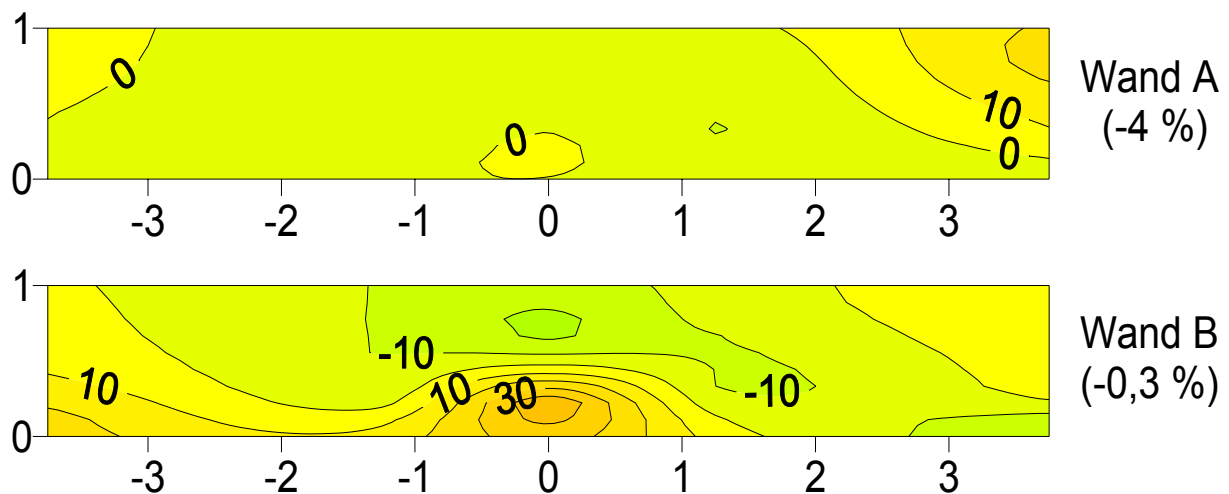


Abb. 6: Baumreihe mit 6 cm Kronendurchmesser, GV40

Der in Abb. 5 erkennbare Konzentrationsanstieg an den Schluchträndern infolge einer Verblockung durch die Baumreihe wird durch die verkehrsinduzierte Turbulenz wieder geschmälert. Die Kfz-Bewegungen mischen die bodennahe Luft durch und heben die Versperkungswirkung der Baumreihe wieder auf, d.h. der negative Einfluss auf die Straßenschluchtbelüftung durch Baumpflanzungen wird mit zunehmender Kfz-induzierter Turbulenz wieder kleiner.

Es folgen die Konzentrationsverteilungen an den Häuserwänden der Straßenschlucht für Modellbäume mit 10 cm (15 m in der Natur) Kronendurchmesser in den Abb. 7 und 8. Die Baumkronen benachbarter Bäume berühren sich hierbei und das Straßenraumvolumen ist zu annähernd 40 % versperrt. Anzumerken ist noch, dass bei dieser Konfiguration im Unter-

schied zu den vorherigen, die Baumkronen mit ihren Wipfeln um 1 cm aus der Straßenschlucht nach oben hinausragen.

