

Eberhard Rosenthal, Philipp Lodomez, Jessica Henseler, Julia Hartmann,
Wolfgang Büscher und Bernd Diekmann

Validierung eines dynamischen Ausbreitungsmodells für Stäube aus landwirtschaftlichen Anlagen

Um detaillierte und standortspezifische Aussagen über die Aerosolzusatzbelastung des Umfeldes von geplanten Tierhaltungsanlagen treffen zu können, ist eine Immissionsprognostik unumgänglich. Es kommen Ausbreitungssimulationen zur Anwendung, deren zugrunde liegenden Algorithmen das natürliche Geschehen immer aufwändiger wiedergeben. Um eine dynamische Ausbreitungssimulation, die in unserer Arbeitsgruppe entwickelt worden ist, zu validieren, wurde ein Verfahren entworfen, das auf einem fluoreszierenden Tracer-Aerosol und einem, hierzu entwickelten, Nachweissystem basiert.

Schlüsselwörter

Ausbreitungssimulation, Validierung, UPMS, Aerosol, Transmission, Immission

Keywords

Dispersion modeling, validation, UPMS, dust, transmission, immission, exhaust air velocity

Abstract

Rosenthal, Eberhard; Lodomez, Philipp; Henseler, Jessica; Hartmann, Julia; Büscher, Wolfgang and Diekmann, Bernd

Validation of a dynamic dispersion model concerning dust emitted by agricultural facilities

Landtechnik 64 (2009), no. 2, pp. 98 - 101, 3 figures, 4 references

Immission prediction is necessary to give detailed and site-specific information on aerosol exposure due to animal husbandry facilities. In order to reproduce natural conditions, algorithms used in propagation modelling have become more and more complex. A verification technique, based on a fluorescent tracer aerosol and a corresponding tracer system, was developed and allows to validate a dynamic propagation model that was earlier developed in our work group.

die Umströmung von Gebäuden und Landschaftselementen besser berücksichtigen zu können, kommen dynamische Ausbreitungsmodelle zum Einsatz [1]. Um die Aussagekraft neuer Modelle überprüfen zu können, sind Validierungsmessungen unumgänglich. Geht es um die Ausbreitung von Stäuben, ist der Einsatz von herkömmlichen, auf Tracergasen beruhenden Messsystemen nicht möglich. Dies liegt darin begründet, dass gerade aerosolspezifische physikalische Eigenschaften mit diesen Verfahren nicht überprüft werden können. Aus diesem Grunde wurde am Physikalischen Institut der Universität Bonn in der Arbeitsgruppe Energie und Umwelphysik, in Kooperation mit dem Institut für Landtechnik, sowohl die dynamische Ausbreitungssimulation STAR3D als auch ein Verfahren zur Validierung von Aerosolausbreitungsmodellen entwickelt.

Das dynamische Ausbreitungsmodell STAR3D

STAR3D (Simulated transmission of aerosols in 3 dimensions) ermöglicht eine dynamische Betrachtung der Ausbreitung von Aerosolen. Das Programm basiert auf der am Institut für Angewandte Mathematik der Universität Bonn entwickelten Software Nast3DGP [3]. Diese löst die inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen in einem frei konfigurierbaren Volumen durch numerische Approximation.

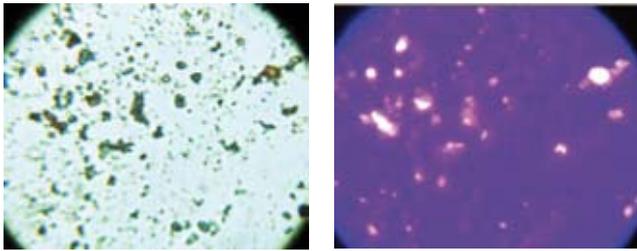
$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} = \frac{\bar{g}}{Fr} - \nabla p + \frac{1}{Re} \Delta \bar{u} \quad [Gl.1]$$

$$\nabla \bar{u} = 0 \quad [Gl.2] \quad (\text{Navier-Stokes-Gleichungen})$$

(\bar{u} = Windgeschwindigkeit, \bar{g} = äußere Kräfte, p = Druck, Re = Reynoldszahl und Fr = Froudezahl)

■ Besonders im strukturierten landwirtschaftlichen Raum stoßen Ausbreitungssimulationen häufig an ihre Grenzen. Um

