

(Print) ISSN 1439–8222

(Internet) ISSN 1439–8303

Nummer/Number 9

Auflage/Edition 1

---

# Berichte zur Umweltphysik

## *Reports on Environmental Physics*

---

Weiterentwicklung ausgewählter methodischer  
Grundlagen der Schornsteinhöhenbestimmung und  
der Ausbreitungsrechnung nach TA Luft

*Enhancement of selected methodical foundations  
for the calculation of stack height and dispersion  
according to TA Luft*

Ulf Janicke, Lutz Janicke, Wolfgang Bächlin, Thomas Flassak,  
Wolfgang Theurer, Alfred Trukenmüller

April 2017



Ingenieurbüro Janicke, Hermann-Hoch-Weg 1, 88662 Überlingen, Germany

Autoren/Authors :

Dr. Ulf Janicke  
Dr. Lutz Janicke  
Ing.-Büro Janicke  
Hermann-Hoch-Weg 1  
D-88662 Überlingen  
(Email [uj@janicke.de](mailto:uj@janicke.de), [lj@janicke.de](mailto:lj@janicke.de))

Dr. Wolfgang Bächlin  
Dr. Thomas Flassak  
Ing.-Büro Lohmeyer GmbH & Co. KG  
An der Rossweid 3  
D-76229 Karlsruhe  
(Email [wolfgang.baechlin@lohmeyer.de](mailto:wolfgang.baechlin@lohmeyer.de), [thomas.flassak@lohmeyer.de](mailto:thomas.flassak@lohmeyer.de))

Dr. Wolfgang Theurer  
Ing.-Büro Theurer  
An den Gewerbewiesen 16  
D-67374 Hanhofen  
(Email [IB.Theurer.SP@t-online.de](mailto:IB.Theurer.SP@t-online.de))

Alfred Trukenmüller  
Umweltbundesamt  
Fachgebiet II 4.1  
Wörlitzer Platz 1  
D-06844 Dessau-Roßlau  
(Email [alfred.trukenmueller@uba.de](mailto:alfred.trukenmueller@uba.de))

**Berichte zur Umweltphysik (Print), ISSN 1439–8222**

**Berichte zur Umweltphysik (Internet), ISSN 1439–8303**

Herausgeber:  
Ingenieurbüro Janicke  
Hermann-Hoch-Weg 1, 88662 Überlingen  
Deutschland  
Internet: [www.janicke.de](http://www.janicke.de)

Publisher:  
Janicke Consulting  
Hermann-Hoch-Weg 1, 88662 Überlingen  
Germany  
Internet: [www.janicke.de](http://www.janicke.de)

Die Berichte dieser Schriftenreihe erscheinen in unregelmäßigen Zeitabständen. Sie werden im Selbstverlag gedruckt und außerdem auf der Internet-Seite [www.janicke.de](http://www.janicke.de) in Form von Pdf-Dateien kostenlos zur Verfügung gestellt. Alle Rechte sind dem Herausgeber vorbehalten.

The reports of this series are published at irregular time intervals and are printed by the publisher. In addition, the reports are made available free of charge in the Internet on page [www.janicke.de](http://www.janicke.de) in form of pdf files. All rights are reserved to the publisher.



# Weiterentwicklung ausgewählter methodischer Grundlagen der Schornsteinhöhenbestimmung und der Ausbreitungsrechnung nach TA Luft

Ulf Janicke, Lutz Janicke, Wolfgang Bächlin, Thomas Flassak,  
Wolfgang Theurer, Alfred Trukenmüller

April 2017

## Zusammenfassung

Dieser Bericht führt Untersuchungen auf, die im Forschungsvorhaben *Weiterentwicklung ausgewählter methodischer Grundlagen der Schornsteinhöhenbestimmung und der Ausbreitungsrechnung nach TA Luft* (FKZ 3714 43 204 00) von den Ingenieurbüros Janicke, Lohmeyer und Theurer im Auftrag des Umweltbundesamtes in den Jahren 2015 und 2016 durchgeführt wurden. Mit aufgeführt (Abschnitt 3.2.11.2) ist die ergänzende Untersuchung *Bestimmung der äquivalenten Quaderhöhe für die numerische mikroskalige Modellierung durch Untersuchungen im Windkanal*, die vom Ingenieurbüro Theurer im Auftrag der Länder Baden-Württemberg, Bayern, Berlin, Hessen und Thüringen durchgeführt wurden, und Vergleiche zwischen alter und neuer Schornsteinhöhenbestimmung (Abschnitt 2.5), die von Alfred Trukenmüller (Umweltbundesamt) im Rahmen der Begleitung dieses Forschungsvorhabens vorgenommen wurden.

## Abstract

This report quotes research that has been carried out 2015/2016 on behalf of the German Federal Environmental Agency (UBA) in the project *Enhancement of selected methodical foundations for the calculation of stack height and dispersion according to TA Luft* (FKZ 3714 43 204 00) by the companies Ingenieurbüro Janicke, Ingenieurbüro Lohmeyer and Ingenieurbüro Theurer. It contains (Section 3.2.11.2) the supplementary research on the *Wind tunnel determination of an equivalent block height for numerical microscale modelling* by Ingenieurbüro Theurer on behalf of the federal states Baden-Württemberg, Bayern, Berlin, Hessen und Thüringen and a comparison (Section 2.5) of former and new stack heights carried out by Alfred Trukenmüller (UBA) in course of steering this research project.



# Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Ungestörter Abtransport von Abgasen mit der freien Luftströmung</b>                       | <b>6</b>  |
| 1.1      | Einleitung   | 6         |
| 1.2      | Umströmung von Bauwerken und ihr Einfluss auf die Ausbreitung von Abgasen                    | 7         |
| 1.3      | Anforderungen für einen ungestörten Abtransport der Abgase im Sinne der TA Luft              | 11        |
| 1.4      | Umsetzung der Anforderungen in der überarbeiteten Richtlinie VDI 3781 Blatt 4 (2017)         | 12        |
| 1.5      | Bestimmung der maximalen Höhe der Abgasanlage bei großflächigen Gebäuden mit flachen Dächern | 15        |
| <b>2</b> | <b>Ausreichende Verdünnung</b>   | <b>17</b> |
| 2.1      | Einleitung   | 17        |
| 2.2      | Das alte Nomogramm   | 19        |
| 2.2.1    | Grundlagen   | 20        |
| 2.2.2    | Parameterwerte   | 21        |
| 2.2.3    | Maximalkonzentration und Schornsteinhöhe   | 22        |
| 2.2.4    | Endüberhöhung  | 23        |
| 2.2.5    | Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit  | 25        |
| 2.2.6    | Anwendung des Nomogramms   | 25        |
| 2.2.6.1  | Kurvenverlauf  | 25        |
| 2.2.6.2  | Annahmen und Näherungen  | 27        |
| 2.2.6.3  | Volumenstrom   | 27        |
| 2.2.6.4  | Sauerstoffgehalt   | 28        |
| 2.3      | Aktualisierter Ansatz  | 29        |
| 2.3.1    | Konzept  | 29        |
| 2.3.2    | Detailuntersuchungen   | 29        |
| 2.3.2.1  | Effektive Quellhöhe versus dynamische Überhöhung   | 30        |
| 2.3.2.2  | Spezialfall labile Schichtung  | 34        |
| 2.3.2.3  | Abhängigkeit der Konzentration von der Quellhöhe   | 41        |
| 2.3.3    | Festlegung der Modellierung  | 41        |
| 2.3.3.1  | Ausbreitungsrechnungen mit effektiver Quellhöhe  | 45        |
| 2.3.3.2  | Erstellung der Datenbasis  | 46        |
| 2.4      | Referenzimplementierung <i>BESMIN</i>  | 48        |
| 2.4.1    | Das Programm   | 48        |
| 2.4.2    | Technische Details   | 50        |
| 2.4.2.1  | Details des Rechenverfahrens   | 50        |



|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.4.2.2  | Bauhöhenbestimmung für niedrige Quellen . . . . .                          | 52        |
| 2.5      | Vergleich altes Nomogramm versus <i>BESMIN</i> . . . . .                   | 54        |
| 2.6      | Mehrere Quellen . . . . .  | 57        |
| 2.7      | Referenzimplementierung <i>BESMAX</i> . . . . .                            | 58        |
| 2.7.1    | Das Programm . . . . .   | 58        |
| 2.7.2    | Technische Details . . . . .   | 61        |
| 2.8      | Weitere Anmerkungen zu Nummer 5.5 der TA Luft . . . . .                    | 63        |
| 2.8.1    | Berücksichtigung von Bebauung und Bewuchs . . . . .                        | 63        |
| 2.8.2    | Berücksichtigung von unebenem Gelände . . . . .                            | 65        |
| 2.8.3    | Minimum der Schornsteinbauhöhe . . . . .                                   | 65        |
| <b>3</b> | <b>Fortschreibung der Ausbreitungsrechnung</b> . . . . .                   | <b>66</b> |
| 3.1      | Einleitung . . . . .   | 66        |
| 3.2      | Anhang Ausbreitungsrechnung . . . . .                                      | 66        |
| 3.2.1    | Abschnitt <i>Allgemeines</i> . . . . .                                     | 66        |
| 3.2.2    | Abschnitt <i>Festlegung der Emissionen</i> . . . . .                       | 67        |
| 3.2.3    | Abschnitt <i>Ausbreitungsrechnung für Gase</i> . . . . .                   | 67        |
| 3.2.4    | Abschnitt <i>Ausbreitungsrechnung für Stäube</i> . . . . .                 | 67        |
| 3.2.5    | Abschnitt <i>Ausbreitungsrechnung für Geruchsstoffe</i> . . . . .          | 68        |
| 3.2.6    | Abschnitt <i>Bodenrauigkeit</i> . . . . .                                  | 69        |
| 3.2.6.1  | Zuordnung der Klassen . . . . .  | 69        |
| 3.2.6.2  | Mittlere Rauigkeitslänge . . . . .   | 70        |
| 3.2.7    | Abschnitt <i>Abgasfahnenüberhöhung</i> . . . . .                           | 71        |
| 3.2.8    | Abschnitt <i>Rechengebiet und Aufpunkte</i> . . . . .                      | 72        |
| 3.2.9    | Abschnitt <i>Meteorologische Daten</i> . . . . .                           | 72        |
| 3.2.9.1  | Allgemeines . . . . .  | 72        |
| 3.2.9.2  | Windrichtung . . . . .   | 72        |
| 3.2.9.3  | Windgeschwindigkeit . . . . .  | 72        |
| 3.2.9.4  | Obukhov-Länge, Allgemein . . . . .   | 72        |
| 3.2.9.5  | Obukhov-Länge, Klassierung . . . . .                                       | 72        |
| 3.2.9.6  | Obukhov-Länge, Klassierung für III/1 . . . . .                             | 74        |
| 3.2.9.7  | Mischungsschichthöhe . . . . .   | 90        |
| 3.2.9.8  | Verdrängungshöhe . . . . .   | 90        |
| 3.2.9.9  | Niederschlagsintensität . . . . .  | 90        |
| 3.2.10   | Abschnitt <i>Berücksichtigung der statistischen Unsicherheit</i> . . . . . | 90        |
| 3.2.11   | Abschnitt <i>Berücksichtigung von Bebauung</i> . . . . .                   | 91        |
| 3.2.11.1 | Windfeldmodelle und Bebauung . . . . .                                     | 91        |
| 3.2.11.2 | Äquivalente Quaderhöhe . . . . .   | 93        |
| 3.2.12   | Abschnitt <i>Berücksichtigung von Geländeunebenheiten</i> . . . . .        | 97        |
| 3.2.13   | Abschnitt <i>Verwendung einer Häufigkeitsverteilung</i> . . . . .          | 97        |
| 3.2.14   | Abschnitt <i>Bestimmung Schornsteinhöhe</i> . . . . .                      | 98        |
| 3.3      | Abstandskurven für Ammoniak und weitere Stoffe . . . . .                   | 98        |
| 3.3.1    | Einleitung . . . . .   | 98        |
| 3.3.2    | Meteorologische Datensätze . . . . .                                       | 99        |
| 3.3.3    | Theorie . . . . .  | 99        |
| 3.3.4    | Tests und Vergleiche . . . . .   | 100       |



|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 3.3.4.1  | Das bisherige NH <sub>3</sub> -Abstandsdiagramm . . . . .                            | 100        |
| 3.3.4.2  | Erweiterte Rechnungen für bodennahe Quellen . . . . .                                | 104        |
| 3.3.4.3  | Folgerungen . . . . .  | 111        |
| 3.3.4.4  | Emission mehrerer Substanzen . . . . .   | 111        |
| 3.3.5    | Abstandsdiagramm für die überarbeitete TA Luft . . . . .                             | 112        |
| <b>4</b> | <b>Überhöhungsmodell</b>   | <b>113</b> |
| 4.1      | Einleitung . . . . .   | 113        |
| 4.2      | Ergänzende Erläuterungen . . . . .   | 114        |
| 4.2.1    | Berechnung der Dichte . . . . .  | 115        |
| 4.2.2    | Spezifische Wärmekapazität . . . . .   | 116        |
| 4.2.3    | Radialprofile . . . . .  | 117        |
| 4.2.4    | Berechnung des sichtbaren Fahnenradius . . . . .                                     | 120        |
| 4.2.5    | Berechnung der spezifischen Feuchte . . . . .  | 122        |
| 4.3      | PLURIS Version 3 . . . . .   | 124        |
| 4.3.1    | Referenzimplementierung IBJpluris . . . . .  | 124        |
| 4.3.2    | Abbruchkriterium . . . . .   | 124        |
| 4.3.3    | Profile nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) . . . . .                            | 126        |
| 4.3.4    | Stacktip downwash . . . . .  | 127        |
| 4.3.5    | Parameter für die Ausbreitungsrechnung . . . . .                                     | 128        |
| 4.4      | Zusätzliche Aspekte . . . . .  | 129        |
| 4.4.1    | Fahneninduzierte Turbulenz . . . . .   | 129        |
| 4.4.2    | Nahe beieinander liegende Quellen . . . . .  | 130        |
| 4.5      | Überhöhungsformeln nach der Richtlinie VDI 3782 Blatt 3 (1985) . . . . .             | 133        |
| 4.5.1    | Herleitung der Briggs-Formeln . . . . .  | 133        |
| 4.5.2    | Impulsüberhöhung . . . . .   | 136        |
| 4.5.3    | Thermische Überhöhung . . . . .  | 137        |
| 4.5.4    | Zusammenfassung . . . . .  | 139        |
| 4.6      | Validierungen und Vergleiche . . . . .   | 139        |
| 4.6.1    | Validierungsrechnungen der Veröffentlichung . . . . .                                | 139        |
| 4.6.2    | Vergleiche mit Richtlinie VDI 3782 Blatt 3 (1985) . . . . .                          | 145        |
| 4.6.2.1  | Impulsfahne, kleine Quellhöhe . . . . .  | 146        |
| 4.6.2.2  | Impulsfahne, indifferente Schichtung . . . . .                                       | 146        |
| 4.6.2.3  | Impulsfahne, alle Schichtungen . . . . .   | 146        |
| 4.6.2.4  | Thermische Fahne und feste Windgeschwindigkeit . . . . .                             | 150        |
| 4.6.2.5  | Thermische Fahne und variable Windgeschwindigkeit . . . . .                          | 153        |
| 4.6.2.6  | Zusammenfassung . . . . .  | 155        |
| 4.6.3    | Vergleiche mit Richtlinie VDI 3784 Blatt 2 (1990) bzw. <i>VDISP</i> . . . . .        | 155        |
| 4.6.3.1  | Meteorologische Profile . . . . .  | 156        |
| 4.6.3.2  | Vergleichsrechnungen . . . . .   | 157        |
| 4.6.3.3  | Ergebnisse . . . . .   | 158        |
| 4.6.4    | Auswirkung von unterschiedlichen Werten des Abbruchfaktors im Jahresmittel . . . . . | 161        |
| 4.6.5    | Vergleich mit dem Datensatz Indianapolis . . . . .                                   | 166        |
| 4.7      | Diskussion des Abbruchfaktors . . . . .  | 167        |



|  |            |
|--|------------|
| <b>5 Workshops</b>   | <b>172</b> |
| 5.1 Einleitung . . . . .   | 172        |
| 5.2 Durchführung der Workshops . . . . .   | 172        |
| 5.2.1 Erster Workshop – Umweltbundesamt in Dessau, 06./07.07.2015 . . . . .  | 173        |
| 5.2.2 Zweiter Workshop – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau<br>und Reaktorsicherheit, 16./17.11.2015 . . . . . | 173        |
| 5.2.3 Dritter Workshop – Umweltbundesamt in Dessau, 18./19.01.2016 . . . . .   | 173        |
| 5.2.4 Tagesordnungen . . . . .   | 174        |
| 5.3 Protokolle . . . . .   | 177        |
| 5.3.1 Erster Workshop . . . . .  | 178        |
| 5.3.2 Zweiter Workshop . . . . .   | 187        |
| 5.3.3 Dritter Workshop . . . . .   | 197        |
| <b>Literatur</b>   | <b>210</b> |



# Kapitel 1

## Ungestörter Abtransport von Abgasen mit der freien Luftströmung

### 1.1 Einleitung

Das Immissionsschutzrecht ist einer der zentralen Rechtsbereiche des Umweltschutzes. Regelt durch das Bundes-Immissionsschutzgesetz, verfolgt es die Ziele, den Menschen und seine Umwelt vor potenziell schädlichen Einwirkungen (Immissionen) zu schützen (Gefahrenabwehr) und ihrem Entstehen vorzubeugen (Vorsorge). Grundsätzlich sind die Immissionen vorrangig zu vermeiden oder durch eine Verringerung der Emissionen unter dem Einsatz der besten verfügbaren Technik zu minimieren. Lassen sich Emissionen dennoch nicht vermeiden, so gilt es, die schädlichen Einwirkungen auf den Menschen, Tiere und Pflanzen so gering wie möglich zu halten. Dies bedeutet, dass Abgasemissionen in die Atmosphäre möglichst gut verdünnt werden müssen. Eine möglichst gute Verdünnung wird erreicht, wenn die Freisetzung der Abgase in die durch Bebauung und sonstige Hindernisse ungestörte, freie Luftströmung der Atmosphäre erfolgt.

In der TA Luft und auch in anderen Regelwerken und Richtlinien hat sich deshalb der Begriff des „ungestörten Abtransportes von Abgasen mit der freien Luftströmung“ festgesetzt. Gemeint ist damit die Ableitung der Abgase so, dass sie nicht in den direkten Einflussbereich von Gebäuden und sonstigen Hindernissen gelangen. Eine ähnliche Formulierung findet sich auch in anderen Richtlinien, z.B. in der Richtlinie VDI 2280 (2005). Hier ist der Ort der Freisetzung so zu wählen, dass er nicht im Bereich von „Störzonen“ liegt bzw. ein Eintrag der Abgase in die Störzonen weitgehend vermieden wird.

Der Ausdruck „ungestörter Abtransport“ ist allerdings missverständlich, weil ein wirklich ungestörter Abtransport, d.h. Ableitung in einen Bereich der atmosphärischen Grenzschicht, die nicht durch die Bebauung und andere Hindernisse beeinflusst ist, zu unrealistisch hohen Schornsteinhöhen führen würde. Der Ausdruck „ungestörter Abtransport von Abgasen mit der freien Luftströmung“ ist daher als eine Konvention im Sprachgebrauch zu sehen. Gemeint ist hiermit eine Freisetzung außerhalb der Rezirkulationszonen oder Störzonen, die nachfolgend beschrie-



ben werden.

Die Anforderungen und Randbedingungen für einen „ungestörten Abtransport mit der freien Luftströmung“ im Sinne dieser Definition werden in der überarbeiteten Richtlinie VDI 3781 Blatt 4 (2017)

*Umweltmeteorologie – Ableitbedingungen für Abgase  
Kleine und mittlere Feuerungsanlagen sowie andere als Feuerungsanlagen*

allgemein dargelegt.

Die Richtlinie VDI 2280 (1977), auf die in der TA Luft (2002) unter 5.5.2 Abschnitt 5 verwiesen wird, wurde zwischenzeitlich zurückgezogen. Die neu erschienene Richtlinie VDI 2280 „Ableitbedingungen für organische Lösemittel“ aus dem Jahr 2005 befasste sich nur noch mit den Ableitbedingungen. Die dort definierten Anforderungen sind in die überarbeitete Richtlinie VDI 3781 Blatt 4 (2017) integriert, so dass künftig in der TA Luft nur noch auf die Richtlinie VDI 3781 Blatt 4 (2017) verwiesen werden muss.

## 1.2 Umströmung von Bauwerken und ihr Einfluss auf die Ausbreitung von Abgasen

Für die Ausbreitung von Abgasen in Gebäudenähe ist das Strömungsfeld um die Bauwerke verantwortlich, welches bereits bei einfachen Körpern sehr komplex ist. In Bild 1.1 sind die verschiedenen Strömungsregime am Beispiel eines Würfels dargestellt:

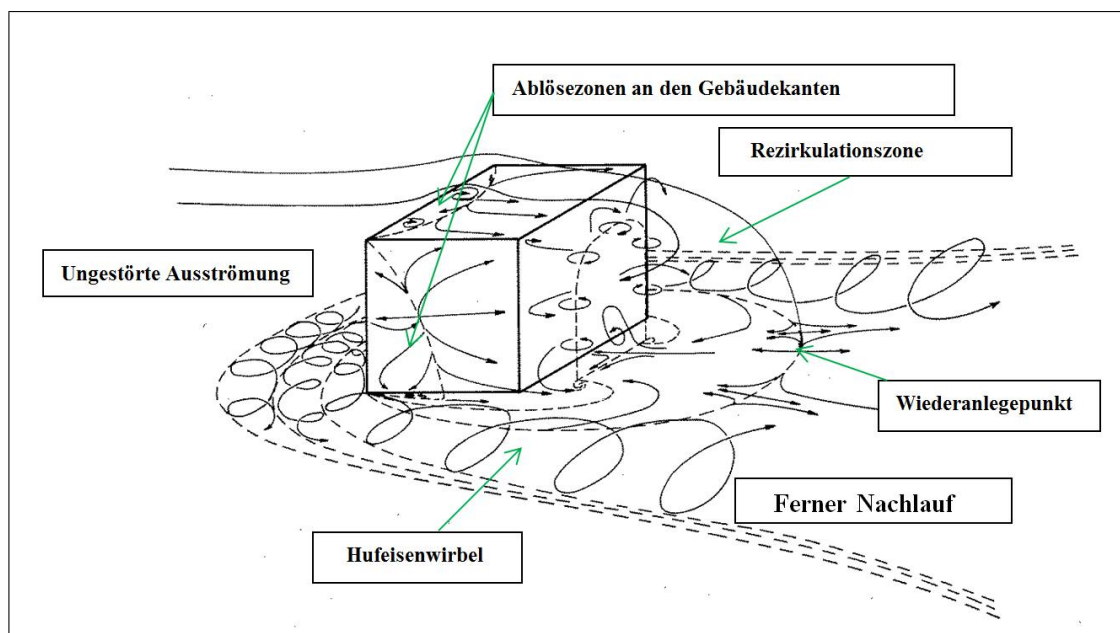


BILD 1.1: Wirbelstrukturen bei Umströmung eines Würfels nach Woo (1976).

Auf der windzugewandten Seite bildet sich das *Frontwirbelsystem* aus, bei der seitlichen Umströmung entsteht nach Ablösung der Strömung an den seitlichen Kanten der sogenannte *Hufeisenwirbel* und auf der windabgewandten Seite entwickelt sich die *Rezirkulationszone*, auch *Kavitätszone* genannt.

Die für die Ausbreitung in Gebäudenähe wesentlichen Strömungsmerkmale sind in Bild 1.2 oben am Beispiel eines einfachen quaderförmigen Gebäudes im Mittelschnitt dargestellt. Beim Um- und Überströmen des Bauwerks löst die Strömung an den luvseitigen Kanten ab. Es bildet sich bei der Überströmung des Körpers eine Rezirkulationszone aus, welche in der Literatur auch als naher Nachlauf bezeichnet (siehe VDI 3783 Blatt 10, 2010) wird, und die eine für sie typische Rückströmung zum Gebäude hin aufweist. Stromabwärts folgt der ferne Nachlauf, der durch zum Boden abgelenkte Stromlinien, erhöhte Turbulenz und reduzierte Windgeschwindigkeiten geprägt ist. Aufgrund der Strömungsablösung und der dadurch induzierten Sekundärströmung sind die vertikalen Windprofile durch eine Abnahme der Windgeschwindigkeit  $u_0$  bis weit in den fernen Nachlauf beeinflusst (siehe Bild 1.2).

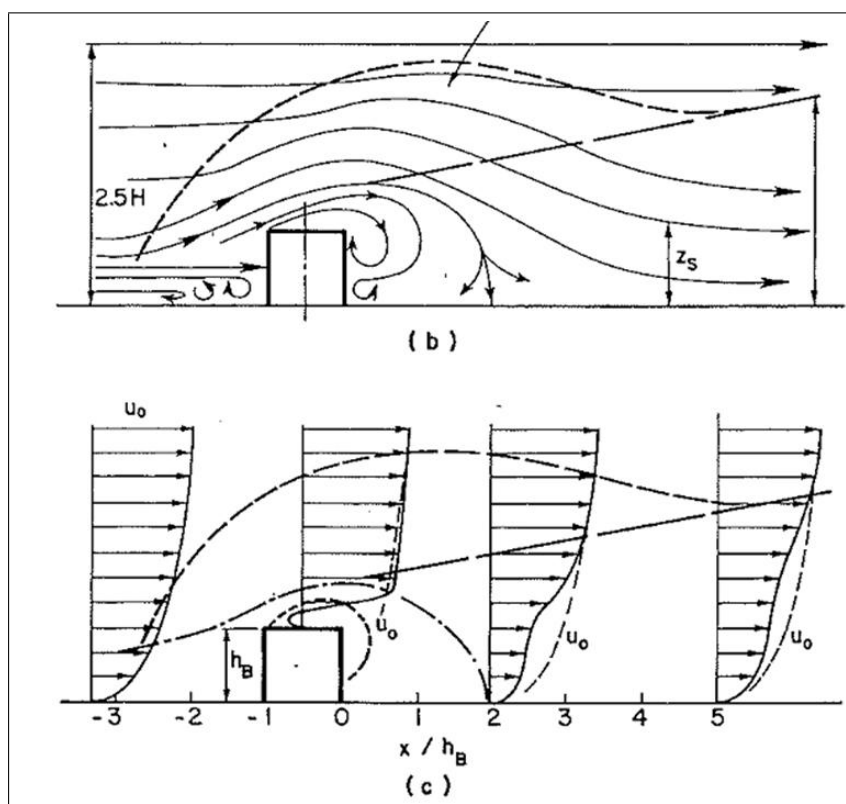


BILD 1.2: Strömungsfeld im Mittelschnitt um ein quaderförmiges Gebäude nach MERONEY (1982).

Bei Freisetzung von Abgasen im Umfeld von Gebäuden oder auf Gebäuden ist darauf zu achten, dass die Abgase außerhalb der Störbereiche des Gebäudes freigesetzt werden. In Bild 1.3 sind die Auswirkungen von unterschiedlichen Freisetzungshöhen bzw. -positionen der Abgase auf die immissionsseitigen Konzentrationsverhältnisse anschaulich dargestellt. Liegt der Freisetzungsort der Abgase deutlich außerhalb des Störbereichs des Gebäudes, wie bei der linken Quelle im Fall (a), kann die Abgasfahne ungestört abströmen. Bei der etwas niedrigeren Quelle im Fall (a) rechts gelangen die Abgase zwar nicht in die Rezirkulationszone des Bauwerks, aber aufgrund des sich einstellenden Strömungsregimes wird die Fahne nach unten in den fernen Nachlauf umgelenkt, höhere Konzentrationen finden sich aber weit oberhalb des Bodenniveaus.

Auch hier wäre im Sinne der Definition im Abschnitt 1.1 von einem – weitgehend – ungestörten Abtransport der Abgase mit der freien Luftströmung auszugehen. Werden die Abgase, wie im Fall (c) im Bereich der Rezirkulationszone freigesetzt, erfolgt eine Umlenkung der Abgase zum Boden hin und ein Rücktransport zum Gebäude mit bodennah sehr hohen Abgaskonzentrationen. Bei einer Freisetzung der Abgase nur wenig über der Rezirkulationszone kann es dennoch, bedingt durch die sich einstellende Scherschicht, zur Einmischung von Abgasen in die Rezirkulationszone kommen (Fall b).

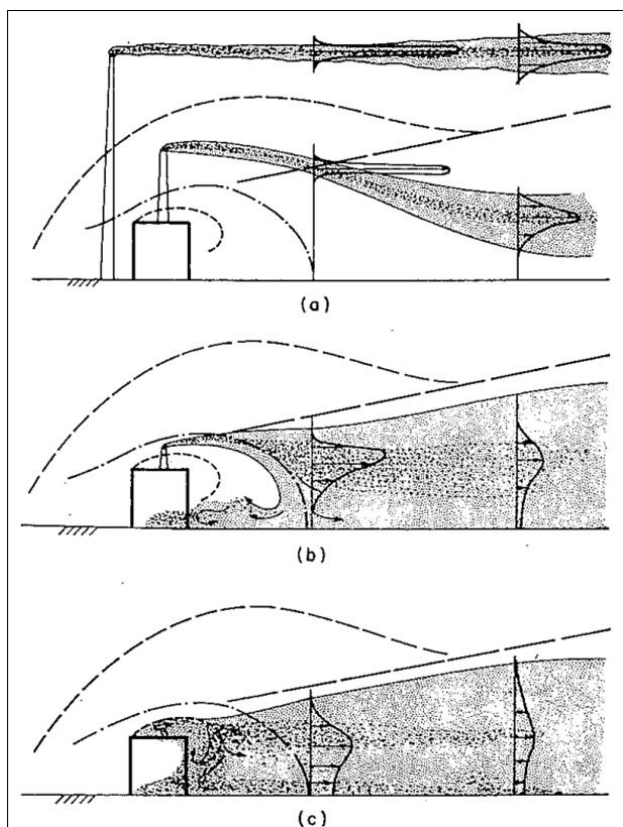


BILD 1.3: Ausbreitung der Abgase bei unterschiedlichen Quellhöhen (MERONEY, 1982).

In Bild 1.4 sind die in den Bildern 1.2 und 1.3 getrennt gezeigten Effekte von Bauwerken auf Strömung und Ausbreitung gemeinsam dargestellt. Die vertikalen Geschwindigkeitsprofile in Bild 1.4 (zweites Teilbild von oben) zeigen in Bodennähe die Rückströmung in der Rezirkulationszone. In Bild 1.4 (drittes Teilbild von oben) ist, wie oben ausgeführt, die schwache Einmischung von Schornsteinabgasen über die sich einstellende Scherschicht in die Rezirkulationszone dargestellt.

Die beschriebenen Strömungs- und Ausbreitungsphänomene wurden seit den 1960er Jahren näher beobachtet und durch zahlreiche grundlegende Untersuchungen an physikalischen Modellen in Wind- und Wasserkanälen systematisch erfasst. Basierend auf Arbeiten von EVANS (1957) zeigt Bild 1.5 nach WOLFSEHER & GERTIS (1978) schematisch die Überströmung von Gebäuden mit Satteldächern verschiedener Neigungswinkel und die sich dann einstellenden Rezirkulationszonen. Man erkennt deutlich die Ablösung der Strömung am Dachfirst und die bei steileren Dachneigungswinkeln entsprechend größeren Rezirkulationszonen.

WILSON (1979) führte systematische Messungen an Gebäuden mit Flachdächern mit unter-

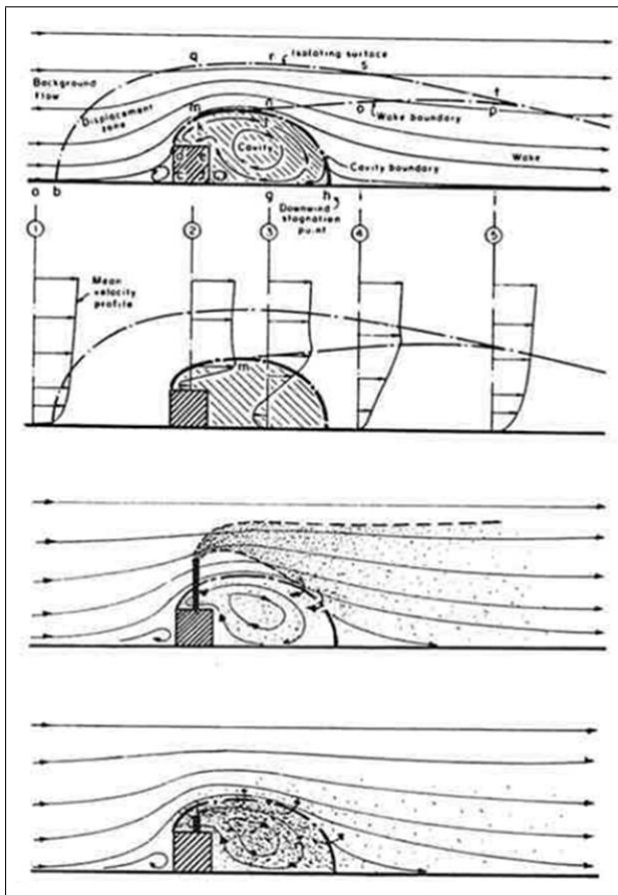


BILD 1.4: Skizzierte Darstellung der Umströmung eines würfelförmigen Gebäudes. Stromlinien (oben), mittlere Windprofile (Mitte) und Einfluss der Schornsteinhöhe (unten), nach FERT (1978).

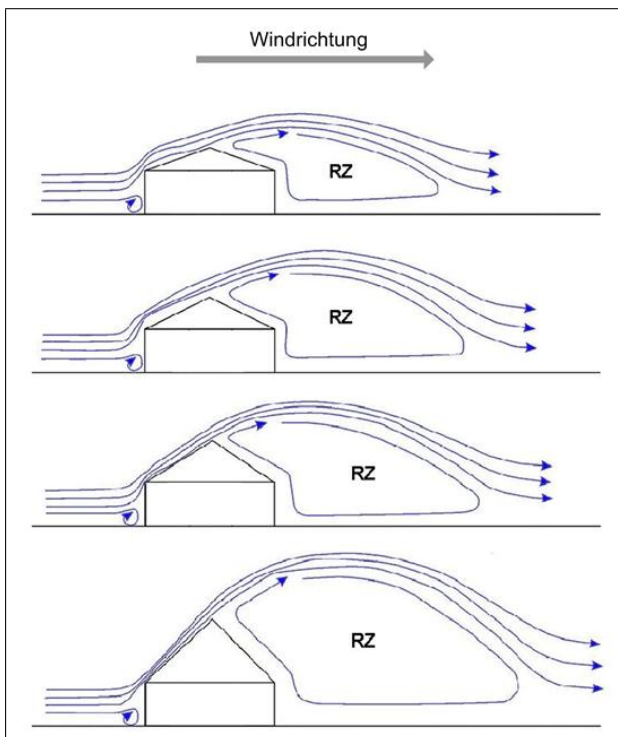


BILD 1.5: Qualitative Darstellung der Rezirkulationszonen (RZ) in Abhängigkeit von der Dachneigung (auf Grundlage von WOLFSEHER & GERTIS, 1978).

schiedlichen Grundflächen und Längen-, Breiten- und Höhenverhältnissen zur Bestimmung der Umströmung der Gebäude und der sich einstellenden Rezirkulationszonen durch. Er versuchte, mit pragmatischen Ansätzen die Abmessungen dieser Zonen zu beschreiben, die in Bild 1.6 schematisch dargestellt sind. Für eine Reihe von Gebäudeformen unterschiedlicher Abmessungen entwickelte er Formeln und Diagramme zur Berechnung der entsprechenden Zonen. Nach WILSON (1979) kann die Höhe der Rezirkulationszone  $H_c$  berechnet werden als

$$H_c = 0.22R \quad \text{mit} \quad R = D_{\text{small}}^{0.67} D_{\text{large}}^{0.33} \quad (1.1)$$

mit dem Parameter  $R$  als Produkt der jeweiligen kürzeren Abmessung  $D_{\text{small}}$  der angeströmten Gebäudefläche (z.B. Höhe des Gebäudes) und der längeren Abmessung  $D_{\text{large}}$  (z.B. Breite des Gebäudes) mit den entsprechenden Exponenten.

