

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

# Diffusionseffekte bei Staubemissionen – Simulation und experimenteller Nachweis

Es wurde eine Laserschnittanlage entwickelt, mit der die Bewegung von Staubpartikeln in der Größenordnung von etwa 2-20 µm untersucht wurden, die sich unter dem Einfluss von Sedimentation und Diffusionseffekten im Luftstrom bewegen. So konnte ein Zahlenwert für die turbulente Diffusion ermittelt werden. Dieser Wert wurde in eine Sedimentationssimulation implementiert und die so erhaltenen Kurven mit den im Experiment gemessenen Kurven verglichen.

## Schlüsselwörter

Diffusion, Turbulenz, Aerosol, Ausbreitungssimulation, Sedimentation

## Keywords

Diffusion, turbulence, aerosol, dispersion modelling, sedimentation

## Abstract

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

## Diffusional effects on emitted dust – modelling and experimental evaluation

Landtechnik 65 (2010), no. 2, pp. 114-117, 5 figures, 1 table, 11 references

A method was developed that allows to follow the movement of dust particles moving in an air flow under the influence of sedimentation and diffusion using a laser and a camera. A numerical value for the turbulent diffusion could be determined. This value was implemented into sedimentation modelling and the simulation was compared to sedimentation curves that were earlier measured in experiments.

Die Ausbreitung von Stäuben aus diversen Quellen, z. B. aus Tierställen, wird von der Öffentlichkeit kritisch beobachtet. Vor diesem Hintergrund gewinnen Simulationen in Genehmi-

gungsverfahren immer mehr Bedeutung. Um die Zuverlässigkeit der Prognosen zu verbessern, sind in der landtechnischen Forschung Rechenalgorithmen aus der Fluidodynamik Gegenstand der wissenschaftlichen Diskussion. So wurde am Institut für Landtechnik der Universität Bonn die Ausbreitungssimulation STAR3D entwickelt und erfolgreich validiert [1].

Moderne Simulationen der Ausbreitung von Aerosolen ermöglichen es, die Eigenschaften von stalltypischen Staubpartikeln zu berücksichtigen. Dazu zählt neben der Sedimentation, der Resuspension, der Adsorption und der Agglomeration auch die Diffusion.

## Grundlagen

Bei der Brown'schen Diffusion handelt es sich um eine isotrope Partikelbewegung in allen drei Raumdimensionen. Sie resultiert aus Stößen zwischen den Luftmolekülen und (kleinen) Aerosolpartikeln und verursacht einen Partikelstrom  $J$ , der dem Gradienten der Konzentration  $n$  entgegengesetzt gerichtet ist.

$$J = D_{mol} \cdot \nabla n \quad [\text{Gl. 1}] \text{ (1. Ficksches Gesetz)}$$

Der Diffusionskoeffizient  $D_{mol}$  kann in Abhängigkeit der Temperatur  $T$ , der dynamischen Gasviskosität  $\eta$  und des Partikeldurchmessers  $d$  berechnet werden [2]:

$$D_{mol} = \frac{k \cdot T}{3\pi\eta d} \quad [D_{mol}] = \frac{m^2}{s} \quad [\text{Gl. 2}]$$

Dieser Diffusionskoeffizient ist zeitunabhängig. Für die mittlere Geschwindigkeit der Partikel ergibt sich

$$v = \sqrt{\frac{18k \cdot T}{\pi\rho_p d}} \quad [\text{Gl. 3}] [3]$$

Unter Berücksichtigung von Gleichung 3 lassen sich für typische Partikeldurchmesser, eine Dichte von  $\rho = 2,7 \text{ kg/m}^3$  und eine Viskosität von  $\eta = 17,1 \mu\text{Pa s}$  die in **Tabelle 1** angegebenen Werte für  $D_{mol}$  und  $v$  berechnen. Zum Vergleich sind ihnen die zu erwartenden Sedimentationsgeschwindigkeiten gegenübergestellt, die nach Gleichung 4 berechnet werden können.

