

Numerische Simulation der räumlichen und zeitlichen Verteilung gas- und partikelförmiger Luftbeimengungen im Nahbereich von Autobahnen

D. Bäumer, B. Vogel, F. Fiedler, IMK

Einleitung

Der Kraftfahrzeugverkehr stellt nach wie vor eine wesentliche Quelle für schädliche Luftbeimengungen dar. Neben den gasförmigen Emissionen werden als Folge der Verbrennungsprozesse auch Partikel wie z.B. Ruß direkt in die Atmosphäre emittiert. Durch Abriebprozesse an Reifen und Bremsen und durch Aufwirbelungen von Straßenstaub werden ebenfalls Partikelemissionen hervorgerufen. Als Folge der gasförmigen Emissionen können sich Produkte wie Photooxidantien bilden, zu deren prominentesten Vertretern das bodennahe Ozon gehört. Auch so genannte Sekundärpartikel können als Folge der gasförmigen Emissionen entstehen.

Um die Immissionskonzentrationen im Lee einer Autobahn quantifizieren und prognostizieren zu können, sind numerische Simulationen erforderlich. Die numerischen Modelle, die zur Beschreibung der Konzentrationsverteilungen im Nahfeld der Verkehrswege herangezogen werden, müssen neben der atmosphärischen Turbulenz auch die zusätzliche Turbulenz berücksichtigen, die durch den Kraftfahrzeugverkehr hervorgerufen wird. Solche Parametrisierungen existieren bisher nur in stark vereinfachter Form. Basierend auf Messungen, die federführend vom Forschungszentrum unter Beteiligung nationaler und internationaler Messgruppen durchgeführt wurden [1], konnte eine neue Parametrisierung der kraftfahrzeuginduzierten Turbulenz entwickelt und in das Modellsystem KAMM/DRAIS [2, 3] integriert werden.

Durch Vergleich von simulierten mit gemessenen Konzentrationsverteilungen lässt sich die Güte der neuen Parametrisierung überprüfen. Mit dem so verbesserten Modell soll der Frage nachgegangen

werden, wie die durch die Fahrzeuge hervorgerufene Turbulenz die Konzentrationsverteilungen von gas- und partikelförmigen Luftbeimengungen im Nahbereich einer Autobahn beeinflusst.

Die Parametrisierung der autobahninduzierten Turbulenz

Für die Simulationen der räumlichen und zeitlichen Verteilung von Luftbeimengungen im Nahfeld eines Autobahnabschnittes wurde das oben erwähnte Modellsystem KAMM/DRAIS verwendet. Dabei wird die Diffusionsgleichung in zweidimensionaler Form numerisch gelöst:

$$\frac{\partial \bar{c}_i}{\partial t} = -\bar{u} \frac{\partial \bar{c}_i}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} K_{xx} \frac{\partial \bar{c}_i}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} K_{zz} \frac{\partial \bar{c}_i}{\partial z} + \bar{P}_i + \bar{L}_i + (\bar{Q}_i) \quad (1)$$

Darin bezeichnet c_i die Konzentration einer Substanz i , u die straßen-senkrechte Windkomponente, P_i und L_i Produktion und Verlust durch chemische Umwandlungen und Q_i die Emissionen. Die Querstriche kennzeichnen ein zeitliches Mittel. Die horizontalen Diffusionskoeffizienten K_{xx} und die vertikalen Diffusionskoeffizienten K_{zz} setzen sich dabei aus einem atmosphärischen (Atm) und einem autobahninduzierten Anteil (AB) zusammen:

$$\begin{aligned} K_{xx} &= K_{xx, \text{Atm}} + K_{xx, \text{AB}} \\ K_{zz} &= K_{zz, \text{Atm}} + K_{zz, \text{AB}} \end{aligned} \quad (2)$$

Für die Parametrisierung der autobahninduzierten Diffusionskoeffizienten wird von einer Gleichung ausgegangen, die die zeitliche und räumliche Entwicklung der turbulenten kinetischen Energie e beschreibt.

$$\frac{\partial \bar{e}}{\partial t} = -\bar{u} \frac{\partial \bar{e}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} K_{xx} \frac{\partial \bar{e}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} K_{zz} \frac{\partial \bar{e}}{\partial z} + \bar{P}_V + \bar{P}_D - \epsilon \quad (3)$$