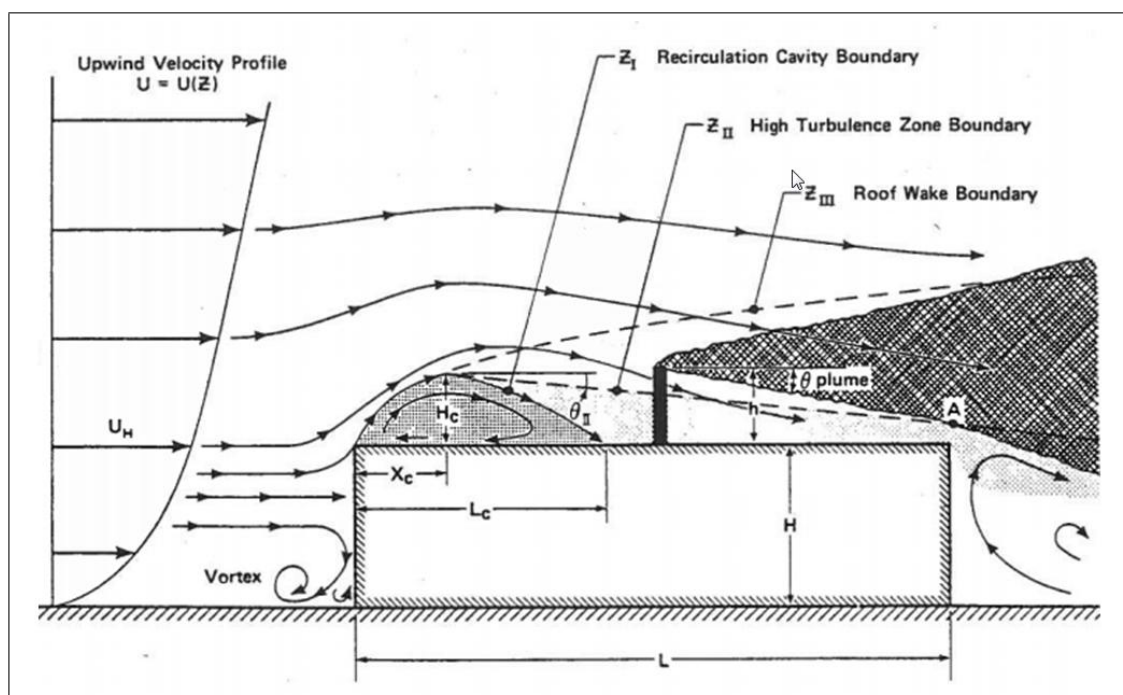


BILD 1.6: Verschiedene Zonen bei Umströmung eines Gebäudes mit Flachdach nach WILSON (1979).

Den Vergleich von in Grenzschichtwindkanälen ermittelten gebäudenahen Strömungs- und Ausbreitungsverhältnissen mit Feldmessungen und die Übertragung der modelltechnisch erfassten Werte auf Naturverhältnisse zeigen z.B. die Arbeiten von PERNPEINTNER ET AL. (1988).

### 1.3 Anforderungen für einen ungestörten Abtransport der Abgase im Sinne der TA Luft

Der ungestörte Abtransport von Abgasen mit der freien Luftströmung im Sinne der in Abschnitt 1.1 beschriebenen Konvention bedingt, dass die Abgase außerhalb des unmittelbaren Einflussbereiches von Gebäuden auf die Strömung freigesetzt werden. Insbesondere ist eine

Freisetzung in Rezirkulationszonen um Gebäude zu vermeiden, wie die Bilder 1.3 und 1.4 zeigen. Die sich bei der Um- und Überströmung der Gebäude einstellenden Druckverhältnisse bewirken in den Rezirkulationszonen, wie dargestellt, eine Umlenkung der an der Dachkante abgelösten Strömung zum Boden hin und eine Rückströmung zum Gebäude. Dadurch gelangen in den Rezirkulationszonen freigesetzte Abgase nur unzureichend verdünnt bis in Bodennähe und werden wieder, entgegen der eigentlichen Strömungsrichtung, zurück zum Gebäude transportiert. Dies führt zu erheblich höheren Schadstoffkonzentrationen als bei einer Emission in die freie Luftströmung. Zur Bestimmung der Höhe und Lage von Schornsteinen ist daher die Kenntnis der Rezirkulationszonen unabdingbar. Die Ausdehnung der Rezirkulationszonen ist in erster Linie abhängig von der Gebäudegeometrie selbst, aber auch von den Anströmbedingungen. Bei der praktischen Anwendung müssen diese Größen berücksichtigt werden.

Im fernen Nachlauf findet der Übergang von der gestörten zur ungestörten Strömung statt. Die Einflussnahme des Gebäudes auf die Strömung und Ausbreitung von Abgasen geht mit zunehmender Entfernung vom Gebäude kontinuierlich zurück. Die Windgeschwindigkeit in diesem Bereich ist reduziert mit modifizierten Turbulenzeigenschaften. Emissionen im Einflussbereich des fernen Nachlaufs können zwar auch zu einer Erhöhung von Immissionen führen, die bodennah allerdings deutlich geringer ausfällt, als bei Freisetzung in den Rezirkulationszonen.

## 1.4 Umsetzung der Anforderungen in der überarbeiteten Richtlinie VDI 3781 Blatt 4 (2017)

Die Forderung nach einem ungestörten Abtransport der Abgase mit der freien Luftströmung setzt im Sinne der vorangegangenen Definition Kenntnisse über die Ausdehnung der Rezirkulationszonen um Gebäude voraus. Auf dieser Grundlage ist es dann möglich, die Mindesthöhe der Mündungen von Einrichtungen zur Ableitung von Abgasen, die aus Feuerungsanlagen, aus Anlagen, die organische Lösemittel freisetzen, und aus anderen, schadstoffemittierenden Anlagen stammen, zu bestimmen. Mit der Neufassung der Richtlinie VDI 3781 Blatt 4 (2017) wurden, basierend auf den strömungsmechanischen Aspekten, die Abmessungen der Rezirkulationszonen definiert und, darauf aufbauend, die Anforderungen an die Mindesthöhen von Einrichtungen zur Ableitung von Abgasen erarbeitet, um einen ungestörten Abtransport der Abgase mit der freien Luftströmung im Sinne der obigen Definition zu gewährleisten. Emissionsfreisetzungen innerhalb der Rezirkulationszonen sind zu vermeiden.

Nach dem Ablaufschema aus der Richtlinie VDI 3781 Blatt 4 (2017) in Bild 1.7 sind dabei durch den Anwender der Richtlinie verschiedene Situationen zu betrachten. Die Bearbeitung ist stufenweise aufgebaut:

Zunächst wird das *Gebäude als allein stehendes Einzelgebäude*, quasi auf der grünen Wiese, ohne den Einfluss einer Umgebungsbebauung betrachtet. In Abhängigkeit von der Dachneigung und -form des Gebäudes mit der Abgasanlage und ihrer Position auf dem Dach wird die erforderliche Höhe der Abgasanlage  $H_{A1}$ , bezogen auf die Firsthöhe, berechnet. Als Dachformen behandelt werden symmetrische und unsymmetrische Satteldächer, Flachdächer, Pultdächer, Sheddächer, Walmdächer und verwandte Formen sowie Mansarddächer. Andere Formen lassen

sich durch eine sinnngemäße Anwendung abdecken.

Im nächsten Schritt wird eine etwaige vorgelagerte Bebauung berücksichtigt. Dabei wird überprüft, ob das zu betrachtende Gebäude im Bereich der Rezirkulationszonen von vorgelagerten Einzelgebäuden oder vorgelagerter geschlossener Bebauung liegt. Der Ausdruck „vorgelagerte Bebauung“ bezieht sich nicht auf eine Windrichtung, sondern alle Gebäude in der Umgebung werden als potentiell vorgelagerte Gebäude berücksichtigt. Die Richtlinie liefert die entsprechenden Berechnungsansätze zur Ermittlung der Höhe  $H_{A2}$  der Abgasanlage, damit ihre Mündung außerhalb der Rezirkulationszonen der umgebenden Gebäude zu liegen kommt.

Liegen die Gebäude in *Hanglage*, dann ist der Höhenunterschied zwischen der für das vorgelagerte Gebäude und der für das Gebäude mit der Abgasanlage maßgeblichen Geländeoberfläche zu erfassen und daraus gegebenenfalls eine korrigierte Höhe  $H_{A2,T}$  der Abgasanlage zu bestimmen.

Schließlich können auch *Dachaufbauten* auf Gebäuden eigene Rezirkulationszonen erzeugen und wie Einzelgebäude oder wie eine vorgelagerte Bebauung wirken. Auch hier ist darauf zu achten, dass im Sinne des ungestörten Abtransports die Freisetzung der Abgase außerhalb der Rezirkulationszonen erfolgt. Die Vorgehensweise zur Erfassung dieser Zonen ist in der Richtlinie beschrieben; Ergebnis sind die Höhen  $H_{A1,DA}$  oder  $H_{A2,DA}$  der Abgasanlage.

Aus den Höhen  $H_{A1}$ ,  $H_{A2}$ ,  $H_{A2,T}$ ,  $H_{A1,DA}$  und  $H_{A2,DA}$  ist die größte berechnete Höhe  $H_A$  zu ermitteln. Diese Höhe  $H_A$  legt die erforderliche Höhe der Abgasanlage über First fest, die per Definition einen ungestörten Abtransport der Abgase ermöglicht.

Grundsätzlich gilt, dass der über dem Dach freistehende Teil einer Abgasanlage am kürzesten ist, wenn die Anlage möglichst am höchsten Punkt eines Gebäudes, also firstnah, positioniert wird, wie viele Beispiele aus der Vergangenheit zeigen. Zu beachten ist dennoch, dass, wie die Bilder in Abschnitt 1.2 zeigen, die Berandung der Rezirkulationszone keine scharfe Linie im Vertikalschnitt und keine scharfe Grenzfläche im Raum ist, sondern aufgrund der sich zur Außenströmung hin einstellenden, hochturbulenten Scherschicht eine gewisse Dicke aufweist. Bei der Berechnung der Mündungshöhen wird dies durch einen additiven Term  $H_{\bar{U}}$  berücksichtigt. Der Wert von  $H_{\bar{U}}$  wurde als Konvention festgelegt. In Abhängigkeit von der Nenn- oder Feuerungswärmeleistung bei Feuerungsanlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV und bei Feuerungsanlagen mit einer Feuerungswärmeleistung größer oder gleich 1 MW beträgt er zwischen 0.4 und 3.0 m, bei anderen als Feuerungsanlagen beträgt er in der Regel 3.0 m. Dies gilt insbesondere für Anlagen im Anwendungsbereich der 31. BImSchV. Bei anderen als Feuerungsanlagen außerhalb des Anwendungsbereichs der 31. BImSchV kann der Wert von  $H_{\bar{U}}$  sinngemäß wie bei den Feuerungsanlagen abgestuft werden.

Die überarbeitete Richtlinie VDI 3781 Blatt 4 (2017) wurde anwendungsorientiert gestaltet. Neben dem Ablaufschema in Bild 1.7 ergänzen Skizzen zum besseren Verständnis die Berechnungsansätze zu dem jeweiligen Themenpunkt. Im Anhang zur Richtlinie finden sich als Hilfestellung für den Anwender zahlreiche illustrierte Beispiele mit nahezu allen in der Richtlinie verwendeten Einzelgrößen. Trotz der umfassenden Darstellungen kann die Richtlinie nicht jeden Einzelfall einer Bebauung abbilden. In solchen Fällen sollte auf eine weitergehende Modellierung der Strömung und Rezirkulationszonen, beispielsweise in einem Grenzschichtwind-

kanal oder durch eine detailgetreue numerische Modellierung, zurückgegriffen werden.

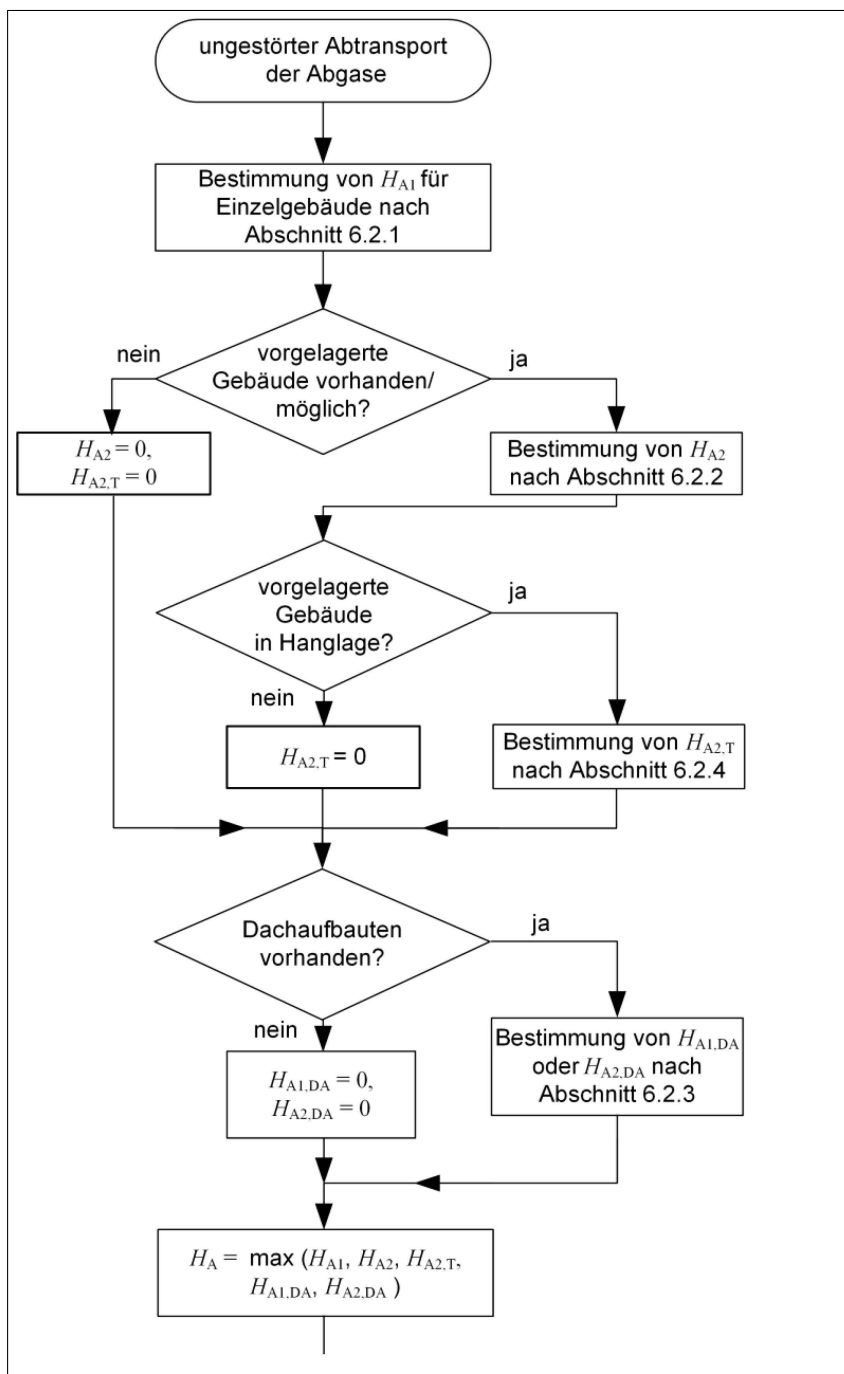


BILD 1.7: Ablaufdiagramm zur Bestimmung der erforderlichen Mündungshöhe, um einen ungestörten Abtransport der Abgase zu gewährleisten (nach VDI 3781 Blatt 4, 2017).



## 1.5 Bestimmung der maximalen Höhe der Abgasanlage bei großflächigen Gebäuden mit flachen Dächern

Bei Industrieanlagen existieren durchaus Hallenbauten, deren Breiten bis zu 200 Meter und mehr betragen können und die mehrere Dekameter hoch sind. Zur Berechnung der Mündungshöhe von Abgasanlagen wird bei solchen Hallen, Dachneigungen kleiner  $20^\circ$  oder Flachdächer vorausgesetzt, sowohl nach der TA Luft (2002) wie nach den Vorgaben der Richtlinie VDI 3781 Blatt 4 (2017) auf die sogenannte  $20^\circ$ -Regel zurückgegriffen. Bei dieser Regel wird als Konvention für die Berechnung der Firsthöhe ein fiktives Dach mit einer Dachneigung von  $20^\circ$ , bezogen auf die Gebäudebreite als die kürzere Seite, zugrunde gelegt. Bei großflächigen Gebäuden ergeben sich mit diesem Ansatz erhebliche fiktive Dachhöhen und daraus entsprechende Höhen der Abgasanlagen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zusätzlich die Größe  $H_{\ddot{U}}$  in Abhängigkeit von der Nenn- oder Feuerungswärmeleistung bei Feuerungsanlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV nach Angaben der VDI 3781 Blatt 4 (2017) und bei Feuerungsanlagen mit einer Feuerungswärmeleistung größer oder gleich 1 MW und bei anderen als Feuerungsanlagen mit in der Regel 3.0 m zu berücksichtigen ist (siehe Abschnitt 1.4).

Auch wenn die Höhe der Abgasanlage nach TA Luft (2002) das 2-fache der Gebäudehöhe nicht übersteigen soll, können sich bei der beschriebenen Vorgehensweise und sehr großflächigen höheren Gebäuden unrealistisch große Mündungshöhen der Abgasanlagen ergeben. Bedenkt man, dass es bei solchen Gebäuden zu einem Wiederanlegen der Strömung auf der Dachfläche kommen kann, wie in Bild 1.6 dargestellt, liegt die Mündung weit oberhalb der maßgeblichen Rezirkulationszonen. Daher wurde ein Verfahren erarbeitet, um für solche Gebäude eine weitere Begrenzung der Mündungshöhen einzuführen.

Der Ansatz baut auf Gleichung (1.1) nach WILSON (1979) auf. Eine Recherche zu derzeit existierenden Hallen mit größeren Abmessungen ergab als oberen Wert Hallenbreiten von ca. 200 m. Dies wurde als Richtwert für  $D_{\text{large}}$  in Gleichung (1.1) verwendet und die Höhen der Rezirkulationszonen auf der Dachfläche für verschiedene Gebäudehöhen  $D_{\text{small}}$  bestimmt. Vergleiche mit aktuellen Strömungssichtbarmachungen in einem Grenzschichtwindkanal ergaben gute Übereinstimmungen der Rechenergebnisse nach WILSON (1979) mit den Beobachtungen.

In der Richtlinie VDI 3781 Blatt 4 (2017) wird nun die Mündungshöhe der Abgasanlage sowohl nach der bisherigen  $20^\circ$ -Regel als auch nach der unter der Verwendung der Gleichung (1.1) ableitbaren Gleichung (1.2) berechnet:

$$H_{A1,F} = GH_{\text{First}}^{2/3} + H_{\ddot{U}} \quad (1.2)$$

mit

$H_{A1,F}$  erforderliche Höhe der Mündung der Abgasableiteinrichtung über First für den ungestörten Abtransport der Abgase für ein Einzelgebäude mit Flachdach oder Dachneigungen kleiner  $20^\circ$ , in m;

$G$  Skalierungsparameter,  $G = 1.3 \text{ m}^{1/3}$ .

Die geringere der beiden Höhen ist zu verwenden, wobei als drittes Kriterium die Gesamthöhe



der Abgasableiteinrichtung (Geländeoberfläche bis Mündungshöhe) nicht größer sein sollte als die doppelte Gebäudehöhe. Diese entspricht bei geneigten Dächern der Firsthöhe, bei Flachdächern der Traufhöhe. Bei Gebäuden mit Attika wird als Traufhöhe die Gebäudehöhe einschließlich Attika verwendet. Bei Gebäuden mit flächigen Aufbauten (z. B. Solaranlagen) sind Trauf- und Firsthöhe einschließlich der Höhe der Aufbauten zu bestimmen.

Da auf die überarbeitete Richtlinie VDI 3781 Blatt 4 (2017) in der neuen TA Luft Bezug genommen wird, gilt das Verfahren auch für Schornsteinhöhenberechnungen für genehmigungsbedürftige Anlagen nach der TA Luft.

## Kapitel 2

# Ausreichende Verdünnung

### 2.1 Einleitung

Die TA Luft (2002) enthält in Nummer 5 *Anforderungen zur Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen* und in Nummer 5.5 *Ableitung von Abgasen* ein Nomogramm, aus dem bei Vorgabe der Freisetzungsbedingungen (Schornsteindurchmesser, Abgasvolumenstrom, Austrittstemperatur) und der Freisetzungsrate eines Schadstoffes, für den ein S-Wert vorgegeben ist, die erforderliche Schornsteinhöhe zu bestimmen ist.

Dieses Nomogramm stammt im Wesentlichen aus der Richtlinie VDI 2289 Blatt 1 (1963) *Schornsteinhöhen in ebenem, unbebautem Gelände*. Die Grundlagen für diese Richtlinie sind von F. Wippermann in seiner Arbeit *Diagramme zur Beurteilung der Eignung von Schornsteinhöhen für die Luftreinhaltung* gelegt worden (WIPPERMANN, 1963), die ihrerseits auf der Untersuchung von F. Wippermann und W. Klug *Ein Verfahren zur Bestimmung von Schornsteinmindesthöhen* beruht (WIPPERMANN & KLUG, 1962).

Die Aufgabe war, das nunmehr 50 Jahre alte Verfahren zur Schornsteinhöhenbestimmung, wie es in dem Nomogramm niedergelegt ist, auf den heutigen Stand der Modellierungstechnik zu bringen, wie er im Anhang 3 der TA Luft (2002) beschrieben ist. Es war also die Zielsetzung des Nomogramms entsprechend den heutigen Erkenntnissen und mit den heutigen Modellierungsmöglichkeiten in ein Verfahren zur Bestimmung der Schornsteinhöhe umzusetzen.

Leider enthält die TA Luft (2002) keine explizite Aussage über die Zielsetzung des Nomogramms. Es heißt lediglich in 5.5.3: *Die Schornsteinhöhe ist nach der Abbildung 2 zu bestimmen*. Selbst der allgemeine Begriff *Ausreichende Verdünnung der Abgase* wird weder bei Bezug auf 5.5 noch in 5.5 selbst erwähnt, lediglich in 5.5.2 Absatz 5 in Abgrenzung zu Absatz 1. Bei der Neufassung des Nomogramms unter Verwendung des in Anhang 3 beschriebenen Ausbreitungsmodells war daher auf die Intention der dem Nomogramm zu Grunde liegenden Arbeiten zurückzugreifen. Es wird vorgeschlagen, in der überarbeiteten TA Luft dieses Vorsorgekriterium explizit zu formulieren.

WIPPERMANN & KLUG (1962) beschreiben das von ihnen entwickelte Verfahren folgendermaßen:

*Es wird ein Verfahren angegeben, welches es gestattet, die Mindesthöhen von Schornsteinen so zu bestimmen, dass eine vorgegebene höchstzulässige Konzentration am Boden nicht überschritten wird.* Das Augenmerk liegt dabei auf Kurzzeitwerten. In der Arbeit wird beispielhaft der lokale Halbstunden-Mittelwert betrachtet, wobei Umrechnungsformeln auf andere Mittelungszeiten angegeben werden.

Bei der Untersuchung der relevanten meteorologischen Situationen heißt es zwar: *für diese darf nicht die ungünstigste gewählt werden, da sie sinnlose Schornsteinhöhen ergäbe.* Es ist aber nicht klar, ob sich diese Aussage auf Beobachtungen bezieht oder auf die Ergebnisse der damals zur Verfügung stehenden Modelle oder nur dazu dient, im Verlaufe der Herleitung des Nomogramms notwendige Approximationen zu rechtfertigen. Aus heutiger Sicht ist ein solcher Vorbehalt nicht notwendig, denn die zum Schutz der Gesundheit durchgeführten Ausbreitungsrechnungen beschränken sich bereits auf einen für relevant erachteten Parameterbereich, wobei die viel diskutierten Wetterlagen mit schwachen und umlaufenden Winden sich im Verlaufe der Vorarbeiten zur TA Luft 2002 als nicht kritisch erwiesen hatten.

Daraus ergab sich also die Aufgabe, ein Verfahren zu entwickeln, *welches es gestattet, die Mindesthöhen von Schornsteinen so zu bestimmen, dass eine vorgegebene höchstzulässige Konzentration am Boden nicht überschritten wird,* wobei das in der TA Luft (2002) angegebene Ausbreitungsmodell verwendet wird unter Einbeziehung aller Situationen, die in Abschnitt 4 *Anforderungen zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen* (bzw. Anhang *Ausbreitungsrechnung*) für relevant erachtet werden.

Das in Richtlinie VDI 2289 Blatt 1 (1963) beschriebene und in die TA Luft (2002) übernommene Nomogramm weicht etwas von dem zuvor beschriebenen Verfahren ab, indem es nicht den berechneten Maximalwert als Kriterium betrachtet, sondern das 85-Perzentil, das man erhält, wenn man die Windgeschwindigkeit im Rahmen einer vorgegebenen Windgeschwindigkeitsverteilung variiert. Die Argumentation lautet:

*H (ist die) festgelegte erforderliche Schornsteinhöhe, die sich ... ergibt, wenn ein durch Konvention festzusetzender Prozentsatz der Betriebszeit, und zwar der mit den ungünstigsten Wetterbedingungen, außer Acht gelassen wird. ... Die Nichtberücksichtigung eines festzusetzenden Prozentsatzes mit ungünstigen Wetterbedingungen wird durch den Umstand gerechtfertigt, dass die Rechnung für Windstillen und sehr geringe Windgeschwindigkeit keine Aussage mehr ermöglicht. Und: Bei der Festlegung von H ... wurde vereinbart, 15% aller möglichen Fälle unberücksichtigt zu lassen. Dieser Prozentsatz wurde im Hinblick auf die Häufigkeit von Windstillen und sehr windschwachen Wetterlagen für angemessen gehalten.*

Diese Argumentation ist nach heutigen Erkenntnissen und bei Verwendung der heutigen Modellierungstechniken nicht mehr haltbar, wie zuvor bereits ausgeführt wurde. Die Einbeziehung einer Windgeschwindigkeitsverteilung, die von Ort zu Ort variiert, hat zudem den Nachteil, dass die Beurteilung der Anlage nicht nur von ihrer Art abhängt, wie es das BImSchG verlangt, sondern auch von ihrer geographischen Lage. Damit müsste man eigentlich für jeden Ort ein eigenes Nomogramm erstellen, insbesondere wenn noch weitere für die Ausbreitung wichtige meteorologische Größen hinzugenommen werden. Dass dies kein wünschenswerter Weg ist, macht die Tatsache deutlich, dass von den ursprünglich drei Nomogrammen für unterschiedliche mittlere Windgeschwindigkeiten nur noch eins in der TA Luft (2002) verwendet wurde.

Die primäre Aufgabe dieses Arbeitspaketes war es also, ein Verfahren zur Bestimmung der Schornsteinhöhe auf der Grundlage der Beurteilung von Einzelsituationen und der in ihnen auftretenden maximalen bodennahen Konzentrationswerte zu erstellen. Dieses Verfahren ist unabhängig von der lokalen Meteorologie, gilt also gleichermaßen für jeden Ort, und setzt lediglich ebenes Gelände und keine Beeinflussung durch Gebäude oder Bewuchs voraus.

## 2.2 Das alte Nomogramm

Das Nomogramm der TA Luft (2002) basiert auf dem Nomogramm der Richtlinie VDI 2289 Blatt 1 aus dem Jahr 1963. Es entstand in einer Zeit ohne Computer und Taschenrechner im heutigen Sinn. Modellentwickler konnten zum Lösen von Funktionsgleichungen teilweise auf Großrechner von spezialisierten Hochschulen zurückgreifen, Anwendern standen nur Papier und Rechenschieber zur Verfügung. Das Nomogramm in Papierform war somit das einzige sachgerechte Mittel für den praktischen Einsatz, seine Grundlagen waren notwendigerweise stark abstrahierende und vereinfachende Annahmen.

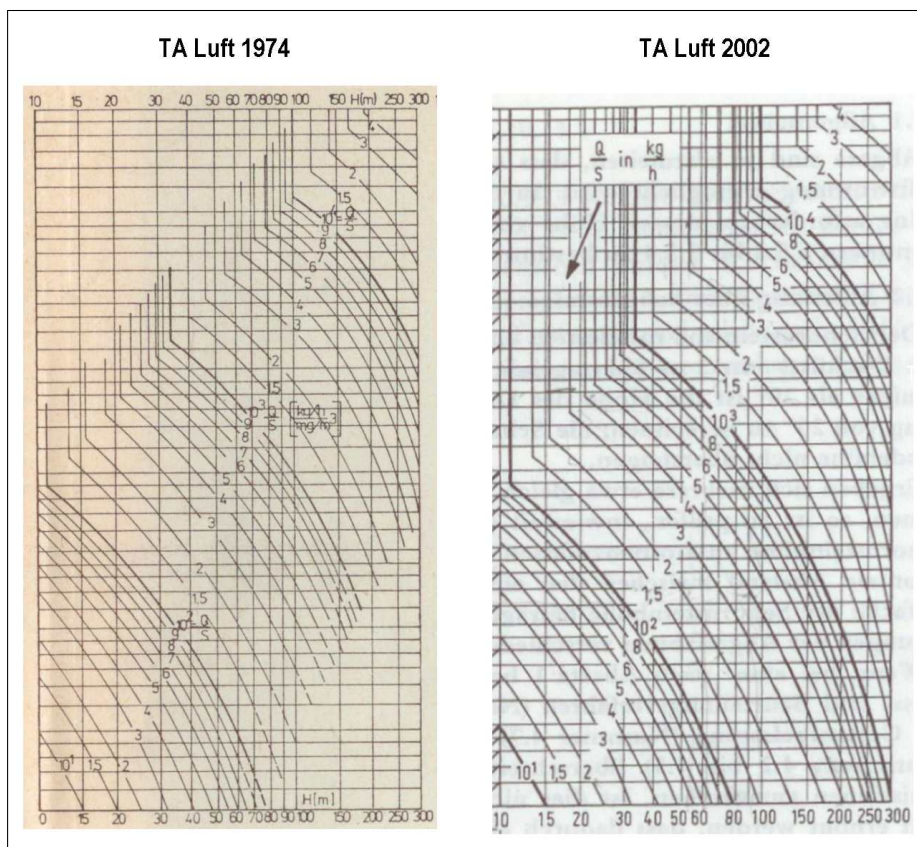


BILD 2.1: Rechter oberer Teil des alten Nomogramms. Links: Version in der TA Luft (1974). Rechts: Version in der TA Luft (2002).

In die TA Luft (1974) wurde das Nomogramm im wesentlichen unverändert übernommen.<sup>1</sup> In der TA Luft (1986) wurde nur noch ein Teil des Nomogramms (der für die mittlere Windgeschwindigkeit 3 m/s) beibehalten, die Linien wurde über ihren ursprünglichen Gültigkeitsbereich hinaus gezeichnet, der Normvolumenstrom wurde als Normvolumenstrom trocken festgelegt und der S-Wert wurde seiner physikalischen Einheit und Bedeutung beraubt. In der TA Luft (1986) und (2002) hat es dann bis auf Ergänzungen und Anpassungen zu den S-Werten keine weiteren substantiellen Änderungen mehr gegeben.

Im Folgenden werden die Grundlagen des Nomogramms aufgezeigt, damit deutlich wird, auf welchen Vorstellungen, Näherungen und Vereinfachungen es beruht und welche Unterschiede im Rahmen einer Anpassung an den aktuellen Stand der Technik zu erwarten sind.

## 2.2.1 Grundlagen

Die Richtlinie VDI 2289 Blatt 1 (1963) basiert auf einer Arbeit von WIPPERMANN (1963), der sich auf Arbeiten von WIPPERMANN & KLUG (1962) zur Bestimmung von Mindestschornsteinhöhen und von STÜMKE (1961) zur Abgasfahnenüberhöhung bezieht. Die Konstruktion des Nomogramms ist in der Richtlinie nur unvollkommen beschrieben. Es ist notwendig zum Verständnis, die referierte Literatur durchzugehen.

Prinzipiell wird von einem Gaußschen Ausbreitungsmodell ausgegangen mit Berücksichtigung einer Abgasfahnenüberhöhung und die Ausbreitungsrechnung wird mit einer effektiven Quellhöhe  $h$  durchgeführt. Es werden feste Fahnenparameter angenommen, unterschiedliche Schichtungsstabilitäten oder die Abhängigkeit der Fahnenparameter von der Quellhöhe und der Rauigkeitslänge werden nicht berücksichtigt. Der einzig variable Modellparameter ist die Windgeschwindigkeit  $u$ . Bei der Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit werden drei unterschiedliche Werte für das Jahresmittel unterschieden.

Im Gauß-Modell ist die Konzentration  $c(x, y, z)$  in der Abgasfahne einer Punktquelle im Koordinatenursprung mit der Höhe  $h$  und der Quellstärke  $Q$  gegeben durch:

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u_g} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(h-z)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(h+z)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (2.1)$$

$$\sigma_y(x) = Fx^f \quad (2.2)$$

$$\sigma_z(x) = Gx^g \quad (2.3)$$

Die Konzentration am Boden unter der Fahnenachse ist:

$$\tilde{c}(x) = c(x, 0, 0) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z u_g} \exp\left[-\frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (2.4)$$

<sup>1</sup>Das Nomogramm der Richtlinie VDI 2289 Blatt 1 (1963) hat einen Höhenbereich von 20 m bis 250 m, das der TA Luft (1974) dagegen einen Höhenbereich von 10 m bis 300 m. Bereits bei dieser ersten Erweiterung (erkennbar z.B. auch an der anderen Anordnung der Beschriftung für den Scharparameter Q/S) schlichen sich leichte Unregelmäßigkeiten ein, was man im Vergleich von berechneten zu Nomogramm-Höhen feststellen kann. Unter anderem sind die vier senkrechten Linien im in der TA Luft (1974) angefügten linken Streifen einen kleines Stück weiter nach links zu großen Windgeschwindigkeiten bzw. kleinen Höhen hin verschoben.

## 2.2.2 Parameterwerte

Als Windprofil wird ein Potenzansatz verwendet:

$$u(z) = u_a \left( \frac{z}{h_a} \right)^m \quad (2.5)$$

$$u_g = \frac{1}{h} \int_0^h u(z) dz = \frac{1}{1+m} u(h) \quad (2.6)$$

$$u_b = u(h_b) \quad (2.7)$$

mit der Anemometerhöhe  $h_a$ , der bis zur Höhe  $h$  gemittelten Windgeschwindigkeit  $u_g$  und der Bauhöhe des Schornsteins  $h_b$ .

Die Richtlinie gibt folgende Hinweise auf die Parameter des verwendeten Gauß-Modells:

$$m = 0.18 \quad (2.8)$$

$$r = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{f}{g} \right) = 0.98 \quad (2.9)$$

$$F = 1.20 \text{ cm}^{0.33} \quad (2.10)$$

$$G = 0.75 \text{ cm}^{0.30} \quad (2.11)$$

Hieraus lässt sich schließen:

$$f = 0.67 \quad (2.12)$$

$$g = 0.70 \quad (2.13)$$

Die Maßeinheiten von  $F$  und  $G$  deuten darauf hin, dass sie zur Verwendung mit der Längeneinheit *Zentimeter* gedacht sind. Zum Rechnen mit *Meter* müssen sie umgerechnet werden:<sup>2</sup>

$$F = 1.20 (0.01)^{0.33} \text{ m}^{0.33} = 0.263 \text{ m}^{0.33} \quad (2.14)$$

$$G = 0.75 (0.01)^{0.30} \text{ m}^{0.30} = 0.188 \text{ m}^{0.30} \quad (2.15)$$

Vom Zahlenwert her sind die Ausbreitungsparameter sehr ähnlich denen, welche die TA Luft (1986) für 50 m und 150 m Emissionshöhe bei sehr stabiler Schichtung verwendet. Der Exponent des Windprofils entspricht dagegen labiler Schichtung.

Die Quellentfernung  $\hat{x}$ , in der die Konzentration unter der Fahnenachse ihr Maximum annimmt, ergibt sich folgendermaßen:

$$\left. \frac{d\tilde{c}}{dx} \right|_{x=\hat{x}} = 0 \quad (2.16)$$

$$= \tilde{c} \left\{ -\frac{\sigma'_y}{\sigma_y} - \frac{\sigma'_z}{\sigma_z} + \frac{h^2}{\sigma_z^2} \frac{\sigma'_z}{\sigma_z} \right\} \quad (2.17)$$

$$h^2 = 2rG^2 \hat{x}^{2g} \quad (2.18)$$

$$\hat{x} = \left( \frac{h}{\sqrt{2rG}} \right)^{\frac{1}{g}} \quad (2.19)$$

<sup>2</sup>Aus dem in Richtlinie VDI 2289 Blatt 2 (1969) zitierten Gauß-Modell kann man  $f+g = 1.37$  und  $2G^2 = 0.071$  entnehmen.