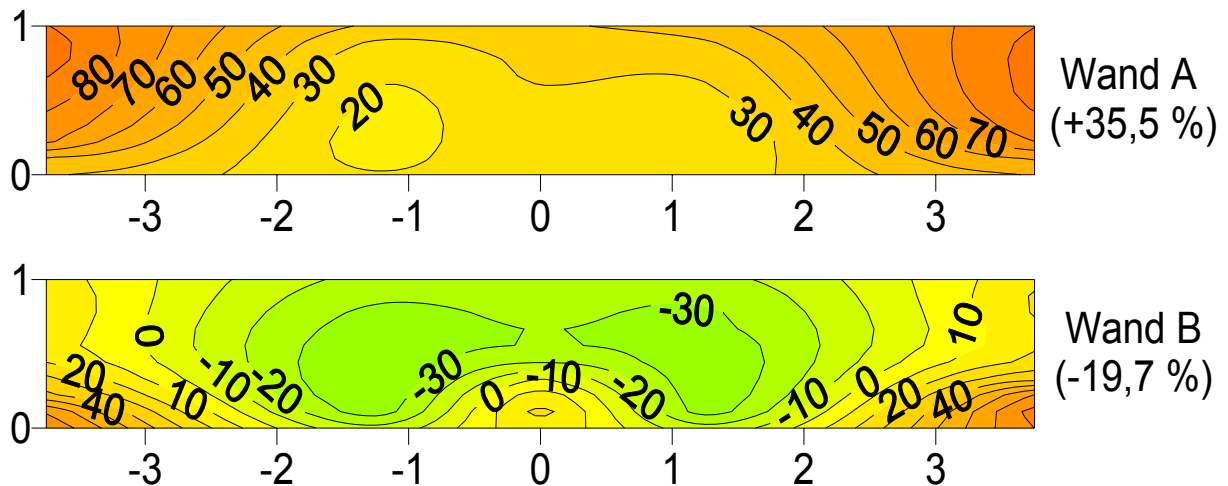


Abb. 7: Baumreihe mit 10 cm Kronendurchmesser, OV00

An der Wand A ist nun auch im mittleren Bereich der Straße ein signifikanter Konzentrationsanstieg zu erkennen, der darauf schließen lässt, dass der vormals dominante und für den Schadstoffabtransport wichtige Canyon Vortex nicht länger existiert bzw. nur noch stark abgeschwächt existiert. Zu den Rändern hin ist ebenfalls wieder eine starke Konzentrationszunahme zu beobachten, die erwartungsgemäß stärker ausfällt als bei kleineren Kronendurchmessern. An der Wand B zeigt sich wieder ein Konzentrationsabfall in Straßenmitte. Dieses zunächst erstaunliche Phänomen lässt sich folgendermaßen erklären: Im Falle einer baumfreien Straßenschlucht werden die Autoabgase vom Canyon Vortex auf seinem Weg von Wand B zu Wand A am Boden über der Straße aufgenommen. Im Dachniveau findet ein teilweiser Luftaustausch zwischen dem im Straßenraum rotierenden Wirbel und der darüber hinweg streichenden unbelasteten Luft aus der Anströmung statt. Die nicht ausgetauschte, im Straßenraum verbleibende belastete Luft wird nun mit dem Canyon Vortex weiter zur Wand B geführt und führt hier zu einer Schadstoffbelastung. Ist der Straßenraum mit ausreichend vielen Baumkronen versperrt, kann sich kein Canyon Vortex ausbilden - allenfalls nur noch rudimentär - und der Transportmechanismus, der die Beimengungen zur Wand B führt, unterbleibt.

Die Konzentrationsmesswerte der gleichen Straßenschluchtkonfiguration jetzt jedoch mit Kfz-Bewegung werden in Abb. 8 dargestellt.