\bar{P}_V ist die Produktion der turbulenten kinetischen Energie durch den Verkehr, \bar{P}_D ist die Produktion durch das Strömungshindernis, welches der Damm, auf dem die Strasse verläuft, darstellt. ϵ ist die Energiedissipation. Für die Produktionsterme und die Energiedissipation wurden folgende Parametrisierungen entwickelt.

$$\bar{P}_V = \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot W \cdot H \cdot V^2 \cdot F \quad (4)$$

$$\bar{P}_D = \frac{1}{2} \cdot c_{d,D} \cdot H_D \cdot u^3 \quad (5)$$

$$\epsilon = 0.1 \cdot \frac{\bar{e}^{1.5}}{H} \quad (6)$$

c_d ist der Widerstandsbeiwert (0.3 für PKW, 0.9 für LKW), W die Breite (1.8 m, 2.4 m), H die Höhe (1.4 m, 3.5 m) und V ist die Geschwindigkeit (33 m s^{-1} , 22 m s^{-1}) der Fahrzeuge. F ist die zeitlich variierende Verkehrsstärke. $c_{d,D}$ ist der Widerstandsbeiwert (0.12) und H_D die Höhe des Fahrdammes (1.0 m). Gleichung (3) wird numerisch integriert. Aus der berechneten Verteilung der turbulenten kinetischen Energie werden schließlich die Diffusionskoeffizienten $K_{xx,AB}$ und $K_{zz,AB}$ wie folgt bestimmt:

$$\begin{aligned} K_{xx,AB} &= W \cdot \bar{e}^{1/2} \\ K_{zz,AB} &= H \cdot \bar{e}^{1/2} \end{aligned} \quad (7)$$

$K_{xx,Atm}$ und $K_{zz,Atm}$ werden mit Parameterisierungen berechnet, welche quellentfernungsabhängige

Diffusionskoeffizienten liefern. Dies trägt der in Abb. 1 skizzierten Tatsache Rechnung, dass mit zunehmendem Abstand immer größere Wirbel aus dem atmosphärischen Turbulenzspektrum zur Verdünnung der auf der Straße emittierten Luftbeimengungen beitragen [4,5]. Neben dem Abstand von der Quelle hängen die Diffusionskoeffizienten $K_{xx,Atm}$ und $K_{zz,Atm}$ auch von der atmosphärischen Temperaturschichtung und von der Windscherung ab.

Vergleiche von Modellergebnissen mit Messungen

Während der Messkampagne BABII an der Autobahn Mannheim-Heidelberg wurden neben den Konzentrationsmessungen

von gas- und partikelförmigen Luftbeimengungen auch Turbulenzmessungen auf beiden Seiten der Autobahn durchgeführt. Die Messstellen sind in Abb. 2 skizziert. Die Autobahn verläuft in Höhe der Messstellen auf einer größeren Strecke geradlinig, so dass man von zweidimensionalen Verhältnissen ausgehen kann. Abb. 3 zeigt zum einen die gemessene Differenz der normierten Turbulenzenergie für die Daten der Messstellen 1 und 2. In diese Kurve flossen die Messdaten sämtlicher Wochentage ein. Während der verkehrssamen Zeit zwischen 22 Uhr und 5 Uhr ist die Energiedifferenz nahezu konstant, aber signifikant von Null verschieden. Dies ist auf die Turbulenzproduktion infolge der Dammüberströmung zurückzuführen. Abb. 3

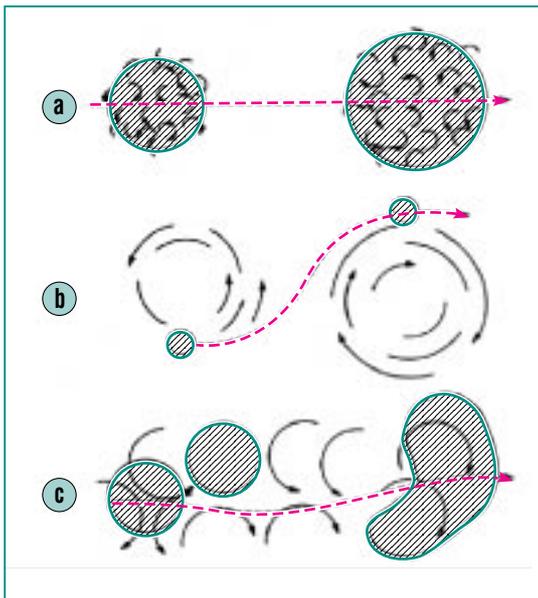


Abb. 1: Nur atmosphärische Wirbel, deren Durchmesser kleiner als die Ausdehnung einer betrachteten Luftbeimengungswolke sind, können zur Verdünnung der Luftbeimengung beitragen (a, c). Größere Wirbel bewirken lediglich eine Verlagerung der Luftbeimengungswolke (b).