Die folgende Tabelle listet die Werte von  $\hat{x}$  für verschiedene Quellhöhen  $h$  (Bauhöhe plus Endüberhöhung) auf; sie stimmen mit den Werten überein, die in der Richtlinie als  $x_{\max}$  auf der letzten Seite als Fußnote angegeben sind, wenn man berücksichtigt, dass die in der Richtlinie angegebenen Bauhöhen im Rahmen dieser Modellierung gerade der halben effektiven Quellhöhe entsprechen:

| $h$ (m) | $\hat{x}$ (km) |
|---------|----------------|
| 40      | 1.3            |
| 50      | 1.8            |
| 100     | 4.8            |
| 150     | 8.6            |
| 200     | 13.0           |
| 300     | 23.2           |
| 400     | 35.0           |
| 500     | 48.2           |

Damit die weiteren Rechnungen nicht zu kompliziert werden, wird näherungsweise  $f$  gleich  $g$  gesetzt:

$$f \approx g = 0.7 \quad (2.20)$$

$$r = 1 \quad (2.21)$$

$$\hat{x} = \left( \frac{h}{\sqrt{2}G} \right)^{\frac{1}{g}} \quad (2.22)$$

### 2.2.3 Maximalkonzentration und Schornsteinhöhe

Die Konzentration  $\hat{c}$  am Ort des Maximums ist

$$\hat{c} = \tilde{c}(\hat{x}) = \frac{Q}{\pi\sigma_y(\hat{x})\sigma_z(\hat{x})u_g} \exp\left[-\frac{h^2}{2\sigma_z(\hat{x})^2}\right] \quad (2.23)$$

$$\sigma_y(\hat{x}) = \frac{hF}{\sqrt{2}G} \quad (2.24)$$

$$\sigma_z(\hat{x}) = \frac{h}{\sqrt{2}} \quad (2.25)$$

$$\hat{c} = \alpha \frac{Q}{u_g h^2} \quad \text{mit} \quad \alpha = \frac{2G}{\pi e F} \approx 0.167 \quad (2.26)$$

Die effektive Quellhöhe  $h$  setzt sich zusammen aus der Bauhöhe  $h_b$  und dem Fahnenanstieg  $\Delta_h$ :

$$h = h_b + \Delta_h \quad (2.27)$$

Bei STÜMKE (1961) und in der TA Luft (1986) – außer für den Fall stabiler Schichtung – hat  $\Delta_h$  die Form

$$\Delta_h = \frac{A}{u_b}, \quad (2.28)$$





wobei die Größe  $A$  nur von den Freisetzungsbedingungen abhängt. Damit ist

$$\hat{c} = \frac{\alpha Q}{u_g} \frac{1}{(h_b + A/u_b)^2} \quad (2.29)$$

$$= \frac{\alpha Q u_b^2}{u_g (u_b h_b + A)^2} \quad (2.30)$$

Setzt man näherungsweise  $u_g$ , die mittlere Windgeschwindigkeit bis zur effektiven Quellhöhe, gleich  $u_b$ , der Windgeschwindigkeit in Bauhöhe,

$$u = u_b \approx u_g \quad (2.31)$$

dann kann man die maximale Konzentration  $\hat{c}$  als Funktion von  $u$  schreiben:

$$\hat{c}(u) = \frac{\alpha Q u}{(u h_b + A)^2} \quad (2.32)$$

$\hat{c}(u)$  nimmt sein Maximum  $c_{\max}$  für  $u = u_{\max}$  an,

$$\left. \frac{d\hat{c}}{du} \right|_{u=u_{\max}} = 0 \quad (2.33)$$

$$u_{\max} = A/h_b \quad (2.34)$$

$$c_{\max} = \hat{c}(u_{\max}) = \frac{\alpha}{4A} \frac{Q}{h_b} \quad (2.35)$$

Die Bauhöhe  $h_{\min}$ , bei der  $c_{\max}$  gleich dem vorgegebenen S-Wert ist, ergibt sich damit zu<sup>3</sup>

$$h_{\min} = \frac{\alpha}{4A} \frac{Q}{S} \quad (2.36)$$

Aus Gleichung (2.34) ergibt sich außerdem, dass im Fall der maximalen Konzentration die Endüberhöhung  $\Delta_h$  gleich der Bauhöhe  $h_b$  ist. Dies gilt unabhängig von den Details des Überhöhungmodells. Dieses Resultat findet sich ebenfalls bei WIPPERMANN.

## 2.2.4 Endüberhöhung

Der Parameter  $A$  hängt ab von

- $d$  Schornsteindurchmesser
- $v$  Austrittsgeschwindigkeit
- $t$  Austrittstemperatur in °C

<sup>3</sup>Diese Beziehung wird bereits von HOLLAND (1953) aufgeführt (Gleichung 29, Seite 559), der von WIPPERMANN (1963) zitiert wird.

Abgeleitete Größen sind der Volumenstrom  $R$ , der Normvolumenstrom  $R_N$ , die Austrittstemperatur  $T$  in Kelvin, der Wärmestrom  $M$  in MW. Mit der Umgebungstemperatur  $t_a = 10^\circ\text{C}$  und  $T_0 = 273.15\text{ K}$  ist nach VDI 3782 Blatt 3 (1985)<sup>4</sup>

$$T = t + T_0 \quad (2.37)$$

$$R = \frac{\pi}{4} d^2 v \quad (2.38)$$

$$R_N = R \frac{T_0}{T} \quad (2.39)$$

$$M = 1.36 \cdot 10^{-3} R_N (t - t_a) \quad (2.40)$$

In der TA Luft (1986) ist für indifferente Schichtung

$$A_{\text{tal}} = 102M^{3/5} \quad \text{für } M > 6 \text{ MW} \quad (2.41)$$

$$= 78.4M^{3/4} \quad \text{für } M < 6 \text{ MW} \quad (2.42)$$

Für die Endüberhöhung nach STÜMKE (1961) erhält man aus der Originalarbeit, Gl. 333, mit der potentiellen Temperatur  $\vartheta$ :

$$A_{\text{stlm}} = 2.92dv \left[ 1.5 + 2.845d \frac{\Theta}{1 + \Theta} \right] \quad (2.43)$$

$$\text{mit } \Theta = \frac{\vartheta - \vartheta_a}{\vartheta_a} \quad (2.44)$$

$$\approx 4.38vd + 2.92 \cdot 2.845d^2 v \frac{t - t_a}{T} \quad (2.45)$$

$$= 4.38vd + 28.5M \quad (2.46)$$

Die Richtlinie VDI 2289 Blatt 2 (1969) gibt als Endüberhöhung an:

$$\Delta_h = \frac{1.46E^{0.847}}{\bar{u}_M} \quad (2.47)$$

$$E = 0.36R_N \left\{ 0.0522 \frac{t + T_0}{d} + 0.1046(t - t_a) \right\} \quad (2.48)$$

Dabei ist  $\bar{u}_M$  die Windgeschwindigkeit in Anemometerhöhe und es wird von einer Umgebungstemperatur  $t_a$  von  $15^\circ\text{C}$  ausgegangen. Bis auf einen Umrechnungsfaktor für die Geschwindigkeit ist damit

$$A_{\text{vdi}} = 1.46 \{ 4.03dv + 27.7M \}^{0.847} \quad (2.49)$$

$$\approx 24.3M^{0.847} \quad \text{für großen Wärmestrom} \quad (2.50)$$

Richtlinie VDI 2289 Blatt 2 weist explizit darauf hin, dass diese Formel dem Nomogramm in Richtlinie VDI 2289 Blatt 1 zu Grunde liegt. Richtlinie VDI 2289 Blatt 1 erwähnt aber nur die Arbeit von STÜMKE (1961), der sich bei seiner Formel auf HOLLAND bezieht.

<sup>4</sup>Der Faktor 1.36 beinhaltet die spezifische Wärmekapazität und die Dichte bei 0 Grad Celsius eines für Kohlefeuerung typischen Gasgemisches.

Für die Vergleichsrechnungen im Abschnitt 2.5 wurden die Nomogramm-Kurven mit Hilfe der Überhöhungsgleichung (15) in WIPPERMANN (1963) analytisch nachgebildet, was auf eine gute Übereinstimmung mit den in der TA Luft abgedruckten Kurven führt. Gleichung (2.47) oben ergibt sich im Rahmen von Rundungsungenauigkeiten aus Gleichung (16) bzw. (17) in WIPPERMANN (1963).

## 2.2.5 Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit

Es wird festgelegt, dass die Schornsteinhöhe so zu bestimmen ist, dass eine vorgegebene Maximalkonzentration höchstens in 15% der gesamten Betriebszeit überschritten werden darf, wobei unterschiedliche Betriebszeiten sich durch unterschiedliche Windgeschwindigkeiten auszeichnen.

Für die Schornsteinhöhenbestimmung wird die Windgeschwindigkeit  $u_{\max}$  ermittelt, die zur maximalen Konzentration  $S$  führt. Aus dieser Windgeschwindigkeit ergibt sich dann die geforderte Schornsteinhöhe  $h_{\min}$ . Mit ihr wird die vorgegebene Konzentration  $S$  zu keiner Zeit überschritten. Wird eine etwas kleinere Schornsteinhöhe  $h' < h_{\min}$  gewählt, dann wird  $S$  für Geschwindigkeiten um  $u_{\max}$  herum überschritten. Die Höhe  $h'$  kann nun so weit verringert werden, bis die Häufigkeit für das Auftreten von Windgeschwindigkeiten in diesem Bereich gerade gleich 15% beträgt.

Ist  $u_{\max}$  wesentlich größer oder wesentlich kleiner als das Jahresmittel der Windgeschwindigkeit  $\bar{u}$ , um das die Häufigkeitsverteilung zentriert ist, dann kann  $h'$  relativ weit (ein Faktor von der Größe 2 kann durchaus vorkommen) herabgesetzt werden, bis die 15% erreicht werden. Liegt dagegen  $u_{\max}$  in der Nähe von  $\bar{u}$ , dann werden die 15% schon bei einer geringfügigen Herabsetzung von  $h'$  erreicht.

## 2.2.6 Anwendung des Nomogramms

### 2.2.6.1 Kurvenverlauf

Von besonderem Interesse ist der rechte obere Teil des Nomogramms. Entlang einer Kurve ist  $Q/S$  konstant. Die Abszisse (horizontale Achse) gibt die Schornsteinhöhe an, die Ordinate (vertikale Achse) charakterisiert den Überhöhungsparameter  $A$ .<sup>5</sup>

Bewegt man sich auf einer Kurve mit konstantem  $Q/S$  nach oben, dann nimmt der Überhöhungsparameter  $A$  zu und die Schornsteinhöhe ab. Das erscheint auf den ersten Blick unmittelbar einleuchtend, denn mit zunehmender Endüberhöhung genügt eine kleinere Bauhöhe, um eine benötigte effektive Quellhöhe zu erzielen. Diese Interpretation ist jedoch falsch, denn mit zunehmendem  $A$  nimmt auch die Geschwindigkeit  $u_{\max}$  zu<sup>6</sup> und zwar gerade so, dass an

<sup>5</sup>Nach Fußnote 2 in Richtlinie VDI 2289 Blatt 2 ist auf der Ordinate der Wert  $E$  im Bereich  $10 \text{ m}^2/\text{s}$  bis  $5000 \text{ m}^2/\text{s}$  aufgetragen.

<sup>6</sup>Aus  $u_{\max} = A/h_{\min}$  und  $h_{\min} = (\alpha/(4A))(Q/S)$  folgt  $u_{\max} = (4A^2/\alpha)(S/Q)$ .

jedem Punkt auf der Kurve die Endüberhöhung  $A/u_{\max}$  genau gleich der Schornsteinhöhe ist (siehe Abschnitt 2.2.3).

Bewegt man sich also auf einer Kurve mit konstantem  $Q/S$  nach oben, dann nimmt  $u_{\max}$  zu und Endüberhöhung und Bauhöhe ab. Irgendwann gelangt man an den Punkt, an dem die Kurve einen Knick macht und in eine Senkrechte übergeht. Nach Richtlinie VDI 2289 Blatt 1 ist das der Punkt, an dem  $u_{\max} = 12$  m/s ist. Für größere Geschwindigkeiten ( $u_{\max}$  kann, je nach dem Wert von  $A$ , Werte von 100 m/s und mehr annehmen) wird der Überhöhungsformel nicht mehr getraut, so dass die Autoren ab hier  $u_{\max}$  und damit die Bauhöhe einfrieren.<sup>7</sup> Das führt zu dem etwas unerwarteten Effekt, dass in diesem Bereich eine Erhöhung des Volumenstroms nicht zu einer Erniedrigung der erforderlichen Schornsteinhöhe führt.

Bewegt man sich auf einer Kurve mit konstantem  $Q/S$  nach unten, dann wird  $u_{\max}$  irgendwann so klein, dass die Voraussetzungen für die Anwendung eines Gaußschen Fahnenmodells ( Vernachlässigung der Diffusion in Windrichtung) und des Überhöhungsansatzes (*bent over* Fahne) nicht mehr erfüllt sind.<sup>8</sup> In Richtlinie VDI 2289 Blatt 1 (1963) und der TA Luft (1974) hören die Linien deshalb am unteren Ende irgendwann auf, ab der TA Luft (1986) wurden sie jedoch in den ungültigen Bereich hinein verlängert, siehe Bild 2.1.

In den späteren Jahrzehnten ist vermutlich kaum jemandem in der Anwendung bewusst gewesen, dass man sich insbesondere auf den senkrechten Linien außerhalb des eigentlich konzipierten Anwendungsbereichs befindet. Aufgrund der Emissionsreduktionen über die vergangenen Jahrzehnte ist das typische Verhältnis  $Q/S$  kleiner als früher und Anwendungen finden wesentlich häufiger in diesem Bereich statt.

Nach den Näherungslösungen in Abschnitt 2.2.3 sollte die Schornsteinhöhe proportional zu  $E^a$  mit konstantem Exponenten  $a$  sein. In der Log-Log-Darstellung müssten die Linien mit konstantem Verhältnis  $Q/S$  also Geraden sein. Tatsächlich sind sie gekrümmt, was auf die Höhenkorrektur  $h_{\min} \rightarrow h'$  aufgrund der Perzentilbedingung zurückzuführen ist: Sowohl bei sehr großen Werten von  $u_{\max}$  (oberer Teil einer Kurve) als auch bei sehr kleinen Werten (unterer Teil einer Kurve) ergibt sich eine Korrektur hin zu kleineren Bauhöhen.

Wie weiter unten dargestellt, ist es ein erheblicher Vorteil des aktualisierten Verfahrens, das für die überarbeitete TA Luft vorgeschlagen wird, dass von vorneherein durch Beschränkung auf die Klassen des etablierten AKS-Formats nur meteorologische Situationen betrachtet werden, die in der Praxis als relevant angesehen werden können. Nachträgliche, in gewissem Rahmen willkürliche Kappungen oder Perzentilfestlegungen sind nicht erforderlich. Auch deckt der Anwendungsbereich sowohl des aktualisierten Ausbreitungsmodells als auch des aktualisierten Überhöhungsmodells den Bereich kleiner Windgeschwindigkeiten ab und die Beschreibung einer Einzelfahne inklusive Überhöhung mit Hilfe eines Lagrangeschen Partikelmodells nach Richtlinie VDI 3945 Blatt 3 (2000) und dem Modellansatz *PLURIS* (JANICKE & JANICKE, 2001) ist wesentlich realitätsnäher als die mit dem vereinfachten Gaußschen Fahnenmodell aus den

<sup>7</sup>Aus  $h_{\min} = (\alpha/(4A))(Q/S)$  und  $u_{\max} = A/h_{\min}$  folgt  $h_{\min}^2 = (\alpha/(4u_{\max}))(Q/S)$ . Einsetzen der Zahlenwerte und Angabe von  $Q'$  in kg/h und  $S$  in mg/m<sup>3</sup> ergibt  $h_{\min} = 0.98 \sqrt{Q'/S}$ , was gut mit der Lage der Knickpunkte im Nomogramm übereinstimmt.

<sup>8</sup>Die Tatsache, dass über die 15%-Regel ein Teil dieser unsachgemäß behandelten Fälle aussortiert wird, ändert hieran im Grundsatz nichts.

60er Jahren.

### 2.2.6.2 Annahmen und Näherungen

Dem Nomogramm der TA Luft (2002) liegen also insbesondere folgende Annahmen und Näherungen zugrunde:

- Das eingesetzte Gaußsche Fahnenmodell basiert auf einem einzigen Satz empirischer Fahnenparameter. Sie gelten nur für einen eingeschränkten Quellhöhenbereich (etwa zwischen 50 m und 150 m), stabile bis indifferente Schichtung und einen eingeschränkten Rauigkeitslängen-Bereich (vermutlich um die 1 m).
- Die aktuelle Windgeschwindigkeit ist hinreichend groß (Vernachlässigung der Diffusion in Windrichtung).
- Das Profil der Windgeschwindigkeit hat einen festen Exponenten.
- Das Jahresmittel der Windgeschwindigkeit beträgt 3 m/s (in 20 m Höhe nach Richtlinie VDI 2289 Blatt 1, 1963, in 10 m Höhe nach TA Luft, 1974).
- Der Überhöhungsansatz basiert auf ähnlichen Näherungen wie Richtlinie VDI 3782 Blatt 3 (1985), insbesondere:
  - Die Geschwindigkeit der Umgebungsluft ist höhenunabhängig.
  - Die Umgebungsluft ist adiabatisch geschichtet.
  - Es liegt ein typischer Geschwindigkeitsbereich und ein typisches Verhältnis von Windgeschwindigkeit zu Schubspannungsgeschwindigkeit vor.
- Es ist nur für einen eingeschränkten Wertebereich anwendbar; die senkrechten Linien im oberen rechten Teildiagramm kennzeichnen die Grenzen des Anwendungsbereiches, auch wenn es gerade in diesem Bereich in den letzten Jahrzehnten verstärkt zum Einsatz gekommen ist.

### 2.2.6.3 Volumenstrom

Die Bedeutung des Volumenstroms, der in das Nomogramm eingesetzt wird, hat sich im Laufe der Zeit konkretisiert – oder geändert:

- In Richtlinie VDI 2289 Blatt 1 ist es die *gesamte Abgasmenge im Normzustand in  $m^3/h$*  und für die Größen  $t$ ,  $R$  und  $Q$  sind jeweils die Werte bei Vollast einzusetzen.
- In der TA Luft (1974) ist es der *Volumenstrom des Abgases im Normzustand* und für die Größen  $t$ ,  $R$  und  $Q$  sind jeweils die Werte bei Vollast und Verwendung der für die Luftreinhalteung ungünstigeren Brenn- bzw. Rohstoffe, die im Betrieb verwendet werden sollen, einzusetzen.

- In der TA Luft (1986) ist es der *Volumenstrom des Abgases im Normzustand nach Abzug des Feuchtegehaltes an Wasserdampf*.

Da der Volumenstrom in die Berechnung der Überhöhung eingeht und diese von den Eigenschaften der feuchten Abluft bestimmt wird, erscheint es nicht ganz plausibel, warum seit 1986 der trockene Volumenstrom als Eingangsgröße für die Berechnung vorgeschrieben ist.

#### 2.2.6.4 Sauerstoffgehalt

Die TA Luft (2002) gibt maximale, stoffspezifische Emissionskonzentrationen  $G$  vor, die sich auf einen bestimmten Bezugssauerstoffgehalt  $O_B$  beziehen. Wird eine Konzentration  $E_M$  bei einem Sauerstoffgehalt  $O_M$  gemessen, dann ist sie für  $O_M > O_B$  vor dem Vergleich mit dem Grenzwert  $G$  auf den Bezugssauerstoffgehalt umzurechnen in (TA Luft, 2002, 5.1.2)

$$E_B = \frac{21 - O_B}{21 - O_M} E_M. \quad (2.51)$$

Für  $O_M > O_B$  muss  $E_M$  so klein sein, dass auch der größere Wert  $E_B$  unter dem Grenzwert  $G$  liegt. Für  $O_M < O_B$  ( $E_B$  ist dann kleiner als  $E_M$ ) soll für Stoffe, deren Emissionskonzentration durch eine nachgeschaltete Abgasreinigungseinrichtung gemindert wird, keine Umrechnung vorgenommen werden.

Für die Anwendung des Nomogramms muss die Emissionsrate  $Q$  bestimmt werden, die sich aus der Multiplikation der Emissionskonzentration  $E_M$  mit dem Volumenstrom bei Betriebssauerstoff  $R_M$  ergibt,  $Q = R_M E_M$ . Der Volumenstrom  $R_M$  geht auch unmittelbar in die Ableseung des Nomogramms ein.

Geht man von dem Grenzwert  $G$  als Emissionskonzentration  $E_B$  bei Bezugssauerstoff aus, dann ist für  $O_M > O_B$  die Umrechnung  $E_B \rightarrow E_M$  vorzunehmen und die Emissionsrate ist  $Q = R_M [(21 - O_M)/(21 - O_B)] G = R_B G$ . Für  $O_M < O_B$  entfällt für Stoffe, deren Emissionskonzentration durch eine nachgeschaltete Abgasreinigungseinrichtung gemindert wird, die Umrechnung und die Emissionsrate ist  $Q = R_M G$ . Diese Klarstellungen erfolgen bisher im LAI-MERKBLATT (2012) zur Schornsteinhöhenberechnung.

Eine gewisse Gefahr kann bei Hilfsprogrammen entstehen, die das Ablesen des Nomogramms ersetzen. Hier wird als Volumenstrom  $R_B$  und als Emissionskonzentration  $E_B = G$  vorgegeben, damit das Programm  $Q/S$  bestimmt. Anschließend muss der Volumenstrom allerdings auf den Wert  $R_M$  geändert werden, bevor die Schornsteinhöhenrechnung durchgeführt wird.<sup>9</sup>

<sup>9</sup>Soweit man sich im senkrechten Teil der Nomogramm-Linien befindet, kann sich dieser potentielle Anwendungsfehler nicht bemerkbar machen.

## 2.3 Aktualisierter Ansatz

### 2.3.1 Konzept

Das Konzept, eine Neufassung des Nomogramms auf der Bewertung der maximalen bodennahen Konzentration in Einzelsituationen zu begründen, wurde auf der 20. Sitzung des Fachgesprächs „Ausbreitungsrechnung“ der Länder am 11.03.2015 in Hildesheim vorgestellt. Die positive Resonanz bestärkte die Autoren darin, unmittelbar die Arbeiten an einem entsprechenden Verfahren zu beginnen.

Interessant ist in diesem Zusammenhang noch eine Arbeit von G. Manier (MANIER, 1971): *Die Bestimmung von Schornsteinhöhen im Hinblick auf die Luftreinhaltung; Theoretische Grundlagen einer neuen VDI-Richtlinie*. Hier wird das Verfahren der Richtlinie VDI 2289 Blatt 1 von 1963 auf 2-dimensionale Statistiken von Ausbreitungssituationen erweitert unter Hinzunahme der Klassierung nach Klug/Manier und Verwendung eines entsprechend parametrisierten Gauß-Fahnenmodells. Damit wird das Verfahren noch stärker ortsabhängig und Manier schreibt: *Die Häufigkeitsverteilungen der Ausbreitungsbedingungen ändern sich von Ort zu Ort und damit auch die zu verwendenden Richtliniendiagramme*.

Möglicherweise war genau dies der Punkt, warum seine Arbeit nicht in eine Novellierung der Richtlinie mündete. Im Gegensatz hierzu sieht das im folgenden vorgestellte Konzept ein Verfahren vor, das von seiner Struktur her ortsunabhängig ist:

Es wird die Schornsteinbauhöhe  $h_b$  bestimmt, bei der in jeder Einzelsituation die maximale bodennahe Konzentration  $\hat{c}$  einen vorgegebenen Wert  $c_g$  nicht überschreitet. Grundlage hierfür sind Ausbreitungsrechnungen mit dem in der TA Luft vorgegebenen Rechenmodell.

### 2.3.2 Detailuntersuchungen

Die maximale bodennahe Konzentration  $\hat{c}$  hängt bei vorgegebener Quellstärke  $E_q$  von den Emissionsgrößen  $\mathcal{E}$  und den meteorologischen Größen  $\mathcal{M}$  ab,

$$\mathcal{E} = \{ h_b, d_b, v_q, t_q, f_q \}$$

$$\mathcal{M} = \{ z_0, u_a, k_s \}$$

|      |       |                           |       |                                   |
|------|-------|---------------------------|-------|-----------------------------------|
| mit: | $h_b$ | Schornsteinbauhöhe        | $z_0$ | Rauigkeitslänge                   |
|      | $d_b$ | Schornsteindurchmesser    | $u_a$ | Windgeschwindigkeit bei $z = h_a$ |
|      | $v_q$ | Ausströmgeschwindigkeit   | $k_s$ | Stabilitätsklasse                 |
|      | $t_q$ | Abgastemperatur           |       |                                   |
|      | $f_q$ | Feuchtegehalt des Abgases |       |                                   |

Für einen Parametersatz  $[\mathcal{E}, \mathcal{M}]$  wird mit der Quellstärke 1 g/s die bodennahe Konzentration  $c(x, y)$  berechnet und der Maximalwert  $\hat{c}(\mathcal{E}, \mathcal{M}) = \max(c|x, y)$  bestimmt. Dies wird für alle me-

teorologischen Situationen  $\mathcal{M}$  durchgeführt und daraus die für die Emissionssituation maximal mögliche bodennahe Konzentration  $c_{\max}(\mathcal{E}) = \max(\hat{c} | \mathcal{M})$  bestimmt.

Durch Variation von  $h_b$  wird der Wert  $\hat{h}$  bestimmt, bei dem

$$E_q c_{\max}(\hat{h}; d_b, v_q, t_q, f_q) = c_g \quad (2.52)$$

erfüllt ist. Dies ist für alle Werte von  $d_b$ ,  $v_q$ ,  $t_q$  und  $f_q$  durchzuführen. Für eine Datenbasis zur Bestimmung von  $\hat{h}$  sind also Ausbreitungsrechnungen unter Variation von 8 Parametern durchzuführen. Das ist mit vertretbarem Aufwand nicht möglich.

Eine wesentliche Vereinfachung ergibt sich, wenn man Abgasfahnenüberhöhung und Ausbreitungsrechnung separiert: Zuerst wird mit dem Überhöhungsmodell (*IBJpluris*) die effektive Quellhöhe  $h_e(\mathcal{E}, \mathcal{M})$  berechnet und dann mit dem Partikelmodell die maximale bodennahe Konzentration  $\hat{c}(h_e, \mathcal{M})$ . Jetzt sind für die Ausbreitungsrechnung nur noch 4 Parameter zu variieren, also etwa 10000 Einzelsituationen zu rechnen. Dies ist machbar, denn auch bei einer AKTerm-Rechnung entsteht dieser Aufwand, wenn auch mit erheblich geringeren Genauigkeitsanforderungen.

Die Zahl der Überhöhungsrechnungen ist zwar nicht reduziert, aber der Aufwand für die Einzelrechnung ist dort um Größenordnungen geringer als bei der Ausbreitungsrechnung mit einem Partikelmodell.

### 2.3.2.1 Effektive Quellhöhe versus dynamische Überhöhung

Eine Kernfrage ist damit, welcher Fehler bei einer Ausbreitungsrechnung gemacht wird, wenn nicht mit einem kontinuierlichen Fahnenanstieg gerechnet, sondern von vornherein als Emissionshöhe die effektive Quellhöhe  $h_e$  eingesetzt wird. Hierzu wurden eine Reihe von Testrechnungen mit der Quellstärke 1 g/s durchgeführt.

Fall A: Bauhöhe  $h_b = 10$  m

Wärmestrom  $q_q = 0.25$  MW

Ausbreitungsklasse  $k_s = 3.1$

Rauigkeitslänge  $z_0 = 0.5$  m

Anemometerhöhe  $h_a = 10$  m

Windgeschwindigkeit  $u_a = \{ 1, 2, 3, 4.5, 6, 7.5, 9, 12 \}$  m/s

Da die Bauhöhe  $h_b$  gleich der Anemometerhöhe  $h_a$  ist, ist auch die Windgeschwindigkeit in Schornsteinhöhe  $u_q$  gleich der Windgeschwindigkeit in Anemometerhöhe  $u_a$ . Damit erhält man für die thermische Abgasfahnenüberhöhung  $\Delta_h$  nach VDI 3782 Blatt 3 (1985) die Werte

$$\Delta_h = 84 \sqrt{q_q}/u_q = \{ 42, 21, 14, 9.33, 7.00, 5.60, 4.67, 3.50 \} \quad (2.53)$$

Das Rechengitter mit  $120 \times 100 \times 20$  Maschen hat horizontal eine Maschenweite von  $d = 10$  m, vertikal beträgt die Maschenweite 5 m. Es wurde *LASAT* mit dem Meteorologie-Standardmodell (Meteorologie-Version 2.1) und der internen Überhöhungsrechnung nach VDI 3782 Blatt 3 (1985) verwendet.



Fall B: Effektive Bauhöhe  $h_b = 10 \text{ m} + \Delta_h$

Wärmestrom  $q_q = 0.0 \text{ MW}$

ansonsten wie Fall A

Das Ergebnis der Rechnungen ist:

|       | ----- A: mit Überhöhung ----- |     |       |           |      |  | ----- B: mit effektiver Quellhöhe ----- |     |       |           |      |  |
|-------|-------------------------------|-----|-------|-----------|------|--|---|-----|-------|-----------|------|--|
| Ua    | Cm                            | Sm  | Xm    | Cy        | Sy   |  | Cm                                      | Sm  | Xm    | Cy        | Sy   |  |
| 1.0:  | 2.582e-05                     | 3.4 | 805.0 | 5.645e-03 | 95.8 |  | 2.698e-05                               | 4.5 | 615.0 | 5.075e-03 | 81.8 |  |
| 2.0:  | 3.010e-05                     | 1.9 | 345.0 | 4.875e-03 | 69.7 |  | 3.608e-05                               | 2.5 | 335.0 | 5.447e-03 | 65.8 |  |
| 3.0:  | 3.502e-05                     | 1.8 | 265.0 | 4.763e-03 | 59.1 |  | 4.395e-05                               | 1.6 | 225.0 | 5.137e-03 | 51.0 |  |
| 4.5:  | 3.834e-05                     | 1.5 | 185.0 | 4.170e-03 | 47.5 |  | 4.856e-05                               | 1.7 | 155.0 | 4.562e-03 | 40.9 |  |
| 6.0:  | 3.982e-05                     | 1.0 | 145.0 | 3.767e-03 | 41.1 |  | 5.002e-05                               | 0.7 | 125.0 | 4.139e-03 | 36.1 |  |
| 7.5:  | 4.020e-05                     | 1.1 | 145.0 | 3.654e-03 | 40.4 |  | 5.065e-05                               | 1.1 | 115.0 | 3.930e-03 | 34.2 |  |
| 9.0:  | 4.133e-05                     | 0.9 | 125.0 | 3.386e-03 | 36.8 |  | 4.970e-05                               | 0.8 | 105.0 | 3.633e-03 | 32.2 |  |
| 12.0: | 3.919e-05                     | 1.0 | 85.0  | 2.691e-03 | 29.9 |  | 4.627e-05                               | 1.1 | 85.0  | 3.012e-03 | 28.7 |  |

Ua: Windgeschwindigkeit in Anemometerhöhe in  $\text{m} = u_a$

Cm: Maximale Konzentration in der untersten Schicht in  $\text{g/m}^3 = \hat{c}$

Sm: Zugehörige Streuung in Prozent

Xm: Quellentfernung des Maximums in  $\text{m}$

Cy: Quer zur Fahnenachse integrierte Konzentration bei  $x=Xm$  in  $\text{g/m}^2 = c_y$

Sy: Breite der Fahne bei  $x=Xm$  in  $\text{m} = \sigma_y$

Die maximale Konzentration ist im Fall B immer höher als im Fall A, bis zu etwa 25%. Dies ist vorwiegend durch die unterschiedliche Fahnenbreite  $\sigma_y$  bedingt (bis zu 15%).  $c_y$  ist ca. 10% höher (für  $u_a \geq 2 \text{ m/s}$ ), was auf Unterschiede im vertikalen Transport schließen lässt. Die korrekte Lage der Fahnenachse wurde durch Testrechnungen überprüft, bei der eine einzelne Trajektorie ohne vertikale Streuung gerechnet wurde.

Die entsprechende Rechnung mit dem Meteorologie-Modell der TA Luft (2002) (Meteorologie-Version 2.6) zeigt ähnliche Unterschiede:

|       | ----- A: mit Überhöhung ----- |     |       |           |      |  | ----- B: mit effektiver Quellhöhe ----- |     |       |           |      |  |
|-------|-------------------------------|-----|-------|-----------|------|--|---|-----|-------|-----------|------|--|
| Ua    | Cm                            | Sm  | Xm    | Cy        | Sy   |  | Cm                                      | Sm  | Xm    | Cy        | Sy   |  |
| 1.0:  | 3.643e-05                     | 3.4 | 725.0 | 5.328e-03 | 62.2 |  | 3.986e-05                               | 4.0 | 715.0 | 5.590e-03 | 60.8 |  |
| 2.0:  | 5.699e-05                     | 1.4 | 345.0 | 5.073e-03 | 37.8 |  | 6.500e-05                               | 0.9 | 335.0 | 5.637e-03 | 36.5 |  |
| 3.0:  | 6.679e-05                     | 1.6 | 245.0 | 4.867e-03 | 30.1 |  | 7.818e-05                               | 1.4 | 215.0 | 5.288e-03 | 27.6 |  |
| 4.5:  | 7.399e-05                     | 1.1 | 205.0 | 4.727e-03 | 26.5 |  | 8.701e-05                               | 0.8 | 155.0 | 4.866e-03 | 22.9 |  |
| 6.0:  | 7.649e-05                     | 0.9 | 155.0 | 4.292e-03 | 22.7 |  | 8.794e-05                               | 0.9 | 145.0 | 4.710e-03 | 22.0 |  |
| 7.5:  | 7.674e-05                     | 0.5 | 125.0 | 3.896e-03 | 20.5 |  | 8.697e-05                               | 0.3 | 115.0 | 4.228e-03 | 19.7 |  |
| 9.0:  | 7.689e-05                     | 0.6 | 115.0 | 3.677e-03 | 19.7 |  | 8.464e-05                               | 0.4 | 105.0 | 3.914e-03 | 18.8 |  |
| 12.0: | 7.158e-05                     | 0.6 | 85.0  | 3.057e-03 | 17.2 |  | 7.766e-05                               | 0.3 | 85.0  | 3.300e-03 | 17.1 |  |

Die Unterschiede in  $\hat{c}$  liegen hier unter 20%,  $c_y$  ist um bis zu 10% höher.

Ursache für die Unterschiede scheint die vertikale Inhomogenität der Atmosphäre zu sein. Die Auflistung der meteorologischen Größen für die Meteorologie-Version 2.1 bei  $u_a = 4.5 \text{ m/s}$  ergibt:



| ! k  | Z     | U    | D   | Vx   | Vy   | Su   | Sv   | Sw   | Tu | Tv | Tw | Kh     | Kv    |
|------|-------|------|-----|------|------|------|------|------|----|----|----|--------|-------|
| V 0  | 0.0   | 0.00 | 270 | 0.00 | 0.00 | 1.66 | 1.33 | 0.86 | 1  | 1  | 1  | 1.33   | 0.56  |
| V 1  | 5.0   | 2.69 | 270 | 2.69 | 0.00 | 1.66 | 1.33 | 0.86 | 13 | 21 | 1  | 36.64  | 0.66  |
| V 2  | 10.0  | 4.50 | 270 | 4.50 | 0.00 | 1.66 | 1.33 | 0.86 | 22 | 35 | 2  | 61.20  | 1.83  |
| V 3  | 15.0  | 5.35 | 270 | 5.35 | 0.00 | 1.66 | 1.33 | 0.86 | 26 | 41 | 4  | 72.75  | 3.10  |
| V 4  | 20.0  | 5.91 | 270 | 5.91 | 0.00 | 1.66 | 1.33 | 0.85 | 29 | 45 | 6  | 80.36  | 4.34  |
| V 5  | 25.0  | 6.33 | 270 | 6.33 | 0.00 | 1.66 | 1.33 | 0.85 | 31 | 49 | 8  | 86.05  | 5.56  |
| V 6  | 30.0  | 6.66 | 270 | 6.66 | 0.00 | 1.66 | 1.33 | 0.85 | 33 | 51 | 9  | 90.60  | 6.74  |
| V 7  | 35.0  | 6.94 | 270 | 6.94 | 0.00 | 1.66 | 1.33 | 0.84 | 34 | 53 | 11 | 94.38  | 7.89  |
| V 8  | 40.0  | 7.18 | 270 | 7.18 | 0.00 | 1.66 | 1.33 | 0.84 | 35 | 55 | 13 | 97.62  | 9.02  |
| V 9  | 45.0  | 7.39 | 270 | 7.39 | 0.00 | 1.66 | 1.33 | 0.84 | 36 | 57 | 14 | 100.46 | 10.12 |
| V 10 | 50.0  | 7.57 | 270 | 7.57 | 0.00 | 1.66 | 1.33 | 0.83 | 37 | 58 | 16 | 102.98 | 11.20 |
| V 11 | 55.0  | 7.74 | 270 | 7.74 | 0.00 | 1.66 | 1.33 | 0.83 | 38 | 60 | 18 | 105.25 | 12.24 |
| V 12 | 60.0  | 7.89 | 270 | 7.89 | 0.00 | 1.66 | 1.33 | 0.83 | 39 | 61 | 19 | 107.32 | 13.27 |
| V 13 | 65.0  | 8.03 | 270 | 8.03 | 0.00 | 1.66 | 1.33 | 0.82 | 40 | 62 | 21 | 109.21 | 14.26 |
| V 14 | 70.0  | 8.16 | 270 | 8.16 | 0.00 | 1.66 | 1.33 | 0.82 | 40 | 63 | 23 | 110.96 | 15.23 |
| V 15 | 75.0  | 8.28 | 270 | 8.28 | 0.00 | 1.66 | 1.33 | 0.82 | 41 | 64 | 24 | 112.59 | 16.18 |
| V 16 | 80.0  | 8.39 | 270 | 8.39 | 0.00 | 1.66 | 1.33 | 0.82 | 41 | 65 | 26 | 114.10 | 17.10 |
| V 17 | 85.0  | 8.49 | 270 | 8.49 | 0.00 | 1.66 | 1.33 | 0.81 | 42 | 65 | 27 | 115.53 | 18.00 |
| V 18 | 90.0  | 8.59 | 270 | 8.59 | 0.00 | 1.66 | 1.33 | 0.81 | 42 | 66 | 29 | 116.86 | 18.88 |
| V 19 | 95.0  | 8.69 | 270 | 8.69 | 0.00 | 1.66 | 1.33 | 0.81 | 43 | 67 | 30 | 118.13 | 19.73 |
| V 20 | 100.0 | 8.77 | 270 | 8.77 | 0.00 | 1.66 | 1.33 | 0.80 | 43 | 68 | 32 | 119.33 | 20.57 |

Die vertikale Lagrange-Korrelationszeit  $T_w$  beträgt in 10 m Höhe 2 s, in 20 m Höhe 6 s. Die vertikalen Fluktuationen  $\sigma_w$  unterscheiden sich kaum. Die Fahne B behält also für 6 Sekunden ihre lineare Aufweitung bei, bevor sie die geringere Aufweitung  $\sim \sqrt{x}$  annimmt, die Fahne A geht aber schon nach 2 Sekunden in die schlankere Form über. Die anfängliche vertikale Diffusion ist also im Fall B größer als im Fall A, was die etwas höheren Konzentrationswerte erklären könnte.