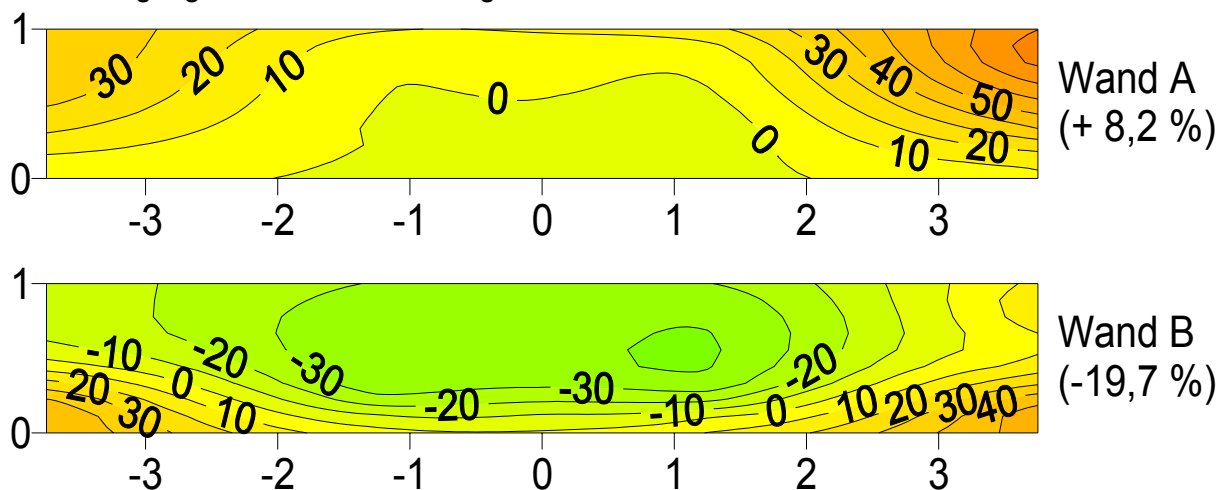


Abb. 8: Baumreihe mit 10 cm Kronendurchmesser, GV40

An der Wand B ist ebenfalls wieder im mittleren Straßenbereich ein deutlicher Rückgang der Konzentrationen registrierbar. Die verkehrsinduzierte Turbulenz scheint die Blockadewirkung der Bäume für den Luftaustausch im Zentrum der unteren Hälfte der Wand A auszugleichen, die Konzentrationen sind sogar etwas geringer. Dies deutete sich auch schon bei den 6 cm Baumkronen in Abb. 6 an. Die Erklärung hierfür könnte darin zu finden sein, dass das durch die Kfz-Bewegung in Turbulenz und Advektion versetzte Luftvolumen aufgrund des zunehmenden Kronenraumvolumens immer geringer wird und somit die Umwälzung und der damit verbundene Luftaustausch besonders effektiv werden.

In Abb. 9 ist der Einfluss der Kfz-Bewegung auf die Konzentrationsverteilung an Wand A für Bäume mit 10 cm Kronendurchmesser aufgezeigt (der Referenzfall ist die Straßenschluchtkonfiguration mit 10 cm Baumkronendurchmesser ohne fahrenden Verkehr).

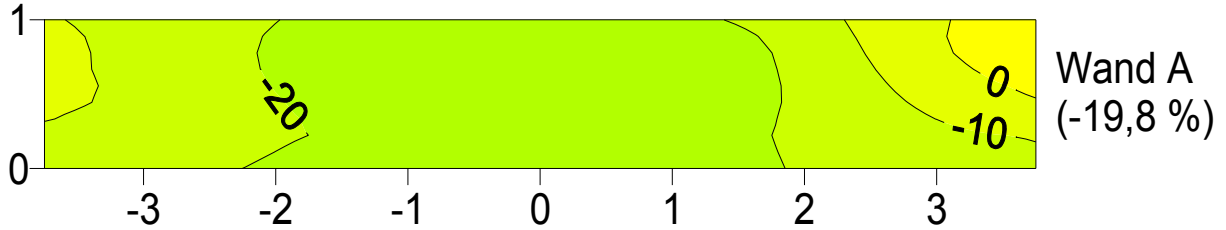


Abb. 9: Einfluss der Kfz-Bewegung bei 10 cm Kronendurchmesser

Dieser Einfluss ist am stärksten in der Straßenmitte wirksam. Er ist in Gegenwart von Bäumen stärker ausgeprägt als im vergleichbaren Fall ohne Baumanordnung (s. Abb. 4, Wand A) und unterstützt die bereits oben geäußerte Vermutung einer effektiveren Lüftungswirkung der vom Kfz-Verkehr induzierten Turbulenz in Gegenwart von Bäumen.

