

# Ausbreitungsrechnungen und computergesteuerte Anlagenführung

THOMAS LUNG\*

## 1. Einleitung

Im Oktober 2002 ist die neue Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) in Kraft getreten, in deren Anhang 3 eine „moderne“ Ausbreitungsrechnung für luftverunreinigende Gase und Stäube verankert ist [1]. Damit wird das Gaußmodell der ehemaligen TA Luft abgelöst; Immissionsprognosen für Genehmigungsverfahren nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) sind entsprechend den Vorgaben der ersten allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz nun mit einem spezifizierten Partikelmodell durchzuführen. Welche Auswirkungen dieser Modellwechsel in der Anwendung haben wird, ist immer noch nicht abzusehen, da längst nicht für alle Praxisfälle vergleichende Testrechnungen durchgeführt werden konnten.

Bei Abfallbehandlungsanlagen, insbesondere Kompostierungsanlagen, sind neben Gerüchen und Schadgasen immer öfter Mikroorganismen diejenigen luftgetragenen Spurenstoffe, für die im Genehmigungsverfahren, aber auch bei der Anlagenüberwachung

und im Beschwerdefall, Aussagen zur Immissionsbelastung getroffen werden müssen. Die neue TA Luft streift das Thema KEIME nur summarisch, z. B. unter Punkt 5.4.7.1 : „Die Möglichkeiten, die Emissionen an Keimen und Endotoxinen durch dem Stand der Technik entsprechende Maßnahmen zu vermindern, sind zu prüfen.“ Immissionsgrenzwerte für meso- und thermophile Pilze und Bakterien, für Aktinomyceten und Endotoxine sind dort ebenso wenig zu finden, wie die Einbeziehung von Mikroorganismen in die Ausbreitungsrechnung. Was das Neue an der Ausbreitungsrechnung der novellierten TA Luft ist, wo weiterer Entwicklungsbedarf besteht und was Mikroorganismen von anderen luftgetragenen Spurenstoffen hinsichtlich der Ausbreitungsvorgänge unterscheidet, soll im ersten Teil des vorliegenden Beitrags herausgestellt werden.

Der zweite Teil, der in keinem unmittelbaren Zusammenhang mit dem ersten steht, beschäftigt sich mit den Möglichkeiten und Erfahrungen computergesteuerter Anlagenführung auf der Grundlage des Meß- und Simulationssystems *OdorSonic*.

## Teil I

### 2. Die Ausbreitungsrechnung der Neuen TA Luft

Den Anlaß zur Novellierung der TA Luft haben ein fortgeschrittener Rechts- und Kenntnisstand sowie verbindliche EU-Vorgaben gegeben, nach denen neben z. T. schärferen Grenzwerten auch veränderte Mittelungszeiten für die betreffenden Immissionskenngrößen einzuhalten sind. Für die in der neuen TA Luft aufgeführten Schadstoffe werden keine Perzentile mehr berechnet, sondern Tageswerte und Stundenwerte der Konzentration mit ihren zulässigen Überschreitungshäufigkeiten. Falls z. B. eine Immissionsprognose für Schwefeldioxid nötig ist, müssen neben dem Jahresmittelwert der Konzentra-

tion auch die Tages- und Stundenmittelwerte mit bestimmten Überschreitungen berechnet werden; für Ammoniak ist hingegen nur der Jahresmittelwert der Konzentration und der Deposition gefordert. Das bedeutet für die Ausbreitungsrechnung: für bestimmte Schadstoffe müssen sog. meteorologische Zeitreihen zur Berechnung von Stunden- und Tagesmittelwerten verwendet werden, in denen mindestens über ein Jahr die Stundenwerte der Windrichtung und -geschwindigkeit sowie der Schichtungsstabilität aufgelistet sind.

Neu im Hinblick auf die Ausbreitungsrechnung ist

\* Dipl.-Phys. Thomas Lung, Ingenieur- und Gutachterbüro für Immissionsprognostik und Ausbreitungsmodellierung, Eosanderstraße 17, 10587 Berlin  
Tel.: 030 – 34 70 38 00 Fax: 030 – 34 70 38 01 E-Mail: lung@snafu.de [www.ingentom.de](http://www.ingentom.de)

auch der Bezug auf Immissionspunkte; der Flächenbezug der alten TA Luft mit ihren Beurteilungsf lächen wurde fallengelassen. Der Aufpunkt in der Ausbreitungsrechnung ist nach der neuen Regelung auch gleich der Beurteilungspunkt.

Die größte Neuerung in der Ausbreitungsrechnung der neuen TA Luft besteht gewiß in der Verpflichtung zur Anwendung eines (Lagrange) Partikelmodells. Für St äube und Gase ist die Ausbreitungsrechnung nach VDI-Richtlinie 3945 Blatt 3 vorzunehmen, in der ein Partikelmodell als atmosphärisches Ausbreitungsmodell beschrieben ist [2].