Zur Überprüfung wurde eine Testrechnung mit Version 0.1 des Meteorologie-Modells von LASAT gemacht, bei der die Atmosphäre vertikal homogen ist. Mit  $u_* = \sigma_u = \sigma_v = 1$  m/s,  $\sigma_w = 0.8$  m/s,  $L_M = 9999$  m ergibt sich für  $u_a = 4.5$  m/s folgendes Profil:

| ! k | Z    | U    | D   | Vx   | Vy   | Su   | Sv   | Sw   | Tu | Tv | Tw | Kh    | Kv   |
|-----|------|------|-----|------|------|------|------|------|----|----|----|-------|------|
| V 0 | 0.0  | 4.50 | 270 | 4.50 | 0.00 | 1.00 | 1.00 | 0.80 | 50 | 50 | 5  | 50.00 | 3.20 |
| V 1 | 5.0  | 4.50 | 270 | 4.50 | 0.00 | 1.00 | 1.00 | 0.80 | 50 | 50 | 5  | 50.00 | 3.20 |
| V 2 | 10.0 | 4.50 | 270 | 4.50 | 0.00 | 1.00 | 1.00 | 0.80 | 50 | 50 | 5  | 50.00 | 3.20 |

Die Ausbreitungsrechnungen ergeben:

|        | ----- A: mit Überhöhung ----- |     |       |           |      |  | ----- B: mit effektiver Quellhöhe ----- |     |       |           |       |  |
|--------|-------------------------------|-----|-------|-----------|------|--|---|-----|-------|-----------|-------|--|
| Ua     | Cm                            | Sm  | Xm    | Cy        | Sy   |  | Cm                                      | Sm  | Xm    | Cy        | Sy    |  |
| 1.0:   | 5.637e-05                     | 1.3 | 15.0  | 4.423e-03 | 83.9 |  | 2.642e-05                               | 1.9 | 215.0 | 7.888e-03 | 139.5 |  |
| 2.0:   | 6.246e-05                     | 0.7 | 65.0  | 4.979e-03 | 45.7 |  | 5.147e-05                               | 0.3 | 135.0 | 6.618e-03 | 63.7  |  |
| 3.0:   | 7.278e-05                     | 1.0 | 95.0  | 4.975e-03 | 34.3 |  | 6.669e-05                               | 0.8 | 135.0 | 5.853e-03 | 42.2  |  |
| > 4.5: | 7.663e-05                     | 0.4 | 125.0 | 4.499e-03 | 27.1 |  | 7.683e-05                               | 0.4 | 135.0 | 4.772e-03 | 28.5  |  |
| 6.0:   | 7.815e-05                     | 0.3 | 155.0 | 4.199e-03 | 24.0 |  | 7.866e-05                               | 0.5 | 145.0 | 4.077e-03 | 22.9  |  |
| 7.5:   | 7.665e-05                     | 0.5 | 175.0 | 3.728e-03 | 21.4 |  | 7.685e-05                               | 0.5 | 175.0 | 3.733e-03 | 21.4  |  |
| 9.0:   | 7.368e-05                     | 0.6 | 185.0 | 3.264e-03 | 19.1 |  | 7.373e-05                               | 0.6 | 185.0 | 3.265e-03 | 19.1  |  |
| 12.0:  | 6.615e-05                     | 0.4 | 225.0 | 2.712e-03 | 17.3 |  | 6.615e-05                               | 0.4 | 225.0 | 2.712e-03 | 17.3  |  |

Die Unterschiede für  $u_a = 4.5$  m/s oder höher sind minimal. Bei geringeren Windgeschwindigkeiten macht sich zunehmend die nicht mit  $u_a$  skalierte zu hohe horizontale Diffusion bemerkbar.

Es entspricht nicht ganz der anschaulichen Vorstellung von turbulenter Diffusion, dass Fall B höhere bodennahe Konzentrationen liefert als Fall A. Dies ist vermutlich ein reiner Modell-Effekt, der auf der vereinfachten Modellierungstechnik beruht. Bei der Herleitung des Algorithmus von Richtlinie VDI 3945 Blatt 3 (2000) wurde schwache Inhomogenität vorausgesetzt und hierfür der Korrekturterm hergeleitet. Die Prandtl-Schicht ist jedoch stark inhomogen in ihrer Turbulenzstruktur und den resultierenden Transporteigenschaften. Zusätzlich wurde der Effekt einer aufsteigenden Abgasfahne aufgeprägt.

Weitere Testrechnungen sollten die Unterschiede zwischen A und B in einem erweiterten Parameterbereich klären. Es wurden folgende Szenarien betrachtet:

$z_0 = 0.05, 0.20, 0.50$  m  
 $h_b = 10, 20, 50, 100, 250$  m  
 $d_b = 0.05h_b$   
 $v_q = 10$  m/s  
 $k_s = 1.0, 2.0, 3.1, 3.2, 4.0, 5.0$   
 $t_q = 30, 110, 250$  °Celsius  
 $u_a = 1, 1.5, 2, 3, 4.5, 6.0, 7.5, 9.0, 12.0$  m/s

Die Variation der Windgeschwindigkeit wurde innerhalb eines Rechenlaufes durchgeführt. Bei der Rechnung für Fall A wurde in der Log-Datei eingetragen, welche Abgasfahnenüberhöhung verwendet wurde. Daraus wurde die effektive Quellhöhe berechnet und mit diesem Wert als Bauhöhe der Fall B gerechnet.

Die 540 erforderlichen Rechenläufe benötigten etwa 110 Stunden Rechenzeit. Hieraus wurde für Fall A und Fall B die maximale Konzentration bezüglich der meteorologischen Parameter  $k_s$  und  $u_a$ ,  $c_{\max}(z_0, h_b, t_q)$ , bestimmt. Die folgende Tabelle zeigt die Auflistung des Quotienten  $Q_{BA}(z_0, h_b, t_q) = c_{\max}^{(B)} / c_{\max}^{(A)}$  für Meteorologie-Version 2.1:

| $h_b \setminus t_q$ | $z_0 = 0.05$ |      |      | $z_0 = 0.20$ |      |      | $z_0 = 0.50$ |      |      |
|---------------------|--------------|------|------|--------------|------|------|--------------|------|------|
|                     | 30           | 110  | 250  | 30           | 110  | 250  | 30           | 110  | 250  |
| 10                  | 1.10         | 1.16 | 1.21 | 1.01         | 1.06 | 1.13 | 1.01         | 1.03 | 1.17 |
| 20                  | 1.48         | 1.78 | 1.90 | 1.18         | 1.35 | 1.39 | 1.01         | 1.03 | 1.03 |
| 50                  | 1.91         | 1.50 | 1.50 | 1.55         | 1.29 | 1.28 | 1.31         | 1.13 | 1.27 |
| 100                 | 1.23         | 1.21 | 1.23 | 1.15         | 1.14 | 1.07 | 1.09         | 1.08 | 1.09 |
| 250                 | 0.99         | 0.82 | 0.93 | 0.98         | 0.91 | 0.92 | 1.01         | 0.91 | 0.94 |

Die Werte für Fall B variieren zwischen dem 0.82-fachen und dem 1.91-fachen des jeweiligen Wertes von Fall A. Um die hohen Abweichungen bei  $h_b=20$  m und 50 m und geringer Rauigkeit zu verstehen, ist in folgender Tabelle aufgelistet, bei welcher meteorologischen Situation im Fall A oder Fall B der Maximalwert erreicht wurde. Dabei sind die Stabilitätsklassen durch

Indexwerte 1 bis 6 angegeben und die Geschwindigkeitswerte  $u_a$  durch die Buchstaben A bis I, wobei zuerst die Angabe für Fall A und durch '/' separiert die Angabe für Fall B steht:

| $h_b \setminus t_q$ | $z_0 = 0.05$ |       |       | $z_0 = 0.20$ |       |       | $z_0 = 0.50$ |       |       |
|---------------------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
|                     | 30           | 110   | 250   | 30           | 110   | 250   | 30           | 110   | 250   |
| 10                  | C3/B6        | E3/E4 | G3/D6 | D2/D2        | E2/E3 | G2/F4 | D1/D1        | F1/F1 | F3/G2 |
| 20                  | B4/A6        | E4/B6 | E3/C6 | B2/A6        | E2/B6 | D2/D6 | B2/B2        | D2/D2 | D2/D2 |
| 50                  | B4/A6        | A4/C6 | A4/D6 | A4/A6        | C4/C6 | A4/D6 | A3/A5        | B4/C4 | A4/C4 |
| 100                 | A4/B6        | A4/D6 | B4/E6 | A4/A6        | A4/A6 | B4/D6 | A4/A6        | A4/A4 | A4/A4 |
| 250                 | A6/B6        | A6/A6 | A6/A6 | A6/B6        | A6/A6 | A6/A6 | A6/A6        | A6/A6 | A6/A6 |

| Ausbreitungsklasse | 1.0 | 2.0 | 3.1 | 3.2 | 4.0 | 5.0 |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Indexwert          | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   |

| Windgeschwindigkeit | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 3.0 | 4.5 | 6.0 | 7.5 | 9.0 | 12.0 |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Kennbuchstabe       | A   | B   | C   | D   | E   | F   | G   | H   | I    |

Hieraus kann man erkennen, dass der Quotient nur dann größer ist als 1.27, wenn im Fall A der Maximalwert bei stabiler oder indifferenter Schichtung angenommen wurde (Klassen 1.0 bis 3.2), im Fall B aber bei sehr labiler Schichtung (Klasse 5.0).

### 2.3.2.2 Spezialfall labile Schichtung

Für die Anwendbarkeit des beschriebenen Verfahrens ist es wichtig, dass durch den Ersatz der realen, ansteigenden Abgasfahne (Fall A) durch eine passive Quelle in effektiver Quellhöhe (Fall B) keine zu großen Abweichungen in der berechneten maximalen bodennahen Konzentration erzeugt werden. Die zuvor dargestellten Ergebnisse zeigen, dass bei labiler Schichtung, geringer Bodenrauigkeit und großer Quellhöhe die Rechnung mit der Ersatzquelle (Fall B) deutlich höhere Werte für  $\hat{c}$  als die mit der realen Quelle (Fall A) liefern kann.

Solche großen Abweichungen treten nur auf, wenn im Fall B sehr labile Schichtung (Stabilitätsklasse V) den Maximalwert liefert. Mit labiler/konvektiver Schichtung hat der Transport-Algorithmus im Ausbreitungsmodell jedoch ein Problem. Er geht von einer Normalverteilung der Geschwindigkeitsfluktuationen aus, die sich bei der Addition vieler Zufallsgrößen automatisch ergibt (zentraler Grenzwertsatz). Dies ist bei stabiler und indifferenter Schichtung in Ordnung, da sich die Wirkung vieler Turbulenzwirbel addiert und zum turbulenten Transport führt.

Bei konvektiver Schichtung ist der vertikale Transport aber großräumig strukturiert. Aufwinde (*updrafts*) und Abwinde (*downdrafts*) wechseln sich ab und sind gelegentlich ortsfest (zur Freude der Segelflieger). Die tatsächliche Verteilungsdichte der vertikalen Geschwindigkeitsfluktuation bei konvektiver Schichtung ist also eine Überlagerung von zwei gegeneinander bewegten Verteilungen, die jeweils näherungsweise als Normalverteilung angesetzt werden können, wie im folgenden Bild skizziert.

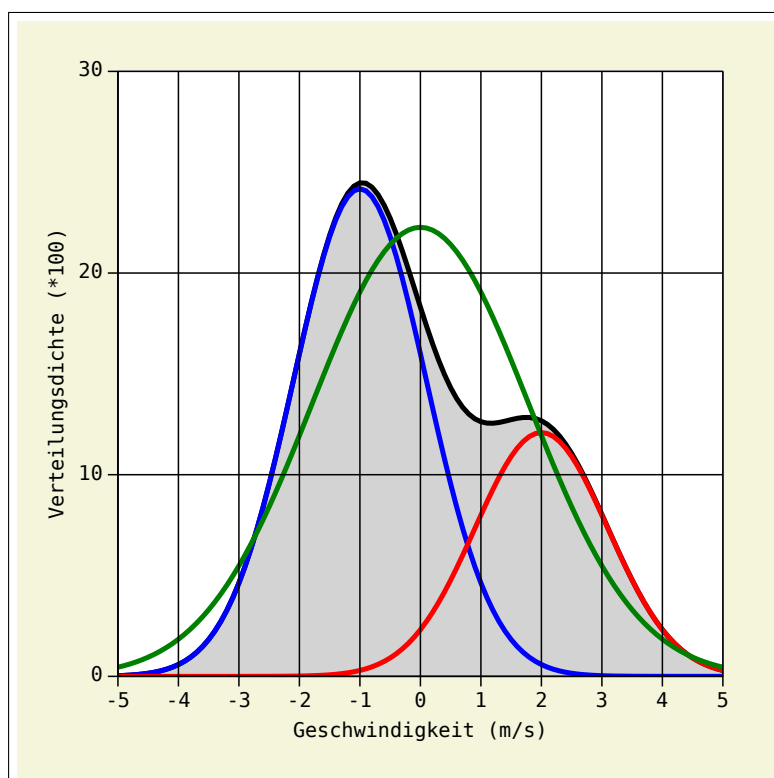


BILD 2.2: Das nebenstehende Bild zeigt die Überlagerung zweier Normalverteilungen: eine für Aufwinde (rot, Drift von 2 m/s) und eine für Abwinde (blau, Drift von -1 m/s). Die Summe der beiden ergibt die schwarze Kurve. Die grüne Kurve ist eine Normalverteilung mit der gleichen Varianz wie die schwarze.

Simulationsteilchen, die bei labiler Schichtung in größerer Höhe freigesetzt und in der vertikalen Geschwindigkeit entsprechend einer Normalverteilung initialisiert werden, zeigen also einen höheren Anteil an großen negativen Geschwindigkeiten als die Geschwindigkeitsfluktuationen in der Natur. Auf Grund der vorgegebenen hohen Lagrange-Korrelationszeit können sie relativ ungehindert bis zum Erdboden gelangen, wo sie dann in der Prandtl-Schicht abgebremst werden und sich dort stärker ansammeln, als es einem Gleichgewichtszustand entspricht.

Im Fall A werden die Simulationsteilchen entsprechend der Meteorologie in Bauhöhe initialisiert (mit geringerer Varianz und kürzerer Lagrange-Korrelationszeit) und dann mit der Abgasfahne aufwärts transportiert, so dass sich hier weniger Artefakte zeigen. Die beobachtete Diskrepanz zwischen Fall A und Fall B beruht also im wesentlichen auf einer Unzulänglichkeit in der Modellierung bei konvektiver Schichtung im Fall B.

Dieses Defizit des Lagrange-Modells ist seit langem bekannt, vielleicht allerdings nicht in allen seinen Auswirkungen. In den bisherigen Anwendungen, bei denen es vorwiegend um die Berechnung von Langzeit-Mittelwerten geht, spielt dies keine große Rolle, da dabei über statistische und systematische Fehler gemittelt wird. Ebenso wurden die Resultate von Ausbreitungsexperimenten bei labiler Schichtung mit zufriedenstellender Genauigkeit reproduziert. Für die hier vorgesehene Anwendung kommt es dagegen auf die korrekte Simulation jeder Einzelsituation an, so dass Korrekturen notwendig sind.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens konnte kein neuer Transport-Algorithmus entwickelt werden, der den Besonderheiten der konvektiven Schichtung in speziellen Fällen Rechnung trägt. Es konnte jedoch versucht werden, den störenden Effekt zu reduzieren. In den meisten Fällen unterscheiden sich die Ergebnisse nur um einige Prozent, wie beispielsweise der Ver-

gleich der beiden folgenden Bilder zeigt, bei denen für Fall A und Fall B die maximale bodennahe Konzentration bei der selben Ausbreitungsklasse angenommen wird. Das Maximum liegt in Fall B um 12 % über dem von Fall A.

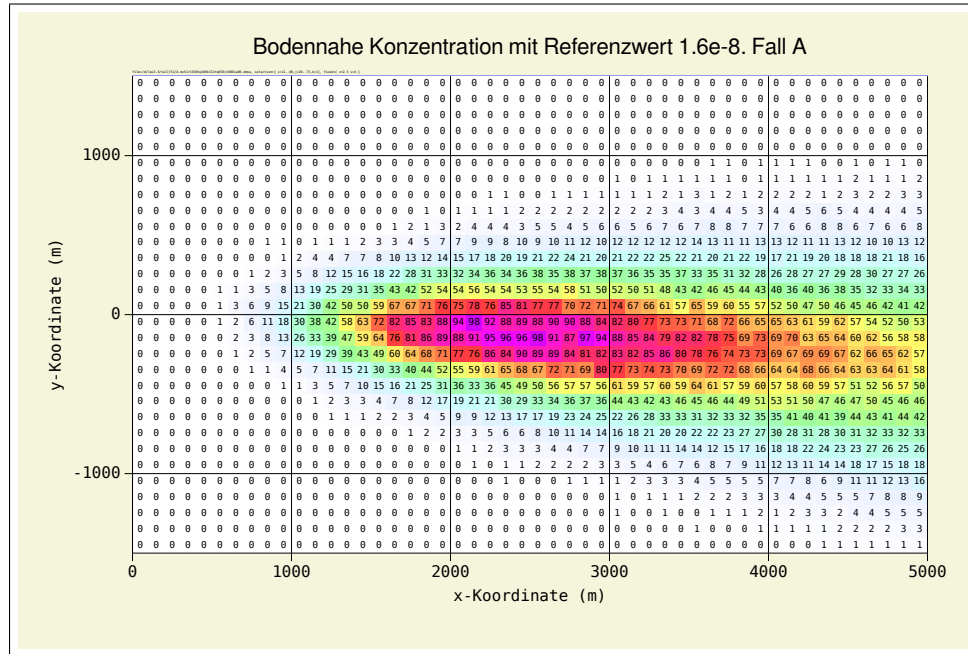


BILD 2.3: Bodennahe Konzentration für eine Ausbreitungsrechnung mit ansteigender Fahne (Fall A). Die Parameter sind:  $z_0 = 0.1$  m,  $d_0 = 0.6$  m,  $h_b = d_0 + 100$  m,  $t_q = 30^\circ$ ,  $v_q = 10$  m/s, Stabilitätsklasse III/2,  $u_a = 1$  m/s.

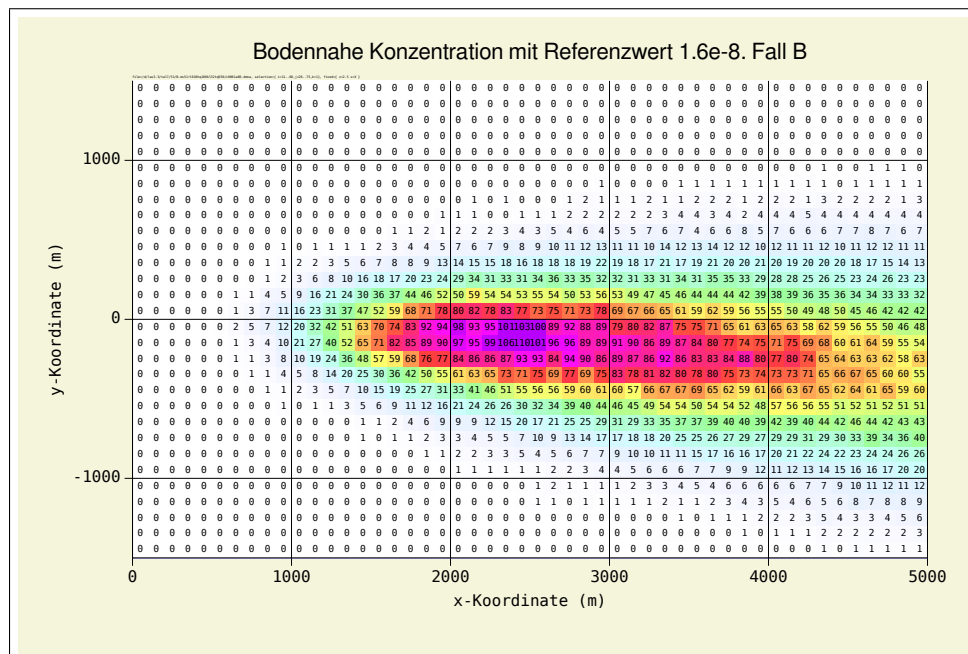


BILD 2.4: Bodennahe Konzentration für eine Ausbreitungsrechnung unter Verwendung einer effektiven Quellhöhe (Fall B). Die Parameter sind:  $z_0 = 0.1$  m,  $d_0 = 0.6$  m,  $h_e = 294$  m, Stabilitätsklasse III/2,  $u_a = 1$  m/s.



Um zu untersuchen, wie stark die Ausbreitungsklasse V den maximalen Konzentrationswert bestimmt, wurden Ausbreitungsrechnungen mit folgenden Parametern durchgeführt:

- Meteorologie-Modell 5.1 (entspricht dem Entwurf der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8, 2016)
- Rauigkeitslängen  $z_0 = 0.05, 0.10, 0.20, 0.50, 1.50$  m
- Ausbreitungsklassen I, II, III/1, III/2, IV, V
- Windgeschwindigkeit  $u_a = 1, 1.5, 2, 3, 4.5, 6, 7.5, 9, 12$  m/s
- Schornstein-Bauhöhe  $h_b = d_0 + 10, 20, 50, 100, 150, 200, 250$  m
- Abgastemperatur  $t_q = 10, 110, 250$  °Celsius
- Vertikale Nullpunktverschiebung  $d_0 = 6z_0$
- Anemometerhöhe  $h_a = d_0 + 10$  m
- Schornsteindurchmesser  $d_b = 0.05h_b$
- Ausströmgeschwindigkeit  $v_q = 10$  m/s

Zusätzlich wurde bei der aufsteigenden Fahne (Fall A) eine explizite, geringe Aufweitung während des Anstiegs angesetzt, deren genauer Wert später vom Abgasfahnenmodell bereitgestellt wird.

In der folgenden Liste werden die resultierenden Maximalwerte verglichen:

Die folgenden Tabellen enthalten für verschiedene Werte von  $z_0$ ,  $h_q$  und  $t_q$  in jedem Zahlenblock die Größen

A6 B6 B6/A6  
A5 B5 B5/A5  
A4 B4 B4/A4

$A_n$  = maximale bodennahe Konzentration für Fall A bei Auswertung von  $n$  Stabilitätsklassen  
 $B_n$  = maximale bodennahe Konzentration für Fall B bei Auswertung von  $n$  Stabilitätsklassen

| $z_0=0.05$ ----- |          |    |       |           |      |      |           |      |      |           |      |      |           |     |      |     |     |      |
|------------------|----------|----|-------|-----------|------|------|-----------|------|------|-----------|------|------|-----------|-----|------|-----|-----|------|
|                  | $h_q=50$ |    |       | $h_q=100$ |      |      | $h_q=150$ |      |      | $h_q=200$ |      |      | $h_q=250$ |     |      |     |     |      |
| $t_q=30$         | A6       | B6 | B6/A6 | 1664      | 1749 | 1.05 | 1003      | 1153 | 1.15 | 734       | 926  | 1.26 | 592       | 725 | 1.22 |     |     |      |
|                  | A5       | B5 | B5/A5 | 4760      | 5254 | 1.10 | 1664      | 1749 | 1.05 | 1003      | 1072 | 1.07 | 673       | 713 | 1.06 | 524 | 612 | 1.17 |
|                  | A4       | B4 | B4/A4 | 4760      | 5155 | 1.08 | 1664      | 1749 | 1.05 | 1003      | 1072 | 1.07 | 673       | 713 | 1.06 | 524 | 612 | 1.17 |
| $t_q=110$        | A6       | B6 | B6/A6 | 841       | 1027 | 1.22 | 571       | 748  | 1.31 | 602       | 734  | 1.22 | 590       | 725 | 1.23 |     |     |      |
|                  | A5       | B5 | B5/A5 | 1894      | 2232 | 1.18 | 841       | 946  | 1.13 | 528       | 644  | 1.22 | 531       | 624 | 1.17 | 519 | 612 | 1.18 |
|                  | A4       | B4 | B4/A4 | 1894      | 2232 | 1.18 | 841       | 946  | 1.13 | 528       | 644  | 1.22 | 531       | 624 | 1.17 | 519 | 612 | 1.18 |
| $t_q=250$        | A6       | B6 | B6/A6 | 584       | 748  | 1.28 | 580       | 748  | 1.29 | 582       | 734  | 1.26 | 597       | 725 | 1.21 |     |     |      |
|                  | A5       | B5 | B5/A5 | 1416      | 1496 | 1.06 | 584       | 668  | 1.14 | 536       | 644  | 1.20 | 545       | 624 | 1.15 | 531 | 612 | 1.15 |
|                  | A4       | B4 | B4/A4 | 1416      | 1496 | 1.06 | 584       | 668  | 1.14 | 536       | 644  | 1.20 | 545       | 624 | 1.15 | 531 | 612 | 1.15 |
| $z_0=0.10$ ----- |          |    |       |           |      |      |           |      |      |           |      |      |           |     |      |     |     |      |
|                  | $h_q=50$ |    |       | $h_q=100$ |      |      | $h_q=150$ |      |      | $h_q=200$ |      |      | $h_q=250$ |     |      |     |     |      |
| $t_q=30$         | A6       | B6 | B6/A6 | 1571      | 1754 | 1.12 | 942       | 1098 | 1.17 | 714       | 921  | 1.29 | 553       | 679 | 1.23 |     |     |      |
|                  | A5       | B5 | B5/A5 | 5090      | 5256 | 1.03 | 1571      | 1754 | 1.12 | 942       | 1007 | 1.07 | 676       | 718 | 1.06 | 464 | 533 | 1.15 |
|                  | A4       | B4 | B4/A4 | 5090      | 4978 | 0.98 | 1571      | 1754 | 1.12 | 942       | 1007 | 1.07 | 676       | 699 | 1.03 | 464 | 533 | 1.15 |
| $t_q=110$        | A6       | B6 | B6/A6 | 759       | 994  | 1.31 | 539       | 703  | 1.30 | 563       | 679  | 1.21 | 575       | 679 | 1.18 |     |     |      |



|         |        |      |      |        |      |      |        |      |      |        |     |      |        |     |      |
|---------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|-----|------|--------|-----|------|
|         | 1950   | 2089 | 1.07 | 759    | 915  | 1.21 | 484    | 592  | 1.22 | 471    | 581 | 1.23 | 467    | 533 | 1.14 |
|         | 1950   | 2089 | 1.07 | 759    | 915  | 1.21 | 484    | 592  | 1.22 | 471    | 581 | 1.23 | 467    | 533 | 1.14 |
| tq=250  | 1355   | 1480 | 1.09 | 546    | 734  | 1.35 | 563    | 703  | 1.25 | 551    | 679 | 1.23 | 567    | 679 | 1.20 |
|         | 1355   | 1480 | 1.09 | 546    | 640  | 1.17 | 491    | 592  | 1.21 | 475    | 581 | 1.22 | 470    | 533 | 1.13 |
|         | 1355   | 1480 | 1.09 | 546    | 640  | 1.17 | 491    | 592  | 1.21 | 475    | 581 | 1.22 | 470    | 533 | 1.13 |
| z0=0.20 | -----  |      |      |        |      |      |        |      |      |        |     |      |        |     |      |
|         | hq= 50 |      |      | hq=100 |      |      | hq=150 |      |      | hq=200 |     |      | hq=250 |     |      |
| tq= 30  | 5353   | 5596 | 1.05 | 1541   | 1629 | 1.06 | 903    | 1054 | 1.17 | 686    | 906 | 1.32 | 547    | 626 | 1.15 |
|         | 5353   | 5292 | 0.99 | 1541   | 1614 | 1.05 | 903    | 990  | 1.10 | 643    | 673 | 1.05 | 433    | 488 | 1.13 |
|         | 5353   | 5292 | 0.99 | 1541   | 1614 | 1.05 | 903    | 990  | 1.10 | 643    | 673 | 1.05 | 433    | 488 | 1.13 |
| tq=110  | 1868   | 2074 | 1.11 | 746    | 957  | 1.28 | 477    | 653  | 1.37 | 533    | 633 | 1.19 | 523    | 614 | 1.17 |
|         | 1868   | 2074 | 1.11 | 746    | 824  | 1.10 | 434    | 502  | 1.16 | 427    | 495 | 1.16 | 424    | 478 | 1.13 |
|         | 1868   | 2074 | 1.11 | 746    | 824  | 1.10 | 434    | 502  | 1.16 | 427    | 495 | 1.16 | 424    | 478 | 1.13 |
| tq=250  | 1355   | 1458 | 1.08 | 522    | 680  | 1.30 | 494    | 653  | 1.32 | 508    | 633 | 1.25 | 517    | 614 | 1.19 |
|         | 1355   | 1458 | 1.08 | 522    | 585  | 1.12 | 421    | 502  | 1.19 | 429    | 495 | 1.15 | 411    | 478 | 1.16 |
|         | 1355   | 1458 | 1.08 | 522    | 585  | 1.12 | 421    | 502  | 1.19 | 429    | 495 | 1.15 | 411    | 478 | 1.16 |
| z0=0.50 | -----  |      |      |        |      |      |        |      |      |        |     |      |        |     |      |
|         | hq= 50 |      |      | hq=100 |      |      | hq=150 |      |      | hq=200 |     |      | hq=250 |     |      |
| tq= 30  | 5524   | 5473 | 0.99 | 1516   | 1652 | 1.09 | 855    | 1004 | 1.17 | 612    | 793 | 1.30 | 518    | 572 | 1.10 |
|         | 5524   | 5473 | 0.99 | 1516   | 1566 | 1.03 | 855    | 899  | 1.05 | 605    | 628 | 1.04 | 431    | 446 | 1.04 |
|         | 5524   | 5473 | 0.99 | 1516   | 1566 | 1.03 | 855    | 899  | 1.05 | 605    | 628 | 1.04 | 431    | 446 | 1.04 |
| tq=110  | 1922   | 2080 | 1.08 | 714    | 893  | 1.25 | 415    | 541  | 1.31 | 451    | 527 | 1.17 | 450    | 516 | 1.15 |
|         | 1922   | 2080 | 1.08 | 714    | 761  | 1.07 | 409    | 451  | 1.10 | 374    | 417 | 1.11 | 351    | 390 | 1.11 |
|         | 1922   | 2080 | 1.08 | 714    | 761  | 1.07 | 409    | 451  | 1.10 | 374    | 417 | 1.11 | 351    | 390 | 1.11 |
| tq=250  | 1313   | 1432 | 1.09 | 534    | 618  | 1.16 | 434    | 527  | 1.22 | 429    | 527 | 1.23 | 452    | 516 | 1.14 |
|         | 1313   | 1432 | 1.09 | 534    | 560  | 1.05 | 372    | 410  | 1.10 | 351    | 417 | 1.19 | 357    | 390 | 1.09 |
|         | 1313   | 1432 | 1.09 | 534    | 560  | 1.05 | 372    | 410  | 1.10 | 351    | 417 | 1.19 | 357    | 390 | 1.09 |
| z0=1.50 | -----  |      |      |        |      |      |        |      |      |        |     |      |        |     |      |
|         | hq= 50 |      |      | hq=100 |      |      | hq=150 |      |      | hq=200 |     |      | hq=250 |     |      |
| tq= 30  | 4893   | 5360 | 1.10 | 1491   | 1480 | 0.99 | 764    | 893  | 1.17 | 525    | 641 | 1.22 | 412    | 510 | 1.24 |
|         | 4893   | 5077 | 1.04 | 1491   | 1480 | 0.99 | 764    | 816  | 1.07 | 525    | 538 | 1.03 | 380    | 382 | 1.01 |
|         | 4893   | 4822 | 0.99 | 1491   | 1480 | 0.99 | 764    | 816  | 1.07 | 525    | 538 | 1.03 | 380    | 382 | 1.01 |
| tq=110  | 1851   | 2043 | 1.10 | 648    | 707  | 1.09 | 384    | 482  | 1.26 | 286    | 352 | 1.23 | 304    | 339 | 1.12 |
|         | 1851   | 2043 | 1.10 | 648    | 694  | 1.07 | 384    | 389  | 1.01 | 241    | 260 | 1.08 | 231    | 250 | 1.08 |
|         | 1851   | 2043 | 1.10 | 648    | 694  | 1.07 | 384    | 389  | 1.01 | 241    | 260 | 1.08 | 231    | 250 | 1.08 |
| tq=250  | 1221   | 1361 | 1.11 | 471    | 558  | 1.19 | 273    | 358  | 1.31 | 292    | 352 | 1.20 | 305    | 339 | 1.11 |
|         | 1221   | 1361 | 1.11 | 471    | 502  | 1.07 | 262    | 284  | 1.08 | 235    | 260 | 1.11 | 230    | 250 | 1.09 |
|         | 1221   | 1361 | 1.11 | 471    | 502  | 1.07 | 262    | 284  | 1.08 | 235    | 260 | 1.11 | 230    | 250 | 1.09 |

Dem Vergleich kann man folgendes entnehmen:

- Die Klasse IV spielt in Fall A überhaupt keine Rolle. Die Werte in der zweiten und der dritten Zeile sind für Fall A immer gleich. Bei Fall B gibt es vier mal eine Differenz zwischen Klasse IV Klasse III/2, die aber höchstens 5 % beträgt. Wenn man auf Klasse V verzichtet, kann man daher auch auf Klasse IV verzichten, ohne dass merkliche Änderungen auftreten.
- Wenn man in Fall A und in Fall B nur vier Stabilitätsklassen auswertet, liegen die Konzentrationswerte von Fall B um höchstens 23 % über und höchstens 1 % unter denen von Fall A.

Eine etwas bessere Übersicht erhält man, wenn man diese Ergebnisse graphisch darstellt. Dabei



wird jeder Zahlenblock von 3×3 Zahlen als Quadrat dargestellt, in dem die Werte von Fall A und Fall B als Rauten eingezeichnet sind, wobei der höchste Wert von Fall A als Referenzwert genommen wird. Der graue Bereich stellt die Abweichung von 20 % vom Referenzwert dar.