Das Strömungsfeld am Ende der Straßenschlucht

Die Horizontalkomponenten der parallel zur Straßenlängsachse in der äußersten vertikalen Straßenschluchtebene bei $y/H = \pm 5$ vorherrschenden mittleren Windgeschwindigkeiten sind für den Basisfall ohne Bäume und für den Fall größter Straßenraumversperrung mit 10 cm Kronendurchmesser, jeweils bei stehendem Verkehr, in Abb. 10 zu sehen. Die in den Straßenschluchtraum hineinströmende unbelastete Luft ist hierbei positiv aufgetragen.

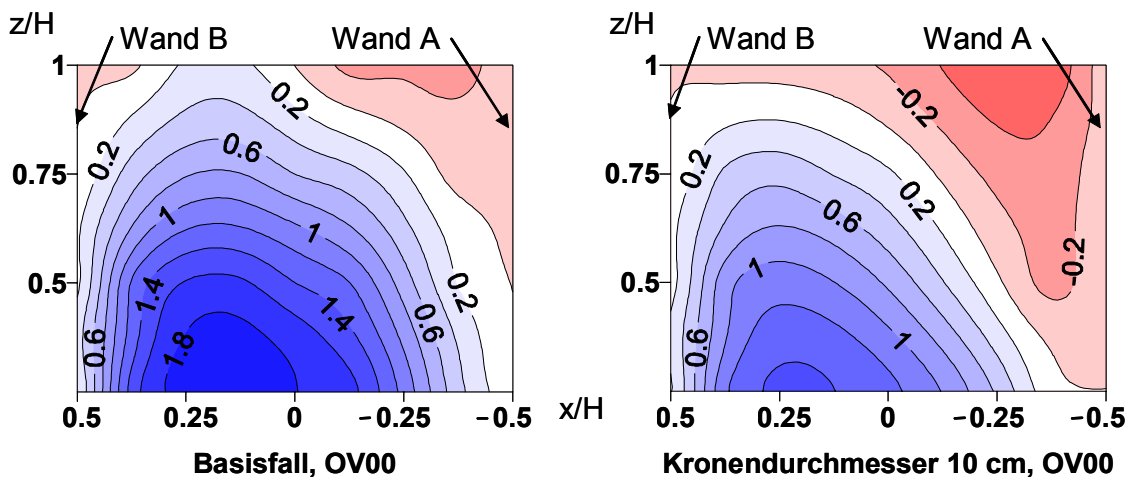


Abb. 10: v-Komponente [m/s] des Strömungsfeldes am Straßenschluchtrand

In diesen beiden Bildern ist die unterschiedliche Stärke des im Straßenrandbereich für die Frischluftzufuhr so wichtigen Corner Eddy's ersichtlich. Die unbelastete Luft der freien An-

strömung löst an den Kanten des luvseitigen Gebäudes A ab und dringt überwiegend leicht außermittig zur Wand B versetzt in den Straßenraum ein (s. Abb. 2). Für die baumfreie Straße sind die Komponenten der Horizontalgeschwindigkeiten des eindringenden Windes ebenso wie die von ihm durchströmte Fläche deutlich größer.

In Abb. 11 sind die aufintegrierten Netto- bzw. Brutto-Volumenströme des Zuflusses durch die seitliche Ebene für diverse Baumkronengrößen aufgetragen über dem besetzten Straßenraumvolumen abgebildet. Eine stetige Verminderung des Luftaustausches durch die zunehmend blockierten Corner Eddies bei ansteigendem Besetzungsgrad ist erkennbar. Somit ist die bereits zuvor in der Diskussion der Konzentrationswerte aufgestellte These, dass eine Behinderung der Corner Eddies zu geringerem Luftaustausch führt, bestätigt worden.