$$v_{sed} = \frac{g \cdot \rho \cdot d^2}{18\eta} \quad [\text{Gl. 4}] [3]$$

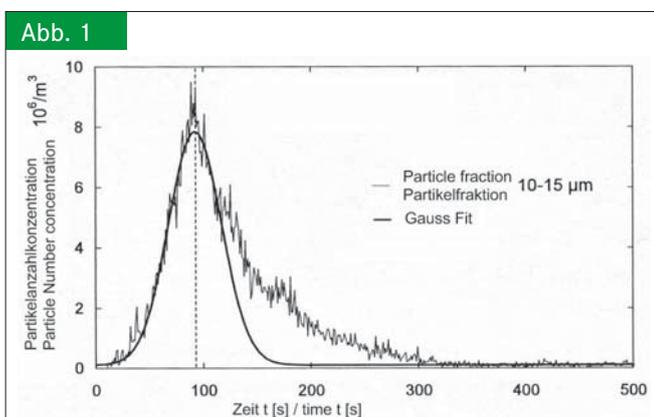
Man sieht, dass die Brown'sche Diffusion mit steigendem Durchmesser deutlich an Bedeutung verliert.

### Fragestellung

Betrachtet man die Sedimentation einer monodispersen Aerosolwolke unter Vernachlässigung aller Effekte außer der Sedimentation und der Diffusion, so ergibt sich eine gaußförmige Verteilung der Ankunftszeiten der Partikel [4]. Bei früheren Untersuchungen an der Universität Bonn entsprach jedoch die Verteilung der gemessenen Ankunftszeiten von Partikeln gleicher Größe auf der Zeitachse nicht der theoretisch zu erwartenden Gaußschen Glockenkurve, sondern wies eine Verschiebung auf [5]. Diese Beobachtung war Anlass für weitere Untersuchungen und auch für die vorliegende Arbeit.

Die bereits in [6] vorgestellten Untersuchungen zeigen einen von der Theorie abweichenden, asymmetrischen Kurvenverlauf (**Abbildung 1**), der im Rahmen einer Diplomarbeit untersucht wurde [7].

Im Rahmen dieser Diplomarbeit, durchgeführt in Kooperation zwischen dem Institut für Landtechnik und dem Physikalischen Institut der Universität Bonn, wurde das Verhalten von sedimentierenden Aerosolen genauer untersucht. Im Fokus des Interesses standen vor allem die asymmetrisch verteilten Ankunftszeiten der Partikel.



Verteilung der Ankunftszeiten für Partikel mit einer Dichte  $\rho = 2,7 \text{ kg/m}^3$  und einem Durchmesser zwischen 10 und 15  $\mu\text{m}$ . Zur Veranschaulichung wurde eine Gaußkurve an die Messungen angepasst.

Fig 1: Distribution of particle arrival time for particles with density  $\rho = 2,7 \text{ kg/m}^3$  and a diameter  $d$  between 10 and 15  $\mu\text{m}$ . For better understanding a Gauss curve was fitted to the experimental data

**Tab. 1**

Vergleich von Sedimentations- und Diffusionsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers

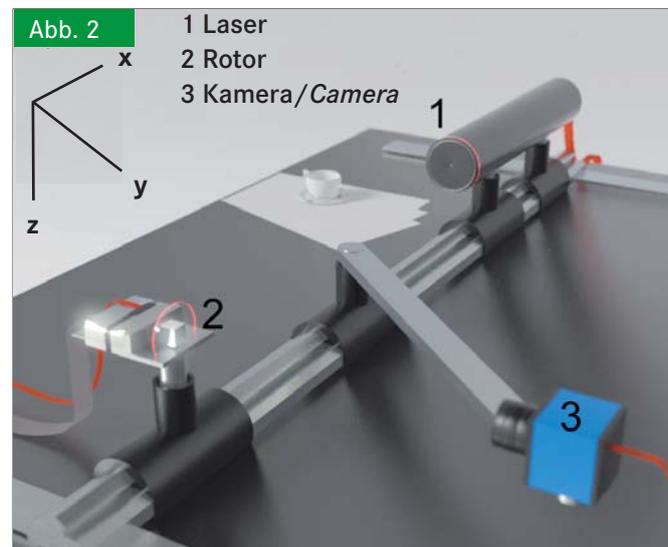
Table 1: A comparison between sedimentation velocity  $v_{sed}$ , diffusion coefficient  $D$  and diffusion velocity  $v$  in regard to particle diameter  $d$