Abb. 1



Depositionsprobe, beleuchtet mit weißem Licht im Durchlichtverfahren (links) bzw. mit ultraviolettem Licht im Auflichtverfahren (rechts)
 Fig. 1: Sample, illuminated with transmitted white light (left) respectively incident ultraviolet light (right)

Hierdurch ist es insbesondere möglich, das Windfeld in einem Testvolumen unter Berücksichtigung von Hindernissen (Gebäude, Bäume oder Ähnliches) zu berechnen. Ebenso ist es möglich, die Einströmbedingungen frei zu definieren, wodurch das Einströmen der Abluft aus den Kaminen des Stalls berücksichtigt werden kann. Das auf diese Weise simulierte Windgeschwindigkeitsfeld kann dann in STAR3D zur Berechnung der Partikelbahnen gemäß der Gleichung 3 verwendet werden.

$$\frac{\partial \bar{x}_p}{\partial t} = \alpha_w \cdot \bar{u} + \lambda \cdot \bar{e} + \bar{v}_{sed} \quad [Gl.3]$$

Hierbei bezeichnen \bar{x}_p die Partikelposition, α_w die Kopplung des Partikels an das äußere Windgeschwindigkeitsfeld, \bar{u} die Windgeschwindigkeit an der Position des Partikels, λ die Diffusionskonstante, \bar{e} einen Einheitsvektor, der die Richtung der Diffusion angibt und \bar{v}_{sed} die Sedimentationsgeschwindigkeit des Partikels. Aus der so berechneten Verteilung der Partikel kann für jeden Zeitschritt durch Integration über die gesamte Simulationszeit die Gesamtmission berechnet werden. Zur Validierung eines solchen Verfahrens ist es deshalb sinnvoll, die Aerosolkonzentration bzw. die Menge der deponierten Aerosolpartikel in Abhängigkeit des räumlichen Abstandes von der Quelle mit einem geeigneten Messverfahren zu bestimmen und mit den simulierten Werten zu vergleichen.

Das Validierungsverfahren

Bei der Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens von Aerosolen tritt grundsätzlich das Problem auf, dass in einem natürlichen Umfeld eine hohe Aerosoluntergrundkonzentration vorzufinden ist. Allein das Hinzufügen einer weiteren Quelle, zum Beispiel eines Abluftkamines einer Stallanlage, erhöht die Hintergrundkonzentration unwesentlich bzw. es lassen sich die gemessenen Partikel nicht eindeutig der Quelle zuordnen. Auf diese Weise können folglich keine qualifizierten Aussagen über die Transmission von Aerosolen getroffen werden.

Dementsprechend muss ein geeigneter Tracer gefunden werden, der zum einen ähnliche Eigenschaften besitzt wie der Stoff, dessen Ausbreitungsverhalten untersucht werden soll und zum anderen aber einzigartige Merkmale besitzt, um ihn

sicher, effizient und verwechslungsfrei nachweisen zu können. Darüber hinaus darf der eingesetzte Stoff weder eine Gefährdung für die Gesundheit von Mensch und Tier noch für die die Umwelt darstellen.

Bei dem hier beschriebenen Validierungsverfahren kommt der Tracer BHA Visolite® von General Electrics zum Einsatz. Es handelt sich dabei um ein fluoreszierendes Pulver auf Basis von Natriumcarbonat. Um die Fluoreszenz anzuregen, wird die Probe mit Licht einer Wellenlänge von 390-400 nm bestrahlt. Das Emissionsspektrum des gewählten Tracers liegt bei einer Wellenlänge von 590-650 nm.

Ein Verfahren zur Validierung von Ausbreitungssimulationen lässt sich grundsätzlich in mehrere Bereiche unterteilen:

1. Zunächst muss der Tracer in ein Aerosol überführt werden und über ein geeignetes Abluftsystem freigesetzt werden. Dazu wurde am Institut für Landtechnik der Universität Bonn ein mobiler Abluftkamin, bestehend aus Abluftrohren mit einem Innendurchmesser von 920 mm, konstruiert. Ein entsprechender im Kamin montierter Ventilator sorgte für einen Luftstrom, in den hinein die Tracerpartikel dosiert wurden. Die gesamte Vorrichtung stand auf einem 1,50 m hohen Anhänger, so dass sich eine Austrittshöhe von 6,50 m ergab. Die erzielten Abluftgeschwindigkeiten schwankten um einen Mittelwert von 10 m/s. Dies entspricht einer typischen Sommersituation von einem Stall mit einer Belegung von 200 Schweinen [2]. Mit Hilfe eines am Ende des Kamins befestigten optischen Partikelzählers wurden die Anzahl und die Größe der sich in der „Abluft“ befindenden Partikel kontinuierlich bestimmt.