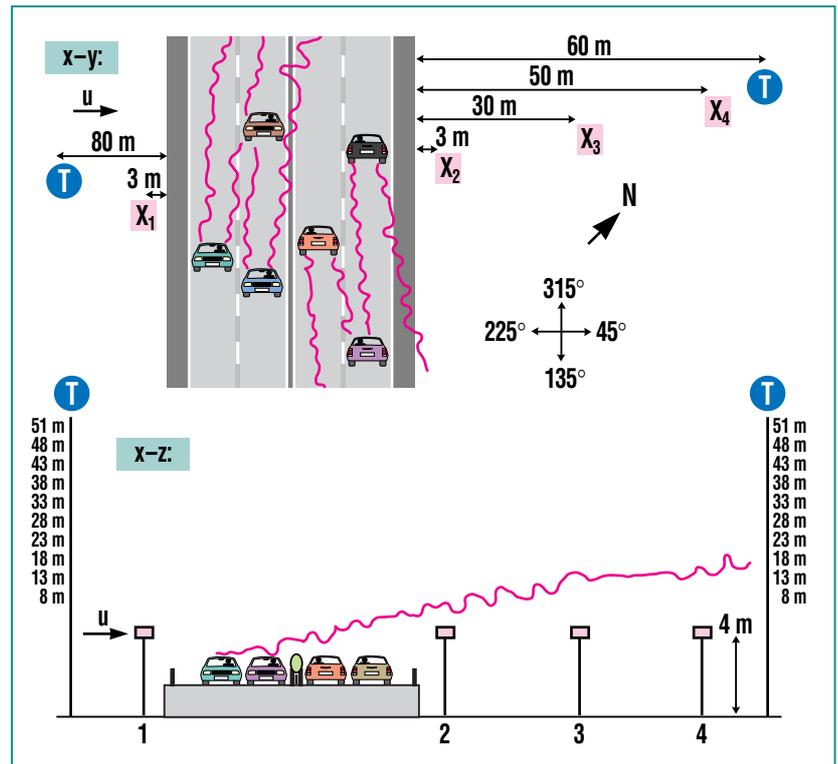


Abb. 2: Der Messaufbau für Konzentrations- und Turbulenzmessungen an der Autobahn.

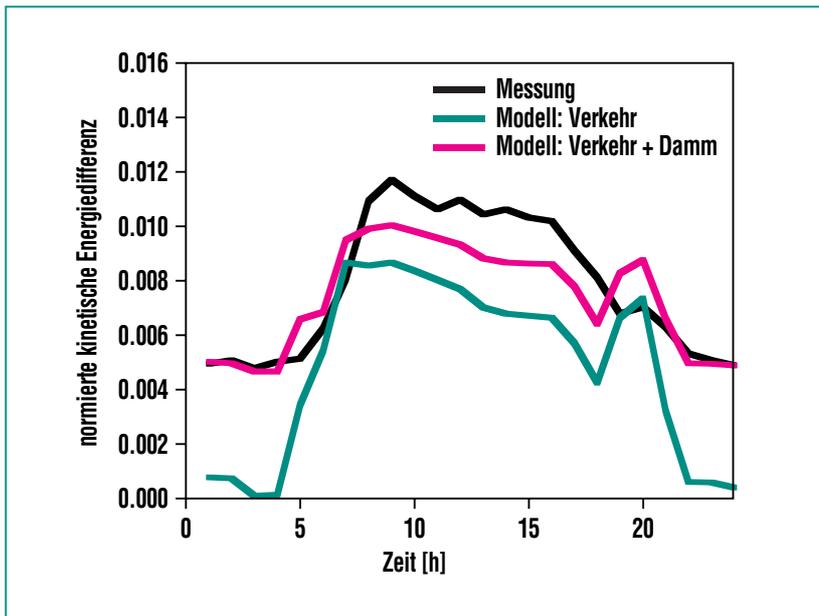


Abb. 3: Mittlerer Tagesgang der Differenz der an Mast 1 und Mast 2 gemessenen normierten turbulenten kinetischen Energie an Wochentagen.

zeigt zum anderen auch die simulierte Differenz der normierten turbulenten kinetischen Energie gemäß Gleichung 3 und zwar zuerst die Turbulenzproduktion durch den Verkehr alleine (Gleichung 4) und dann die Turbulenzproduktion durch Verkehr und Dammüberströmung (Gleichung 5) zusammen. Bei Berücksichtigung beider Turbulenzbeiträge stimmen die simulierten Werte recht gut mit den Beobachtungen überein.