$d$ $\mu\text{m}$	$D$ $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$v$ $\text{mm/s}$	$v_{sed}$ $\text{mm/s}$
2,5	10,4	0,75	0,5
3,5	7,4	0,45	1,1
4,5	5,6	0,31	1,7
6,75	3,8	0,17	3,9
8,75	3	0,11	6,6
12,5	2,1	0,04	13,4

Zielsetzung war es, aus den Sedimentationsexperimenten ein Modell abzuleiten, welches die Partikelbewegung beschreibt.

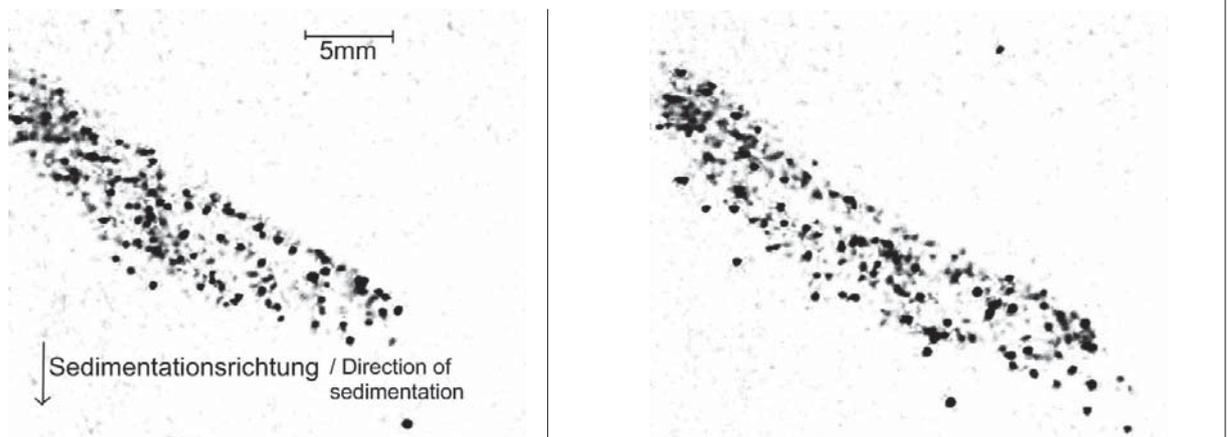
Als Ansatz wurden zwei theoretische Annahmen praktisch untersucht. Bei der turbulenten Diffusion wird Energie durch eine chaotische Wirbelbewegung übertragen. Dadurch sind die auftretenden Geschwindigkeiten wesentlich höher als bei der Brown'schen Diffusion, sodass die turbulente Diffusion den relevanten Ausbreitungsmechanismus darstellt. Wie in [8] und [9] dargestellt, kann für Partikel kleiner als 50  $\mu\text{m}$  die turbulente Diffusion mathematisch analog zur Brown'schen Diffusion mit einem angepassten Diffusionskoeffizienten behandelt werden. Dieser muss aus dem Experiment bestimmt werden.

Der zweite in Betracht gezogene Effekt ist das im Fick'schen Gesetz auftretende Konzentrationsgefälle: Schwere Partikel sedimentieren schneller als leichte. Daher baut sich nach kurzer Zeit ein Konzentrationsgefälle auf und es kommt zu einem zusätzlichen, der Sedimentation entgegengerichteten Partikelfluss. Als Folge diffundieren leichte Partikel, die sich im Wind-



Aufbau der Laserschnittanlage für die eigenen Untersuchungen  
Fig 2: Experimental set up used during the measurements

Abb. 3



Zwei im Abstand von 1/16 s aufgenommene Bilder. Der Bildausschnitt entspricht einer Größe von 2 x 0,7 cm

Fig 3: Two pictures that were taken in an interval of 1/15 s. The images shown correspond to an area of 2 x 0,7 cm

schatten größerer Partikel befinden, bevorzugt entgegen der Sedimentationsrichtung und es kommt zu einer Verzögerung der Ankunftszeit.