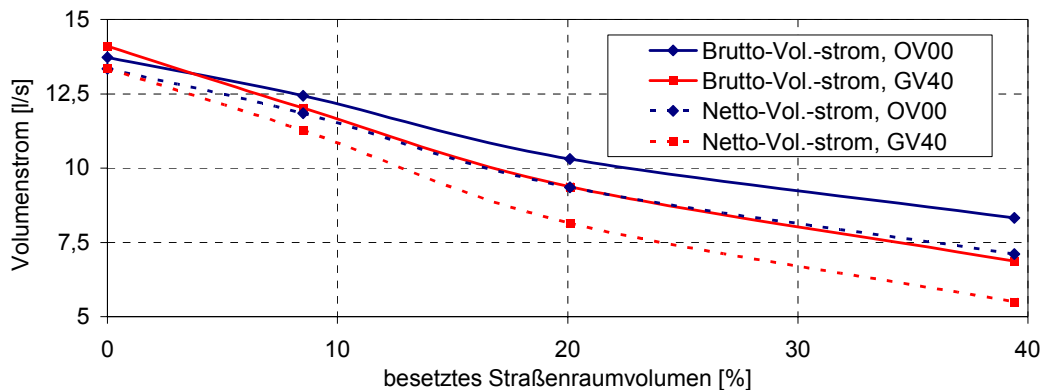


Abb. 11: Volumenströme des Zuflusses durch die äußerste vertikale Straßenschluchtebene

Abschließende Zusammenfassung

Die maximalen Abgaskonzentrationen treten sowohl für baumbepflanzte als auch für baumfreie Straßenschluchten an der Wand A der Straßenschlucht in Mitte der Straßenschluchtlänge auf. Der Einfluss einer Baumreihe zeigt sich besonders deutlich in einem zunehmenden Anstieg der gemessenen Konzentrationswerte zu den äußeren Enden der Straßenschlucht hin. Die Versperrung des Straßenschluchtvolumens durch Bäume führt offensichtlich dazu, dass die Abgase vermehrt über die Seitenquerschnitte der Schlucht abgeführt werden. Mit zunehmendem Kronendurchmesser, d.h. mit zunehmender Einnahme des Straßenraumvolumens zwischen den Häuserreihen durch Baumkronen, wird der Einfluss der Baumanordnung auf das Konzentrationsfeld in der Straßenschlucht größer (s. Abb12). Im Bereich der Mitte der Straßenschluchtlänge ist im Vergleich zum baumfreien Referenzfall ein Konzentrationsanstieg an der Wand A und eine Konzentrationsabnahme im oberen Teil der Wand B zu beobachten. Die verkehrsinduzierte Turbulenz durch Gegenverkehr führt zu einer Vergleichmäßigung und einer durchschnittlich geringeren Konzentrationsbelastung an den Häuserwänden.

Die für die Hauswände A und B gemittelten absoluten dimensionslosen Konzentrationswerte entsprechend den zuvor besprochenen Baum- und Verkehrskonfigurationen sind zusammenfassend im Diagramm der Abbildung 12 dargestellt. Für die Wand A ist ein Anstieg der mittleren Schadstoffbelastung mit zunehmend besetztem Straßenraumvolumen ablesbar (die leichte Konzentrationsabnahme im Verkehrsfall GV40 liegt im Bereich der Messgenauigkeit). Der Anstieg ist für den Fall stehender Verkehr OV00 wesentlich stärker ausgeprägt und nimmt bei großen Kronenvolumina, also großem Versperrungsgrad, progressiv zu. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass mittig gepflanzte Bäume mit kleinen Kronen den Luftaustausch innerhalb der Straßenschlucht nur geringfügig behindern und somit aus stadtplanerischer Perspektive im Hinblick auf das Wohlbefinden und die Gesundheit der Anwohner zu

bevorzugen sind. An der Wand B ist sogar ein stetiger Konzentrationsabfall mit zunehmendem Kronenvolumen erkennbar. Bei diesem Diagramm ist allerdings zu beachten, dass es sich um gemittelte Werte für die gesamte Hauswand handelt und durchaus lokal begrenzte Bereiche mit erhöhten Belastungen auftreten. Die Wirkung der turbulenz erzeugenden Verkehrsbewegung führt im Vergleich zum stehenden Verkehr in allen Fällen zu Konzentrationsabnahmen.