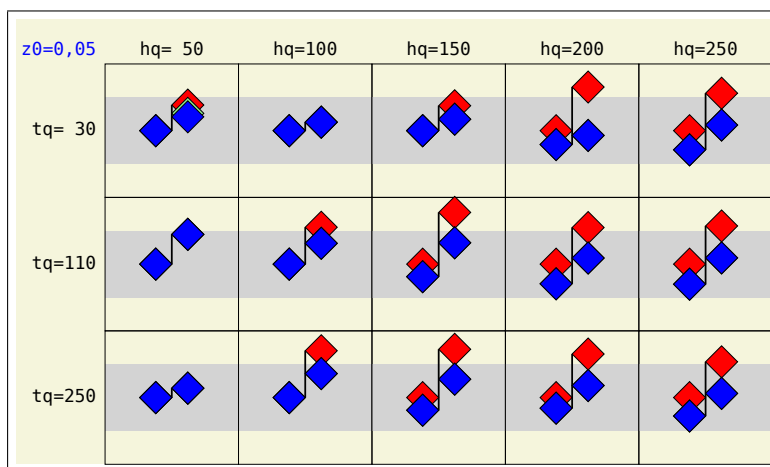
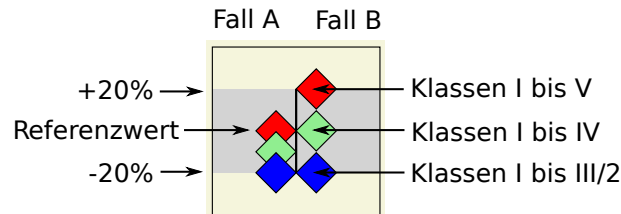


BILD 2.5: Vergleich Fall A und Fall B,  $z_0 = 0.05$  m.

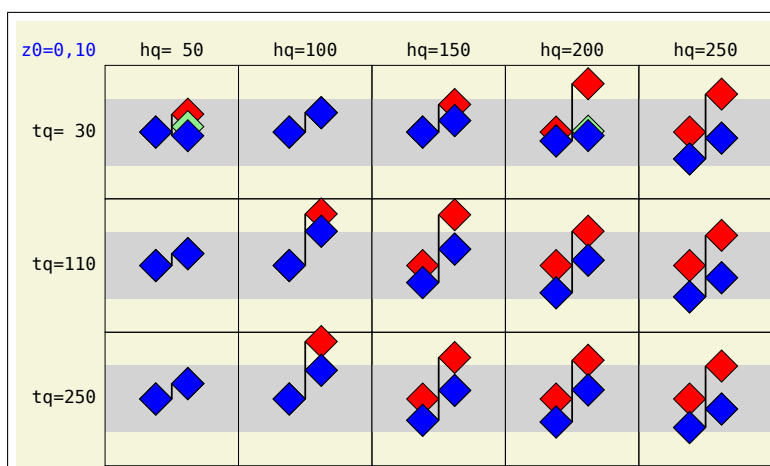


BILD 2.6: Vergleich Fall A und Fall B,  $z_0 = 0.1$  m.

Das Fehlen der grünen Raute beruht darauf, dass sie fast überall von der blauen Raute mit den gleichen Werten überlagert ist, wie auch die rote Raute in vielen Fällen.

Will man wissen, wie stark sich für Fall B der über vier Klassen ermittelte Wert von dem für Fall A über sechs Klassen ermittelten Wert unterscheidet, dann muss man die Position der blauen Raute in der rechten Hälfte mit der der roten Raute in der linken Hälfte (Mitte des grauen Bereichs) vergleichen. Die Abweichungen liegen bei höchstens 20 %, in den meisten Fällen aber deutlich darunter. Dies ist kein so großer Unterschied zu der Situation, wo auch in Fall A nur 4 Klassen betrachtet werden.

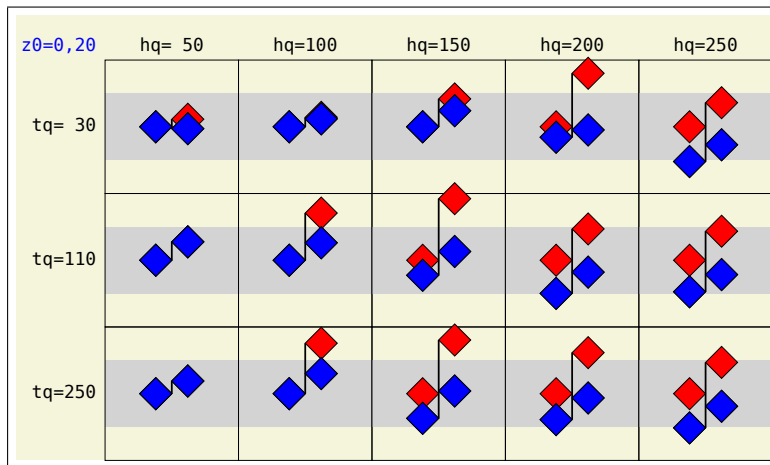


BILD 2.7: Vergleich Fall A und Fall B,  $z_0 = 0.2$  m.

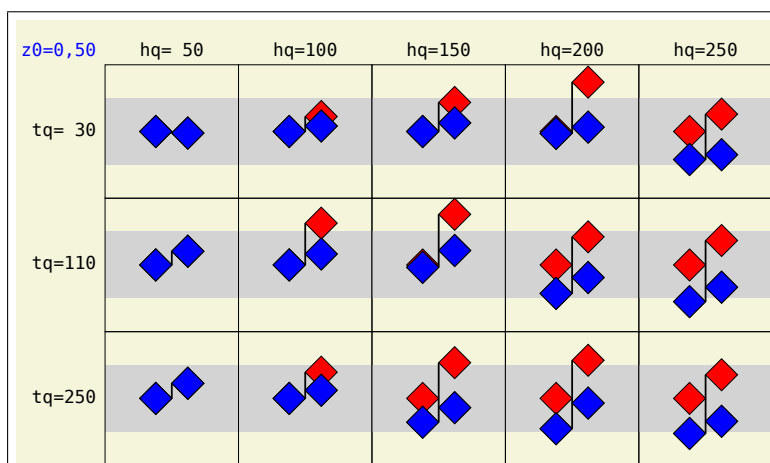


BILD 2.8: Vergleich Fall A und Fall B,  $z_0 = 0.5$  m.

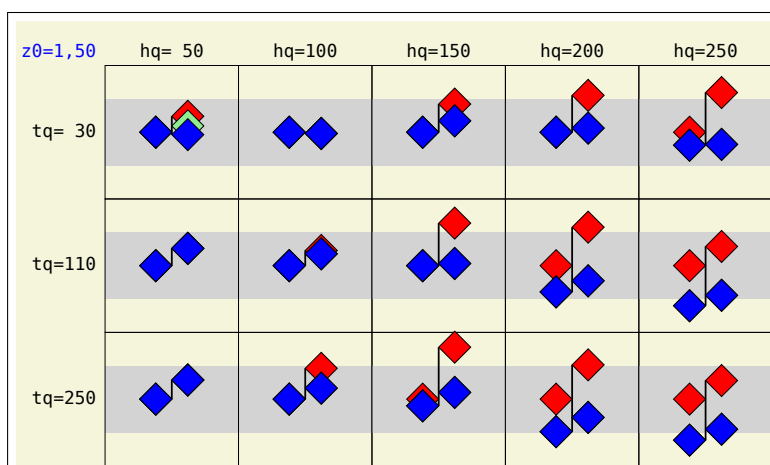


BILD 2.9: Vergleich Fall A und Fall B,  $z_0 = 1.5$  m.

Eine Strategie ist es also, bei der Bestimmung der Schornsteinbauhöhe nur die Stabilitätsklassen I bis III/2 zu betrachten (25 Ausbreitungssituationen) und entsprechend auch in komplexen Situationen, wo man zur Prüfung des Schornsteinhöhen-Kriteriums explizit auf Ausbreitungsrechnungen zurückgreifen muss, nur diese Stabilitätsklassen zu verwenden.

### 2.3.2.3 Abhängigkeit der Konzentration von der Quellhöhe

Bei der bisherigen Diskussion ist immer davon ausgegangen worden, dass eine Erhöhung der Schornsteinbauhöhe auch immer zu einer Verringerung der bodennahen Konzentration  $c_{\max}$  führt. Für eine Reihe von Parameterkombinationen wurde dies für die Variation der effektiven Quellhöhe  $h_e$  überprüft. Die gewählten Parameter sind:

- Meteorologie-Modell 2.1
- Rauigkeitslängen  $z_0 = 0.10, 0.50, 2.00$  m
- Ausbreitungsklassen I, II, III/1, III/2, IV, V
- Windgeschwindigkeit  $u_a = 1, 1.5, 2, 3, 4.5, 6, 7.5, 9, 12$  m/s
- Effektive Quellhöhe  $h_e = 10, 20, 40, 80, 160$  m mit jeweils 4 Zwischenwerten

Bei keiner der 129 Parameterkombinationen gibt es einen Hinweis, dass sich das Modell nicht den Erwartungen gemäß verhält. Es ist zu beobachten, dass bei labiler Schichtung in großer Quellentfernung die bodennahe Konzentration unabhängig von der effektiven Quellhöhe ist. Dies ist wegen der gleichmäßigen Durchmischung der Mischungsschicht auch nicht anders zu erwarten.

Die folgenden Bilder zeigen für drei Parameterkombinationen die Konzentration unter der Fahnenachse für die 21 Werte von  $h_e$ . Dabei ist jede Kurve nur in dem Bereich gezeichnet, in dem 1% des jeweiligen Maximalwertes überschritten wird.

### 2.3.3 Festlegung der Modellierung

Wie zuvor erläutert werden für die Schornsteinhöhenbestimmung die Ausbreitungsrechnungen mit der effektiven Quellhöhe durchgeführt und es werden nur die Stabilitätsklassen I bis III/2 betrachtet. Als Grenzschichtmodell wird das der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) verwendet (Meteorologie-Modell 5.3 in *LASAT*).

Für die Berechnung der Abgasfahnenüberhöhung wird das Programm *IBJpluris* eingesetzt mit Einstellungen, die im Wesentlichen im Abschnitt 4.3 aufgeführt sind und in einem der nächsten *Berichte zur Umweltphysik* noch zusammenfassend dargestellt werden. Auf eine überarbeitete Version der Richtlinie VDI 3782 Blatt 3 (1985) konnte noch nicht zurückgegriffen werden, da die Überarbeitung auf Grundlage von *PLURIS* noch nicht abgeschlossen ist.

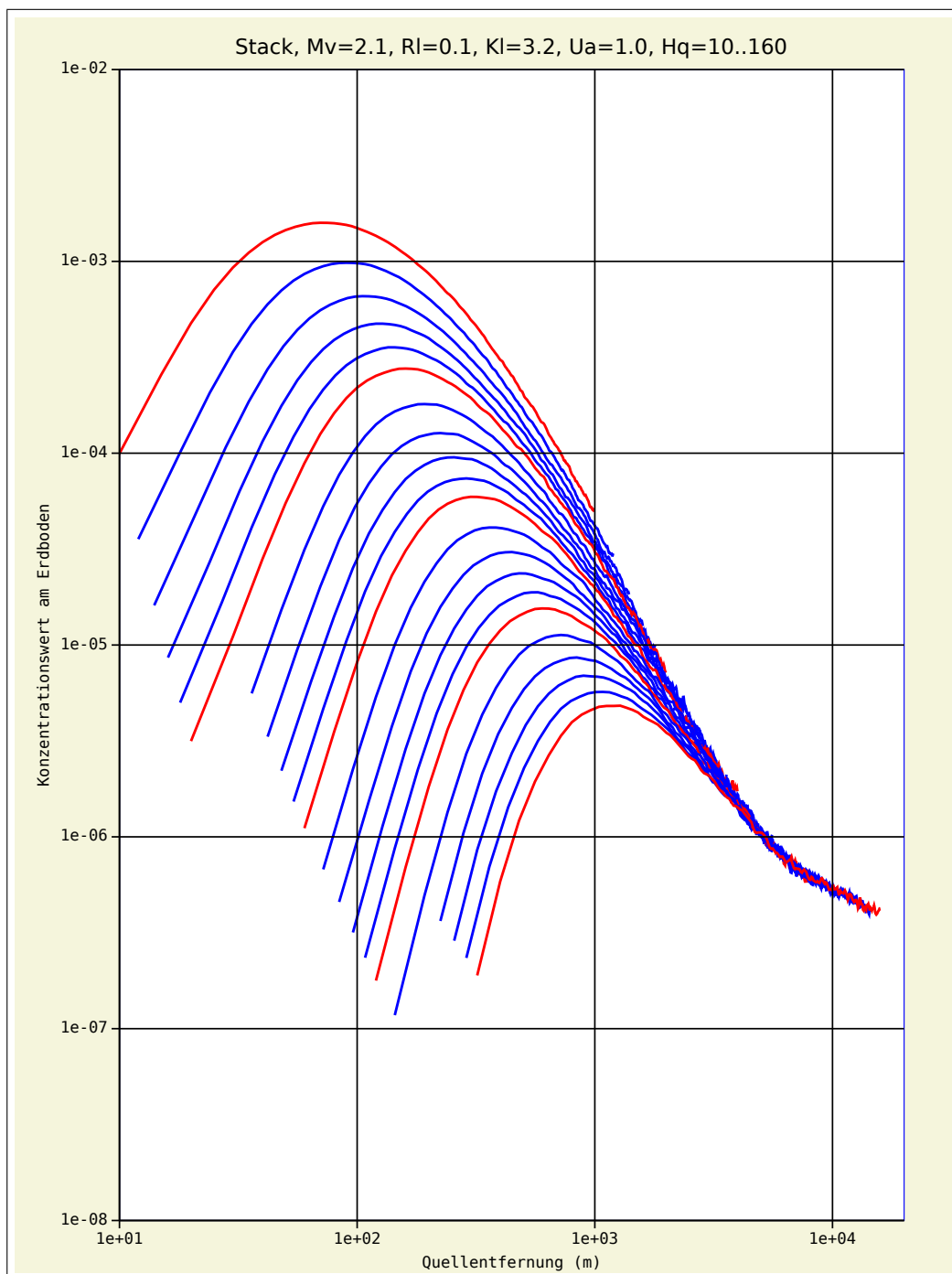


BILD 2.10: Bodennahe Konzentration unter der Fahnenachse für passive Quellen in den Höhen 10, 12, 14, 16, 18, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 48, 56, 64, 72, 80, 96, 112, 128, 144, 160 m (von oben nach unten).

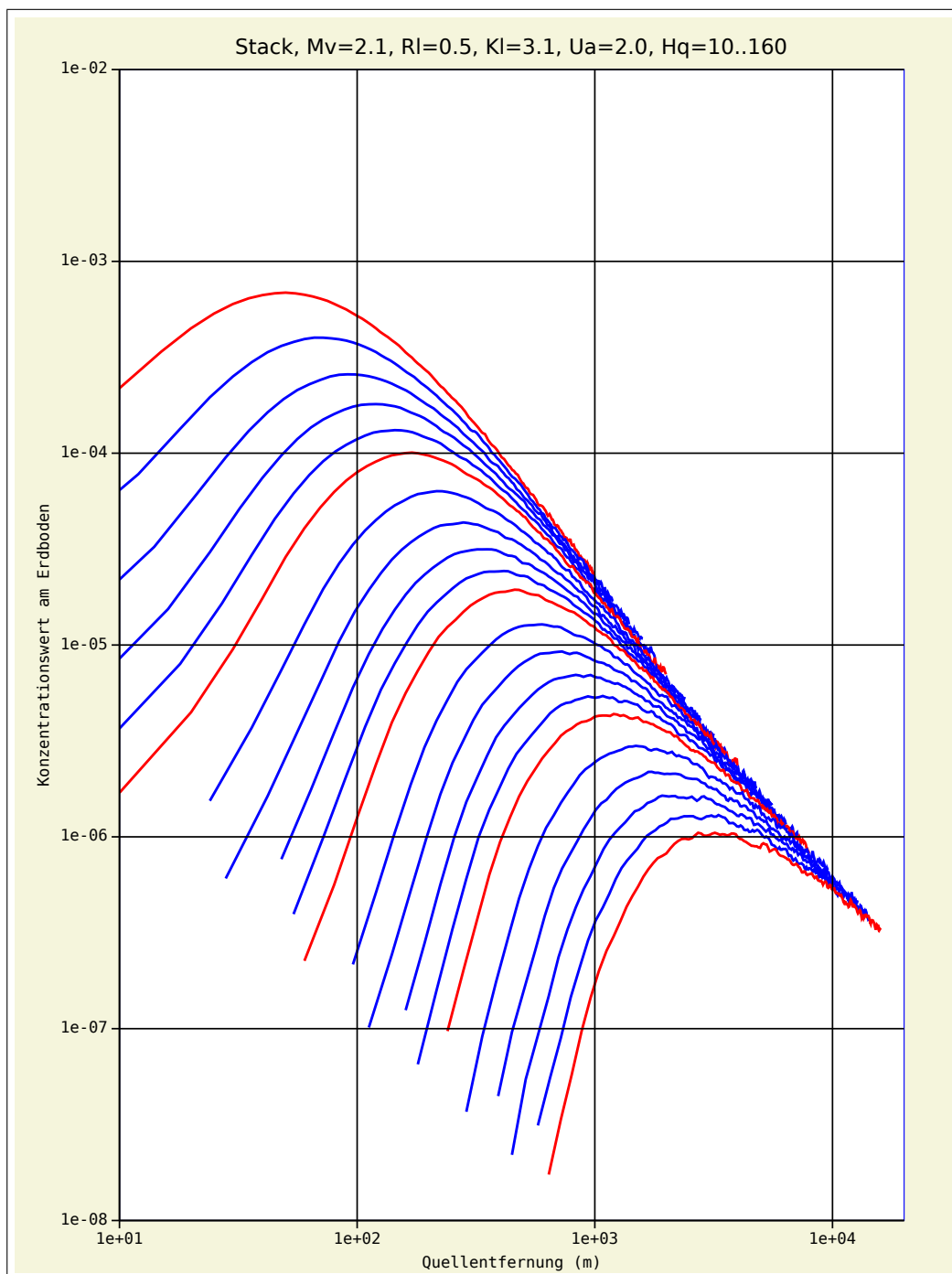


BILD 2.11: Bodennahe Konzentration unter der Fahnenachse für passive Quellen in den Höhen 10, 12, 14, 16, 18, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 48, 56, 64, 72, 80, 96, 112, 128, 144, 160 m (von oben nach unten).

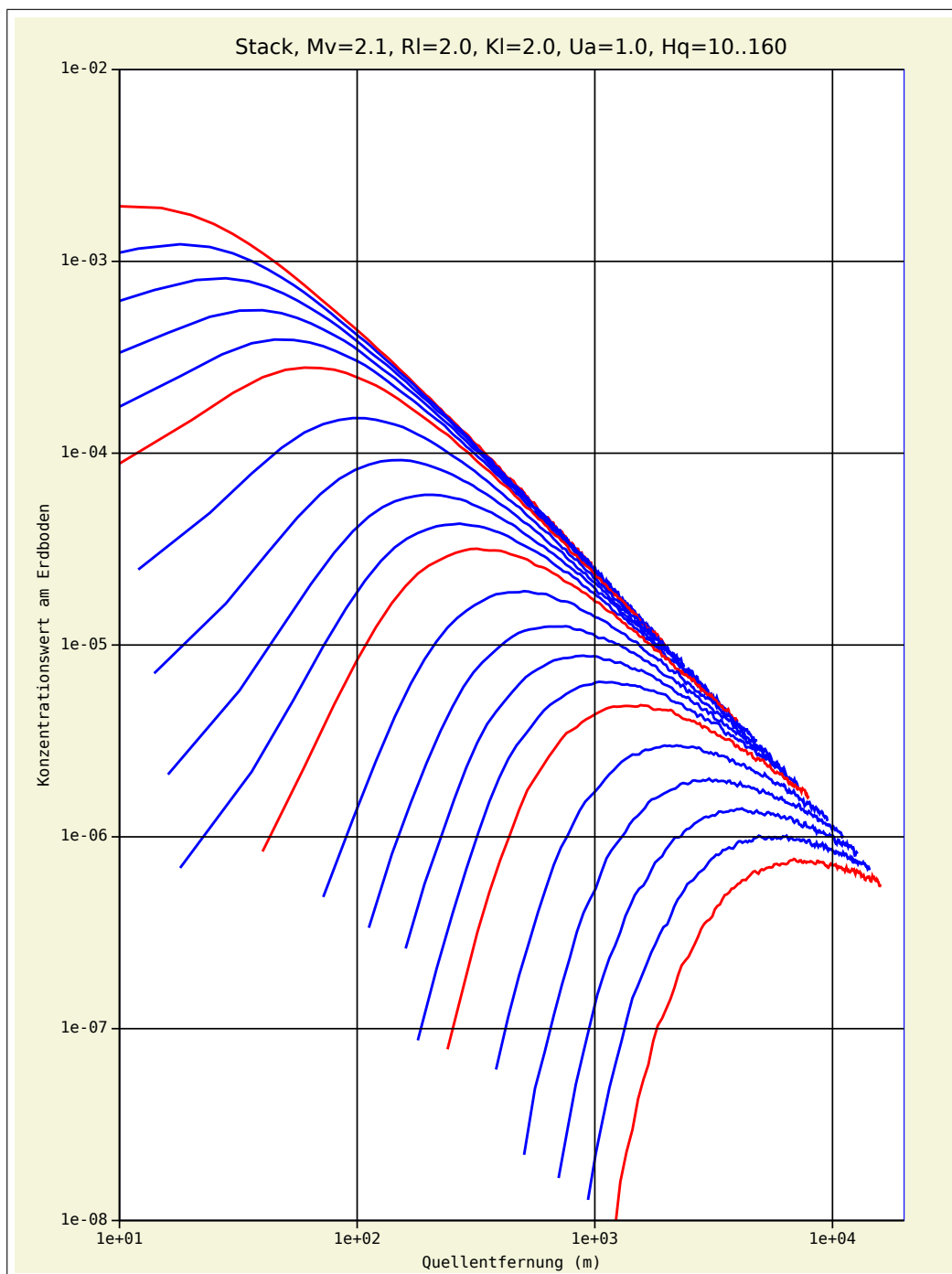


BILD 2.12: Bodennahe Konzentration unter der Fahnenachse für passive Quellen in den Höhen 10, 12, 14, 16, 18, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 48, 56, 64, 72, 80, 96, 112, 128, 144, 160 m (von oben nach unten).

### 2.3.3.1 Ausbreitungsrechnungen mit effektiver Quellhöhe

Wie bereits früher geschehen wurde auch für diese aktualisierte Modellierungsart der Vergleich zwischen den beiden Verfahren zur Berücksichtigung der Abgasfahnenüberhöhung durchgeführt:

- A Die Abgasfahnenüberhöhung wird mit *IBJpluris* berechnet und der Anstieg der Fahnenachse wird bei der Ausbreitungsrechnung durch die Parameter *Anstiegszeit* und *Anstiegsgeschwindigkeit* beschrieben. Das Produkt aus beiden ist die resultierende, asymptotisch erreichte Abgasfahnenüberhöhung. So wird bei der normalen Ausbreitungsrechnung vorgegangen.
- B Die Abgasfahnenüberhöhung wird im voraus mit *IBJpluris* berechnet, zur Schornsteinbauhöhe zugeschlagen und dann mit der effektiven Quellhöhe als Emissionshöhe wie für eine passive Quelle gerechnet. Diese Art der Rechnung kommt bei der aktualisierten Schornsteinhöhenbestimmung zum Einsatz.

Folgende Situationen wurden untersucht:

- Meteorologie-Modell 5.3
- Rauigkeitslängen  $z_0 = 0.05, 0.10, 0.20, 0.50, 1.50$  m
- Ausbreitungsklassen I, II, III/1, III/2
- Windgeschwindigkeiten  $u_a = 1, 1.5, 2, 3, 4.5, 6, 7.5, 9, 12$  m/s
- Schornstein-Bauhöhen  $h_b = 10, 20, 50, 100, 150, 200, 250$  m
- Abgastemperaturen  $t_q = 30, 110, 250$  °Celsius
- Vertikale Nullpunktverschiebung  $d_0 = 6z_0$
- Anemometerhöhe  $h_a = d_0 + 10$  m
- Schornsteindurchmesser  $d_b = 0.05h_b$
- Ausströmgeschwindigkeit  $v_q = 10$  m/s
- Vertikales Rechenetz 0, 3, 6, 10, 15, 20, 25 ... m

In diesen Tests wurden zur Vollständigkeit und Prüfung verschiedene Rauigkeitslängen betrachtet. In der späteren Anwendung wird die Rauigkeitslänge fest mit dem mittleren Wert von 0.5 m vorgegeben, damit die Schornsteinhöhenbestimmung standortunabhängig erfolgt.

Für jede der möglichen Kombinationen von  $z_0$ ,  $h_b$  und  $t_q$  wurde die maximale Konzentration in der untersten Schicht über alle Ausbreitungssituationen separat für Fall A,  $\hat{c}^{(A)}$ , und für Fall B,  $\hat{c}^{(B)}$ , bestimmt. In den folgenden Tabellen ist die Größe  $100 \times \hat{c}^{(B)} / \hat{c}^{(A)}$  aufgetragen.

Maximum über die Klassen I bis III/2 und alle Windgeschwindigkeiten:

| tq=30 | z0\hb | 10  | 20  | 50  | 100 | 150 | 200 | 250 |
|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|       | 0,05  | 100 | 104 | 116 | 116 | 98  | 101 | 103 |
|       | 0,10  | 100 | 102 | 121 | 110 | 94  | 103 | 103 |
|       | 0,20  | 100 | 102 | 111 | 102 | 104 | 99  | 103 |
|       | 0,50  | 99  | 103 | 105 | 106 | 101 | 103 | 98  |
|       | 1,50  | 100 | 101 | 101 | 104 | 99  | 105 | 102 |

| tq=110 | z0\hb | 10  | 20  | 50  | 100 | 150 | 200 | 250 |
|--------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|        | 0,05  | 101 | 102 | 125 | 111 | 101 | 111 | 117 |
|        | 0,10  | 100 | 101 | 115 | 112 | 95  | 102 | 111 |
|        | 0,20  | 100 | 100 | 100 | 108 | 102 | 103 | 108 |
|        | 0,50  | 99  | 102 | 103 | 99  | 93  | 115 | 119 |
|        | 1,50  | 100 | 101 | 101 | 99  | 111 | 95  | 104 |

| tq=250 | z0\hb | 10  | 20  | 50  | 100 | 150 | 200 | 250 |
|--------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|        | 0,05  | 101 | 104 | 114 | 106 | 104 | 112 | 115 |
|        | 0,10  | 100 | 105 | 114 | 108 | 100 | 113 | 117 |
|        | 0,20  | 101 | 101 | 105 | 108 | 100 | 117 | 108 |
|        | 0,50  | 100 | 100 | 102 | 107 | 106 | 108 | 117 |
|        | 1,50  | 100 | 102 | 102 | 101 | 103 | 108 | 107 |

In 97 der insgesamt 105 Kombinationen wurde der Maximalwert in Fall A und in Fall B bei derselben Ausbreitungssituation gefunden (Stabilitätsklasse und Windgeschwindigkeit). Die maximale Abweichung nach oben ist 25 Prozent und nach unten 7 Prozent. In Fall B wird der Wert der Maximalkonzentration tendenziell geringfügig überschätzt.

### 2.3.3.2 Erstellung der Datenbasis

Die Datenbasis für die Schornsteinhöhenberechnung wurde durch Ausbreitungsrechnungen mit folgenden Parametern bestimmt:

- Meteorologie-Modell 5.3
- Rauigkeitslängen  $z_0 = 0.01, 0.02, 0.05, 0.10, 0.20, 0.50, 1.00, 1.50, 2.00$  m
- Anemometerhöhe  $h_a = 6z_0 + 10$  m
- Ausbreitungsklassen I, II, III/1, III/2
- Windgeschwindigkeiten  $u_a = 1, 1.5, 2, 3, 4.5, 6, 7.5, 9, 12$  m/s
- Effektive Quellhöhen  $h_e = 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1280$  m mit jeweils 3 Zwischenwerten





Die Windgeschwindigkeiten entsprechen den Klassenwerten einer Ausbreitungsklassenstatistik (siehe z.B. Anhang 3 der TA Luft, 2002). Nach der Klassierung von Klug/Manier kommt für stabile Klassen nur ein Teilbereich der Windgeschwindigkeiten vor:

|              |                                  |
|--------------|----------------------------------|
| Klasse I     | 1, 1.5, 2                        |
| Klasse II    | 1, 1.5, 2, 3                     |
| Klasse III/1 | 1, 1.5, 2, 3, 4.5, 6, 7.5, 9, 12 |
| Klasse III/2 | 1, 1.5, 2, 3, 4.5, 6, 7.5, 9, 12 |

Das ergibt insgesamt 25 Ausbreitungssituationen.

Als Ergebnis liegen die 3-dimensionalen Felder von Konzentration und statistischer Unsicherheit für jede der möglichen Parameterkombinationen vor. Um eine erste Übersicht über die Ergebnisse zu erhalten, ist in der folgenden Tabelle der über alle Ausbreitungssituationen für  $u_a = 1$  m/s ermittelte maximale Wert der Konzentration in der untersten Schicht aufgetragen. Die Werte sind für eine einfachere Vergleichbarkeit mit dem Faktor  $1000h_c^2$  multipliziert. Daneben ist angegeben, bei welcher Stabilitätsklasse dieser Wert angenommen wird.

Zum Zwecke einer kürzeren Schreibweise werden die Stabilitätsklassen mit den Buchstaben A bis F gekennzeichnet (KTA-Klassennamen): A gleich V, B gleich IV, C gleich III/2, D gleich III/1, E gleich II und F gleich I.<sup>10</sup>

---

<sup>10</sup>Durch das eingesetzte Überhöhungsmodell sind die effektiven Quellhöhen auf Werte bis zu 800 m begrenzt (siehe Abschnitt 4.3.2).

| he\z0  | 0.01  | 0.02  | 0.05  | 0.10  | 0.20  | 0.50  | 1.00  | 1.50  | 2.00  |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 10.0:  | 102 E | 113 E | 124 E | 131 E | 167 F | 247 F | 319 F | 264 F | 239 F |
| 11.9:  | 89 E  | 100 E | 113 E | 119 E | 138 F | 208 F | 271 F | 251 F | 224 F |
| 14.1:  | 79 D  | 87 E  | 102 E | 110 E | 114 E | 173 F | 233 F | 236 F | 216 F |
| 16.8:  | 78 D  | 80 D  | 91 E  | 101 E | 106 E | 142 F | 197 F | 211 F | 204 F |
| 20.0:  | 76 D  | 78 D  | 78 D  | 88 E  | 97 E  | 113 F | 160 F | 181 F | 191 F |
| 23.8:  | 77 D  | 76 D  | 77 D  | 76 E  | 92 E  | 104 E | 131 F | 148 F | 170 F |
| 28.3:  | 77 D  | 78 D  | 75 D  | 73 D  | 82 E  | 98 E  | 109 E | 125 F | 144 F |
| 33.6:  | 80 D  | 78 D  | 75 D  | 75 D  | 73 D  | 90 E  | 100 E | 105 E | 119 F |
| 40.0:  | 80 D  | 79 D  | 77 D  | 76 D  | 77 D  | 83 E  | 91 E  | 94 E  | 100 E |
| 47.6:  | 80 D  | 80 D  | 78 D  | 74 D  | 78 D  | 74 D  | 83 E  | 86 E  | 90 E  |
| 56.6:  | 83 C  | 79 D  | 77 D  | 77 D  | 79 D  | 76 D  | 74 E  | 78 E  | 82 E  |
| 67.3:  | 88 C  | 83 C  | 79 D  | 78 D  | 82 D  | 76 D  | 69 D  | 73 E  | 75 E  |
| 80.0:  | 98 C  | 90 C  | 82 C  | 82 D  | 83 D  | 76 D  | 71 D  | 64 D  | 68 E  |
| 95.1:  | 105 C | 95 C  | 89 C  | 82 C  | 83 D  | 79 D  | 69 D  | 64 D  | 63 C  |
| 113.1: | 111 C | 104 C | 94 C  | 88 C  | 86 C  | 77 C  | 70 C  | 66 C  | 65 C  |
| 134.5: | 120 C | 109 C | 103 C | 96 C  | 95 C  | 84 C  | 78 C  | 67 C  | 68 C  |
| 160.0: | 132 C | 120 C | 112 C | 106 C | 101 C | 91 C  | 79 C  | 73 C  | 68 C  |
| 190.3: | 143 C | 133 C | 122 C | 116 C | 112 C | 94 C  | 83 C  | 74 C  | 71 C  |
| 226.3: | 159 C | 150 C | 136 C | 127 C | 119 C | 100 C | 92 C  | 81 C  | 74 C  |
| 269.1: | 178 C | 165 C | 151 C | 133 C | 124 C | 112 C | 99 C  | 86 C  | 78 C  |
| 320.0: | 199 C | 178 C | 158 C | 147 C | 137 C | 122 C | 102 C | 92 C  | 84 C  |
| 380.5: | 204 C | 190 C | 173 C | 165 C | 153 C | 134 C | 111 C | 100 C | 86 C  |
| 452.5: | 241 C | 232 C | 202 C | 187 C | 176 C | 146 C | 127 C | 108 C | 95 C  |
| 538.2: | 270 C | 254 C | 232 C | 210 C | 195 C | 168 C | 134 C | 115 C | 104 C |
| 640.0: | 296 C | 275 C | 248 C | 221 C | 208 C | 174 C | 140 C | 120 C | 109 C |
| 761.1: | 338 C | 313 C | 277 C | 254 C | 241 C | 194 C | 154 C | 127 C | 110 C |

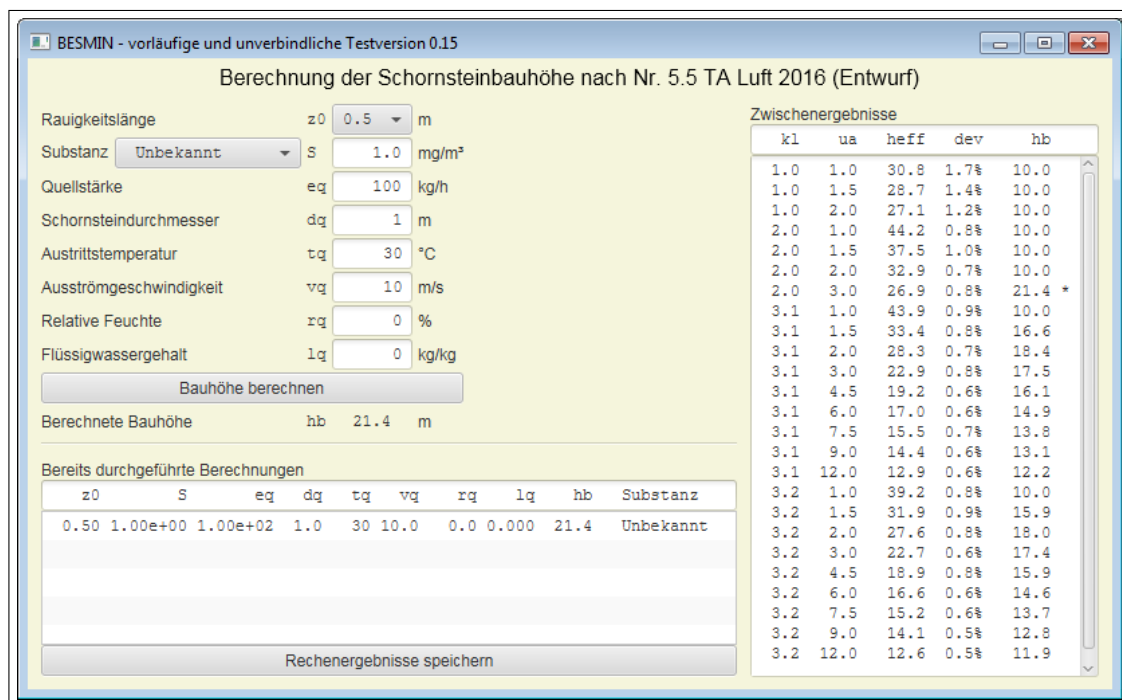
## 2.4 Referenzimplementierung *BESMIN*

Nachdem einmalig die Konzentrationsfahnen (für jede effektive Quelhöhe 25 Ausbreitungssituationen) berechnet und in einer Datenbank abgelegt wurden, kann die Berechnung der erforderlichen Bauhöhe, mit der ein vorgegebener bodennaher Konzentrationswert (S-Wert) nicht überschritten wird, durchgeführt werden. Eine Beschreibung des Rechenverfahrens könnte die überarbeitete TA Luft in einem neuen Abschnitt im Anhang *Ausbreitungsrechnung* geben, siehe Abschnitt 3.2.14 in diesem Bericht. Das JAVA-Programm *BESMIN* (Bestimmung der Mindestschornsteinbauhöhe) ist eine programmtechnische Umsetzung dieser Rechenvorschrift.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Testversion *BESMIN* 0.1x, die unter anderem von einer Mindestbauhöhe von 10 m ausgeht.

