

Philipp Lodomez, Eberhard Rosenthal, Wolfgang Büscher und Bernd Diekmann

Tracerpartikel für die Validierung von Aerosolimmissionsprognosen

In Genehmigungsverfahren gewinnt die Immissionsprognostik der zu erwartenden Aerosolzusatzbelastung im Umfeld von Tierhaltungsanlagen eine immer größere Bedeutung. Dabei kommen häufig Ausbreitungssimulationen zur Anwendung, deren zugrunde liegende Algorithmen das Geschehen nur unzureichend nachbilden. Eine dynamische Ausbreitungssimulation auf Basis der Navier-Stokes-Gleichungen wurde entwickelt und in einer Validierungsmessung mit gutem Erfolg überprüft. Das Verfahren der Ausbreitungssimulation und Validierung sowie die Ergebnisse der Freilandmessung werden in diesem Artikel vorgestellt.

Schlüsselwörter

Ausbreitungssimulation, Validierung, Aerosol, Transmission, Immission

Keywords

Dispersion modelling, validation, aerosol, transmission, immission

Abstract

Lodomez, Philipp; Rosenthal, Eberhard; Büscher, Wolfgang and Diekmann, Bernd

Tracer particles for the validation of aerosol immission predictions

Landtechnik 65 (2010), no. 3, pp. 213-216, 4 figures, 6 references

In approval procedures the prediction of the expected additional load of aerosols in the vicinity of livestock facilities gets more and more important. Dispersion models used for this purpose and the underlying algorithms reproduce insufficiently the natural conditions. A dynamic dispersion model based on the solution of the Navier-Stokes-equation was developed and successfully evaluated in a field survey. The course of the dispersion modelling and the results of the field survey are presented.

Bestehende Ausbreitungssimulationen stoßen in strukturierten, landwirtschaftlich geprägten Räumen häufig an ihre Grenzen. Um auch kleine Verwirbelungen der Luft bei der Umströmung von Gebäuden und Landschaftselementen berücksichtigen

zu können, kommen deshalb immer häufiger dynamische Ausbreitungsmodelle zum Einsatz. Ein solches Modell ist STAR3D. Es wurde am Physikalischen Institut der Universität Bonn in der Arbeitsgruppe Energie und Umwelphysik in Kooperation mit dem Institut für Landtechnik entwickelt. Um die von STAR3D gemachten Vorhersagen überprüfen zu können, müssen Validierungsmessungen durchgeführt werden. Die Schwierigkeit dabei ist: Die bisher üblichen, auf Tracergasen basierenden Verfahren können bei der Ausbreitungssimulation von Stäuben nicht verwendet werden. Dies liegt darin begründet, dass besonders aerosolspezifische physikalische Eigenschaften mit diesen Verfahren nicht überprüft werden können. Daher wurde ein neues Verfahren entwickelt, das auf dem Einsatz eines Traceraerosols basiert.

Ausbreitungssimulation

Das entwickelte Ausbreitungsmodell STAR3D (Simulated Transmission of Aerosols in 3 Dimensions) zeichnet sich durch die Aufteilung der Simulation des Ausbreitungsgeschehens in zwei Schritte aus. Im ersten Schritt wird das Fluidfeld mit NaSt3D berechnet; es ist für den Transport der Aerosolpartikel verantwortlich. Im zweiten Schritt werden, darauf basierend, die Bahnen der Aerosolpartikel berechnet, unter Berücksichtigung von Sedimentation, Adsorption und Resuspension. Diese Aufteilung hat den Vorteil, dass die beiden Rechenschritte unabhängig voneinander sind und die Parameter der Partikeltrajektorienberechnung jederzeit variiert werden können, ohne die zeitaufwändige Berechnung des Windfeldes zu wiederholen.