### Versuchsaufbau

Der Grundgedanke des Versuchsaufbaus ist es, mit Hilfe einer Laserschnittanlage die Partikelbewegung sichtbar zu machen, um ein verbessertes Verständnis für die physikalischen Vorgänge zu entwickeln. Der Aufbau des Experimentes ist in **Abbildung 2** dargestellt: Licht eines Helium-Neon-Lasers (1) trifft auf einen quaderförmigen, mit Spiegeln bestückten Rotor (2), der durch einen Schrittmotor mit einer Geschwindigkeit von 900 U/min in Rotation versetzt wird. Dementsprechend wird eine durch den Laser beleuchtete Ebene von ungefähr 2 mm Dicke in der x-z-Ebene erzeugt, in der sich die Partikel beobachten lassen. Zur Visualisierung der Partikelbewegung dient eine Farb-CCD-Kamera (3).

Alternativ kann im Strahlengang ein weiterer Spiegel eingesetzt werden, der eine Drehung des Laserstrahls um 90° bewirkt und damit eine Aufnahmen in der y-z-Ebene ermöglicht.

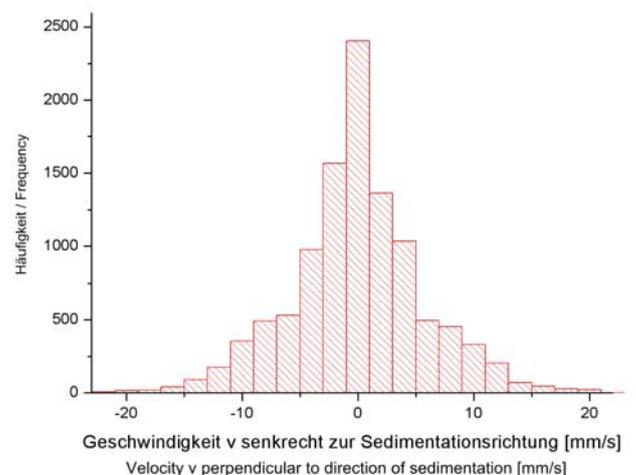
Über der Laserschnittebene befindet sich eine zunächst verschlossene Kammer, in die Calciumcarbonatpartikel mit Hilfe einer Venturidüse eindosiert werden. Im Boden der Kammer befindet sich eine durch einen Schieber verschlossene Öffnung, deren Durchmesser mit Metallblenden auf einen Durchmesser von 2–20 mm angepasst werden kann. Bei geschlossener Öffnung werden die Aerosolpartikel in die Kammer injiziert. Nach einer gewissen Zeit, während der sich die Luftbewegung in der Kammer beruhigt, wird der Schieber geöffnet, so dass die Aerosolpartikel durch die Blenden hindurch in die eigentliche Messkammer sedimentieren können. Gelangen die Partikel in die Laserschnittebene, wird das von ihnen reflektierte Licht von der Kamera erfasst. Durch eine Korrelationsanalyse der Bilddaten ist es möglich, die Geschwindigkeit von Partikelensembles zu bestimmen [10].

### Simulation

In einem zweiten Schritt wird die Bewegung der Partikel in der Messkammer simuliert. Es wird zunächst eine virtuelle Aerosolwolke erzeugt, die der Gravitationskraft unterliegt.

Die entsprechenden Parameter wurden in Analogie zu vorherigen Untersuchungen an die Eigenschaften von Calciumcarbonat angepasst. Danach wird das zu simulierende Volumen in vertikale Schichten von 0,1 mm Dicke unterteilt. Für jeden einzelnen Partikel wird die Anzahl der Partikel, die sich oberhalb ( $n_u$ ) und unterhalb ( $n_u$ ) des zu untersuchenden Partikels befinden, bestimmt. Auf diese Weise wird eine Diffusionsrichtungen vorgegeben, die von der räumlichen Verteilung der Partikel abhängig ist. Im nächsten Simulationsschritt werden die Partikel der Gravitation ausgesetzt und in Abhängigkeit ihrer Größe und Dichte bewegt. Abwechselnd findet nun eine Bewegung der Partikel entsprechend der gerichteten Diffusion und der Sedimentation statt. Passieren die einzelnen Partikel eine virtuelle waagerechte Ebene, wird die Zeit, die seit dem Freisetzen des betreffenden Partikels vergangen ist, in einem Histogramm gespeichert.