Speziell für die Ausbreitungsrechnung von Mikroorganismen gibt es derzeit kein validiertes mathematisches Simulationsmodell; daher werden Mikroorga-

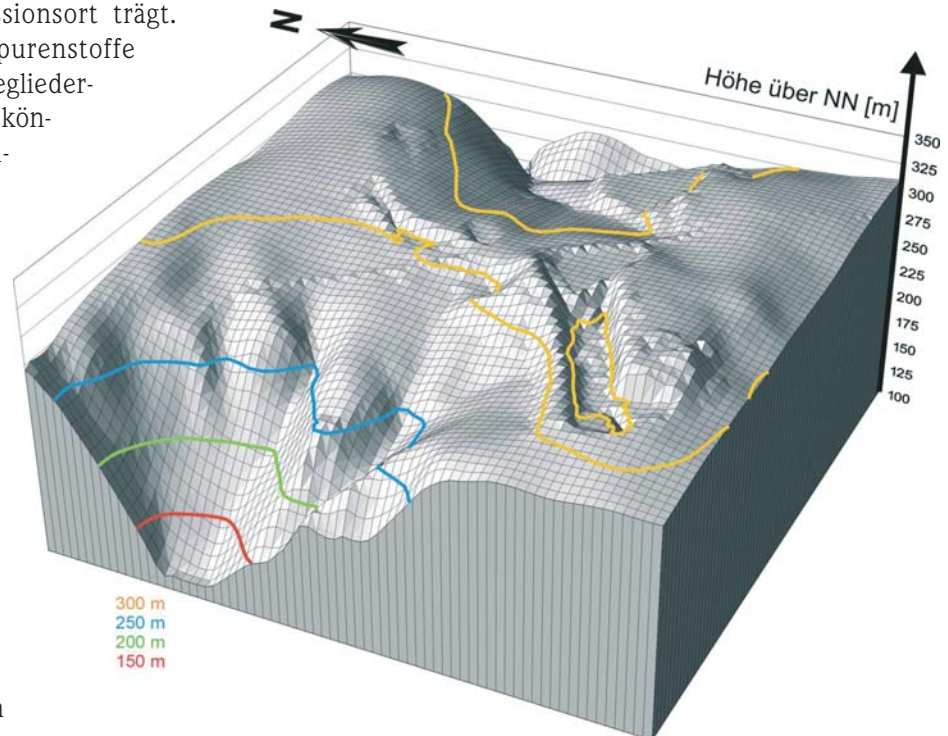
nismen gewöhnlich bei der Ausbreitungssimulation als St äube behandelt, für die allerdings Änderungen im Ausbreitungsverhalten infolge biologischer und evtl. auch chemischer Reaktionen zu berücksichtigen sind. Grundsätzlich ist aber ein Partikelmodell eher als andere Modelltypen (wie etwa Gaußsche oder Eulersche Modelle) zur Ausbreitungssimulation von Mikroorganismen geeignet, da jedem Partikel modellseitig bestimmte Eigenschaften zugeordnet werden können, die sich auf der Reise zum Immissionsort auch definiert ändern lassen. Hier ist vor allem an meteorologische Einflußfaktoren wie (Luft)temperatur, Feuchtigkeit, UV-Einstrahlung etc. zu denken, welche eine biologisch-chemische Umwandlung hervorrufen können oder Keime auch ganz absterben lassen.

### 3. Modellierung des Windfeldes mit digitalen Geländedaten

Die Umwandlung oder das Absterben von Mikroorganismen auf dem Ausbreitungspfad ist aber nur ein Modellteil, der physikalisch-mathematisch richtig zu beschreiben ist. Von entscheidender Bedeutung ist vor allem eine realitätsnahe Beschreibung des atmosphärischen Windfeldes, das die Spurenstoffe von der Quelle zum Immissionsort trägt.

Breiten sich luftgetragene Spurenstoffe gleich welcher Art in stark gegliedertem Gelände aus (Abb. 1), so können aufgrund der orografischen Prägung wesentliche Abweichungen des bodennahen Windes zum unbeeinflussten Wind in höheren Luftschichten auftreten: das Windfeld wird im Ausbreitungsraum des Spurenstoffs stark inhomogen. Zur Berechnung solcher geländegeprägten Windfelder steht das mesoskalige, diagnostische Windfeldmodell TALDIAMES im Rahmen der Ausbreitungsrechnung nach der TA Luft zur Verfügung. Durch Vorgabe eines digitalen Geländemodells, wie es in Bild 1 visualisiert ist, werden mit TALDIAMES die Kompo-

nenten des Windvektors an den Gitterschnittpunkten des Ausbreitungsraumes berechnet, die dann die meteorologische Datengrundlage zur Ausbreitungssimulation mit dem Partikelmodell AUSTAL 2000 bilden.