Navier Stokes in 3 Dimensionen (NaSt3D)

Das Programm NaSt3D wurde am Institut für Angewandte Mathematik der Universität Bonn entwickelt. Es bildet die Basis des Ausbreitungsmodells und wurde bisher zur Simulation der Ausbreitung von gasförmigen Stoffen verwendet [1]. Dieses Programm erlaubt eine zeitabhängige Lösung der Navier-

Stokes-Gleichungen auf rechtwinkligen Gittern. Es ist möglich, die Einströmbedingungen in das Simulationsgebiet sowie die im Simulationsgebiet befindlichen Hindernisse (Gebäude und Ähnliches) zu modellieren. Die notwendige Stabilität der Rechenmethode gegenüber großen Reynoldszahlen wurde durch ein angepasstes Diskretisierungsverfahren realisiert. Das VONOS-Schema (Variable order non oscillatory scheme) ermöglicht es, Strömungsrechnungen mit Luft als Medium bei einer Gitterweite von einem Meter und Anströmgeschwindigkeiten von einigen Metern pro Sekunde ohne Turbulenzmodelle durchzuführen. Für die Ausbreitungsberechnung von Gerüchen wurde NaSt3D bereits in [2] erfolgreich eingesetzt.

Simulierte Transmission von Aerosolen in 3-D

Im Anschluss an die Berechnung des Windfeldes erfolgt die Simulation der Aerosolausbreitung durch Berechnung der Partikeltrajektorien. Um diese zu berechnen, wird die Langevin-Gleichung genutzt, die die Bewegung von Teilchen unter einer zum Teil stochastischen Kraft (hier die Brown'sche Bewegung) beschreibt (**Gleichung 1**) [3].

$$m_p \dot{\vec{v}} = -f(\vec{v} - \vec{w}) + \sum \vec{F}_{ext} + \sum \vec{F}_{i,j} + \vec{F}_B \quad [\text{Gl. 1}]$$

Hierbei bezeichnet m_p die Masse des Partikels, \vec{v} die momentane Geschwindigkeit des Partikels, f die Reibung des Partikels, \vec{w} die Windgeschwindigkeit am Ort des Partikels, \vec{F}_{ext} die äußeren auf das Partikel wirkenden Kräfte, $\vec{F}_{i,j}$ die Interpartikelkräfte und \vec{F}_B die stochastische Kraft auf das Partikel, die durch die Brown'sche Bewegung der Partikel ausgelöst wird. Als äußere Kraft werden die Gravitationskraft und die Saffman-Lift-Kraft der Partikel berücksichtigt. Bei den Interpartikelkräften können, falls notwendig, Coulombkräfte integriert werden [4].

Während der Bewegung der Partikel innerhalb des Simulationsvolumens wird nach jedem Zeitschritt überprüft, ob die Partikel in einen „verbotenen“ Bereich eingedrungen sind: ein Gebäude, einen Baum oder Ähnliches. Wenn dies der Fall ist, wird das Partikel auf die Oberfläche, die es durchdrungen hat, zurückgesetzt und als anhaftend markiert. Im nächsten Zeitschritt wird dann gemäß den ermittelten Parametern für die Wahrscheinlichkeit der Resuspension das Partikel wieder freigesetzt.

Die Simulation des Ausbreitungsgeschehens gliedert sich wie folgt: Im ersten Schritt wird das Simulationsvolumen definiert. Hierzu werden die Maße des Simulationsgebietes sowie die Weite des Gitters festgelegt, auf dem NaSt3D später das Windfeld berechnet. Des Weiteren werden die Gebäude mit eventuell vorhandenen Emissionsquellen (Abluftkaminen) sowie Bäume im Gelände platziert. Die Eigenschaften des Aerosols (Dichte, Form) sowie der Oberflächen der Objekte im Simulationsgebiet werden angegeben. Die Einströmbedingungen des Windfeldes und die Quellstärken der Abluftkamine werden definiert. Ebenso werden die zu simulierende Gesamtzeit und die Zeitschrittweite Δt festgesetzt.

Im nächsten Schritt wird dann mit NaSt3D das Windfeld berechnet. Dieser Teilschritt ist der zeitaufwändigste und kann zwischen einigen Stunden und einigen Wochen dauern, je nach Zeitspanne und Komplexität des Geschehens, die simuliert werden sollen.