2. Um die bei der Ausbreitungssimulation relevanten Größen ermitteln zu können, ist vor allem die Wettermesstechnik zu beachten. Im Falle der hier beschriebenen Validierungsmessung kam ein Ultraschallanemometer vom Typ USA-1 der Firma METEK zum Einsatz. Es ermöglicht die Messung der

Abb. 2



Aufsicht auf das Versuchsgelände. Der rote Punkt markiert die Stelle des Emissionspunktes. An den Positionen der Kreisdiagramme befindet sich jeweils eine Depositionsmessstelle
 Fig. 2: Onview on the experimental area. The red point marks the point of emission, while the pie charts mark the points of dust collecting

dreikomponentigen Windgeschwindigkeit, d. h. für jede euklidische Raumrichtung wird eine Geschwindigkeitskomponente bestimmt. Darüber hinaus stand eine an das Simulationsgebiet angrenzende stationäre Wetterstation zur Bestimmung der Windrichtung, der Windgeschwindigkeit, des Luftdrucks, der Temperatur sowie der relativen Luftfeuchte zu Verfügung

Damit die emittierten Tracerpartikel nachgewiesen werden können, müssen im Ausbreitungsgelände geeignete Messstellen vorhanden sein. Es ist zu unterscheiden, ob die Konzentration des Aerosols oder die Menge der deponierten Partikel gemessen werden soll. In diesem Fall kamen an das Verfahren angepasste Depositionsmessstellen zum Einsatz. Es handelt sich dabei um 1 Meter hohe Ständer, auf dem sich Halter für zwei Sammelflächen befinden. Umgeben ist jeder Ständer von einem Windschutz, so dass die deponierten Partikel unter Windeinfluss nicht aufgewirbelt werden können. Bei den Sammelflächen handelt es sich um Polysine[®]-Objektträger mit den Abmessungen 76 x 26 mm. Diese Träger sind bereits so beschichtet, dass die Partikel sowohl elektrostatisch als auch chemisch an die Oberfläche gebunden werden. Um die auf den Trägern deponierten Partikel gemäß ihrer Größe und Form analysieren zu können, wird ein Messgerät benötigt, das zum einen die Partikel vermessen und zum anderen zwischen Tracerpartikeln und zum Gesamtstaub gehörenden Partikeln unterscheiden kann.

Das Universal Particle Measurement System (UPMS)

Das UPMS ist ein Messsystem zur Untersuchung von an Oberflächen haftenden Partikeln. Das System besteht aus einer Optik, die mechanisch in drei Dimensionen über eine beliebig geformte Oberfläche geführt werden kann. Dabei werden die auf der Oberfläche haftenden Partikel abgebildet und ihre Daten im Messrechner analysiert. Um zwischen dem gesammelten Gesamtstaub und den Tracerpartikeln unterscheiden zu können, wird die Oberfläche abwechselnd mit einer weißen Lichtquelle im Durchlichtverfahren und einer ultravioletten Lichtquelle im Auflichtverfahren beleuchtet.