**Abb. 1:** Perspektivisch visualisiertes Geländekataster wie es als Digitales Geländemodell (DGM) zur Berechnung der Windfelder mit TALDIAMES und AUSTAL 2000 im Rahmen der Ausbreitungsrechnung nach TA Luft verwendet wird

Aber auch im kleinskaligen Bereich von etwa 20 m bis 200 m müssen die Strömungsfelder um die Quelle mit geeigneten Modellen berechnet werden, wenn der Ausbreitungsraum durch größere Gebäude, Vegetation oder andere markante Strömungshindernisse geprägt ist [3]. Abb. 2 gibt in augenfälliger Weise die Abweichungen vom homogenen Strömungsfeld im Bereich von eng zusammenstehenden, höheren Gebäuden wieder.

Der Horizontalschnitt durch das Strömungs- und Konzentrationsfeld wurde mit einem in unserem Ingenieurbüro entwickelten prognostischen Modell berechnet; das farb-kodierte Konzentrationsfeld zeigt hierbei ebenfalls eine deutliche Abweichung von der geradlinigen Ausbreitung wie sie im homogenen, ungestörten Strömungsfeld zu erwarten wäre. Werden die Strömungsfelder im Bereich komplexer Bebauung, etwa im innerstädtischen Gebiet, nicht explizit mit einem geeigneten Modell vorberechnet, so kann es bei der eigentlichen Ausbreitungssimulation

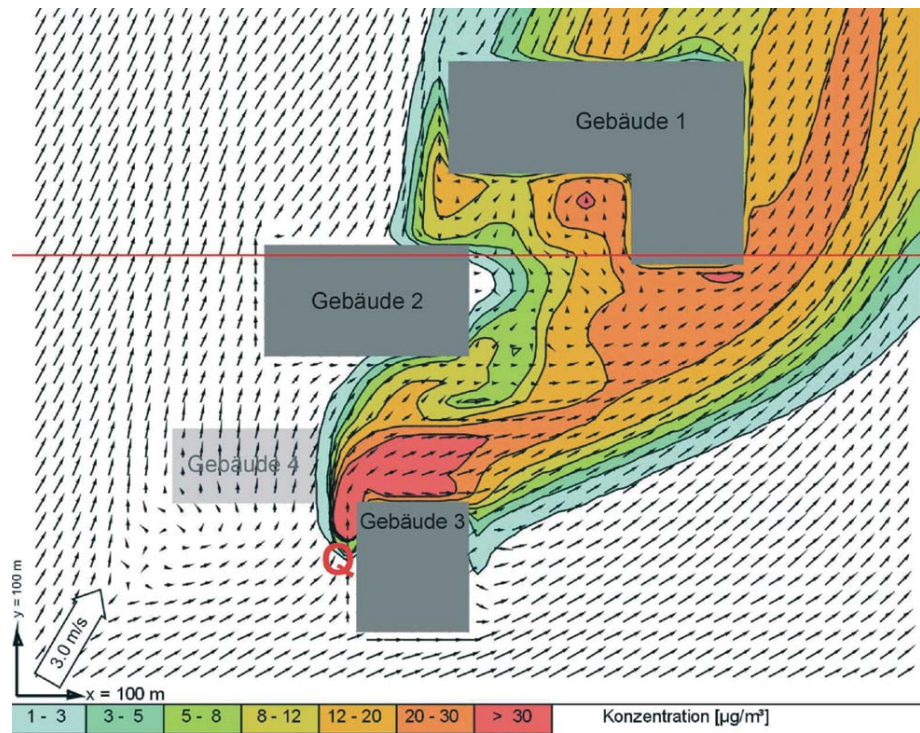


Abb. 2: Horizontalschnitt durch das simulierte dreidimensionale Strömungs- und Konzentrationsfeld im Umfeld komplexer Gebäudestrukturen. Die Gebäude 1, 2 und 3 ragen aus der Schnittebene heraus, während das Gebäude 4 unter der Ebene liegt

zu erheblichen Fehlern in der Konzentrationsberechnung kommen; mitunter wird nicht einmal die Größenordnung der Konzentration richtig getroffen, was bei Schadgasen schwerwiegende Konsequenzen haben kann.

#### 4. Windinduzierte Quellen

Erstmals wird im Anhang 3 der TA Luft die Berücksichtigung variabler Quellstärken bei windinduzierten Quellen vorgeschrieben. Windinduzierte Quellen wie z.B. offene Kompostmieten, Belebungsbecken bei Kläranlagen oder Güllelagunen zeichnen sich dadurch aus, daß sich der Emissionsmassenstrom mit zunehmender Anströmgeschwindigkeit erhöht. In einigen Fällen, man denke an teilseitig geschlossene Komposthallen oder Offenställe in der Landwirtschaft, kommt eine Abhängigkeit des Emissionsmassenstroms von der Windrichtung hinzu. Solche windinduzierten Quellen werden in der Ausbreitungsrechnung mit AUSTAL 2000 durch die Vorgabe einer Emissionsdatei modelliert, in der skalierte Emissionswerte für die einzelnen Windgeschwindigkeits- und ggf. Ausbreitungsklassen in Tabellenform