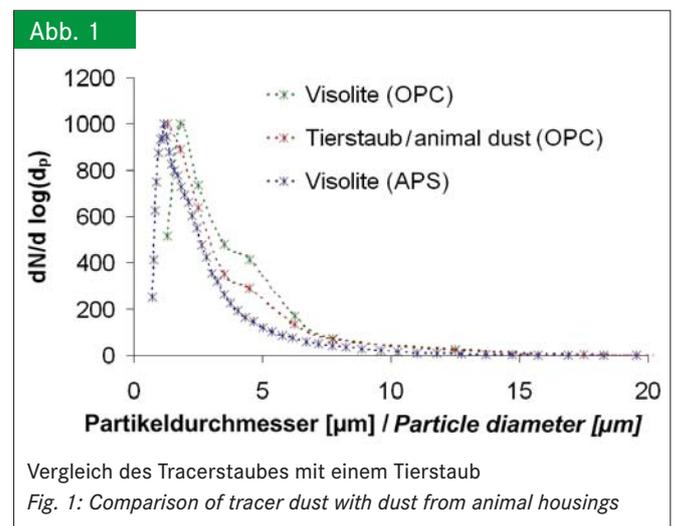
Im Anschluss daran werden die Trajektorien der aus den Emissionsquellen freigesetzten Aerosolpartikel berechnet. Hierbei werden die zuvor definierten physikalischen Eigenschaften berücksichtigt. Dieser Teil der Rechnungen ist mit einem PC in den meisten Fällen innerhalb von einigen Stunden abgeschlossen.

Im letzten Schritt können die Ergebnisse ausgewertet werden. Es ist möglich, Windfeld- und Aerosolpartikelverteilung in Diagrammen abzubilden, die auf dem Boden des Simulationsgebietes deponierte Partikelanzahl zu ermitteln, Zeitreihen der in Teilvolumen des Simulationsvolumens befindlichen Partikelanzahl zu erstellen und die Bewegung der Aerosolpartikel in Animationsequenzen darzustellen. Diese Funktionen ermöglichen es, die von der Ausbreitungssimulation vorhergesagten Ergebnisse mit den durch Freiluftmessungen gewonnenen Resultaten zu vergleichen.

Das Validierungsverfahren

Bei der Untersuchung der Ausbreitung von Aerosolen im Außenbereich ist es nicht möglich, die Trajektorie einzelner Partikel zu verfolgen oder einzelne Partikel eindeutig einer Quelle zuzuordnen. Aus diesem Grund ist eine Validierung von Ausbreitungssimulationen nicht ohne Weiteres realisierbar. Um die Ausbreitungssimulation STAR3D validieren zu können, wurde ein Verfahren entwickelt, das auf einem speziellen Aerosoltracer und einem geeigneten Nachweisverfahren basiert.

Als Tracer wird BHA Visolite von General Electrics eingesetzt, ein fluoreszierendes Pulver auf Basis von Calciumcarbonat. In **Abbildung 1** ist ein Vergleich der Partikeleigenschaften von Visolite mit einem typischen Tierstaub dargestellt. Aufgrund der ähnlichen Eigenschaften kann Visolite zur Ausbreitungssimulation von Tierstäuben eingesetzt werden. Um die Fluoreszenz anzuregen, wird die Probe mit Licht bei einer



Wellenlänge von 390-400 nm bestrahlt. Das Emissionsspektrum des gewählten Tracers liegt bei einer Wellenlänge von 590-650 nm.

Zum Nachweis der Tracerpartikel wurde das APMS (Aerosol Particle Measurement System) entwickelt. Es handelt sich dabei um ein Messsystem zur Untersuchung von Partikeln, die an Oberflächen haften, unter besonderer Berücksichtigung der fluoreszierenden Eigenschaften des Tracers Visolite. Das APMS ist bereits in [5] detailliert beschrieben. Es basiert auf einer Optik, die mechanisch in drei Dimensionen über eine beliebig geformte Oberfläche geführt werden kann. Dabei werden die auf der Oberfläche anhaftenden Partikel abgebildet und im Messrechner vermessen. Das APMS liefert nach erfolgter Bildverarbeitung eine Aufstellung, aus der die Anzahl und die Größenverteilung sowohl der Gesamtpartikel als auch der Tracerpartikel hervorgehen. Auf diese Weise lassen sich in Feldversuchen die Ergebnisse von Ausbreitungssimulationen mit den experimentellen Daten des APMS vergleichen.