Die Auswirkung der autobahninduzierten Turbulenz auf die Konzentrationsverteilungen

Unter Vorgabe von Emissionsdaten, die speziell für den betrachteten Autobahnabschnitt bestimmt wurden, wobei neben Emissionsfaktoren auch die gemessenen Ver-

kehrsstärken und Geschwindigkeiten sowie die beobachtete Flottenzusammensetzung einfließen [6], wurden Ausbreitungsrechnungen

durchgeführt. Abb. 4 zeigt die simulierten und die gemessenen Vertikalprofile der Konzentrationsdifferenz von Kohlenmonoxid (CO). Die Konzentrationsmessungen wurden an den in Abb. 2 mit T bezeichneten Messtürmen gewonnen. Es wurden drei Simulationen durchgeführt. Bei der ersten wurden sowohl die durch den Verkehr als auch die durch die Dammüberströmung erzeugte Turbulenz vernachlässigt, bei den beiden anderen wurden diese Terme nach und nach hinzugezogen. Im ersten Fall ist die simulierte Fahnenhöhe mit 12 m deutlich zu niedrig, die simulierten Konzentrationen sind viel zu hoch. Die Parametrisierung der fahrzeuginduzierten Turbulenz führt zu einer wesentlich größeren vertikalen Durchmischung und dadurch zu einem Ansteigen der Fahnenhöhe. Die geringste Abweichung weist die Simulation mit der kompletten Parametrisierung der autobahninduzierten Turbulenz auf.

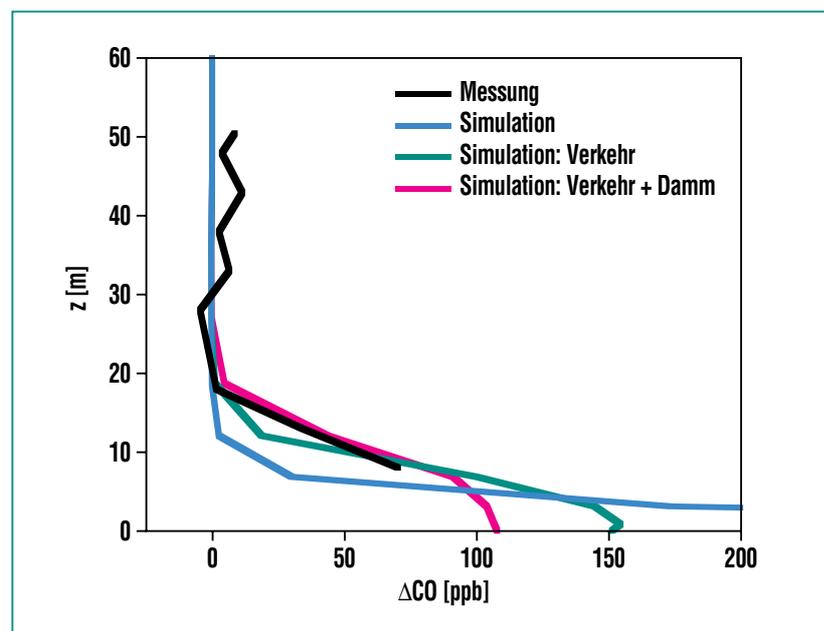


Abb. 4: Simuliertes und gemessenes Vertikalprofil der CO-Differenz (Lee-Luv) am 16.05.2001 um 6:00 Uhr.

Während CO auf der betrachteten Skala als ein nahezu inertes Gas angesehen werden kann, trifft dies für Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) nicht zu. Kraftfahrzeuge emittieren im Wesentlichen NO, welches dann im Laufe des Ausbreitungsvorganges bei Vorhandensein von Ozon in NO₂ umgewandelt wird. Das Verhältnis der direkten Emissionen von NO zu denen von NO₂ ist 9:1. Wie schnell die Umwandlung im Nahbereich der Straße vonstatten geht, ist unter anderem deshalb von Interesse, weil NO₂ erheblich wasserlöslicher ist als NO und daher eher in der Lunge aufgenommen wird. Abb. 5 zeigt die simulierten horizontalen Konzentrationsverteilungen von NO und NO₂ um 13 Uhr in 0.8 m Höhe. Die chemische Umwandlung von NO in NO₂ zeigt sich in einem rascheren Abfall der NO Konzentration mit zunehmendem Abstand von der Straße. Bei Vernachlässigung der autobahninduzierten Turbulenz ergeben sich deutlich höhere Konzentrationen von NO

und NO₂ im Nahbereich der Straße. Dies unterstreicht erneut die Notwendigkeit der Berücksichtigung der autobahninduzierten Turbulenz in Ausbreitungsmodellen.