zusammengestellt sind. Anders als bei Zwangslüftungen besteht hier allerdings die Schwierigkeit darin, für bestimmte Anströmgeschwindigkeiten die absoluten Emissionsfrachten angeben zu können. In der Praxis behilft man sich dann mit Hauben- oder Kanalmessungen, deren Übertragbarkeit auf die ungestörten Anströmbedingungen unter wechselnden meteorologischen Verhältnissen nicht ganz unumstritten ist. Die relative Änderung des Emissionsmassenstroms wird für viele windinduzierte Quelltypen meist durch eine Proportionalität zur Wurzel aus der mittleren Anströmgeschwindigkeit beschrieben, die den Fall laminarer Strömungsverhältnisse widerspiegelt. Aber auch hier ist Vorsicht geboten, da sich der Massenaustrag bei einem Umschlag vom laminaren zum turbulenten Anströmregime schnell vergrößert.

## Teil II Computergesteuerte Anlagenführung

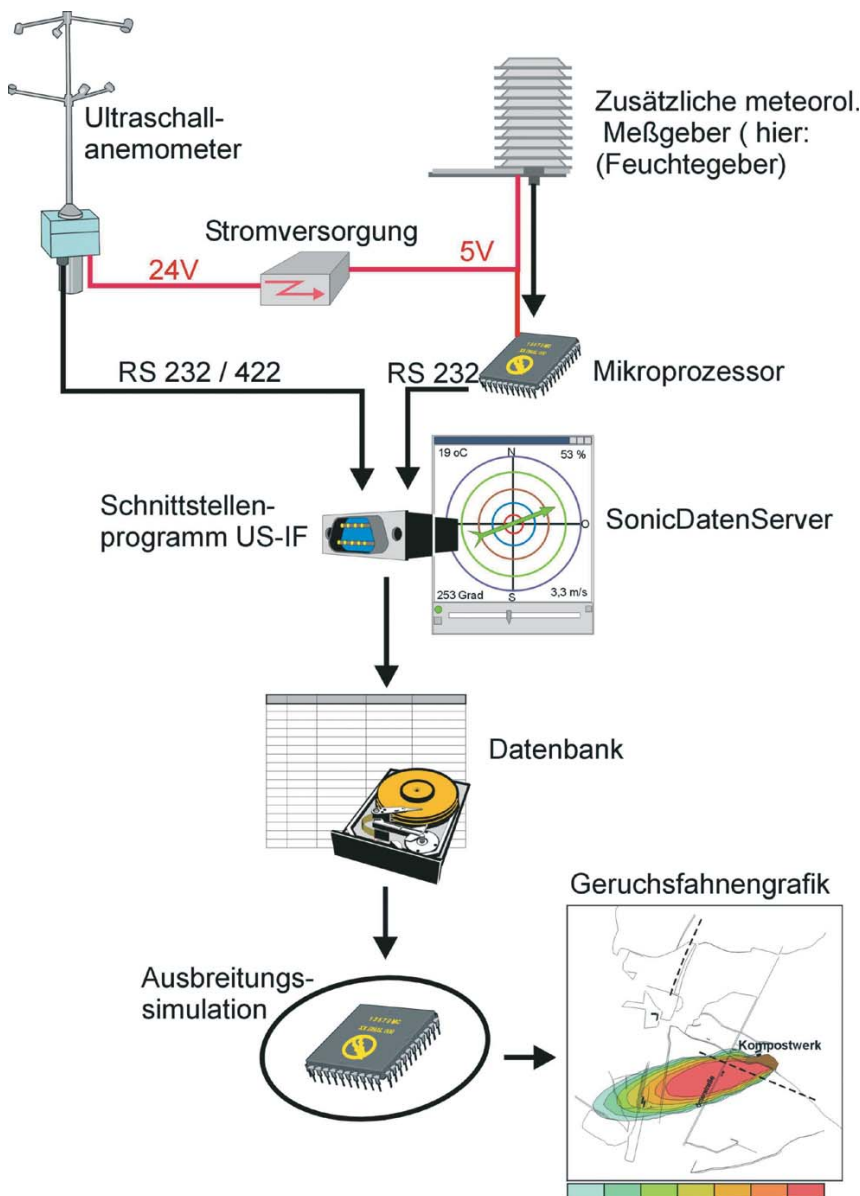
### 5. Das Meß- und Simulationssystem OdorSonic