### 2.4.1 Das Programm

Das Programm *BESMIN* bestimmt die Bauhöhe eines einzelnen Schornsteins so, dass für jede Wettersituation der Maximalwert der bodennahen Konzentration die durch den S-Wert vorgegebene Konzentration (Zahlenwert in  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) gerade nicht überschreitet. Dabei wird auf die Ergebnisse von Ausbreitungsrechnungen zurückgegriffen, die für jede der in Betracht zu zie-


 BILD 2.13: Benutzeroberfläche des Programms *BESMIN* (Testversion 0.15).

henden Wettersituationen<sup>11</sup> und ein Spektrum von effektiven Quellhöhen für eine passive Punktquelle in ebenem Gelände und ohne Gebäudeeinfluss durchgeführt worden sind.

Die Berechnung erfolgt in zwei Schritten:

1. Es wird für jede Wettersituation die effektive Quellhöhe  $h_{\text{eff}}$  berechnet, die erreicht werden muss, damit bei der vorgegebenen Quellstärke die bodennahe Konzentration den S-Wert nicht überschreitet.
2. Es wird für jede Wettersituation die Bauhöhe bestimmt, bei welcher sich zusammen mit der Abgasfahnenüberhöhung (berechnet mit *IBJpluris*) die erforderliche effektive Quellhöhe ergibt.

Der höchste Wert der für alle Wettersituationen bestimmten Bauhöhen ist die gesuchte Mindestbauhöhe. Diese Rechnung wird für einen vorgegebenen Wert der Bodenrauigkeit (0.5 m) durchgeführt.

## Arbeitsablauf

Der Arbeitsablauf ist folgendermaßen:

1. Aus der Auswahlliste die gewünschte Substanz auswählen (der zugehörige S-Wert wird

<sup>11</sup>Klassen I bis III/2 und Windgeschwindigkeiten entsprechend einer AKS von 1 bis 12 m/s.



automatisch eingesetzt) oder die Substanz *Unbekannt* auswählen und im Eingabefeld einen S-Wert eingeben.

2. Die Emissionsparameter Quellstärke, Schornsteindurchmesser, Austrittstemperatur, Austrittsgeschwindigkeit, relative Feuchte und Flüssigwassergehalt in die entsprechenden Felder eintragen.
3. Rechnung starten.

Beim Abarbeiten der einzelnen Wettersituationen werden in der rechten Fensterhälfte die jeweils berechnete effektive Quellhöhe und die resultierende Bauhöhe aufgelistet. Sind alle Wettersituationen abgearbeitet, dann wird die Zeile mit der höchsten Bauhöhe durch einen Stern gekennzeichnet und der Wert wird in das Ergebnisfeld in der linken Fensterhälfte übernommen.

Das Ergebnis wird zusammen mit den Eingabeparametern in die Ergebnisliste übernommen. Sind mehrere Rechnungen durchgeführt, dann kann man durch Anklicken einer Zeile in der Ergebnisliste die zugehörigen Eingabedaten wieder in die Eingabefelder einsetzen, wobei auch die zugehörigen Zwischenergebnisse restauriert werden.

Die Ergebnisse können durch Drücken des Knopfes *Ergebnisliste speichern* im aktuellen Verzeichnis als Text-Datei gespeichert werden.

## 2.4.2 Technische Details

### 2.4.2.1 Details des Rechenverfahrens

Die Rauigkeitslänge ist ein einmal vorgegebener Wert, auf den im Folgenden nicht weiter eingegangen wird.

*BESMIN* greift auf Daten zurück, die durch Ausbreitungsrechnungen für passive, punktförmige Quellen der Quellstärke 1 g/s und der Höhe  $h_k$  durchgeführt worden sind,

$$h_0 = 10 \text{ m} \quad (2.54)$$

$$h_k = h_0 2^{k/4}, \quad k = 0 \dots 26, \quad (2.55)$$

also den Höhenbereich 10 m bis 905 m abdecken. Die höchste von *IBJpluris* ausgewiesene effektive Quellhöhe beträgt 800 m, siehe Abschnitt 4.3.2. Von den berechneten Konzentrationsfeldern wird nur die maximale Konzentration  $\hat{c}_{k,m}$  in der untersten, bodennahen Schicht für die Quellhöhe  $h_k$  und die Wettersituation  $m$  ( $= 1 \dots 25$ ) verwendet. Sie sind in Textdateien mit Dateinamen der Form *maxima-Name.txt* gespeichert.

Für eine Quelle der Stärke  $Q$  wird die auf den S-Wert (in  $\text{g/m}^3$ ) bezogene Quellstärke  $\tilde{Q}$  (in  $\text{m}^3/\text{s}$ ) berechnet,

$$\tilde{Q} = Q/S \quad (2.56)$$

Für jede Wettersituation  $m$  werden die folgenden Schritte zur Bestimmung der erforderlichen effektiven Quellhöhe  $\hat{h}_m$  durchgeführt:

Es wird durch Intervallschachtelung die Höhenschicht  $\tilde{k}$  bestimmt, bei der

$$\tilde{Q}\hat{c}_{k_s,m} > 1 \quad (2.57)$$

$$\tilde{Q}\hat{c}_{k_s+1,m} \leq 1 \quad (2.58)$$

ist. Damit ist das gesuchte  $\hat{h}_m$  auf den Bereich von  $h_{k_s,m}$  bis  $h_{k_s+1,m}$  eingegrenzt und kann durch Interpolation bestimmt werden.

Statt unmittelbar linear zu interpolieren, wird berücksichtigt, dass für die Höhenabhängigkeit der Konzentration  $c(h)$  näherungsweise  $c(h) \sim h^{-2}$  gilt. Es ist also günstiger, die nahezu konstante Größe  $c(h)h^2$  linear zu interpolieren. Zur Vereinfachung der Schreibweise werden folgende Größen definiert:

$$h_a = h_{k_s,m} \quad (2.59)$$

$$h_b = h_{k_s+1,m} \quad (2.60)$$

$$c_a = \hat{c}_{k_s,m} \quad (2.61)$$

$$c_b = \hat{c}_{k_s+1,m} \quad (2.62)$$

$$\Delta = h_b - h_a \quad (2.63)$$

Mit Hilfe des Parameters  $0 \leq \alpha \leq 1$  wird zwischen den Höhen  $h_a$  und  $h_b$  interpoliert:

$$h(\alpha) = h_a + \alpha\Delta \quad (2.64)$$

$$c(\alpha)h(\alpha)^2 = c_a h_a^2 [1 + \alpha A] \quad (2.65)$$

$$A = \frac{c_b h_b^2}{c_a h_a^2} - 1 \quad (2.66)$$

Gesucht ist der Wert von  $\alpha$ , für den  $c(\alpha) = 1$  gilt. Dies ergibt eine quadratische Gleichung für  $\alpha$ , die mit Standardverfahren gelöst wird:

$$[h_a + \alpha\Delta]^2 = c_a h_a^2 [1 + \alpha A] \quad (2.67)$$

$$\alpha = -\frac{p}{2} + \sqrt{\frac{p^2}{4} - q} \quad (2.68)$$

$$p = \frac{1}{\Delta^2} [2h_a\Delta - c_b h_b^2 + c_a h_a^2] \quad (2.69)$$

$$q = \frac{h_a^2}{\Delta^2} [1 - c_a] \quad (2.70)$$

Damit wird die gesuchte effektive Quellhöhe

$$\hat{h}_m = h_{k_s,m} + \alpha[h_{k_s+1,m} - h_{k_s,m}] \quad (2.71)$$

Sodann wird mit *IBJpluris* für die vorgegebenen Emissionsparameter und die vorliegende Wettersituation die Endüberhöhung  $\delta h_{l,m}$  für verschiedene Bauhöhen  $h_l^*$  berechnet, die auf einem feineren Raster definiert sind,

$$h_l^* = h_0 2^{l/8}, \quad l = 0 \dots 38 \quad (2.72)$$

Es wird wieder durch Intervallschachtelung die Höhe  $h_i^*$  bestimmt, bei der

$$h_i^* + \delta h_{\tilde{l},m} \leq \hat{h}_m \quad (2.73)$$

$$h_{\tilde{l}+1}^* + \delta h_{\tilde{l}+1,m} > \hat{h}_m \quad (2.74)$$

gilt, und durch lineare Interpolation von  $h^*$  und  $\delta h$  zwischen diesen beiden Werten die Bauhöhe  $h_{b,m}$  bestimmt, bei der die effektive Quellhöhe den vorgegebenen Wert  $\hat{h}_m$  annimmt.

Die ausgewiesene Bauhöhe  $h_b$  ist das Maximum der für alle Wettersituationen berechneten Bauhöhen  $h_{b,m}$ ,

$$h_b = \max_m \{h_{b,m}\} \quad (2.75)$$

Folgende Sonderfälle können auftreten:

- Es gibt kein  $k_s$ , mit dem Gleichung (2.57) erfüllt ist (zu niedrige Quellstärke). Dann wird  $\hat{h}_m = h_0$  gesetzt.
- Es gibt kein  $k_s$ , mit dem Gleichung (2.58) erfüllt ist oder der berechnete Wert von  $\hat{h}_m$  ist größer als 800 m (zu hohe Quellstärke). Dann wird das Verfahren abgebrochen und  $h_b = 999.9$  gesetzt.
- Es gibt kein  $\tilde{l}$ , mit dem Gleichung (2.73) erfüllt ist. Dann wird  $h_{b,m} = h_0$  gesetzt.
- Der für  $h_b$  berechnete Wert ist größer als 250. Dann wird  $h_b = 999.9$  gesetzt.

#### 2.4.2.2 Bauhöhenbestimmung für niedrige Quellen

*BESMIN* bestimmt für eine erforderliche effektive Quellhöhe die Bauhöhe, die zusammen mit der dazugehörigen Endüberhöhung gerade diese effektive Quellhöhe ergibt. Hierzu wird in einer Intervallschachtelung, beginnend mit der minimalen Bauhöhe von 10 m, jeweils die Endüberhöhung mit *IBJpluris* bestimmt und die Summe aus Bauhöhe und Endüberhöhung mit dem vorgegebenen Wert verglichen.

In einem ersten Ansatz war bei der Intervallschachtelung angenommen worden, dass die effektive Quellhöhe mit zunehmender Bauhöhe zunimmt. Wenn also bereits die Bauhöhe 10 m ausreichend ist, wurde die Berechnung abgebrochen und 10 m als notwendige Bauhöhe ausgewiesen.

Es zeigte sich, dass diese Annahme in manchen Fällen nicht richtig ist. Es gibt Situationen, gerade im Bauhöhenbereich von ein paar Dezimetern, in denen die effektive Quellhöhe mit steigender Bauhöhe zuerst leicht abnimmt und erst dann zunimmt. Ursache ist die in diesem Höhenbereich mit zunehmender Bauhöhe stark zunehmende Windgeschwindigkeit, siehe die Ausführungen weiter unten.

In so einem Fall sollte dann die Bauhöhe auf den größeren Wert jenseits des Minimums der effektiven Quellhöhe gesetzt werden. Eine einfache Intervallschachtelung ist in diesem Fall

nicht möglich, sondern diese Bauhöhe muss, vom Maximalwert beginnend, durch schrittweises Herabsetzen bestimmt werden.

In *BESMIN* wird daher zuerst geprüft, ob die effektive Quellhöhe bei einer Bauhöhe von knapp über 10 m kleiner ist als bei einer Bauhöhe von 10 m. Ist das nicht der Fall, wird von einer monoton steigenden effektiven Quellhöhe ausgegangen und die Bauhöhe so wie bisher durch einfache Intervallschachtelung bestimmt. Sonst wird die Bauhöhe durch schrittweises Herabsetzen bestimmt (dieses Verfahren wurde als schnelle Lösung gewählt, es ist jedoch relativ zeitaufwendig und kann mit einer späteren Version noch optimiert werden).

### Vereinfachte Ableitung zum Verhalten der effektiven Quellhöhe

Die effektive Quellhöhe  $h_e$  ist die Summe aus Bauhöhe  $h$  und Endüberhöhung  $\Delta h$ . In einem einfachen Ansatz, der vom grundsätzlichen Verhalten her auch von *IBJpluris* wiedergegeben wird, kann bei einer thermisch dominierten Überhöhung diese als  $\Delta h = A/\tilde{u}$  abgeschätzt werden mit  $A = a(M/M_0)^{3/5} \text{ m}^2/\text{s}$  mit dem Wärmestrom  $M$ ,  $M_0 = 1 \text{ MW}$ , einem empirischen Faktor  $a$  und einer charakteristischen Windgeschwindigkeit  $\tilde{u}$ . Damit ist

$$h_e = h + \frac{A}{\tilde{u}} \quad (2.76)$$

Für die charakteristische Windgeschwindigkeit wird oft die Windgeschwindigkeit in Bauhöhe oder die Windgeschwindigkeit in effektiver Quellhöhe oder eine in der Höhe dazwischen angesetzt. Für die folgende Diskussion wird das Windprofil vereinfacht als

$$u(z) = u_a \left( \frac{z}{h_a} \right)^m \quad (2.77)$$

angenommen und es wird  $\tilde{u} = u(h)$  gesetzt. Dann ist

$$h_e = h + \frac{A}{u_a} \left( \frac{h}{h_a} \right)^{-m} \quad (2.78)$$

Die effektive Quellhöhe  $h_e$  als Funktion der Bauhöhe  $h$  hat ein Minimum bei einer Bauhöhe  $h_{\min}$ , die sich aus der Bedingung

$$\frac{\partial h_e}{\partial h} = 1 - \frac{mA}{h_a u_a} \left( \frac{h}{h_a} \right)^{-m-1} = 0 \quad (2.79)$$

ergibt. Das Ergebnis ist

$$h_{\min} = h_a \left( \frac{mA}{h_a u_a} \right)^{1/(1+m)} \quad (2.80)$$

Für den konkreten Fall einer Quelle mit  $T = 200^\circ\text{C}$ ,  $v = 15 \text{ m/s}$ ,  $d = 14.3 \text{ m}$  ergibt sich ein Wärmestrom von  $M = 350 \text{ MW}$ . Mit *IBJpluris* ergibt sich eine Endüberhöhung von der Größenordnung 70 m und damit  $a \approx 30$  (nach Richtlinie VDI 3782 Blatt 3, 1985,  $a = 102$ ) und damit  $A \approx 1000$ . Zusammen mit den Umgebungswerten  $u_a = 12 \text{ m}$  bei  $h_a = 13 \text{ m}$  und dem Ansatz  $m = 0.22$  folgt  $h_{\min} = 17 \text{ m}$ .

Die effektive Quellhöhe sollte also bei zunehmender Bauhöhe bis zu einer Bauhöhe von knapp 20 m abnehmen und danach zunehmen. In der Testrechnung findet der Übergang bei einer Bauhöhe von ungefähr 25 m statt.

Der hier beschriebene Effekt basiert auf den eingesetzten Modellen und Annahmen. Auch wenn diese recht allgemein und plausibel erscheinen, so widerspricht der resultierende Effekt doch etwas der Intuition und es wäre interessant zu sehen, wie die Endhöhe einer Abluffahne in der Natur von der Bauhöhe abhängt.

## 2.5 Vergleich altes Nomogramm versus *BESMIN*

Auf Grundlage der in Abschnitt 2.2 aufgeführten Beschreibungen und Literaturzitate wurde die Berechnungsmethode des alten Nomogramms nachprogrammiert, so dass alte und neue Berechnungsmethode im Rahmen einer XLS-Arbeitsmappe miteinander verglichen werden können.

Bild 2.14 zeigt ein Beispiel für einen solchen Vergleich. Die rote Kurve zeigt die Abhängigkeit der Bauhöhe (in m) vom Überhöhungparameter  $E$  (in  $\text{m}^2/\text{s}$ , siehe Abschnitt 2.2.4) für das Verhältnis  $Q/S = 1000 \text{ (kg/s)/(mg/m}^3\text{)}$ . Die grüne Linie zeigt das Ergebnis des alten Nomogramms, das in der Version der TA Luft (2002) auch im Hintergrund abgebildet ist. Grau schattiert sind die Bereiche, in denen das alte Nomogramm gemäß seiner Herleitung nicht gültig ist. In diesem Beispiel liefert die neue Methode im Gültigkeitsbereich der alten Methode tendenziell eine niedrigere Bauhöhe.

Anstelle der Betrachtung eines konstanten Verhältnisses  $Q/S$  ist ein Vergleich für verschiedene explizite Werte der Emissionskonzentration nützlich, da sie im Rahmen der Genehmigung nach TA Luft oft die maßgebliche Eingangsgröße ist. Multipliziert mit dem Normvolumenstrom (trocken) ergibt sie die Quellstärke  $Q$ . Unglücklicherweise verwendet die TA Luft für die Emissionskonzentration ebenfalls das Symbol  $E$ , aus der Einheit sollte jedoch klar hervorgehen, dass hiermit die Konzentration und nicht der Überhöhungparameter gemeint ist.

In Bild 2.15 sind die Bauhöhen für verschiedene Verhältnisse von  $E/S$  (in  $(\text{mg/m}^3)/(\text{mg/m}^3)$ ) dargestellt, wobei eine Quelle mit einer Austrittsgeschwindigkeit von 15 m/s und einer Austrittstemperatur von 100 °C (trockene Abluft) angenommen wurde. Der freie Parameter ist der Durchmesser, der den Volumenstrom und die Emissionsrate festlegt. Für  $\text{NO}_x$  als Leitsubstanz liegen typische Werte für  $E/S$  zwischen etwa 1000 und 2000. Die Linie ohne Symbol kennzeichnet das Ergebnis des alten Nomogramms, die Linien mit Symbolen die Ergebnisse von *BESMIN* mit unterschiedlichen Werten des Abbruchfaktors  $f$ .

Für den Bereich von  $E/S$  zwischen 1000 und 2000 stimmen die Ergebnisse beider Berechnungsmethoden mit  $f$  im Bereich 1.5..1.7 relativ gut überein. Für größere Verhältnisse  $E/S$  liefert die neue Methode bei Bauhöhen unter 100 m kleinere, über 100 m größere Bauhöhen als das alte Nomogramm, für kleinere Verhältnisse liefert die neue Methode stets kleinere Bauhöhen als das alte Nomogramm.



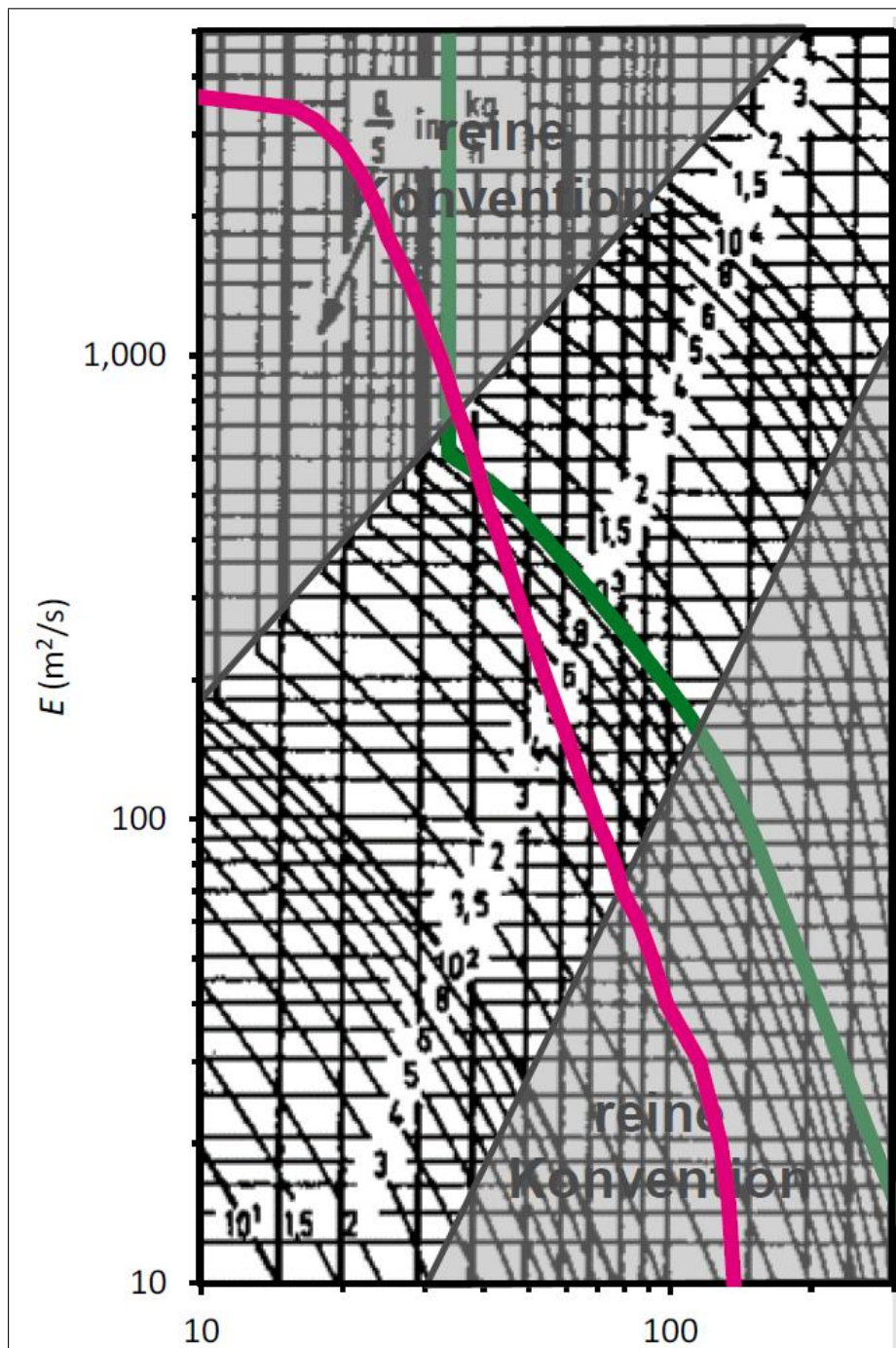


BILD 2.14: Vergleich der Bauhöhen als Funktion des Überhöhungparameters  $E$  (in  $\text{m}^2/\text{s}$ ) für das Verhältnis  $Q/S = 1000 \text{ (kg/h)/(mg/m}^3\text{)}$ . Grüne Linie und Hintergrund: altes Nomogramm. Rote Linie: Neue Berechnungsmethode. Die grauen Schattierungen geben die Bereiche an, in denen das alte Nomogramm gemäß seiner Herleitung nicht gültig ist.

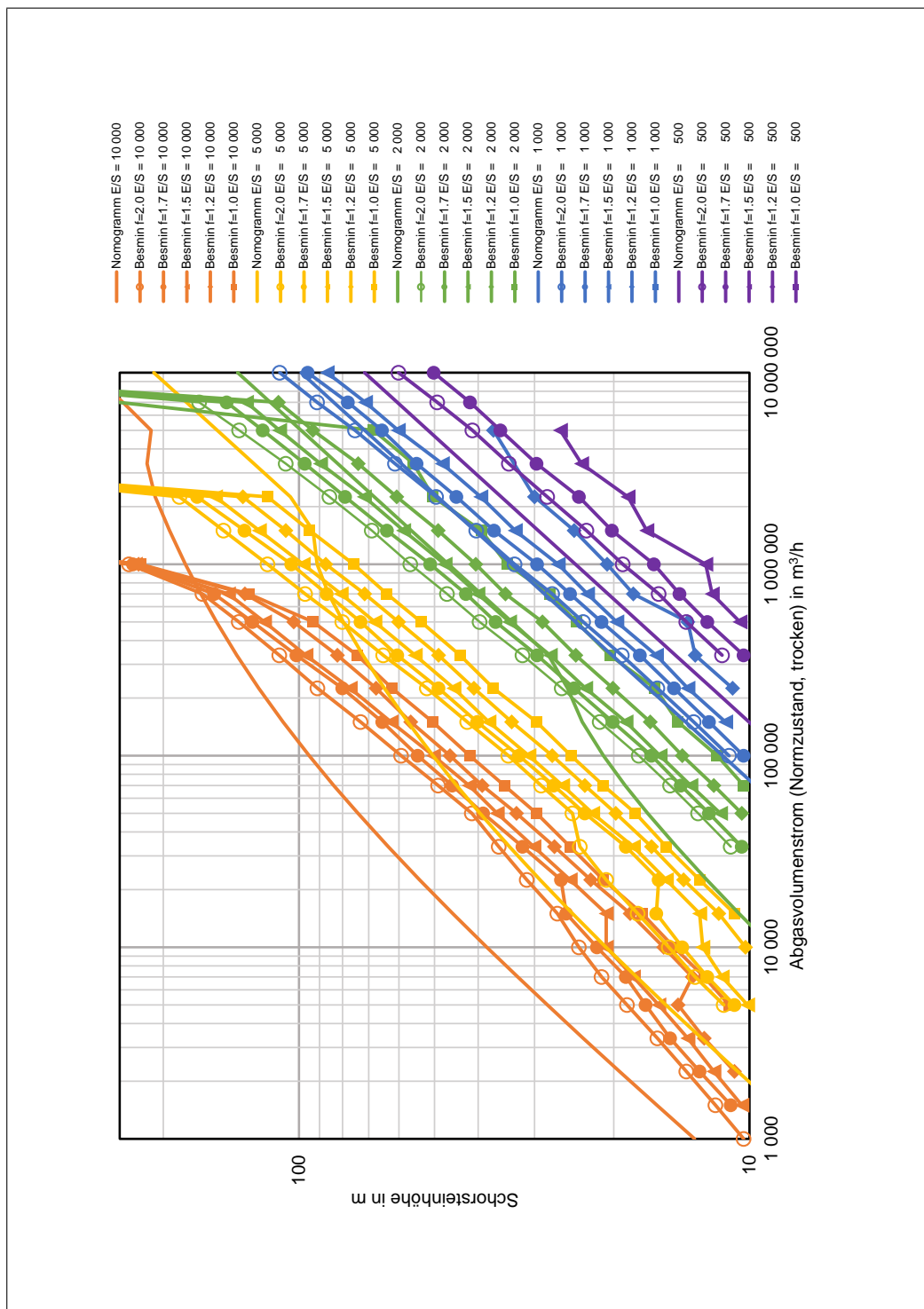


BILD 2.15: Vergleich der Bauhöhen für verschiedene Verhältnisse von Emissionskonzentration zu S-Wert (E/S) und Werte des Abbruchfaktors  $f$  im Überhöhungsmodell. Für die Quelle wurde eine Austrittsgeschwindigkeit von 15 m/s und eine Austrittstemperatur von 100 °C (trockene Abluft) angenommen.

## 2.6 Mehrere Quellen

Für die Schornsteinhöhenbestimmung nach Nummer 5.5 der TA Luft (2002) werden mehrere Schornsteine behelfsweise durch die Zusammenfassung der Emissionen berücksichtigt. Eine andere Möglichkeit bietet das alte Nomogramm auch nicht. Das LAI-Merkblatt gibt hierzu weitergehende Hinweise und Fallunterscheidungen.

Mit dem neuen Verfahren der Schornsteinhöhenbestimmung ist eine behelfsweise Zusammenfassung von Schornsteinen nicht erforderlich, denn die Konzentrationsfahnen einzelner Schornsteine liegen ja explizit vor und können überlagert werden, um das bodennahe Maximum der Konzentration zu bestimmen. Auf diese Weise kann ohne zusätzliche Annahmen geprüft werden, ob bei einer vorgegebenen Konfiguration von Schornsteinen ein vorgegebener S-Wert eingehalten ist.

Eine Frage ist in diesem Zusammenhang, wie mit bestehenden Schornsteinen umzugehen ist. Hierzu wird der Einfachheit halber angenommen, dass sich bei Errichtung eines Schornsteins ein bestehender, gleichartiger Schornstein bereits in unmittelbarer Nähe befindet und der bestehende Schornstein den S-Wert gerade ausschöpft.

Offensichtlich würde der neue Schornstein zu einer Überschreitung des S-Wertes führen, egal wie hoch er gebaut wird. In der Praxis der TA Luft (2002) wird wie folgt vorgegangen: Die beiden Schornsteine werden emissionsseitig zusammengefasst, die erforderliche Schornsteinhöhe wird mit dem alten Nomogramm bestimmt und die so ermittelte Höhe wird dann für den neu zu errichtenden Schornstein angewendet.

Was bedeutet dieses Vorgehen in Bezug auf die bodennahe Konzentration und ihr Verhältnis zum S-Wert? Hierzu wird der vereinfachte analytische Ansatz, der dem Nomogramm zugrunde liegt, herangezogen (siehe Abschnitt 2.2). Die erforderliche Bauhöhe eines Schornsteins ist proportional zu  $Q/S$ , dem Verhältnis von Emissionsmassenstrom zu S-Wert, und die maximale bodennahe Konzentration ist umgekehrt proportional zur Bauhöhe.

Es wird nun angenommen, dass es einen bestehenden Schornstein gibt, der den S-Wert gerade ausschöpft, d.h. die von ihm verursachte maximale bodennahe Konzentration ist gleich dem S-Wert. Wird ein gleichartiger Schornstein unmittelbar neben ihm errichtet, dann wird nach bisheriger Praxis die erforderliche Bauhöhe des neuen Schornsteins durch Zusammenfassung der Emissionsmassenströme ermittelt. Sind beide wie angenommen gleich, dann ist die erforderliche Bauhöhe gleich der doppelten Bauhöhe des bestehenden Schornsteins und die resultierende maximale bodennahe Konzentration aufgrund beider Schornsteine ist (von etwas unterschiedlichen Orten der beiden Teilmaxima abgesehen) das  $3/2$ -fache des S-Wertes. Wird ein dritter Schornstein in derselben Weise hinzugefügt, dann ist seine Bauhöhe das 3-fache des ersten und die maximale Konzentration ist das  $11/6$ -fache des S-Wertes, usw.

Dieses Bild zeigt einen Weg auf, wie bestehende Schornsteine in dem neuen Verfahren behandelt werden können: Bei der Überlagerung der Einzelfahnen zur Bestimmung der Bauhöhe des neuen Schornsteins werden bestehende Schornsteine mit ihrem halben Emissionsmassenstrom berücksichtigt. Wie sieht dann für den betrachteten Testfall die Überlagerung aus: Der bestehende Schornstein liefert in der Höhenberechnung für den zweiten Schornstein den halben

S-Wert. Die Höhe des neuen, gleichartigen Schornsteins muss dann so gewählt werden, dass die Überlagerung beider Fahnen höchstens gerade den S-Wert liefert. Er wird dann höher sein als der erste und den halben S-Wert liefern. Die Überlagerung der tatsächlichen Fahnen ohne Emissionsreduktion des ersten Schornsteins liefert also das  $3/2$ -fache des S-Wertes, so wie im alten Verfahren. Für den dritten Schornstein werden die Emissionen der ersten beiden zur Hälfte berücksichtigt, sie liefern in der Höhenberechnung des dritten Schornsteins das  $3/4$ -fache des S-Wertes, der dritte Schornstein das  $1/4$ -fache des S-Wertes und die Überlagerung der tatsächlichen drei Fahnen das  $7/4$ -fache des S-Wertes. Führt man das immer weiter, ergibt sich eine geometrische Reihe ( $1$  plus  $1/2$  plus  $1/4$  usw.) und die Summe aller Teilbeiträge konvergiert gegen das  $2$ -fache des S-Wertes – im Gegensatz zum alten Verfahren, wo die Summe divergiert ( $1$  plus  $1/2$  plus  $1/3$  usw.).

## 2.7 Referenzimplementierung *BESMAX*

Nachdem einmalig die Konzentrationsfahnen (für jede effektive Quellhöhe 25 Ausbreitungssituationen) berechnet und in einer Datenbank abgelegt wurden, kann für eine gegebene Konfiguration von mehreren Schornsteinen eine Überlagerung der dazugehörigen Einzelfahnen vorgenommen werden und beispielsweise geprüft werden, ob die Summe der Einzelfahnen einen vorgegebenen S-Wert einhält. Das ist eine Kontrollmöglichkeit, die es im Rahmen des alten Nomogramms nicht gab.

Für diesen Zweck wurde das Java-Programm *BESMAX* (Bestimmung der maximalen Konzentration) erstellt. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Testversion *BESMAX* 0.1x.

### 2.7.1 Das Programm

Das Programm *BESMAX* berechnet für eine oder mehrere benachbarte Punktquellen die maximale stündliche bodennahe Konzentration (Mittelwert über die untersten drei Meter) eines emittierten Stoffes. Dabei wird auf die Ergebnisse von Ausbreitungsrechnungen zurückgegriffen, die für jede der in Betracht zu ziehenden Wettersituationen<sup>12</sup> und ein Spektrum von Emissionshöhen für eine passive Punktquelle in ebenem Gelände, ohne Gebäudeeinfluss und ohne Deposition durchgeführt worden sind.

Die Berechnung erfolgt in drei Schritten:

1. Es wird für jede Quelle und jede Wettersituation die effektive Quellhöhe  $h_{\text{eff}}$  mit dem Programm *IBJpluris* berechnet.
2. Es wird für jede Quelle und jede Wettersituation die bodennahe Konzentrationsverteilung bestimmt, indem aus den vorberechneten Feldern auf die vorliegende effektive Quellhöhe interpoliert wird.

<sup>12</sup>Klassen I bis III/2 und Windgeschwindigkeiten entsprechend einer AKS von 1 bis 12 m/s

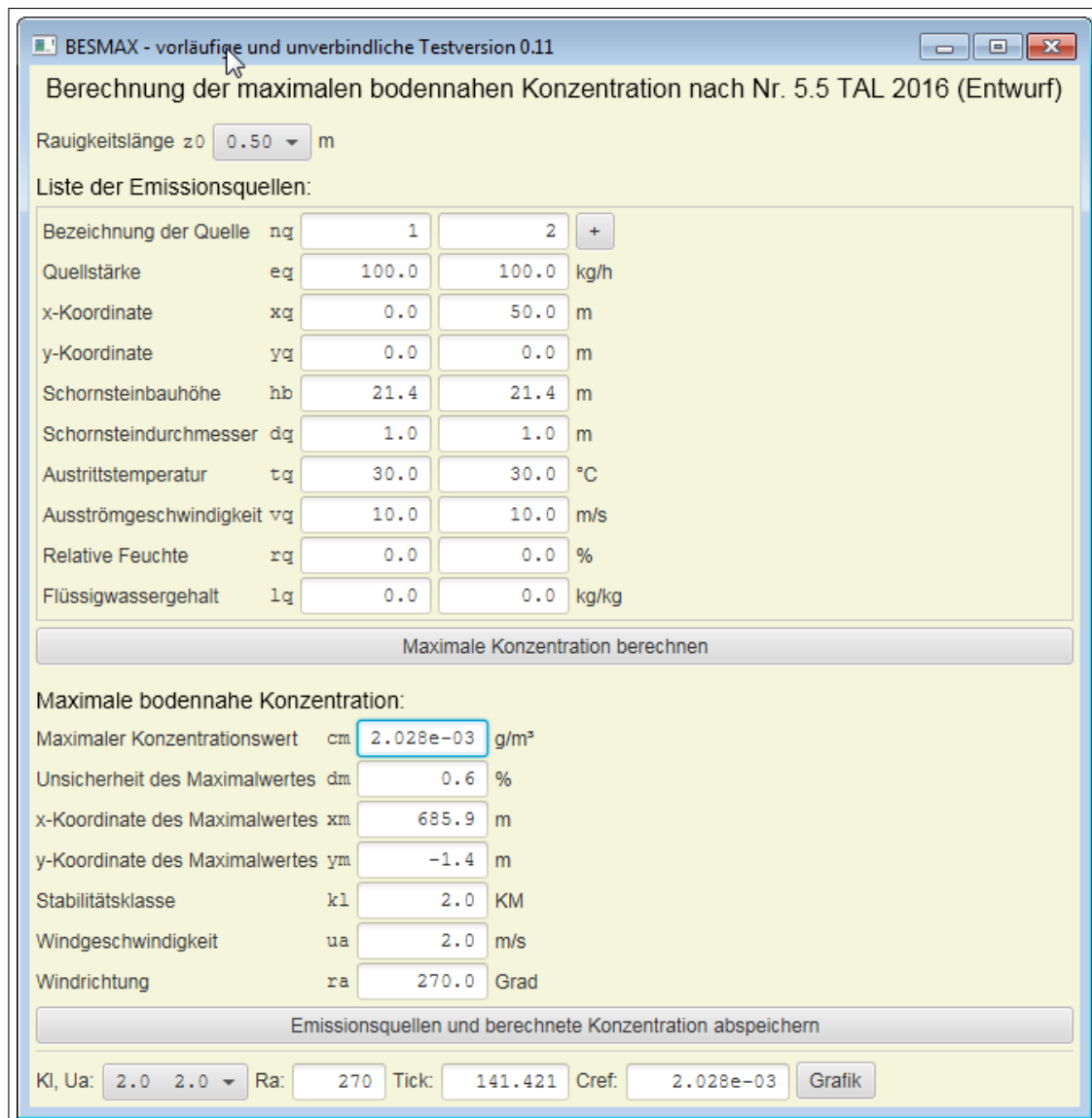


BILD 2.16: Benutzeroberfläche des Programms BESMAX (Testversion 0.11).