Damit die emittierten Tracerpartikel nachgewiesen werden können, müssen im Ausbreitungsgelände geeignete Messstellen vorhanden sein. Es handelt sich dabei um 1 m hohe Ständer, auf denen sich Halter für zwei Sammelflächen befinden. Umgeben ist jeder Ständer von einem Windschutz, sodass die deponierten Partikel unter Windeinfluss nicht wieder aufgewirbelt werden können. Bei den Sammelflächen handelt es sich um Polysine® Objektträger mit den Abmessungen 76×26 mm. Diese Träger sind bereits so beschichtet, dass die Partikel sowohl elektrostatisch als auch chemisch an die Oberfläche gebunden werden.

Die Validierungsmessung

Das Validierungsverfahren von STAR3D lässt sich in 4 verschiedene Abschnitte unterteilen:

- Dispergierung des Tracers Visolite am Emissionspunkt
- Erfassung der meteorologischen Bedingungen
- Depositionsmessungen an verschiedenen Positionen im Ausbreitungsgebiet
- Auswertung der Messergebnisse sowie deren Vergleich mit den STAR3D-Simulationsergebnissen

Die Validierungsmessungen wurden auf den Versuchsfeldern des Gutes Dikopshof der Universität Bonn durchgeführt. Am Tag der Messung wehte der Wind aus südöstlicher Richtung. Daher wurde die Versuchsanordnung wie in **Abbildung 2** gezeigt, angeordnet. Es wurden drei Messstrahlen abgesteckt, auf denen sich die Depositionsmessstellen in einem Abstand von jeweils 50 m befanden. Der Öffnungswinkel zwischen den Messstrahlen betrug $11,3^\circ$. Als Emissionsquelle wurde der in [5] beschriebene Abluftkamin verwendet. Die Messzeit betrug 60 Minuten.

Zur Aufzeichnung der Wetterdaten wurden zwei Ultraschallanemometer (USA) der Marke METEK USA-1 verwendet. Die Ultraschallanemometer wurden an den in **Abbildung 2** mit USA 1 und USA 2 gekennzeichneten Positionen auf einem Ständer in einer Höhe von 3 m aufgestellt. Die erste Position befand

sich in unmittelbarer Nähe des Abluftkamins. Um Einflüsse des Kamins auf die Windfeldaufzeichnung auszuschließen, wurde das zweite Ultraschallanemometer im freien Feld platziert. Durch den Messwert-Vergleich der beiden Geräte können eventuelle Einflüsse des Abluftkamins erkannt werden. Die mittlere Windgeschwindigkeit betrug am Standort von USA 1 ($3,20 \pm 0,75$) m/s und am Standort von USA 2 ($3,18 \pm 0,74$) m/s; sie stimmen innerhalb ihrer Fehlergrenzen überein. Die Geschwindigkeit des Luftstromes aus dem Abluftkamin betrug während der Messung 5,97 m/s.

Innerhalb einer Stunde wurden kontinuierlich 14 mg/s Tracerstaub emittiert. Anschließend wurden die in den Depositionsmessstellen befindlichen Sammelflächen im Labor mit Hilfe des APMS automatisch ausgewertet. Gleichzeitig berücksichtigt wurden die sekundlich gemessenen Windgeschwindigkeit und Emissionsdaten, die mittlere Abluftgeschwindigkeit, die im Labor bestimmten Tracerpartikeleigenschaften und der mit dem Programm STAR3D simulierte Verlauf der Ausbreitung. Dabei wurde ein Simulationsgelände von 220 m Breite, 220 m Länge und 40 m Höhe zugrunde gelegt. Die Gitterweite betrug 1 m, sodass 1,94 Mio. Zellen pro Zeitschritt berechnet werden mussten. Die Simulation der Aerosoltransmission benötigte im vorliegenden Fall eine Rechenzeit von drei Monaten mit einem PC.