Nicht selten weisen Immissionsprognosen im Genehmigungsverfahren für Abfallbehandlungsanlagen die Einhaltung der jeweils gültigen Grenzwerte aus, später aber, nach der Errichtung und Inbetriebnahme der Anlage, werden Beschwerden über unzumutbare Geruchsbelästigungen wie auch Mutmaßungen über hohe Keimkonzentrationen im Be-

reich der umliegenden Wohnbebauung laut. Dabei muß der Betreiber einer Anlage durchaus nicht untätig zusehen, wie bei ungünstigen Wetterlagen verbunden mit hohen Emissionsstärken die Beschwerdesituation heraufbeschworen wird; er hat Steuerungsmöglichkeiten, mit denen er gezielt und auch kurzfristig in die Betriebsführung seiner Anlage eingreifen kann [4]. Voraus-

setzung hierfür ist allerdings, dass er zuvor verlässliche Informationen über die zu erwartenden kritischen Immissionssituationen erhält, um rechtzeitig Maßnahmen zur Reduzierung oder zur lokalen Änderung der Emissionen treffen zu können. Solche Maßnahmen stehen durchaus im Einklang mit der „besten verfügbaren Technik“, wie sie als Forderung in der IVU-Richtlinie der EU aufgestellt ist [5]. Eine beste verfügbare Technik muss sich nicht notwendigerweise auf die Kapselfung von geruchsträchtigen Anlagenteilen mit nachgeschalteter Abluftreinigung beschränken; unter dem in der IVU-Richtlinie an gleicher Stelle genannten Kriterium der Verhältnismäßigkeit der einzusetzenden Technik gewinnen gerade zeitweise immissionsreduzierende Maßnahmen als kostengünstige Alternative zur Einhausung an Bedeutung.

Meteorologische Messstationen, zumindest in ihren einfachsten, meist mangelhaften Ausführungen, gehören inzwischen zur Grundausstattung von Abfallbehandlungsanlagen. Bei der Auswahl und Aufstellung einer meteorologischen Messstation am Standort der Anlage sind allerdings Anforder-



**Abb. 3:** Schematischer Aufbau des Mess- und Simulationssystems *OdorSonic*. Die Luftströmung wird durch ein Ultraschallanemometer erfasst und über ein Schnittstellenprogramm mit Windpfeilanzeige in eine Datenbank eingelesen. Mit den neuesten Winddaten wird dann in 10-minütigen Abständen eine Ausbreitungsrechnung für den gegenwärtigen Betriebszustand der Anlage durchgeführt

rungen zu beachten, von deren Einhaltung in hohem Maße die Qualität der Messdaten abhängt. So müssen nicht nur die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit (Schwachwindlagen!) mit großer Genauigkeit erfasst und registriert werden, darüber hinaus ist auch die Messung von Turbulenzgrößen dringend geboten, aus denen sich für die Ausbreitungsrechnung wichtige atmosphärische Stabilitätsparameter ableiten lassen.

Mit dem System OdorSonic werden am Anlagenstandort mit industriell-wissenschaftlicher Datenqualität Wind- und atmosphärische Turbulenzdaten sowie Lufttemperatur und ggf. weitere meteorologische Größen gemessen und über die serielle Schnittstelle in einen Messrechner (PC) eingelesen. Nach statistischer Auswertung der zeitlich hochauf-

gelösten Rohdaten werden 10-Minuten-Mittelwerte von

- Windrichtung
- horizontaler Windgeschwindigkeit
- Lufttemperatur
- Windgeschwindigkeitsfluktuationen
- weiteren Turbulenzgrößen (Schubspannungsgeschwindigkeit, vertikaler Wärmestrom etc.)

einerseits in eine meteorologische Datenbank eingespeist und andererseits an das Online Geruchsausbreitungsmodell bzw. -programm OdorSonic weitergeleitet (Abb. 3). Auf diese Weise können nicht nur kritische meteorologische Ausbreitungssituationen sofort erkannt und fortlaufend dokumentiert werden, sondern es lassen sich auch aktuelle belastigende Geruchsimmissionen im Einwirkungsbereich der Anlage erfassen.

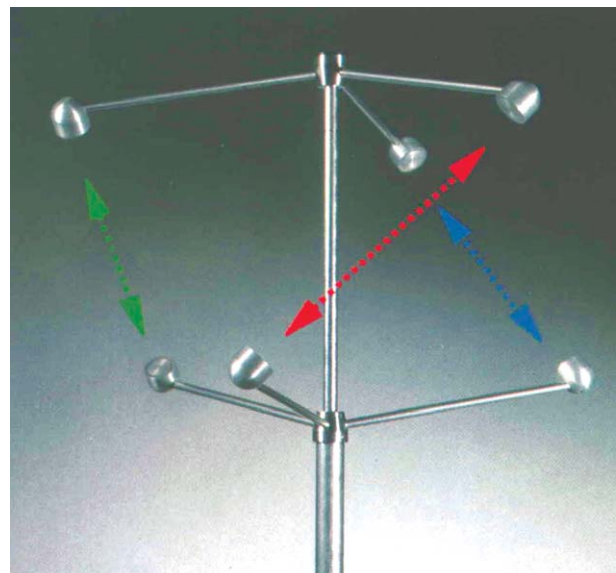
## 6. Wind- und Turbulenzmessung mit dem Ultraschallanemometer

Mit dem Mess- und Simulationssystem OdorSonic ist ein Anlagenbetreiber in der Lage, Präventivmaßnahmen zu ergreifen und so zumindest die Immissionspitzen an sensiblen Wohnorten zu vermeiden. Das System OdorSonic besteht aus einem Ultraschallanemometer (Abb. 4), mit dem nicht nur Windrichtung und -geschwindigkeit gemessen werden, sondern das auch sonst nur schwer zugängliche atmosphärische Turbulenzgrößen erfasst.