3. Für jede Wettersituation und jede Windrichtung (in Schritten von 5 Grad variiert) werden die Konzentrationsfelder der einzelnen Quellen überlagert und aufsummiert und der maximal auftretende Konzentrationswert bestimmt.

Diese Rechnung wird für einen vorgegebenen Wert der Bodenrauigkeit (0.5 m) durchgeführt.

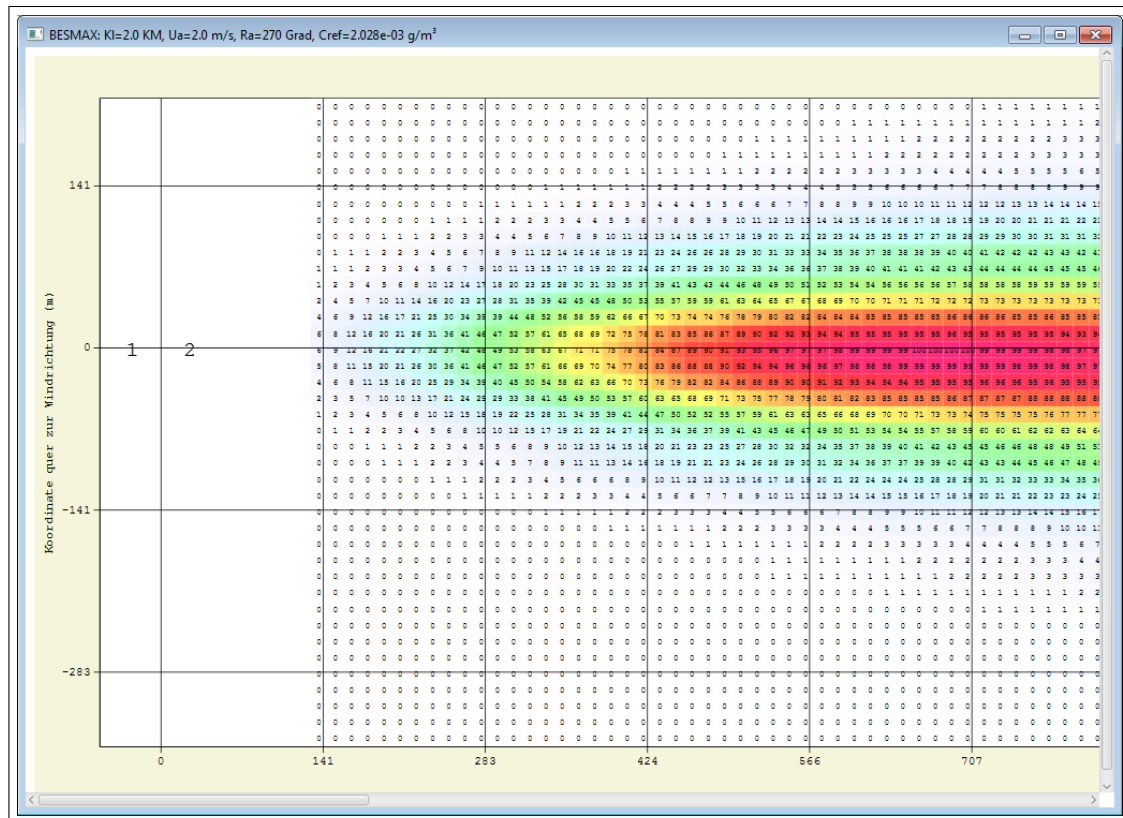


BILD 2.17: Grafische Darstellung der Konzentrationsverteilung von *BESMAX* für die in Bild 2.16 gezeigten Eingabedaten.

## Arbeitsablauf

Der Arbeitsablauf ist folgendermaßen:

1. Aus der Auswahlliste die gewünschte Rauigkeitsklasse auswählen.
2. Für die erste Quelle in den vorgesehenen Eingabefeldern die erforderlichen Daten einsetzen (vorgegebene Beispielswerte ersetzen). Die einzugebenden Daten sind: Quellstärke, Position, Schornsteinbauhöhe, Schornsteindurchmesser, Austrittstemperatur, Ausströmgeschwindigkeit, relative Feuchte und Flüssigwassergehalt. Zusätzlich kann jeder Quelle ein beliebig wählbarer Name gegeben werden.
3. Es erfolgt die Eingabe weiterer Quellen.
4. Die Rechnung wird gestartet.



5. Ist die Rechnung beendet, wird das Ergebnis in den darunter stehenden Feldern angezeigt: Maximaler Konzentrationswert und seine geschätzte Unsicherheit, Ort seines Auftretens und die Wettersituation (einschließlich Windrichtung), bei der er auftritt.

Die Ergebnisse können durch Drücken des Knopfes *Emissionsquellen und berechnete Konzentration abspeichern* im aktuellen Verzeichnis als Text-Datei gespeichert werden.

Zur Information kann die gefundene Konzentrationsverteilung graphisch dargestellt werden. Die Darstellung erfolgt im Wind-System, d.h. die x-Achse verläuft windabwärts. Den Nullpunkt des Koordinatensystems bildet der Emissions-Schwerpunkt. Die in der Grafik aufgeführten Zahlen sind die im Auswertegitter auftretenden Konzentrationswerte in Prozent des vorgebaren Referenzwertes.

## 2.7.2 Technische Details

Die Rauiglängelänge ist ein einmal vorgegebener Wert, auf den im Folgenden nicht weiter eingegangen wird.

*BESMAX* greift auf Daten zurück, die durch Ausbreitungsrechnungen für passive, punktförmige Quellen der Quellstärke 1 g/s und der Höhe  $h_l$  durchgeführt worden sind,

$$h_0 = 10 \text{ m} \quad (2.81)$$

$$h_l = h_0 2^{l/4}, \quad l = 0..26, \quad (2.82)$$

also den Höhenbereich 10 m bis 905 m abdecken. Die höchste von *IBJpluris* ausgewiesene effektive Quellhöhe beträgt 800 m (siehe Abschnitt 4.3.2). Von den berechneten Konzentrationsfeldern werden nur die Werte in der untersten Schicht ( $0 \leq z \leq 3 \text{ m}$ ) verwendet: Konzentration  $c_{i,j,l,m}$  für die Gitterzelle  $(i,j)$ , die Quellhöhe  $h_l$  und die Wettersituation  $m$  und die zugehörige statistische Unsicherheit  $d_{i,j,l,m}$ . Die Rechengitter  $\mathcal{G}_l$  haben folgende Ausdehnung:

$$\text{Anzahl der Maschen in } x\text{-Richtung } n_x = 220 \quad (2.83)$$

$$\text{Anzahl der Maschen in } y\text{-Richtung } n_y = 200 \quad (2.84)$$

$$\text{Maschenweite } \Delta_l = h_l/2 \quad (2.85)$$

$$\text{Linker Rand } x_{\min,l} = -20\Delta_l \quad (2.86)$$

$$\text{Unterer Rand } y_{\min,l} = -100\Delta_l \quad (2.87)$$

Die Indexbereiche sind  $i = 1..n_x$  und  $j = 1..n_y$ . Bei einem verschobenen Gitter  $\mathcal{G}_l^*(\delta_x, \delta_y)$  liegt die Quelle nicht im Nullpunkt, sondern bei  $(\delta_x, \delta_y)$ . Im verschobenen Gitter erhält man die Konzentration  $c^*$  am Punkt  $(x,y)$  durch<sup>13</sup>

$$c_{l,m}^*(x,y) = c_{i^*,j^*,l,m} \quad (2.88)$$

$$i^* = 1 + \lfloor (x - \delta_x - x_{\min})/\Delta_l \rfloor \quad (2.89)$$

$$j^* = 1 + \lfloor (y - \delta_y - y_{\min})/\Delta_l \rfloor \quad (2.90)$$

<sup>13</sup> $\lfloor x \rfloor$  bezeichnet die größte ganze Zahl, die nicht größer ist als  $x$ .

Die Ausbreitungsrechnung hat die Windrichtung  $r_a = 270$  Grad verwendet, die Fahne verläuft also im Wesentlichen in x-Richtung.

Vom Anwender sind  $n_q$  Emissionsquellen mit den Parametern  $\mathcal{P}_n$  vorgegeben, zu denen u.a. folgende Werte gehören ( $n = 1..n_q$ ):

- $e_{q,n}$  Quellstärke
- $x_{q,n}$  x-Koordinate
- $y_{q,n}$  y-Koordinate
- $h_{q,n}$  Bauhöhe

Der Emissionsschwerpunkt  $(\bar{x}, \bar{y})$  ist

$$\bar{x} = \sum_n e_{q,n} x_{q,n} / \sum_n e_{q,n} \quad (2.91)$$

$$\bar{y} = \sum_n e_{q,n} y_{q,n} / \sum_n e_{q,n} \quad (2.92)$$

Die auf den Emissionsschwerpunkt bezogenen Koordinaten der Emissionsquellen sind

$$\tilde{x}_{q,n} = x_{q,n} - \bar{x} \quad (2.93)$$

$$\tilde{y}_{q,n} = y_{q,n} - \bar{y} \quad (2.94)$$

Eine graphische Darstellung erfolgt hier immer so, dass der Emissionsschwerpunkt den Koordinaten-Nullpunkt bildet.

Für jede Wettersituation  $m$  werden die folgenden Schritte durchgeführt:

1. Für jede Quelle  $n$  werden folgende Schritte durchgeführt:

- (a) Mit *IBJpluris* wird die effektive Quellhöhe  $h_{e,n}$  berechnet.
- (b) Es wird die Rechenhöhe  $h_{l_n}$  herausgesucht, die unmittelbar unter der effektiven Quellhöhe liegt, also

$$h_{l_n} \leq h_{e,n} < h_{l_{n+1}} \quad (2.95)$$

- (c) Aus den Konzentrationswerten der Gitter  $\mathcal{G}_{l_n}$  und  $\mathcal{G}_{l_{n+1}}$  werden später die Konzentrationswerte der Quelle  $n$  durch lineare Interpolation bestimmt. Hierzu werden die beiden Interpolationsgewichte  $w_{0,n}$  und  $w_{1,n}$  festgelegt:

$$w_{0,n} = \frac{h_{l_{n+1}} - h_{e,n}}{h_{l_{n+1}} - h_{l_n}} \quad (2.96)$$

$$w_{1,n} = 1 - w_{0,n} \quad (2.97)$$

- (d) Die beiden Gitter werden an den Ort der Quelle verschoben, es werden also die Gitter  $\mathcal{G}_{l_n}^*(\tilde{x}_{q,n}, \tilde{y}_{q,n})$  und  $\mathcal{G}_{l_{n+1}}^*(\tilde{x}_{q,n}, \tilde{y}_{q,n})$  verwendet.



2. Es wird ein Auswertgitter  $\mathcal{G}_{\text{res}}$  festgelegt, dessen Maschenweite  $\Delta_{\text{res}}$  gleich der kleinsten vorkommenden Maschenweite ist,

$$\Delta_{\text{res}} = \min_n \{\Delta_{l_n}\} \quad (2.98)$$

und das alle Gitter  $\mathcal{G}_{l_{n+1}}^*$  umfasst.

3. Die Konzentration  $c_{\text{res},i,j}$  im Auswertgitter wird aus der Summe der Beiträge der einzelnen Quellgitter berechnet:

$$c_{\text{res},i,j,m} = \sum_n \left[ w_{0,n} c_{l_n,m}^*(x_i, y_j) + w_{1,n} c_{l_{n+1},m}^*(x_i, y_j) \right] \quad (2.99)$$

$$(x_i, y_j) = \text{Mittelpunkt der Zelle } (i, j) \text{ des Auswertgitters } \mathcal{G}_{\text{res}} \quad (2.100)$$

Die statistische Unsicherheit  $d_{\text{res},i,j,m}$  wird entsprechend durch Addition der Varianzen berechnet.

4. Die maximale bodennahe Konzentration für die Wettersituation  $m$  und die Standardwindrichtung  $r = 0$  ist

$$c_{\text{max},m,0} = \max_{i,j} \{c_{\text{res},i,j,m}\} \quad (2.101)$$

5. Die Schritte 1 bis 4 werden für alle anderen Windrichtungen, soweit erforderlich, wiederholt, wobei die Windrichtung in Schritten von 5 Grad verändert wird. Dies wird technisch dadurch erreicht, dass die Gruppe der Quellen um den Emissionsschwerpunkt im Gegen-sinn gedreht wird. Damit bleibt die Ausrichtung der Gitter an den Koordinatenachsen des Auswertgitters erhalten. Die maximale Konzentration für die Wettersituation  $m$  ist

$$c_{\text{max},m} = \sum_r c_{\text{max},m,r} \quad (2.102)$$

Der von *BESMAX* als maximale Konzentration ausgewiesene Wert  $c_{\text{max}}$  ist das Maximum über alle Wettersituationen:

$$c_{\text{max}} = \max_m \{c_{\text{max},m}\} \quad (2.103)$$

## 2.8 Weitere Anmerkungen zu Nummer 5.5 der TA Luft

### 2.8.1 Berücksichtigung von Bebauung und Bewuchs

Die Berücksichtigung von Bebauung und Bewuchs über den sogenannten *J*-Wert, der zur berechneten Schornsteinbauhöhe addiert wird, basiert auf der Richtlinie VDI 2289 Blatt 2 aus dem Jahr 1969, wurde jedoch nicht in der ursprünglichen Form übernommen: das Bestimmungsdiagramm sah anders aus und der betrachtete Kreis hatte einen anderen Radius, siehe Bild 2.18.

Dem ursprünglichen Konzept lagen vermutlich zwei Aspekte zugrunde:

1. Dichte Bebauung und Bewuchs führen zu einer Verdrängung der meteorologischen Profile nach oben. Das spielt vor allem windaufwärts der Quelle eine Rolle, da dadurch die meteorologischen Parameter in Austrittshöhe der Quelle beeinflusst werden.
2. Dichte Bebauung und Bewuchs verschieben das Bezugsniveau, welches ansonsten in Bodennähe liegt, nach oben. Das spielt vor allem windabwärts entlang der transportierten Immissionsfahne eine Rolle.

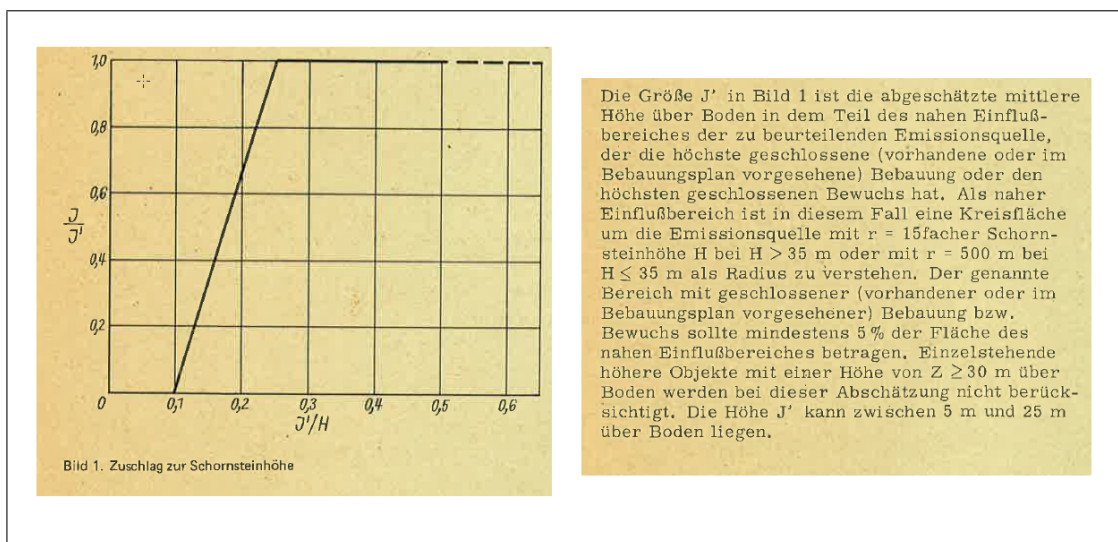


BILD 2.18: Ausschnitte aus der zurückgezogenen Richtlinie VDI 2289 Blatt 2 (1969) zur Bestimmung des  $J$ -Wertes.

Beiden Effekten kann näherungsweise Rechnung getragen werden, indem die Freisetzungshöhe um eine entsprechende Höhe nach oben versetzt wird, damit Eingangsdaten (z.B. Windgeschwindigkeit in Anemometerhöhe) und Ergebnisse einer Ausbreitungsrechnung (z.B. mit *BESMIN* berechnete bodennahe Konzentration) unverändert Anwendung finden können.

Die Entfernung, ab der sich windaufwärts von der Quelle Störeinflüsse auf die meteorologischen Profile bemerkbar machen, beträgt grob 10 Quellhöhen. Das ist auch in etwa die Entfernung, welche die Fahne windabwärts benötigt, um den Boden zu erreichen. Daher war die frühere Regelung, einen Kreis mit Radius der 15-fachen Schornsteinbauhöhe für die Bestimmung der mittleren Bebauungshöhe anzusetzen, sinnvoll. Sie wird auch von Ergebnissen der sogenannten *Footprint*-Methode gestützt (FOKEN, 2012), die einen Radius zwischen etwa dem 10- und 20-fachen der Quellhöhe nahelegen.

Es ist unklar, warum seit der TA Luft (1986) dieser Einwirkungsbereich durch das gesamte Beurteilungsgebiet ersetzt worden ist; eventuell war eine Vereinheitlichung das Ziel, ohne sich über die physikalischen Hintergründe im klaren zu sein.

Für die überarbeitete TA Luft wird vorgeschlagen, dem ursprünglichen Konzept folgend den Radius auf das 15-fache der Schornsteinbauhöhe zu setzen,<sup>14</sup> in diesem Gebiet die 5% Fläche

<sup>14</sup>Entsprechend sollte auch der Radius zur Bestimmung der mittleren Rauigkeitslänge im Anhang *Ausbreitungsrechnung* angepasst werden.

mit zusammenhängender Bebauung bzw. zusammenhängendem Bewuchs zu bestimmen, in der die mittlere Höhe über Grund am größten ist, und diese Höhe (soweit es eine solche Fläche gibt) auf die zuvor bestimmte Schornsteinbauhöhe aufzuschlagen.

## 2.8.2 Berücksichtigung von unebenem Gelände

Die TA Luft (2002) verweist zur Berücksichtigung von unebenem Gelände auf die Richtlinie VDI 3781 Blatt 2 aus dem Jahr 1981. Die Rückmeldung aus den Workshops ergab, dass die Anwendung der Richtlinie, die grobe Kategorisierungen und mit veralteten Modellen erzielte Ergebnisse enthält, in der Praxis problematisch ist.

Den Diskussionsergebnissen aus den Workshops folgend wird vorgeschlagen, dem wohl wichtigsten Aspekt der Richtlinie, dass die Freisetzungshöhe nicht in der Kavitätszone einer Geländestruktur liegt, als Anforderung in die TA Luft explizit zu übernehmen und ansonsten auf einen Verweis auf die Richtlinie zu verzichten.

## 2.8.3 Minimum der Schornsteinbauhöhe

Die TA Luft (2002) legt wie die TA Luft (1986) eine minimale Schornsteinbauhöhe von 10 m über Grund fest. Allerdings ist – trotz eindeutiger Auslegungen, etwa im LAI-Merkblatt *Schornsteinhöhenberechnung* – unklar, ob sich die Mindesthöhe 10 m ursprünglich auf die mit dem Nomogramm bestimmte Höhe bezieht, zu der dann gegebenenfalls der Wert  $J$  (mittlere Höhe aufgrund von dichter Bebauung oder Bewuchs) addiert wird, oder ob sich die Mindesthöhe auf die Summe aus beiden Höhen bezieht. Die Tatsache, dass das dargestellte Nomogramm nur Linien bis 10 m Höhe enthält, ist für die grundsätzliche Klärung nicht entscheidend, zumal in der Praxis auch Versionen des Nomogramms im Einsatz sind, welche die Bestimmung von Bauhöhen kleiner als 10 m erlauben.

Unter den Autoren dieses Berichtes gibt es hierzu zwei unterschiedliche Auffassungen:

- A Die Höhe  $J$  berücksichtigt in erster Linie die Verdrängungshöhe und damit einen meteorologischen Aspekt, der keinen unmittelbaren Bezug zu der Anforderung nach einer Mindestbauhöhe hat; daher gilt die untere Grenze von 10 m für die Summe von Schornsteinbauhöhe und  $J$ .
- B Die 10 m sind ohne dichte Bebauung oder Bewuchs eine Mindestanforderung an Freisetzungshöhe und Verdünnung der Fahne, bis sie zum Boden gelangt. Bei dichter Bebauung oder Bewuchs gilt diese Mindestanforderung für das um  $J$  verschobene Bezugsniveau; daher gilt die untere Grenze von 10 m für die Schornsteinbauhöhe.

In jedem Fall sollte die zukünftige Regelung zur minimalen Bauhöhe eindeutig sein und die mit *BESMIN* bestimmte Höhe sollte oberhalb der Verdrängungsschicht  $d_0 + 6z_0$  liegen, damit die Ergebnisse nicht zu sehr von den vereinfachenden Profilannahmen abhängen, die für diese Schicht erforderlich sind (siehe Richtlinie VDI 3783 Blatt 8, 2017).

## Kapitel 3

# Fortschreibung der Ausbreitungsrechnung

### 3.1 Einleitung

Der Anhang 3 *Ausbreitungsrechnung* der TA Luft (2002) regelt, wie Ausbreitungsrechnungen im Rahmen der TA Luft durchzuführen sind. Im Rahmen der Aktualisierung und Überarbeitung der TA Luft wurde dieser Anhang auf notwendige Aktualisierungen und Ergänzungen hin geprüft.

In drei Workshops (siehe Kapitel 5) wurden die Änderungen diskutiert und Textvorschläge erstellt. In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten inhaltlichen Änderungen — Vorschläge, formuliert als Festlegungen — und Hintergrundinformationen hierzu aufgeführt. Weitere Details können den Protokollen der Workshops (siehe Abschnitt 5.3) entnommen werden.

### 3.2 Anhang Ausbreitungsrechnung

#### 3.2.1 Abschnitt *Allgemeines*

In der überarbeiteten TA Luft wird in der Ausbreitungsrechnung auch die nasse Deposition berücksichtigt. Daneben wird im Rahmen von FFH-Betrachtungen die Berechnung von Stickstoff- und Schwefel- bzw. Säureeinträgen in den Boden erforderlich sein. Die benötigten Auswaschraten und Depositionsgeschwindigkeiten werden auf Grundlage der Richtlinie VDI 3782 Blatt 5 (2007) festgelegt, die deshalb explizit zitiert wird.

Da in die TA Luft die Modellierung von Geruchsimmissionen aufgenommen werden soll (Integration der Geruchs-Immissionsrichtlinie, GIRL), wird hier und an weiteren Stellen des Anhangs auf Geruchsstoffe eingegangen.

### 3.2.2 Abschnitt *Festlegung der Emissionen*

Kein Änderungsvorschlag.

### 3.2.3 Abschnitt *Ausbreitungsrechnung für Gase*

Um die Berechnung von Stickstoff- und Säureeinträgen in den Boden zu ermöglichen, werden Depositionsgeschwindigkeiten und Auswaschraten für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffmonoxid aufgeführt. Bei der trockenen Deposition wird zwischen elementarem und oxidiertem Quecksilber unterschieden, da sie sehr unterschiedliche Depositionsgeschwindigkeiten besitzen.

Für Stickstoffmonoxid ist nach Richtlinie VDI 3782 Blatt 5 (2007) die Auswaschraten 0. Nach der EMEP-Studie (TRAVNIKOV & ILYIN, 2005) wird die Auswaschraten für elementares Quecksilber auf 0 und die für oxidiertes Quecksilber auf  $1 \cdot 10^{-4} (I/I_0)^{0.7}$  1/s (Niederschlagsintensität  $I$ ,  $I_0 = 1$  mm/h) gesetzt.

Grundsätzlich wird für alle Substanzen, für die Depositionsparameter (Depositionsgeschwindigkeit bzw. Auswaschraten) festgelegt sind, die Ausbreitungsrechnung unter Berücksichtigung der Deposition (trockene Deposition bzw. nasse Deposition) durchgeführt, es findet keine nachträgliche Skalierung von Ergebnissen ohne Deposition statt. So ist – im Rahmen der notwendigen Konventionen – eine möglichst realitätsnahe Ausbreitungsrechnung gewährleistet.

Auf längere Sicht sollten die in Richtlinie VDI 3782 Blatt 5 (2007) aufgeführten Depositionsgeschwindigkeiten durch ein Widerstandsmodell abgelöst werden, das eine Bestimmung der Deposition in Abhängigkeit von der aktuellen Bodenbeschaffenheit und Meteorologie ermöglicht. Für ein Lagrangesches Partikelmodell könnte die Richtlinie auch unmittelbar die Depositionswahrscheinlichkeit (siehe Richtlinie VDI 3945 Blatt 3, 2000) ohne Umweg über die Depositionsgeschwindigkeit bereitstellen.

Ebenso sollten auf längere Sicht die rein empirischen Umwandlungsraten von Stickstoffmonoxid nach Stickstoffdioxid, wie sie in der Richtlinie VDI 3782 Blatt 1 (2001) angegeben sind, durch eine detailliertere Betrachtung unter Berücksichtigung der komplexen Umwandlungsvorgänge (siehe Richtlinien VDI 3783 Blatt 18, 2015, und VDI 3783 Blatt 19, 2015) abgelöst werden. Hierauf wird im Text kurz Bezug genommen. Eine mögliche Vorgehensweise ist die Analyse von Einzelfallsituationen mit dem Ausbreitungsmodell LASAT in Kombination mit dem Zusatzmodul LASREA, das die Behandlung nicht-linearer Umsetzungsprozesse erlaubt. Aus den Einzelfallanalysen könnten kategorisierte Umwandlungsraten abgeleitet werden.

### 3.2.4 Abschnitt *Ausbreitungsrechnung für Stäube*

Für die einzelnen Korngrößenklassen werden Auswaschraten gemäß den Standardsetzungen der Richtlinie VDI 4251 Blatt 3 (2015) – Anlagenbezogene Ausbreitungsmodellierung von Bioaerosolen – eingefügt:

| Klasse | $d_a$ in $\mu\text{m}$ | $v_s$ in m/s | $v_d$ in m/s | $\lambda$ in 1/s    | $\kappa$ |
|--------|------------------------|--------------|--------------|---------------------|----------|
| 1      | kleiner 2.5            | 0.00         | 0.001        | $3.0 \cdot 10^{-5}$ | 0.8      |
| 2      | 2.5 bis 10             | 0.00         | 0.01         | $1.5 \cdot 10^{-4}$ | 0.8      |
| 3      | 10 bis 50              | 0.04         | 0.05         | $4.4 \cdot 10^{-4}$ | 0.8      |
| 4      | größer 50              | 0.15         | 0.20         | $4.4 \cdot 10^{-4}$ | 0.8      |

In Richtlinie VDI 4251 Blatt 3 (2015) waren die Auswaschraten auf Grundlage von Richtlinie VDI 3782 Blatt 5 (2007) so bestimmt worden, dass sie über die dazugehörigen aerodynamischen Durchmesser in etwa kompatibel mit den bereits vorhandenen Depositionsgeschwindigkeiten der TA Luft (2002) sind.

Bei unbekannter Korngrößenverteilung von PM<sub>10</sub> (Klassen 1 und 2) werden folgende Aspekte berücksichtigt:

Die EU-weite Berichterstattung nach der E-PRTR-Verordnung (E-PRTR, 2006) berücksichtigt PM<sub>2.5</sub> nicht. Allerdings werden in Deutschland PRTR-Daten zusammen mit Emissionserklärungen nach der 11. BImSchV (BImSchV-11, 2004) und nach der 13. BImSchV (BImSchV-13, 2013) von den Betreibern über die Software BUBE (Betriebliche Umweltdaten-Berichterstattung) übermittelt. In BUBE (2016) sind für viele Abgasreinigungsanlagen PM<sub>2.5</sub>- und PM<sub>10</sub>-Anteile an Gesamtstaubfrachten hinterlegt. Ist keine Abgasreinigungsart vorhanden bzw. zur Abgasreinigung kein PM-Anteil bekannt, ist dort der allgemeine Faktor (35% PM<sub>10</sub>, 10% PM<sub>2.5</sub>) anzuwenden. In BUBE wird bei unbekannter Korngrößenverteilung also ein Verhältnis Klasse 1 zu Klasse 2 von etwa 30:70 angenommen.

Dieses Verhältnis wird für gefasste Quellen übernommen. Für diffuse Quellen wird wie bisher 100% Klasse 2 angenommen, was in Bezug auf die Deposition eine konservative Schätzung ist.

### 3.2.5 Abschnitt *Ausbreitungsrechnung für Geruchsstoffe*

In dem neuen Abschnitt werden Aspekte zur Bestimmung der Geruchsstundenhäufigkeit aufgeführt, die für Gase und Stäube keine Rolle spielen.

Die Beurteilungsschwelle wird explizit mit  $0.25 \text{ GE/m}^3$  angegeben, begründet durch Messungen des Verhältnisses von Mittelwert zu 90-Perzentil der atmosphärischen Spurenstoffkonzentration (siehe Janicke & Janicke, 2007).

Eine Berücksichtigung von Besonderheiten der Geruchsmodellierung oder von vergleichenden Begehungsdaten über die Beurteilungsschwelle ist zwar technisch möglich, kann aber leicht irreführend sein. Beispielsweise können Begehungsdaten für großflächige Geruchsquellen durch Adaptionseffekte der Nase beeinflusst sein, es ist jedoch nicht klar, ob eine Anpassung der Beurteilungsschwelle in diesem Fall der richtige Weg ist, dem Effekt Rechnung zu tragen.

### 3.2.6 Abschnitt *Bodenrauigkeit*

Als Datengrundlage für die Bestimmung der Bodenrauigkeit wird das *CORINE Land Cover* (CLC) durch das *Landbedeckungsmodell Deutschland* (LBM-DE) ersetzt. Beide Datensätze verwenden die gleiche, für CLC festgelegte Klassierung der Landbedeckung, aber LBM-DE ist räumlich genauer, da die Mindestkartierfläche 1 Hektar statt wie bei CLC 25 Hektar beträgt. Ab dem Stichjahr 2012 ist der deutsche CLC-Datensatz eine räumlich aggregierte Version des LBM-DE. CLC und LBM-DE verwenden dieselben Klassenbezeichnungen.

#### 3.2.6.1 Zuordnung der Klassen

In der Zuordnung von Landnutzungsklassen zu Rauigkeitsklassen werden folgende Änderungen vorgenommen:

- 311 (Laubwälder), 312 (Nadelwälder)

Nach Auswertungen des Deutschen Wetterdienstes zur vertikalen Verdrängung  $d_0 = 6z_0$  des Windprofils durch Waldbestand werden die Messwerte besser wiedergegeben, wenn die Klasse 311 der Rauigkeitslänge 2.0 m statt 1.5 m und die Klasse 312 der Rauigkeitslänge 1.5 m statt 1.0 m zugeordnet werden.

- 242 (komplexe Parzellenstrukturen), 243 (Landwirtschaft und natürliche Bodenbedeckung)

Diese Klassen werden im LBM-DE überhaupt nicht verwendet und können daher aus der Tabelle gestrichen werden. Diese „heterogenen“ Klassen entstehen erst bei der Generalisierung zu größeren Kartiereinheiten durch Zusammenfassung anderer landwirtschaftlicher und gegebenenfalls naturnaher Flächen. Eine Analyse zeigt, dass sich hinter diesen Klassen vor allem die Klassen 211 (Nicht bewässertes Ackerland) und 231 (Wiesen und Weiden) verbergen.

- 211 (Nicht bewässertes Ackerland), 231 (Wiesen und Weiden)

Die in der TA Luft (2002) zugewiesene Rauigkeit von 0.05 m bzw. 0.02 m erscheint zu niedrig, da in der Praxis auf den Teilflächen meist immer auch größere Strukturen vorhanden sind (zum Beispiel Ställe, Sträucher, Knicks), die jedoch in der Klassierung nicht berücksichtigt sind. Vor diesem Hintergrund scheint ein Wert von 0.1 m angemessener zu sein. Dieser Wert passt auch besser zu der Klug/Manier-Klassierung nach Richtlinie VDI 3782 Blatt 6 (2017), die von einer Rauigkeitslänge von ebenfalls 0.1 m ausgeht; die zugrunde liegenden Messungen hatten vermutlich auf Flughafen-Wiesen stattgefunden.

- 321 (Natürliches Grünland)

Mit Blick auf die Klassen 141 (Städtische Grünflächen) und 322 (Heiden und Moorheiden) wird diese Klasse derselben Rauigkeitslänge (0.2 m statt 0.02 m) zugewiesen.

- 132 (Deponien und Abraumhalden)

Analog zur Begründung für die Klassen 211 und 231 wird auch diese Klasse einer etwas größeren Rauigkeitslänge zugeordnet (0.05 m statt 0.02 m).

- 334 (Brandflächen)

Diese Klasse kommt mit dem LBM-DE neu hinzu (mit minimalem Vorkommen innerhalb Deutschlands) und wird derselben Rauigkeitslänge zugeordnet wie die Klasse 211 und 231.

Mit dem LBM-DE und den aktualisierten Zuordnungen muss das Rauigkeitskataster für AUSTAL2000 neu erstellt werden.

### 3.2.6.2 Mittlere Rauigkeitslänge

Der Radius des Kreises, innerhalb dessen die Rauigkeitslänge als Mittelwert für die Ausbreitungsrechnung bestimmt wird, wird von dem 10-fachen auf das 15-fache der Freisetzungshöhe geändert, um konsistent mit den neuen Festlegungen in Nummer 5.5 der TA Luft zu sein. Zudem wird das für diese Bestimmung formale Minimum der Freisetzungshöhe auf 10 m gesetzt, damit die Mittelungsfläche nicht unsachgemäß klein wird.

Dem Umstand vertikal und horizontal ausgedehnter Quellen wird Rechnung getragen durch Festlegung der mittleren Höhe als Freisetzungshöhe und des Grundflächen-Schwerpunktes als Bezugspunkt. Bei mehreren Quellen wird aus den mittleren, den Quellen zugewiesenen Rauigkeitslängen ein Mittelwert gebildet, wobei die Werte mit dem Quadrat der jeweiligen Freisetzungshöhe (d.h. mit dem Flächeninhalt des jeweiligen Mittelungsgebietes) gewichtet werden.

Die einzelnen Rauigkeitslängen für jede Masche des LBM-DE werden bei der Mittelbildung über einen Kreis arithmetisch gemittelt. Im Rahmen der Untersuchungen kam die Frage auf, ob eine Mittelwertbildung über den Logarithmus (das entspricht dem geometrischen Mittel) nicht sinnvoller sei, da dadurch die Flüsse gemittelt werden.

Die folgende vereinfachte Betrachtung bezieht sich auf zwei gleich große Teilgebiete unterschiedlicher Rauigkeit  $z_0$  und einem Zusammenhang zwischen Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  und Windgeschwindigkeit  $u$  in hinreichend großer Höhe  $h$  der Form

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left( \frac{h}{z_0} \right) \quad (3.1)$$

bzw. mit den skalierten Größen  $\mu = u_*/(\kappa u)$  und  $\zeta = z_0/h$

$$\mu = -\frac{1}{\ln \zeta} . \quad (3.2)$$

1. Geht man von der Rauigkeitslänge aus, dann ist der Mittelwert

$$\bar{\zeta} = \frac{1}{2} (\zeta_1 + \zeta_2) \quad (3.3)$$



und die mittlere Schubspannungsgeschwindigkeit folgt hieraus zu

$$\bar{\mu} = -\frac{1}{\ln \bar{\zeta}}. \quad (3.4)$$

So wird nach Anhang 3 der TA Luft (2002) vorgegangen.

2. Geht man von einer Mittelung der Flüsse aus, dann ist zum Beispiel

$$\bar{\mu}^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\ln^2 \zeta_1} + \frac{1}{\ln^2 \zeta_2} \right). \quad (3.5)$$

Die Frage ist nun, mit welchem mittleren Wert  $\bar{\zeta}$  dieser mittlere Fluss wiedergegeben werden kann. Die Bedingung hierfür lautet

$$\frac{1}{\ln^2 \bar{\zeta}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\ln^2 \zeta_1} + \frac{1}{\ln^2 \zeta_2} \right) \quad (3.6)$$

oder

$$|\ln \bar{\zeta}| = \sqrt{2} \frac{|\ln \zeta_1| |\ln \zeta_2|}{\sqrt{\ln^2 \zeta_1 + \ln^2 \zeta_2}}. \quad (3.7)$$

Im Rahmen dieser Flussbetrachtung ist der benötigte Mittelwert der Rauigkeitslänge weder das arithmetische noch das geometrische Mittel.<sup>1</sup>

Aus dieser Betrachtung heraus ist nicht offensichtlich, warum bei Zugrundelegen der Flüsse der Mittelwert der Rauigkeitslänge als Mittelwert über die Logarithmen der Teilrauigkeitslängen (geometrisches Mittel) gebildet werden sollte.