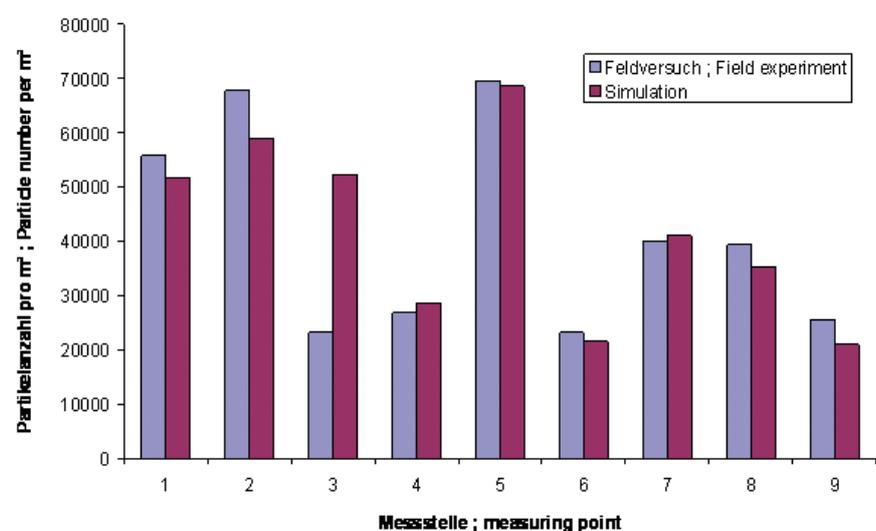
Während bei der ersten Beleuchtungsart alle Partikel abgebildet werden, nutzt man bei der zweiten Aufnahme die fluoreszierenden Eigenschaften des Tracers. Deutlich lassen sich die entsprechend dem Fluoreszenzspektrum leuchtenden Tracerpartikel erkennen, während alle anderen Partikel dunkel erscheinen (Abbildung 1). Die Oberfläche wird nun schrittweise „abgerastert“, wobei von jeder Stelle zwei Aufnahmen gemacht werden. Um eine scharfe Abbildung zu erhalten, muss der Abstand

zwischen Oberfläche und Objektiv konstant gehalten werden, wobei bereits Abweichungen von wenigen Mikrometern unzulässig sind. Um dies gewährleisten zu können und um eine optimale Bildqualität zu erreichen, wird die Position des Objektivs mechatronisch optimiert. Dazu wird der Abstand bei jeder Position ein wenig variiert, wobei die Summe der Gradienten der Helligkeiten zweier benachbarter Pixel im Bild ein Maß für die Qualität der Aufnahme ist. Die bei diesem Verfahren anfallenden und zu verarbeitenden Datenmengen sind sehr groß, weshalb diesem Verfahren eine Grundfokussierung vorgelagert ist. Der so genannte Guided-Focus lässt sich jedoch nur bei planen Oberflächen anwenden. Anhand von Referenzdaten wird das Objektiv auf einer virtuellen Fokusebene geführt, deren Abstand zur Oberfläche konstant ist. Auf diese Weise lässt sich der Aufwand für die aktive Fokussierung deutlich verringern und der gesamte Scanvorgang beschleunigen. Die so ermittelten Bilddaten werden gespeichert und ausgewertet. Dies geschieht mit Hilfe der frei verfügbaren Grafikkbibliothek OpenCV [4]. Dabei gliedert sich die Auswertung in folgende Schritte: Zunächst findet die Segmentierung statt. Im Anschluss werden die zusammenhängenden Pixel-Gebiete als Partikel erkannt, um deren Äquivalentfläche zu bestimmen. Das UPMS 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 UPMS vergleichen.

Ergebnisse des Feldversuches

Zur Validierung von STAR3D und zur Erprobung des vorgestellten Validierungsverfahrens wurden Feldversuche auf den Feld-

Abb. 3



Dargestellt ist die Anzahl der Tracerpartikel pro Quadratmeter für jede der neun Messstellen. Rote Balken repräsentieren dabei die experimentell gemessenen Werte, blaue Balken die simulierten Werte

Fig. 3: Shown is the number of tracer particles per square meter for each of the nine deposition points. Experimental data is shown in red, while blue shows the simulation results.

ern der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof durchgeführt. Ausgehend von dem bereits beschriebenen Emissionskamin wurde ein Fächer aus Depositionsmessstellen aufgespannt (**Abbildung 2**). Der Hauptstrahl folgte der am Versuchstag vorherrschenden Windrichtung Nord-West. Mit einem Öffnungswinkel von jeweils 20° befand sich je ein Nebenstrahl links und rechts vom Hauptstrahl. Die Messstellen sind auf den Strahlen angeordnet und haben einen Abstand von 50 Metern zu den benachbarten Messstellen des gleichen Strahls (**Abbildung 2**). Der Emissionspunkt, am Ursprung der drei Strahlen, konnte frei angeströmt werden. Die mittlere Windgeschwindigkeit am Versuchstag betrug etwa 3,5 m/s.