Die Messdaten werden sodann statistisch im 10-Minutentakt ausgewertet, leicht erkennbar durch eine Windpfeilanzeige dargestellt und in einer Datenbank gespeichert. Im gleichen Takt wird eine Online-Ausbreitungssimulation für den derzeitigen Betriebszustand (Emissionszustand) der Anlage mit den neuesten Winddaten automatisch ausgeführt. Die Ergebnisse der Simulation werden sofort danach auf dem Bildschirm des Messrechners mit einer topographischen Karte des Anlagenumfeldes unterlegt dargestellt, sodass immissionskritische Zustände gleich erkannt werden können (Abb 5).

Wie gut das System OdorSonic die tatsächlich vor Ort anzutreffenden Geruchsimmissionen wiederzugeben in der Lage ist, kann letzten Endes nur durch einen direkten Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Geruchshäufigkeiten oder -intensitäten festgestellt werden. Dazu lassen sich einerseits von

unplausiblen Angaben bereinigte Beschwerdeprotokolle der von den Geruchsbelästigungen betroffenen Anwohner verwenden; andererseits werden Geruchsfahnenbegehungen dazu herangezogen, die Reichweite und das Ausmaß der anlagenbedingten Geruchsimmissionen zu ermitteln. Fahnenbegehungen haben neben der wesentlich größeren Objektiv-



**Abb. 4:** Das Ultraschallanemometer USA-1 der Fa. METEK Elmshorn als integraler Bestandteil des Mess- und Simulationssystems *OdorSonic*. Es hat keine beweglichen Teile und arbeitet auch unter extremen Einsatzbedingungen

vität im Vergleich mit den Beschwerdeprotokollen den Vorteil, dass sie planmäßig bei definierten meteorologischen Randbedingungen in Verbindung mit

bestimmten Betriebszuständen der Kompostanlage durchgeführt werden können.