Abb. 4



Geschwindigkeitsverteilung für Partikelbewegung in horizontaler Richtung

Fig 4. Velocity distribution for particle movement perpendicular to the direction of sedimentation

## Ergebnisse

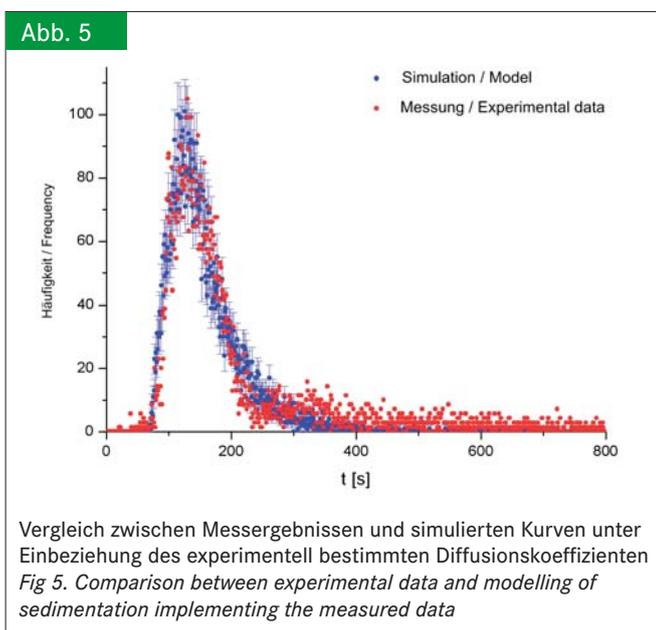
Aus dem Versuchsaufbau resultiert, dass Aussagen zur Partikelbewegung nur im Bereich der Laserschnittebene gemacht werden können. **Abbildung 3** zeigt zwei im Abstand von 1/15 s erstellte Bilder. Der Bildausschnitt entspricht einer Fläche von 4,5 x 3,5 cm. Es lässt sich schon mit bloßem Auge eine Bewegung erkennen, die so schnell sein muss, dass sie nicht ausschließlich durch Brown'sche Diffusion und Sedimentation erklärt werden kann.

In **Abbildung 4** sind die Geschwindigkeiten, senkrecht zur Sedimentationsrichtung der Partikel, in einem Histogramm dargestellt. Die Geschwindigkeiten sind nahezu symmetrisch um den Ursprung verteilt. Dementsprechend sind die horizontalen Diffusionsrichtungen gleichberechtigt. Eine Bewegung der Partikel durch eine gerichtete Luftströmung kann folglich ausgeschlossen werden.

Der gemessene Betrag der Geschwindigkeiten der Partikel liegt im Mittel bei 3,7 mm/s und damit um mehr als eine Zehnerpotenz höher als die in **Tabelle 1** gezeigten Werte der molekularen Diffusion.

Wird die Geschwindigkeitsverteilung in vertikaler Richtung, also in positiver und negativer Sedimentationsrichtung, betrachtet, ergibt sich die Bewegung der Partikel durch eine Überlagerung von Diffusionseffekten und der Partikelsedimentation. Die durch die Sedimentation verursachte Verschiebung des Schwerpunktes lässt sich in der Regel nicht messen, da die gemessenen Sedimentationsgeschwindigkeiten kleiner sind als die Schwankungsbreite des Mittelwertes der Verteilung.

Unter der Annahme einer experimentell ermittelten turbulenten Diffusionsgeschwindigkeit von 3,7 mm/s wurde die Sedimentation eines polydispersen Aerosols simuliert. **Abbildung 5** zeigt den Vergleich der experimentell ermittelten Werte [5] mit den Ergebnissen der Simulation. Die Skalierung zwischen Simulation und Messung wurde auf das Maximum angepasst.