Durch Abriebprozesse an Reifen, Bremsen und dem Straßenbelag und durch Aufwirbelungen von Straßenstaub werden Partikelemissionen hervorgerufen. Die Durchmesser der auf diese Weise erzeugten Partikel erstrecken sich über einen Größenbereich von D = 1 bis 100 µm. Die unterschiedliche Größe der Partikel bedingt unterschiedliche Sedimentationsgeschwindigkeiten und somit auch unterschiedliche Reichweiten. Um zu quantifizieren, wie sich die Größenverteilung der auf einer Straße emittierten Partikel mit zunehmendem Abstand von der Straße verändert und wie diese Veränderung durch die autobahninduzierte Turbulenz beeinflusst wird, wurden ebenfalls numerische Simulationen durchgeführt. Die Koagulation der Partikel

untereinander wurde bei den Simulationen vernachlässigt. Diese Annahme ist auf Grund der zu erwartenden geringen Teilchenzahl-dichten gerechtfertigt.

Die Abb. 6 zeigt simulierte Größenverteilungen der Massendichte grober Partikel um 13 Uhr in 50 m Abstand im Lee der Autobahn. Dargestellt sind die Ergebnisse in den Höhen 0.8 und 3.0 m und zwar zum einen unter Vernachlässigung und zum anderen bei Berücksichtigung der autobahninduzierten Turbulenz. Es fällt auf, dass in beiden Höhen ein Bereich existiert, in dem sich die autobahninduzierte Turbulenz unterschiedlich auf die Massendichten auswirkt. Bei Partikeldurchmessern von 20 bzw. von 40 µm wirkt sich die autobahninduzierte Turbulenz nicht auf die Massendichte aus. Bei größeren Partikeln erzeugt die autobahninduzierte Turbulenz eine Erhöhung der Massendichten. Dies liegt darin begründet, dass im Quellbereich die Partikel in größere Höhen