Im Anschluss erfolgt der Vergleich zwischen der vom APMS gemessenen und der von der Ausbreitungssimulation vorhergesagten deponierten Partikelanzahl an den 12 Messstellen.

In **Abbildung 3 a** ist die von STAR3D vorhergesagte Verteilung der deponierten Partikel zu sehen. Eingezeichnet sind die Position des Kamins und der 12 Messstellen. Die gesamte Anzahl an deponierten Partikeln, die von der Ausbreitungssimulation im Simulationsgebiet vorhergesagt worden war, beträgt $9,87 \pm 0,01$ Mrd. Tracerpartikel. Das heißt: aus dem Emissionspartikelstrom deponieren ungefähr 2 % der Partikel innerhalb des Simulationsgebietes.

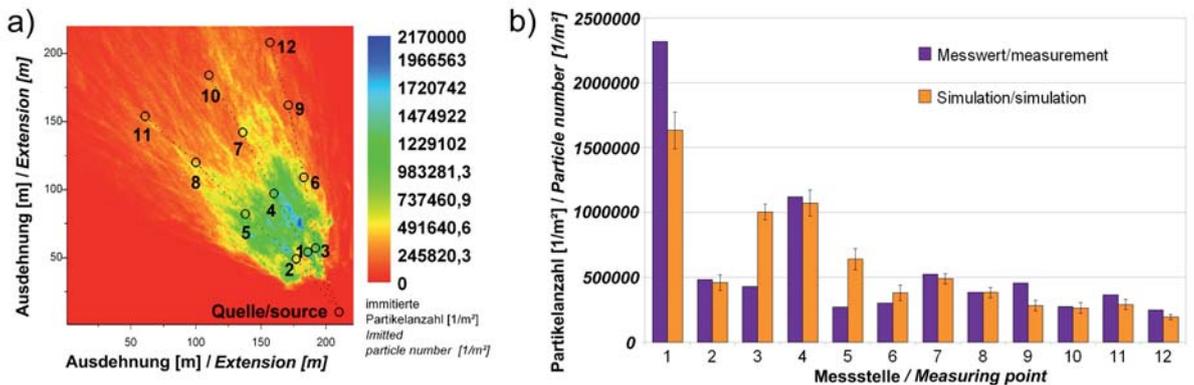
In **Abbildung 3 b** ist ein Vergleich der Partikelanzahl zu sehen, die an der jeweiligen Messstelle mit dem APMS gemessen



Anordnung des Versuchsaufbaus [6]

Fig 2: Positioning of the measurement equipment [6]

Abb. 3



(a) Deponierte Partikelanzahl; (b) Vergleich APMS-Simulation
 Fig. 3: (a) Deposited particle number; (b) Comparison APMS-simulation

sen und von der Simulation vorhergesagt wurden. Dargestellt ist die pro Quadratmeter deponierte Gesamtpartikelanzahl. An den meisten Messstellen ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Nur die Messstellen 1, 3 und 5 zeigen Abweichungen auf. An Messstelle 1 ist die gemessene Partikeldeposition ungefähr $1/3$ höher als die von der Ausbreitungssimulation vorhergesagte Partikeldeposition. An den Messstellen 3 und 5 zeigt sich ein umgekehrtes Bild, hier ist der von der Simulation vorhergesagte Wert für die Partikeldeposition 2- bis 3-mal höher als der vom APMS ermittelte Wert. Eine Ursache für die Abweichungen an diesen Messstellen konnte bisher nicht gefunden werden. Die Abweichung zwischen Mess- und Simulationswert betrug über alle Messstellen gemittelt 27 %. Hierbei konnte auf die Nutzung eines globalen Skalierungsfaktors wie in [5] verzichtet werden.