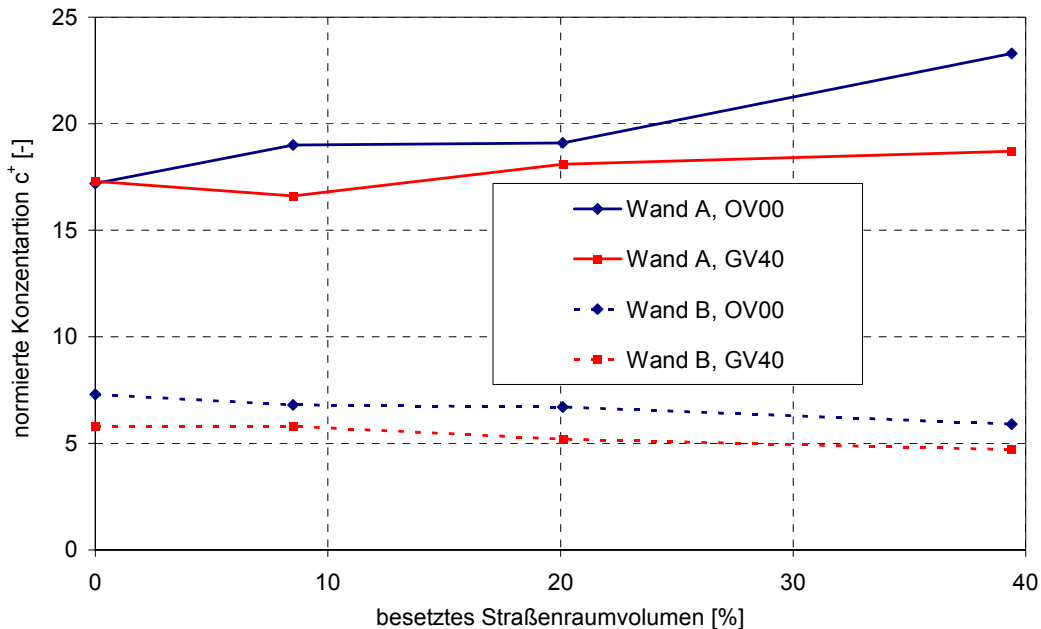


Abb. 12: Verlauf der normierten Konzentrationen an den Wänden A und B

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die finanzielle Unterstützung dieses Projektes.

Literatur

- Ahmad, K., Khare, M. Chaudhry, K.K., 2005: Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections - a review, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 93, pp. 697-717
- Gayev, Y.A., Savory, E., 1999: Influence of street obstructions on flow processes within urban canyons, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 82, pp. 89-103
- Gromke, C., Ruck, B., 2005: Die Simulation atmosphärischer Grenzschichten in Windkanälen, Proc. 13. GALA Fachtagung: Lasermethoden in der Strömungsmechanik, Cottbus, pp. 51-1 - 51-8
- Kastner-Klein, P., 1999: Experimentelle Untersuchungen der strömungsmechanischen Transportvorgänge in Straßenschluchten, Dissertation Universität Karlsruhe, Institut für Hydromechanik, Heft 1999/2
- Kastner-Klein, P. Fedorovich, E., Rotach, M.W., 2001: A wind tunnel study of organised and turbulent air motions in urban street canyons, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 89, pp. 849-861
- Meroney, R., Pavageau, M., Rafailidis, S. Schatzmann, M., 1996: Study of line source characteristics for 2-D physical modelling of pollutant dispersion in street canyons, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 62, pp. 279-290
- Plate, E., 1982: Windkanalmodellierung von Ausbreitungsvorgängen in Stadtgebieten, Kolloquiumsbericht: Abgasbelastungen durch den Kraftfahrzeugverkehr, Verlag TÜV Rheinland GmbH, pp. 61-83
- Ries, K., Eichhorn, J., 2001: Simulation of effects of vegetation on the dispersion of pollutants in street canyons, *Meteorologische Zeitschrift* Vol. 10, No. 4, pp. 229-233