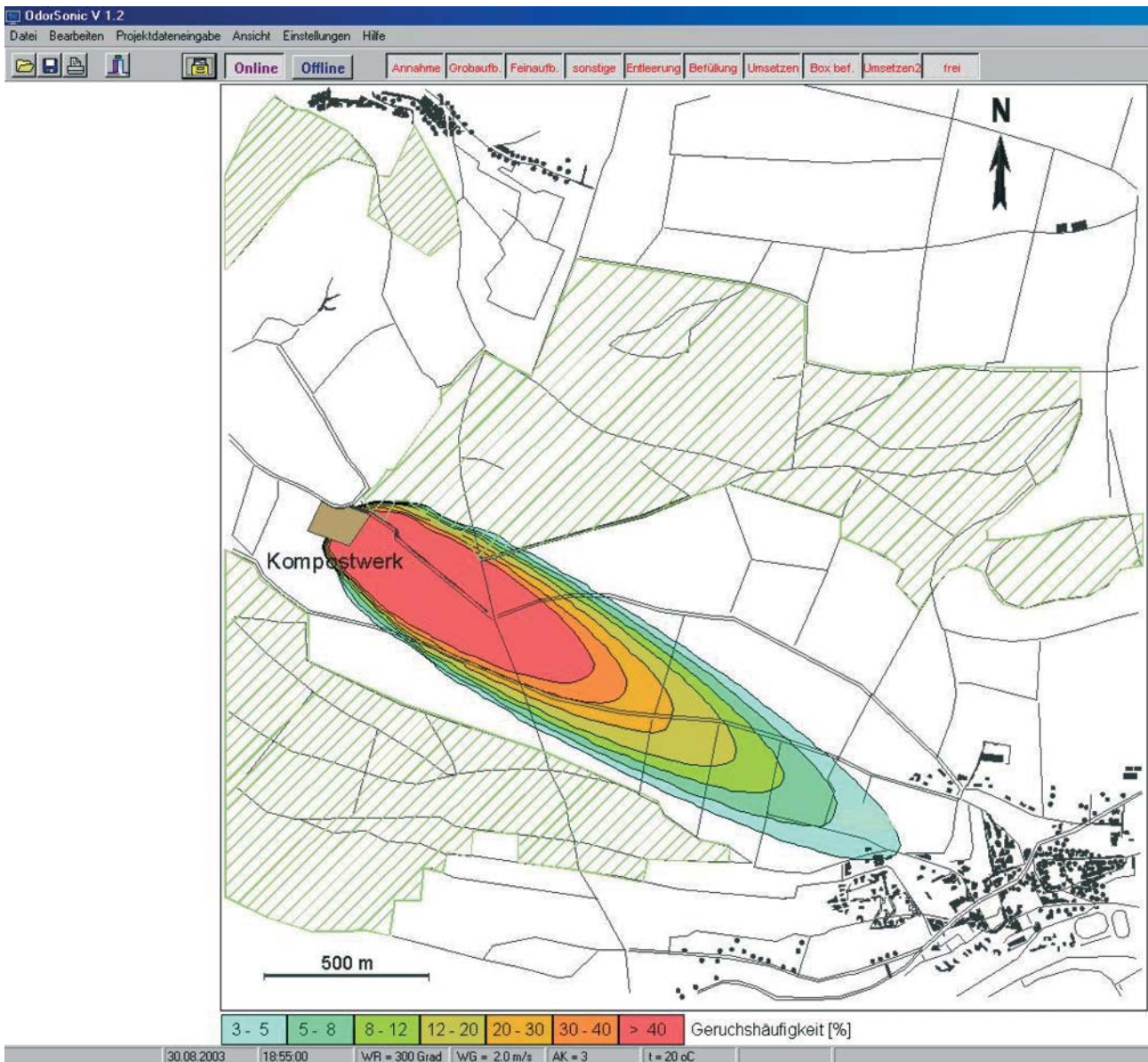


Abb. 5: Screenshot des Online-Simulationsprogramms OdorSonic. Richtung und Reichweite einer Abluftfahne werden vor dem Hintergrund des Anlagenumfeldes 10minütig aktualisiert und grafisch dargestellt

## 7. Validierung des Systems durch Fahnenbegehungen

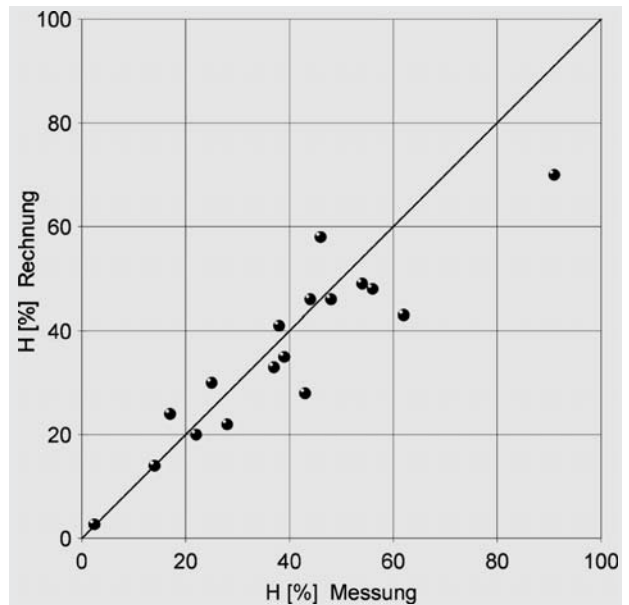
Anders als bei Schadgasen und Mikroorganismen lässt sich für Geruchsstoffe der menschliche (Geruchs)sinn unmittelbar als „Messinstrument“ einsetzen. Die belästigende Wirkung anlagenbedingter Gerüche wird ja an beurteilungsrelevanten Immissionsorten im Bereich der umliegenden Wohnbebauung grundsätzlich auf gleiche Art festgestellt wie

bei Geruchsfahnenbegehungen unter definierten Randbedingungen. Für eine Beurteilung der Geruchsbelästigung sind immer die statistisch gemittelten Feststellungen von Geruchshäufigkeit und -intensität durch Probandengruppen maßgeblich [6]. Das entspricht unmittelbar der Definition des Geruchsschwellenwertes: Die Geruchsschwelle ist als

diejenige Geruchsstoffkonzentration definiert, bei deren Darbietung von 50 % einer Testpersonengruppe (Grundgesamtheit) Gerüche wahrgenommen werden. Sie ist definitionsgemäß mit  $1 \text{ GE/m}^3$  belegt und wird auch als „Wahrnehmungsschwelle“ bezeichnet.

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurden im Umfeld einer bayerischen Kompostanlage mit einem Jahresdurchsatz von ca. 15.000 Mg Bioabfällen eine Reihe von Geruchsfahnenbegehungen durchgeführt [7]. Die Fahnenbegehungen fanden in der Zeit vom 7. März 2001 bis zum 27. Juli 2001 bei unterschiedlichen Wetterlagen und Betriebszuständen statt. 7 Probanden, deren Standorte mit einem GPS-Detektor festgehalten wurden, registrierten nach der aufintegrierenden Methode ihre Geruchswahrnehmungen über einen Begehungszeitraum von jeweils 10 Minuten. Die zu den Begehungsdaten gehörigen zeitgleichen Wind- und Turbulenzdaten wurden der Datenbank der auf dem Anlagengelände installierten Wetterstation OdorSonic entnommen; in einigen Fällen ist mit einem weiteren Ultraschallanemometer zusätzlich in der Nähe der Begehungsstandorte der Wind gemessen worden. Auf der Grundlage der meteorologischen und geometrischen Randbedingungen (Wind-/Turbulenzmesswerte, Koordinaten der Begehungsstandorte und der Geruchsquellen etc.) konnte ausgehend von den Begehungs-

daten durch Rückrechnung der Betriebszustand-abhängige Geruchsstoffstrom bestimmt werden. Die Güte des Verfahrens zeigt sich in einer direkten Gegenüberstellung der beobachteten und der berechneten Geruchshäufigkeiten (Abb. 6):