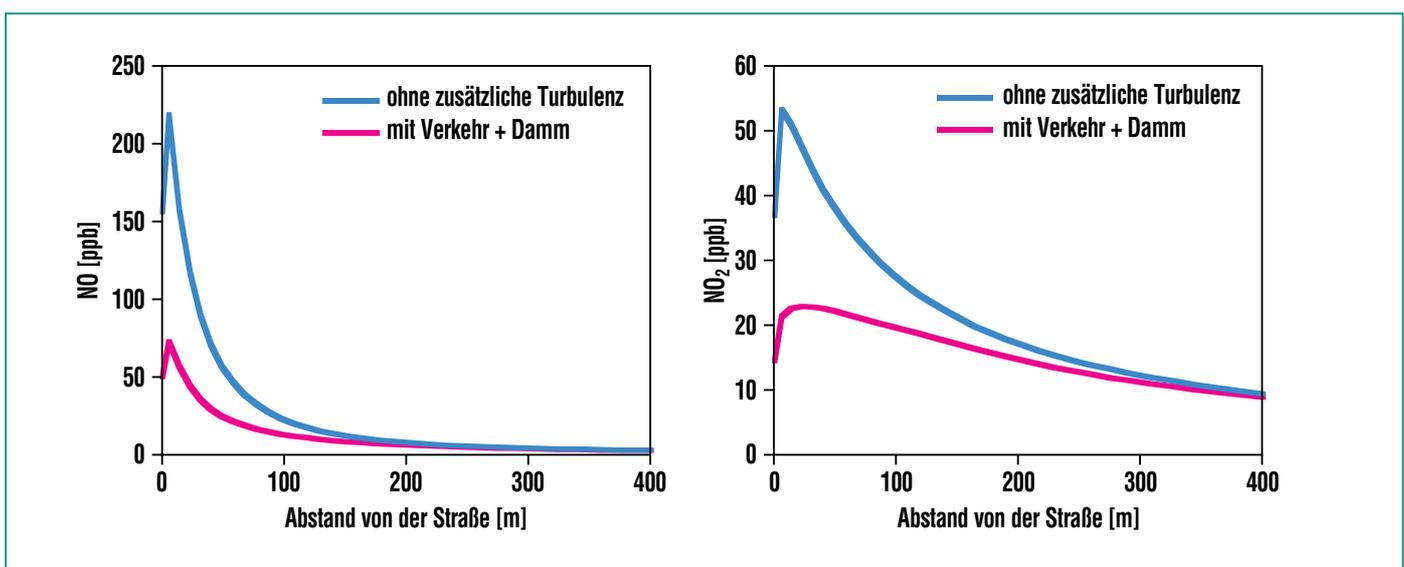


Abb. 5: Simulierter Konzentrationsverlauf in 0.8 m über Grund um 13 Uhr für NO (links) und NO₂(rechts).

transportiert werden. Dadurch erhöht sich die Reichweite der Partikel.

Zusammenfassung

Es wurde eine neue Parametrisierung entwickelt, die es ermöglicht, die durch den Verkehr bzw. durch den Straßendamm hervorgerufene zusätzliche Turbulenz in einem numerischen Ausbreitungsmodell zu berücksichtigen. Mit Hilfe von Messungen im Nahbereich einer Autobahn wurde das Modell überprüft. Mit dem so erweiterten Ausbreitungsmodell wurden die Konzentrationsverteilungen von gas- und partikelförmigen Luftbeimengungen im Nahbereich einer Autobahn berechnet. Ein Vergleich mit gemessenen Konzentrationsverteilungen zeigte die Güte der neuen Parametrisierung. Simula-

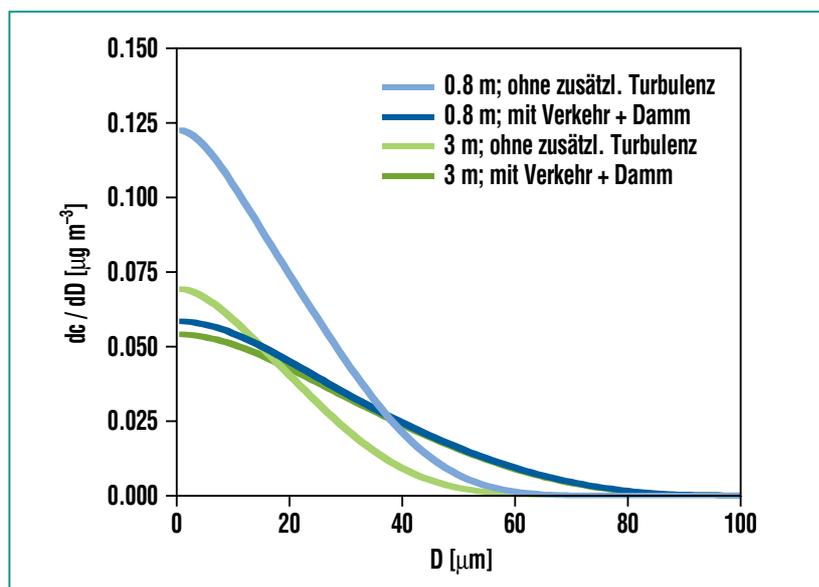


Abb. 6: Simulierte Größenverteilung der Partikel um 13 Uhr in 50 m Quellentfernung.

tionen, die unter Vernachlässigung der autobahninduzierten Turbulenz durchgeführt wurden,

unterstrichen deren Bedeutung für die im Nahbereich der Straße auftretenden Konzentrationen.

Literatur

- | | | |
|--|--|--|
| [1] U. Corsmeier, M. Kohler, B. Vogel, F. Fiedler, <i>vorliegende Ausgabe der Nachrichten.</i> | [3] Bäume, <i>Dissertation, Inst. Meteorol. Klimaforsch., Univ. Karlsruhe, 2002.</i> | [5] C. Keil, <i>Diplomarbeit, Inst. Meteorol. Klimaforsch., Univ. Karlsruhe, 1996.</i> |
| [2] B. Vogel, F. Fiedler, H. Vogel, <i>J. Geophys. Res., 100, 22907-22928, 1995.</i> | [4] G. Degrazia, <i>Dissertation, Inst. Meteorol. Klimaforsch., Univ. Karlsruhe, 1988.</i> | [6] J. Kühlwein, <i>Projektbericht, IER, Univ. Stuttgart, 2002.</i> |