Innerhalb einer Stunde wurden kontinuierlich 140 mg/s Tracerstaub emittiert. Anschließend wurden die in den Depositionsmessstellen befindlichen Sammelflächen im Labor mit Hilfe des UPMS automatisch ausgewertet. Gleichzeitig wurde unter Berücksichtigung der während des Versuches sekundlich gemessenen Windgeschwindigkeit und Emissionsdaten, sowie der mittleren Abluftgeschwindigkeit und der im Labor bestimmten Tracerpartikeleigenschaften mit dem Programm STAR3D der Verlauf der Ausbreitung simuliert. Dabei wurde ein Simulationsgelände von 200 m Breite, 200 m Länge und 40 m Höhe zugrunde gelegt. Die Gitterweite betrug einen Meter, so dass 1,6 Millionen Zellen pro Zeitschritt berechnet werden mussten. Die Simulation der Aerosoltransmission benötigte im vorliegenden Fall eine Rechenzeit von drei Monaten.

Abbildung 2 und **Abbildung 3** zeigen jeweils den Vergleich zwischen den experimentell ermittelten Werten, die rot dargestellt sind, und den blau dargestellten, durch Simulation ermittelten Werten. Verglichen wird jeweils die Anzahl der pro Quadratmeter deponierten Tracerpartikel.

Wie aus den Abbildungen ersichtlich, ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und den gemessenen Werten. Dabei ist zu beachten, dass bei der Simulation eine von der Partikelgrößenfraktion abhängige Untersetzung der Partikelanzahl gewählt wurde. Um die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können, wurde das Gesamtergebnis der Simulation mit einem für alle Größenfraktionen gleichen Faktor skaliert. Über das gesamte Simulationsgebiet betrachtet, ergibt sich ein relativer Unterschied von aufgerundet 14 % zwischen den simulierten Werten und der Messung.

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

In einem Feldversuch konnte gezeigt werden, dass das beschriebene Verfahren zur Validierung von Aerosol-Ausbreitungssimulationen eingesetzt werden kann. Das UPMS wurde erfolgreich aufgebaut und konnte seine Leistungsfähigkeit unter realen Versuchsbedingungen unter Beweis stellen. Das Programm STAR3D ist zur Simulation von Ausbreitungsszenarien anwendbar. In einem ersten Test ergab sich lediglich eine relative Abweichung von 14 % von den Ergebnissen des Feldversuches. Es ist jedoch zu bedenken, dass es sich bei dem Versuchsgebiet um ein ebenes Gelände handelt, die Emissionsquelle konnte frei angeströmt werden. STAR3D wurde jedoch entwickelt, um

in komplexen, bebauten Gebieten 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. Trotz allem sind die Ergebnisse vielversprechend und das UPMS sowie STAR3D haben das Potential, neue Möglichkeiten der Ausbreitungssimulation von Aerosolen und deren Validierung zu eröffnen.

Literatur

- [1] 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
- [2] DIN 18910-1:2004-11: Wärmeschutz geschlossener Ställe - Wärmedämmung und Lüftung - Teil 1: Planungs- und Berechnungsgrundlagen für geschlossene zwangsbelüftete Ställe
- [3] M. Griebel, T. Dornseifer and T. Neunhoffer, Numerical Simulations in Fluid Dynamics, a Practical Introduction, SIAM, Philadelphia, (1998)
- [4] Garry Bradski, Adrian Kaehler, OpenCV, O`Reilly, Beijing 2008

Autoren

Dipl.-Phys. Eberhard Rosenthal und **Dipl.-Phys. Philipp Lodomez** sind wissenschaftliche Mitarbeiter, **cand. Phys. Julia Hartmann** ist Diplomandin, **Dr. Bernd Diekmann**, verantwortlicher Leiter der Arbeitsgruppe Energie und Umweltphysik, ist Privatdozent am Physikalischen Institut der Universität Bonn, Nussallee 12, 53115 Bonn. **Dipl.-Ing agr. Jessica Henseler** ist wissenschaftliche Mitarbeiterin, **Prof. Dr. Wolfgang Büscher** ist Leiter der Abteilung „Verfahrenstechnik der Tierischen Erzeugung“ am Institut für Landtechnik der Universität Bonn, Nussallee 5, 53115 Bonn; E-Mail: rosenthal@uni-bonn.de