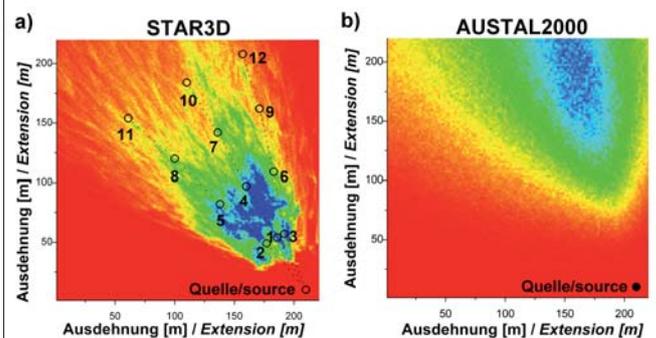
Zum Vergleich wurde die Simulation des Ausbreitungsgeschehens zusätzlich mit dem Programm AUSTAL2000 durchgeführt. Ein Vergleich der ermittelten deponierten Partikelanzahl ist in **Abbildung 4** zu sehen. Die Farbskalen der beiden Darstellungen wurden jeweils auf das Maximum der deponierten Partikelmenge normiert.

Schlussfolgerungen

In einem Feldversuch konnte gezeigt werden, dass das beschriebene Verfahren zur Validierung von Aerosol-Ausbreitungssimulationen eingesetzt werden kann. Das Versuchsgebiet war ein ebenes Gelände und die Emissionsquelle konnte frei angeströmt werden. STAR3D wurde jedoch entwickelt, um in komplexen, bebauten Geländen die Ausbreitung von Aerosolen zu simulieren. Bei dem Feldversuch handelt es sich folglich um einen sehr einfachen Fall, bei dem auch einfachere Ausbreitungsmodelle mit deutlich geringerer Rechenzeit gute Ergebnisse liefern.

Die Ergebnisse des Feldversuches können in Hinsicht auf die Problembereiche (Fein)staub- und Keimimmissionen einen Beitrag leisten. Ein Hemmschuh für solche Ansätze bildet die zurzeit noch nicht zufriedenstellend gelöste Problematik des Rechenaufwandes und der damit verbundenen Rechenzeit. Abhilfe könnte hier die Nutzung von Großrechnern schaffen.

Abb. 4



Vergleich der Ergebnisse mit STAR3D und AUSTAL2000 in willkürlichen Einheiten

Fig. 4: Comparison of the results achieved by STAR3D and AUSTAL2000 in arbitrary units

Literatur

- [1] Griebel, M.; Dornseifer, T. and Neunhoffer, T.: Numerical Simulations in Fluid Dynamics, a Practical Introduction. SIAM, Philadelphia, 1998
- [2] Wallenfang, O.: Erstellung eines numerischen Modells zur zeitaufgelösten Prognose lufttragener Gasausbreitung und deren experimentelle Verifikation. Dissertation. Universität Bonn, 2002
- [3] Gutsch, A.; Pratsinis, S.E. and Löffler, F.: Agglomerate structure and growth rate by trajectory calculations of monomer-cluster collisions. Journal of Aerosol Science 26 (1995), pp. 187-199
- [4] P. Lodomez, ; E. Rosenthal, J. Henseler; W. Büscher; B. Diekmann (2008): Dynamic Dispersion Modelling of Odours and Aerosols. 12th International Conference on Harmonization within Atmospheric Modelling for Regulatory Purposes. Proceedings, Zagreb, Vol. 43, ISSN 1330-0083
- [5] Rosenthal, E.; P. Lodomez, J. Henseler, J. Hartmann, W. Büscher and W. Diekmann: Validierung eines dynamischen Ausbreitungsmodells für Stäube aus landwirtschaftlichen Anlagen. Landtechnik 64 (2009), H. 2., S. 98-101
- [6] <http://maps.google.de>, Zugriff am 28.04.2010

Autoren

Dipl.-Phys. Philipp Lodomez und **Dipl.-Phys. Eberhard Rosenthal** sind wissenschaftliche Mitarbeiter der Arbeitsgruppe Energie und Umweltphysik am Physikalischen Institut der Universität Bonn, Nussallee 12, 53115 Bonn, E-Mail: lodomez@physik.uni-bonn.de

Dr. Bernd Diekmann, verantwortlicher Leiter der Arbeitsgruppe Energie und Umweltphysik, ist Privatdozent am Physikalischen Institut der Universität Bonn.

Prof. Dr. Wolfgang Büscher ist Leiter der Abteilung „Verfahrenstechnik der Tierischen Erzeugung“ am Institut für Landtechnik der Universität Bonn.