**Abb. 6:** Berechnete und gemessene Überschreitungshäufigkeiten der Geruchsschwelle. Ergebnisse der Modellsimulation im Vergleich mit Begehungsdaten für das Umfeld einer Kompostanlage

## 8. Schlussbemerkungen

Ogleich das System *OdorSonic* wie der Name schon sagt vorzugsweise für die Geruchsausbreitungssimulation entwickelt wurde, lässt es sich auch für andere luftgetragene Spurenstoffe wie Schadgase, Stäube oder Mikroorganismen mit den jeweils nötigen Modifikationen verwenden: die Physik der Ausbreitungsvorgänge bleibt schließlich dieselbe. Im einfachsten Fall wird zur Ausbreitungssimulation mit *OdorSonic* ein Gaußsches Abgasfahnenmodell verwendet; es lassen sich jedoch auch komplexere Modelltypen in das System integrieren, die im Falle eines stark gegliederten Anlagenumfeldes auf vorberechnete Windfelder zugreifen. Die Konzentrationsfluktuationen bzw. Überschreitungshäufigkeiten werden mit einem nachgeschalteten statistischen Modellansatz berechnet, der sich u. a. auf Messungen von Tracerkonzentrationen im Naturmaßstab stützt [8].

Das Mess- und Simulationssystem *OdorSonic* ist an mehreren Standorten in der Bundesrepublik Deutschland wie auch im Ausland in Betrieb. In diesem Jahr hat die dänische Firma RAMB LL Consult die exklusiven Rechte zum Vertrieb des Systems *OdorSonic* in den skandinavischen Ländern erworben.

Die Akzeptanz des Systems *OdorSonic* einschließlich des dahinter stehenden Konzeptes der Immissionsreduzierten Anlagensteuerung IRAS [9] durch Anwohner und Behörden liegt einerseits an der Transparenz und Anschaulichkeit des Systems; andererseits ist sie auch dadurch begründet, dass in nicht wenigen Fällen die betreffende Anlage als Störquelle aufgrund der meteorologischen Messdaten definitiv ausgeschlossen werden kann; im Regel-

fall führt das zu einen Rückgang der Beschwerden. Gelegentlich lassen sich auch mit Hilfe dieses Ausschlussprinzips bislang unentdeckt gebliebene (Ge-

ruchs)quellen auffinden, die mit der betreffenden Anlage in keinem betrieblichen Zusammenhang stehen.

## 9. Literatur

- [1] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz. Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft vom 24. Juli 2002
- [2] Richtlinie VDI 3945 Blatt 3 Umweltmeteorologie Atmosphärische Ausbreitungsmodell – Partikelmodell, September 2000
- [3] LUNG, T.: Numerische Immissionsprognose im Nahbereich komplexer Gebäudestrukturen. KTBL Arbeitspapier 253. Oktober 1997, S. 80–88
- [4] MÜSKEN, J.: Einfluss der Betriebsführung auf die Emissionscharakteristik einer Kompostanlage. In: Bioabfallkompostierung - Neue Entwicklungen und Lösungsmöglichkeiten zur Reduzierung von Geruchsemissionen. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden 2001, S. 9–18
- [5] Richtlinie 96/61/EG des Rates vom 24. September 1996 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU-Richtlinie)
- [6] LUNG, T.: Zur Technik der Begehungskalibrierung von Geruchsausbreitungsmodellen. KTBL Arbeitspapier 253. Oktober 1997, S. 56–65
- [7] BOCK, J.: Diplomarbeit eingereicht am 14. Juni 2001 an der Fachhochschule Wilhelmshaven, FB Maschinenbau
- [8] LUNG, T. ET AL.: Messung und Modellierung von Konzentrationsfluktuationen im Naturmaßstab. Agrartechnische Forschung 8, 2002 Heft 1, S. 5–15
- [9] LUNG, T.: IRAS - Immissionsreduzierte Anlagensteuerung. PC-gestütztes Instrument zur Charakterisierung von immissionsrelevanten Ausbreitungssituationen. In: Bioabfallkompostierung – Neue Entwicklungen und Lösungsmöglichkeiten zur Reduzierung von Geruchsemissionen. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden 2001, S. 19–27