## Schlussfolgerungen

Es ist gelungen, die Messergebnisse durch die Simulation zu reproduzieren. Die Ergebnisse zeigen, dass der turbulente Diffusionsfaktor um einen Faktor 40 höher ist als die durch die Brown'sche Diffusion vorhergesagten Werte. Dementsprechend besteht ein größerer Einfluss der turbulenten Diffusion auf das Ergebnis von Ausbreitungssimulationen.

Der aus dem Experiment bestimmte Diffusionsfaktor ist nicht als absolute Zahl anzusehen. Insbesondere ist zu beachten, dass der Versuchsaufbau keine Unterscheidung der Partikel hinsichtlich ihrer Größe ermöglicht. Dennoch konnte mit dem Versuchsaufbau das Verhalten der Partikel phänomenologisch beschrieben und die Größenordnung des turbulenten Diffusionsfaktors bestimmt werden. Darüber hinaus ist es möglich, die bei der Simulation verwendeten Algorithmen zur Berechnung des Gradienten der turbulenten Diffusion in dynamische Ausbreitungssimulationen zu integrieren.

Insbesondere können die Ergebnisse in die Ausbreitungssimulation STAR3D [11] implementiert werden und tragen zukünftig zu einer Verbesserung der Transmissionsmodellierung bei.

## Literatur

- Bücher sind durch ● gekennzeichnet
- [1] Rosenthal, E., P. Lodomez, J. Henseler, J. Hartmann, W. Büscher und B. Diekmann: Validierung eines dynamischen Ausbreitungsmodells für Stäube aus landwirtschaftlichen Anlagen. Landtechnik 64 (2009), H. 2, S. 98-101
  - [2] Einstein, A.: Über die von der molekularinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. Annalen der Physik 17 (1905), S. 549-560
  - [3] ● Hinds, W. C.: Aerosol technology. John Wiley & Sons Inc., New York, 1998
  - [4] ● Roedel, Walter: Physik unserer Umwelt – die Atmosphäre. Springer Verlag, Berlin 1992
  - [5] Schmitt-Pauksztat, Gregor: Verfahren zur Bestimmung der Sedimentationsgeschwindigkeit von Stäuben und Festlegung partikelspezifischer Parameter für deren Ausbreitungssimulation. Dissertation. Rheinische Friedrich Wilhelms-Universität Bonn, 2006
  - [6] Schmitt-Pauksztat, G., Rosenthal, E., Büscher, W., Diekmann, B.: Sinkgeschwindigkeiten von Tierstäuben – Rückschlüsse auf die Partikeleigenschaften. Agrartechnische Forschung 11 (2005), H. 5
  - [7] Rosenthal, E.: Aufbau und Optimierung eines Messsystems zur Bestimmung der Sedimentationsgeschwindigkeit von Aerosolpartikeln unter Berücksichtigung klimatischer Rahmenbedingungen. Diplomarbeit. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2006
  - [8] ● Levich, V. G.: Physicochemical Hydrodynamics, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1962
  - [9] ● Williams, M. M. R. and Loyalka, S. K.: Aerosol Science – Theory and Practice. Pergamon Press, Oxford, 1991
  - [10] ● Raffel, M.; Willert, C. and Kompenhans, J.: Particle Image Velocimetry. Springer Verlag, Berlin, 1998
  - [11] Lodomez, P.; Rosenthal, E.; Henseler, J.; Büscher, W. and Diekmann, B.: Dynamic dispersion modelling of odours and aerosols. 12<sup>th</sup> International Conference on Harmonization within Atmospheric Modelling for Regulatory Purposes. Proceedings, Zagreb, vol. 43, 2008

## Autoren

**Cand. Phys. Julia Hartmann** ist Diplomandin am Physikalischen Institut (PI) der Universität Bonn, Nussallee 12, 53115 Bonn, E-Mail: j.hartmann@physik.uni-bonn.de

**Dipl.-Phys. Eberhard Rosenthal** und **Dipl.-Phys. Philipp Lodomez** sind wissenschaftliche Mitarbeiter am PI der Universität Bonn

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

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