Im Zweifelsfall liefert das arithmetische Mittel etwas höhere Werte als das geometrische Mittel und damit für Quellhöhen, wie sie typisch für die TA Luft sind, eine tendenziell eher konservative Schätzung des bodennahen Konzentrationsmaximums. Daher wird in der TA Luft auch weiterhin das arithmetische Mittel verwendet.

### 3.2.7 Abschnitt Abgasfahnenüberhöhung

In diesem Forschungsvorhaben wurde der Ansatz *PLURIS* zur Bestimmung der Abgasfahnenüberhöhung trockener und feuchter Fahnen weiterentwickelt, siehe Kapitel 4. Die Weiterentwicklung ist Grundlage für die Überarbeitung der Überhöhungsrichtlinien VDI 3782 Blatt 3 (Kamine) aus dem Jahr 1985 und VDI 3784 Blatt 2 (Kühltürme) aus dem Jahr 1990. Da die Richtlinienarbeiten noch nicht abgeschlossen sind, wird die in diesem Forschungsvorhaben entwickelte Bestimmung der Abgasfahnenüberhöhung in einem eigenen *Bericht zur Umweltphysik* dokumentiert und kann genutzt werden, bis die Überarbeitung der Überhöhungsrichtlinien abgeschlossen ist.

<sup>1</sup> Betrachtet man den Fall  $\zeta_1 \ll \zeta_2 < 1$ , also zum Beispiel  $z_{0,1} = 0.02$  m,  $z_{0,2} = 2$  m,  $h_a > 10$  m, dann ist näherungsweise  $|\ln \bar{\zeta}| \approx \sqrt{2} |\ln \zeta_2|$  oder  $\bar{z}_0 \approx h(z_{0,2}/h)^{\sqrt{2}}$ . Für  $h = 100$  m ergibt sich  $\bar{z}_0 = 0.4$  m, für  $h = 50$  m der Wert  $\bar{z}_0 = 0.5$  m und für  $h = 20$  m der Wert  $\bar{z}_0 = 0.8$  m. Der Mittelwert liegt hier also zwischen dem geometrischen Mittel (0.2 m) und dem arithmetischen Mittel (1 m). Für große Werte von  $h$  nähert sich hier  $\bar{z}_0$  dem geometrischen Mittel, für kleine Werte von  $h$  dem arithmetischen Mittel.

### 3.2.8 Abschnitt *Rechengebiet und Aufpunkte*

Kein Änderungsvorschlag.

### 3.2.9 Abschnitt *Meteorologische Daten*

#### 3.2.9.1 Allgemeines

Für diesen Abschnitt wurden in den Workshops Formulierungen entwickelt, die auf aktuelle Richtlinien Bezug nehmen.

#### 3.2.9.2 Windrichtung

Die überarbeitete Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) legt nicht nur das Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit, sondern auch das Vertikalprofil der Windrichtung fest, so dass eine eigene Festlegung hierzu in der TA Luft nicht mehr erforderlich ist.

#### 3.2.9.3 Windgeschwindigkeit

Kein Änderungsvorschlag.

#### 3.2.9.4 Obukhov-Länge, Allgemein

Nach der neuen Terminologie in Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) wird die Länge als Obukhov-Länge und nicht mehr als Monin-Obukhov-Länge bezeichnet (siehe FOKEN, 2006).

#### 3.2.9.5 Obukhov-Länge, Klassierung

Die Klassierung der Obukhov-Länge  $L$  in der TA Luft (2002) in Abhängigkeit von der Stabilitätsklasse nach Klug/Manier und der Rauigkeitslänge  $z_0$  erfolgte in zwei Schritten (JANICKE & JANICKE, 2003):

1. Für die Rauigkeitslänge  $z_0 = 1.5$  m wurde für jede Stabilitätsklasse derjenige Wert von  $L$  bestimmt, mit dem in einer stationären Einzelsituation AUSTAL2000 den halben Maximalwert der quer zur Fahne integrierten, bodennahen Konzentration in derselben Entfernung annimmt wie das Vorgängermodell AUSTAL86. Die Bestimmungen wurden für zwei passive Punktquellen (Quellhöhe 50 m und 100 m) durchgeführt und das gerundete, harmonische Mittel der zwei Werte von  $L$  für jede Stabilitätsklasse gebildet.

Hintergrund dieser Anpassung war zum einen die Überlegung, dass das Modell AUSTAL86 für hohe Rauigkeit und große Quellhöhen validiert ist, und zum anderen der Wunsch nach einem soweit möglich glatten Übergang zwischen alten und neuen Modellergebnissen. Für die Betrachtung wurde die Entfernung des halben Maximalwertes gewählt, da sich diese Entfernung, die im Bereich des Konzentrationsanstiegs nach dem Auftreffen der Fahne auf dem Erdboden liegt, wesentlich genauer bestimmen lässt als die Entfernung, in der das Maximum angenommen wird. Es wurde die quer zur Fahne integrierte Konzentration gewählt, da sie nicht von den Annahmen zur horizontalen Fahnenbreite abhängt und sie die Hauptgröße ist, die den Jahresmittelwert der Konzentration bestimmt.

2. Aus den so bestimmten Klassenwerten von  $L$  für  $z_0 = 1.5$  m wurden die Werte für die anderen Rauigkeitslängen über ein Verfahren bestimmt, das auch Grundlage für die Vorgehensweise in Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) ist:

Für  $L$  gilt

$$L(z_0) \propto u_*^3/q_3 \quad (3.8)$$

mit der Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  und dem vertikalen Wärmestrom  $q_3$ . Das Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit hat die Form

$$u(z) = u_* f(z; L, z_0), \quad (3.9)$$

insbesondere gilt in einer Referenzhöhe  $h_r$

$$u_r = u_* f(h_r; L, z_0). \quad (3.10)$$

Variiert man  $z_0$  und nimmt an, daß  $q_3$  und  $u_*$  dabei im wesentlichen konstant bleiben, dann ist

$$L(z_0) f^3(h_r; L, z_0) = \text{const.} \quad (3.11)$$

Ist also der Wert von  $L$  für einen Wert von  $z_0$  gegeben, kann hieraus der Wert von  $L$  für einen anderen Wert von  $z_0$  bestimmt werden. Wird für die Funktion  $f$  ein komplexes Windprofil verwendet, muss die implizite Gleichung numerisch gelöst werden. Für ein logarithmisches Profil ( $f$  ist dann unabhängig von  $L$ ) lässt sich die Lösung unmittelbar analytisch angeben.

Mit der Überarbeitung der TA Luft wird auch das Grenzschichtmodell entsprechend der überarbeiteten Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) geändert. Damit ändern sich die vertikalen Profile von Geschwindigkeit und vertikalen Turbulenzgrößen und als Folge die hiermit berechnete bodennahe, quer zur Fahne integrierte Konzentration. Als Konsequenz sollten daher auch die Rechnungen zur Klassierung der Obukhov-Länge erneut durchgeführt werden.

Die im Abschlussbericht zu AUSTAL2000 beschriebenen Vergleichsrechnungen wurden mit den Grenzschichtprofilen nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) erneut durchgeführt. Die Umrechnung auf die anderen Rauigkeitslängen erfolgte wie oben beschrieben, für  $f$  wurde entsprechend Abschnitt 7.6.2 der Richtlinie ein logarithmisches Profil mit der Referenzhöhe



$h_r = 100$  m verwendet. Die Ergebnisse für  $z_0 = 1.5$  m sind (xhtal ist die Entfernung, in der nach AUSTAL86 das halbe Maximum erreicht wird):

| Quellhöhe 50m |            |         | Quellhöhe 100m |            |          |
|---------------|------------|---------|----------------|------------|----------|
| Klasse 1:     | xhtal=1178 | L= 43   | Klasse 1:      | xhtal=6740 | L= 82    |
| Klasse 2:     | xhtal= 376 | L= 231  | Klasse 2:      | xhtal=1293 | L= 357   |
| Klasse 3:     | xhtal= 226 | L= 857  | Klasse 3:      | xhtal= 636 | L= -5857 |
| Klasse 4:     | xhtal= 161 | L= -559 | Klasse 4:      | xhtal= 416 | L= -336  |
| Klasse 5:     | xhtal= 122 | L= -184 | Klasse 5:      | xhtal= 312 | L= -151  |
| Klasse 6:     | xhtal= 68  | L= -65  | Klasse 6:      | xhtal= 193 | L= -68   |

Hieraus ergeben sich folgende mittlere Werte von  $L$  (gerundetes harmonisches Mittel) und daraus folgende Werte für die anderen Rauigkeitslängen (für Klasse III/1 wird  $L$  in dieser Tabelle wie bisher auf den Wert 99999 m gesetzt, eine Diskussion des Wertes erfolgt im nächsten Abschnitt):

| Klug/<br>Manier | Neue Werte von $L$ (in m) in Abhängigkeit von $z_0$ (in m) |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 | 0.01   | 0.02  | 0.05  | 0.10  | 0.20  | 0.50  | 1.00  | 1.50  | 2.00  |
| I               | 5  | 7     | 9     | 13    | 17    | 28    | 44    | 60    | 77    |
| II              | 25   | 31    | 44    | 59    | 81    | 133   | 207   | 280   | 358   |
| III/1           | 99999  | 99999 | 99999 | 99999 | 99999 | 99999 | 99999 | 99999 | 99999 |
| III/2           | -37  | -47   | -66   | -88   | -122  | -199  | -310  | -420  | -536  |
| IV              | -15  | -19   | -27   | -36   | -49   | -80   | -125  | -170  | -217  |
| V               | -6   | -8    | -11   | -15   | -20   | -33   | -52   | -70   | -89   |

Im Vergleich zu den alten Klassenwerten sind die Obukhov-Längen für sehr stabile Schichtung etwas weiter in Richtung sehr stabiler Schichtung und für labile Schichtungen etwas in Richtung indifferenter Schichtung verschoben.

| Klug/<br>Manier | Alte Werte von $L$ (in m) in Abhängigkeit von $z_0$ (in m) |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 | 0.01   | 0.02  | 0.05  | 0.10  | 0.20  | 0.50  | 1.00  | 1.50  | 2.00  |
| I               | 7  | 9     | 13    | 17    | 24    | 40    | 65    | 90    | 118   |
| II              | 25   | 31    | 44    | 60    | 83    | 139   | 223   | 310   | 406   |
| III/1           | 99999  | 99999 | 99999 | 99999 | 99999 | 99999 | 99999 | 99999 | 99999 |
| III/2           | -25  | -32   | -45   | -60   | -81   | -130  | -196  | -260  | -326  |
| IV              | -10  | -13   | -19   | -25   | -34   | -55   | -83   | -110  | -137  |
| V               | -4   | -5    | -7    | -10   | -14   | -22   | -34   | -45   | -56   |

### 3.2.9.6 Obukhov-Länge, Klassierung für III/1

Soweit keine aus Messungen abgeleiteten Werte der für die Grenzschichtprofile benötigten Obukhov-Länge vorliegen, kann behelfsweise ein klassierter Wert verwendet werden, wenn

ein Wert zur Stabilitätsklasse nach Klug/Manier vorliegt, der zum Beispiel aus synoptischen Beobachtungen ermittelt wurde.

Die Ableitung der klassierten Werte ist im vorigen Abschnitt beschrieben. Für die Klasse III/1 ist sie mit großen Unsicherheiten verbunden, da hier der Übergang von positiven zu negativen Werten auftritt, so dass sich je nach Randbedingungen (Quellhöhe, Grenzschichtprofil) entweder große negative oder große positive Werte ergaben. Daher wurde der Wert für die Klassierung in der TA Luft (2002) für alle Rauigkeitslängen formal auf 99999 m, also praktisch auf unendlich gesetzt. Diese Festlegung wurde genauer betrachtet, unter anderem, weil die Obukhov-Länge nun über die Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) auch in das Temperaturprofil und über den neuen Ansatz der Abgasfahnenüberhöhung auch in die effektive Quellhöhe eingeht.

In das Temperaturprofil der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) geht die Obukhov-Länge ein. Mit dem Wert 99999 m ergibt sich in größerer Höhe der adiabatische Temperaturgradient. Dieser Wert steht im Gegensatz zu der (bisherigen) Richtlinie VDI 3784 Blatt 2 (1990), die für die Klassen III/1 und III/2 mit einem Wert von  $-0.7 \text{ K}/100 \text{ m}$  einen Wert vorgibt, der deutlich auf der stabilen Seite liegt.

| Ausbreitungsklasse<br>Dispersion class | $m$<br>— | $\gamma$<br>K/m | $z_{\max}$<br>m |
|--|----------|-----------------|-----------------|
| V                                      | 0.09     | -0.011          | 1100            |
| IV                                     | 0.20     | -0.008          | 1100            |
| III/2                                  | 0.22     | -0.007          | 800             |
| III/1                                  | 0.28     | -0.007          | 800             |
| II                                     | 0.37     | 0.005           | 800             |
| I                                      | 0.42     | 0.015           | 800             |

Dieser Unterschied führt auf markant unterschiedliche Endhöhen in der Überhöhungsberechnung nach dem alten Modell (VDISP) einerseits und nach dem neuen Modell (*IBJpluris*) in Kombination mit dem Temperaturprofil nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) und der Klassierung der Obukhov-Länge nach TA Luft (2002) andererseits.

Einen weiteren Hinweis gibt die Originalarbeit zur Festlegung der Stabilitätsklassen von G. Manier (MANIER, 1975). Dort wird in Tabelle 7 die Häufigkeitsverteilung von Temperaturgradienten für die einzelnen Stabilitätsklassen angegeben (bestimmt aus der Temperaturdifferenz zwischen 2 m und 50 m am Hamburger Fernsehturm):

Tabelle 7. Häufigkeitsverteilung des Temperaturgradienten in Abhängigkeit von der Klug-Klasse im Jahresmittel.

|                  | -4 | -3 | -2 | -1 | 0  | 1  | 2  | 3 | 4  | 5  | N    |
|------------------|----|----|----|----|----|----|----|---|----|----|------|
| V                | 54 | 27 | 14 | 4  | 1  | 0  | 0  | 0 | 0  | 0  | 290  |
| IV               | 33 | 24 | 26 | 13 | 4  | 0  | 0  | 0 | 0  | 0  | 852  |
| III <sub>2</sub> | 11 | 19 | 35 | 27 | 6  | 2  | 0  | 0 | 0  | 0  | 2204 |
| III <sub>1</sub> | 1  | 5  | 19 | 48 | 15 | 5  | 3  | 1 | 1  | 2  | 8706 |
| II               | 0  | 0  | 5  | 28 | 19 | 12 | 9  | 7 | 6  | 14 | 2112 |
| I                | 0  | 0  | 0  | 10 | 11 | 11 | 11 | 9 | 10 | 38 | 1409 |

Die Spalten geben die Häufigkeiten in Prozent für die Temperaturgradienten  $-4 \text{ K}/100 \text{ m}$  bis  $+5 \text{ K}/100 \text{ m}$  an. Für die Klasse III/1 liegt die größte Häufigkeit bei  $-1 \text{ K}/100 \text{ m}$ , also (im Rahmen der Rundungsungenauigkeiten) bei einem Wert, der dem trocken-adiabatischen Temperaturgradienten entspricht. Allerdings ist die Häufigkeitsverteilung auf die benachbarten Werte nicht symmetrisch, so dass eine Mittelung unter Einbezug der Nachbargradienten einen anderen Wert ergibt.

Eine solche Mittelung ist problematisch: Zum einen bildet der Wertebereich  $-4 \text{ K}/100 \text{ m}$  bis  $+5 \text{ K}/100 \text{ m}$  offenbar nicht das tatsächliche Spektrum ab (besonders sichtbar bei sehr labiler und sehr stabiler Schichtung), zum anderen steigt die Häufigkeitsverteilung bei stabiler Schichtung im Bereich großer positiver Gradienten wieder an – ein Effekt, der auch schon bei Klasse III/1 erkennbar ist und eventuell auf das Vorliegen bodennaher Inversionsschichten zurückzuführen ist.

Führt man für Klasse III/1 die Mittelung für alle aufgeführten Werte durch, ergibt sich ein mittlerer Gradient von  $-0.77 \text{ K}/100 \text{ m}$ . Führt man die Mittelung nur bis zum Wert  $+3 \text{ K}/100 \text{ m}$  durch, ergibt sich ein Wert von  $-0.94 \text{ K}/100 \text{ m}$ . Beide Werte liegen auf der stabilen Seite des trocken-adiabatischen Temperaturgradienten, sind jedoch nicht so extrem wie der in VDI 3784 Blatt 2 (1990) angegebene Wert von  $-0.7 \text{ K}/100 \text{ m}$ .

Die Darstellung von G. Manier zur Klassierung des Temperaturgradienten legt nahe, dass für die Klasse III/1 im Mittel ein leicht stabiler Temperaturgradient vorliegt. Das bedeutet, dass bei Anwendung des Temperaturprofils nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) eine positive Obukhov-Länge mit einem Wert kleiner als  $99999 \text{ m}$ , aber deutlich größer als rund  $1000 \text{ m}$  für die Rauigkeitslänge  $1.5 \text{ m}$  (aufgrund der eingangs angesprochenen Fahnenvergleiche zur Ableitung der Klassenwerte) anzusetzen ist.

Um einerseits den Ergebnissen von G. Manier und dem bisherigen Ansatz eines Temperaturgradienten in Richtlinie VDI 3784 Blatt 2 (1990) Rechnung zu tragen und andererseits sich nicht ohne Grund zu sehr von den bisherigen Klassenwerten zu entfernen, wurden für Klasse III/1 und Rauigkeitslänge  $1.5 \text{ m}$  die Klassenwerte der Obukhov-Länge von  $4000 \text{ m}$  und  $2000 \text{ m}$  näher untersucht.

Es wurden Ausbreitungsrechnungen mit einer AKS für die Bauhöhen  $10 \text{ m}$  und  $100 \text{ m}$  einer passiven Quelle und die Rauigkeitslängen  $0.1 \text{ m}$ ,  $0.5 \text{ m}$  und  $1.5 \text{ m}$  durchgeführt. Betrachtet wurde das Jahresmittel von  $\text{SO}_2$  und die Geruchsstundenhäufigkeit als typische Langzeit- und Kurz-



zeitkenngrößen.<sup>2</sup>

Die Ergebnisse sind in den Bildern 3.1 bis 3.12 grafisch dargestellt. Gezeigt ist jeweils das Ergebnis nach TA Luft 2002 (oben links) sowie nach der überarbeiteten TA Luft mit dem Grenzschichtmodell nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) unter Verwendung des Klassenwertes der Obukhov-Länge für Klasse III/1 von 99999 m (oben rechts), 4000 m (unten links) und 2000 m (unten rechts). Diskutiert werden im Folgenden die drei letzten Varianten.

Für die bodennahe Quelle ergeben sich erwartungsgemäß nur sehr geringe Unterschiede für das Jahresmittel, bei niedriger Bodenrauigkeit nimmt die Geruchsstundenhäufigkeit in größerer Entfernung mit abnehmendem Klassenwert geringfügig zu. Für die hohe Quelle nimmt das Jahresmittel mit abnehmendem Klassenwert geringfügig ab, bei niedriger Bodenrauigkeit nimmt die Geruchsstundenhäufigkeit mit abnehmendem Klassenwert im Bereich des Maximums ab und in größerer Quellentfernung zu.

Auf Basis der hier vorgestellten Überlegungen wird vorgeschlagen, für Klasse III/1 und die Rauigkeitslänge 1.5 m den Klassenwert der Obukhov-Länge von 99999 m auf 4000 m zu ändern und für die anderen Rauigkeitslängen den Wert gemäß Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) umzurechnen. Die klassierten Werte lauten dann:

| Klug/<br>Manier | Neue Werte von $L$ (in m) in Abhängigkeit von $z_0$ (in m) |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                 | 0.01   | 0.02 | 0.05 | 0.10 | 0.20 | 0.50 | 1.00 | 1.50 | 2.00 |
| I               | 5  | 7    | 9    | 13   | 17   | 28   | 44   | 60   | 77   |
| II              | 25   | 31   | 44   | 59   | 81   | 133  | 207  | 280  | 358  |
| III/1           | 354  | 448  | 631  | 842  | 1160 | 1893 | 2951 | 4000 | 5107 |
| III/2           | -37  | -47  | -66  | -88  | -122 | -199 | -310 | -420 | -536 |
| IV              | -15  | -19  | -27  | -36  | -49  | -80  | -125 | -170 | -217 |
| V               | -6   | -8   | -11  | -15  | -20  | -33  | -52  | -70  | -89  |

<sup>2</sup>LASAT 3.3, Meteorologie-Testversion 5.3,  $d_0 = 6z_0$ ,  $h_a = 10m + d_0$ , Rate 4000. Quellhöhe 10 m: Quellstärken 1 g/s und 5000 GE/s, horizontale Maschenweite 5 m. Quellhöhe 100 m: Quellstärken 100 g/s und 500000 GE/s, horizontale Maschenweite 50 m.

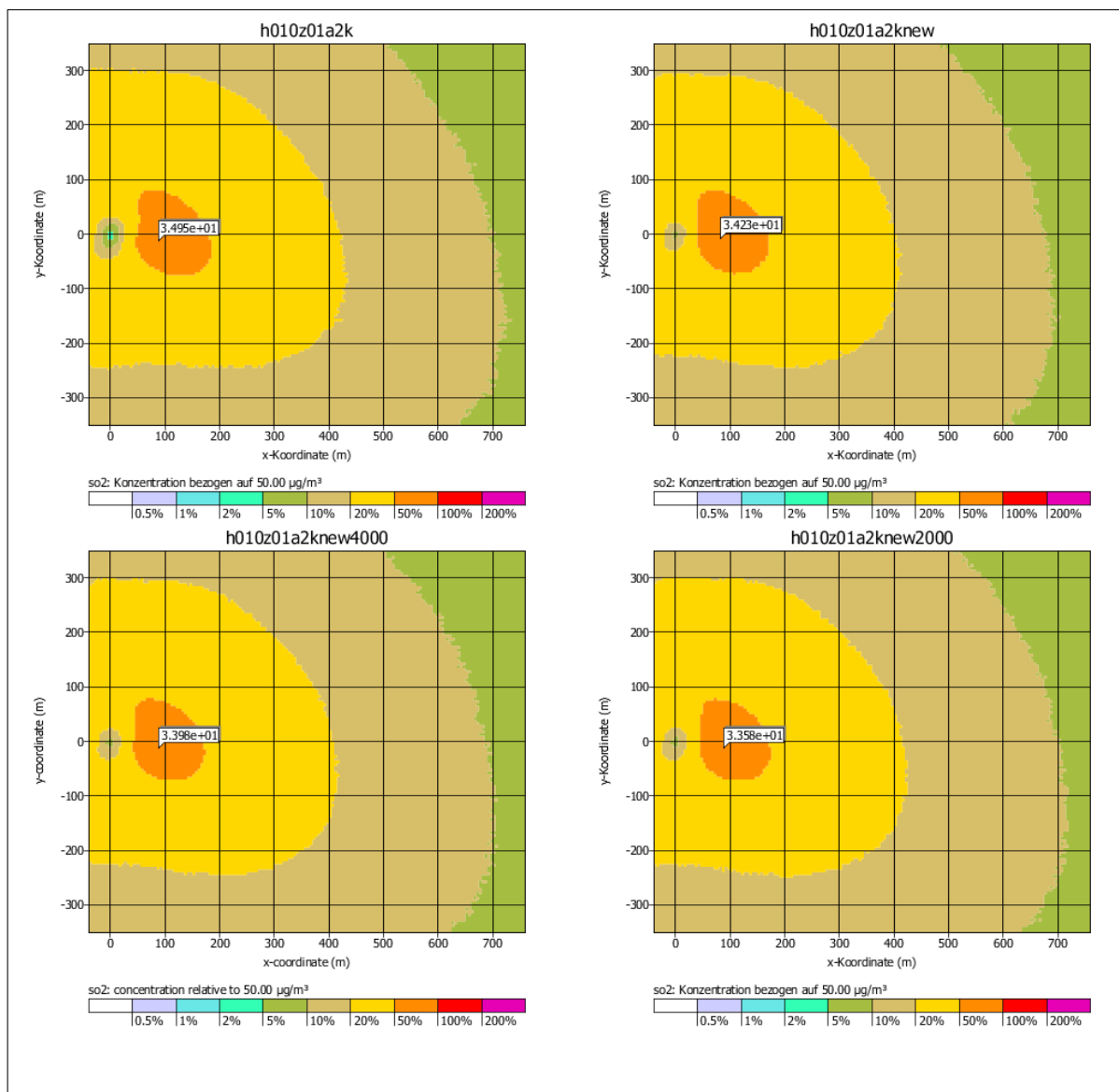


BILD 3.1: Quellhöhe 10 m, Rauigkeitslänge 0.1 m, Jahresmittel SO<sub>2</sub>.



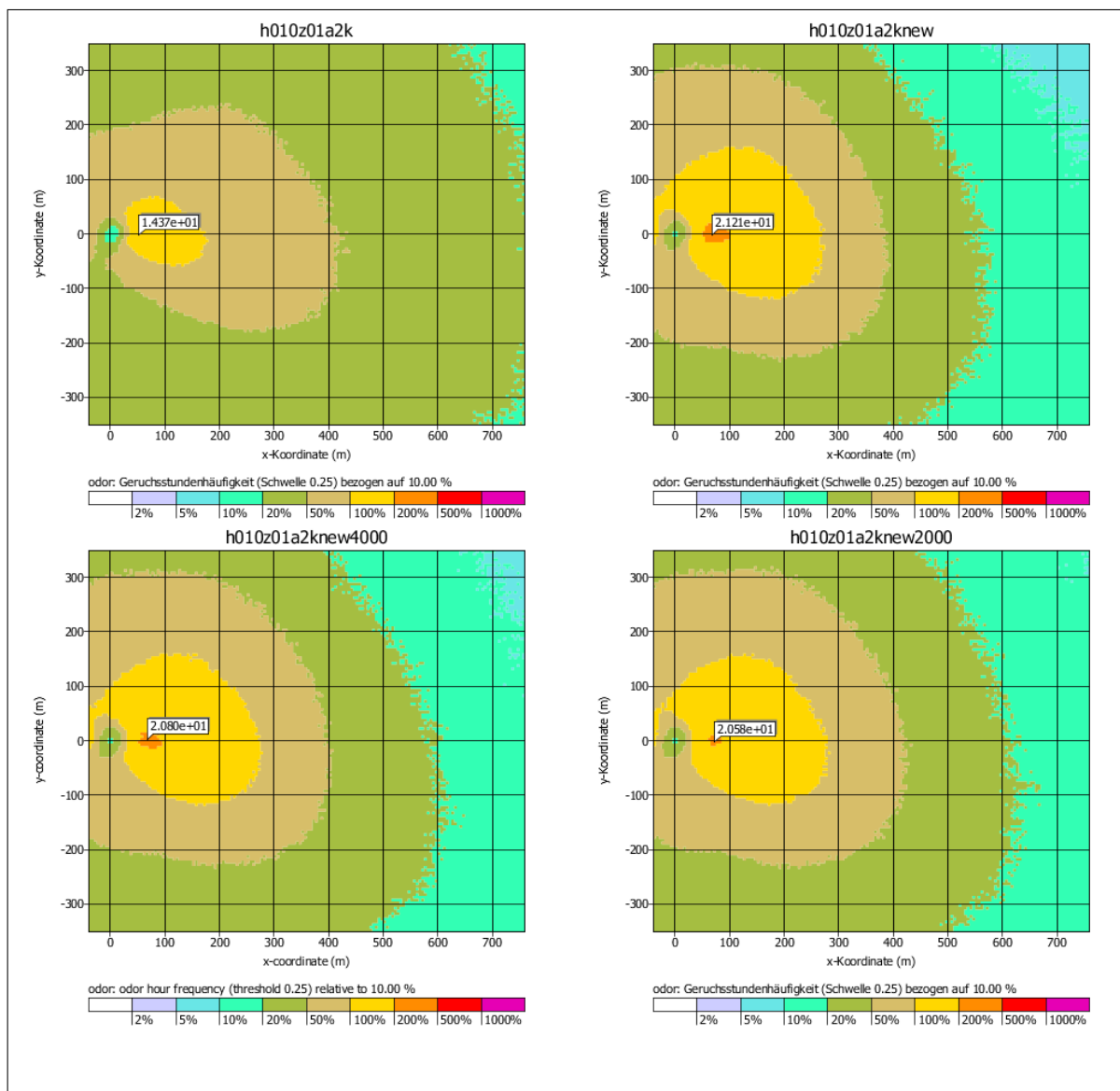


BILD 3.2: Quellhöhe 10 m, Rauigkeitslänge 0.1 m, Geruchsstundenhäufigkeit.

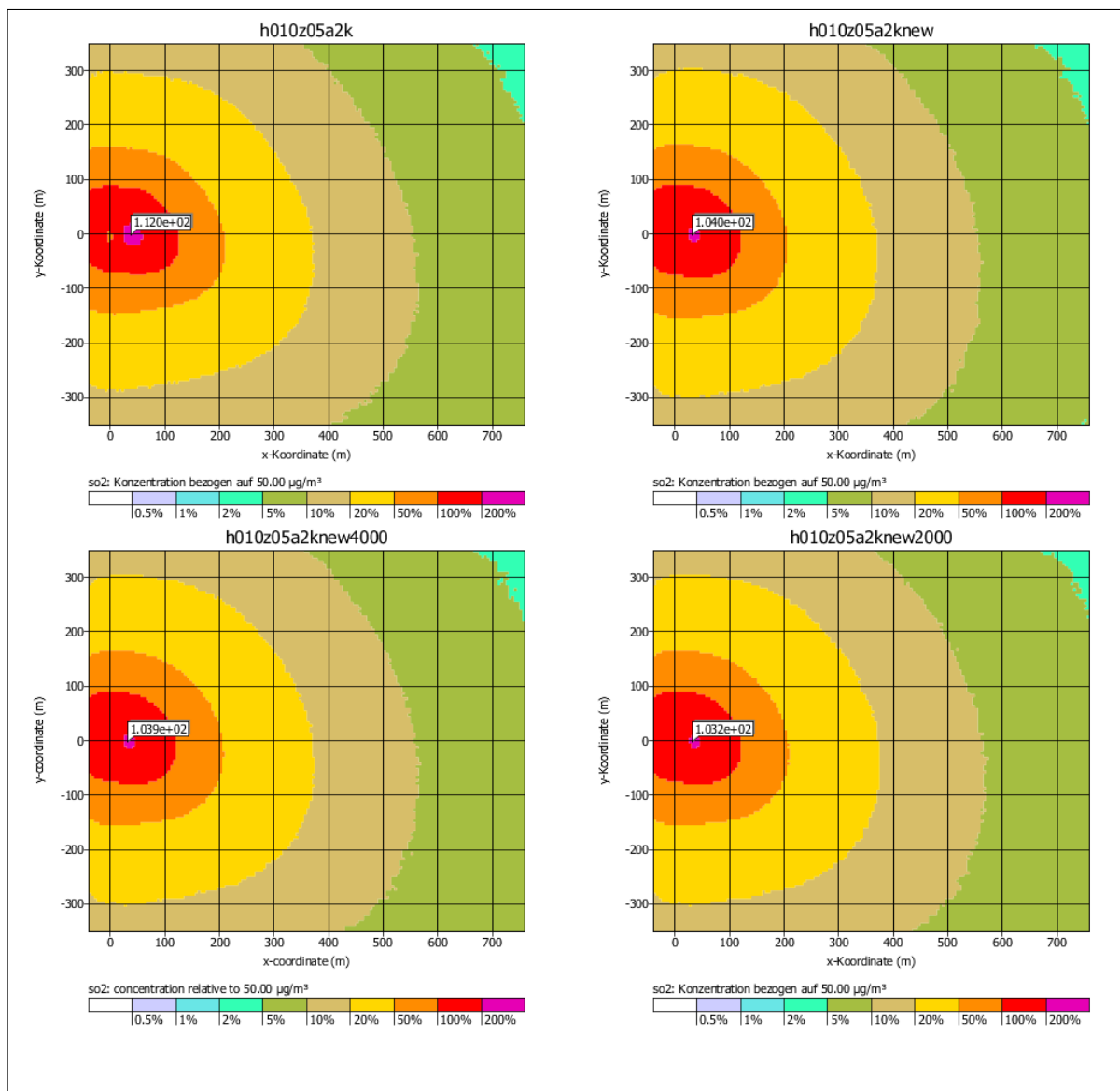


BILD 3.3: Quellhöhe 10 m, Rauigkeitslänge 0.5 m, Jahresmittel SO<sub>2</sub>.

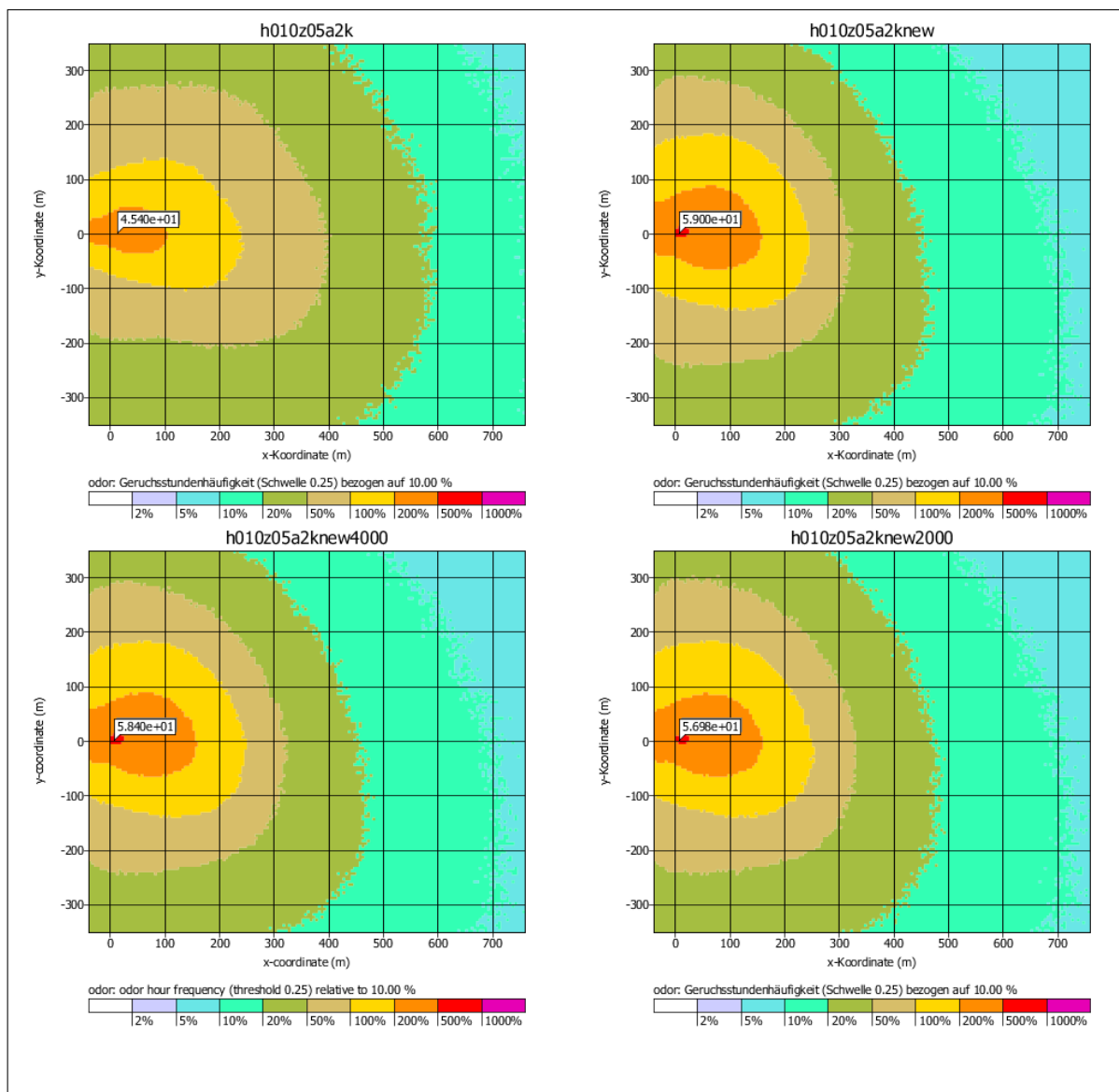


BILD 3.4: Quellhöhe 10 m, Rauigkeitslänge 0.5 m, Geruchsstundenhäufigkeit.

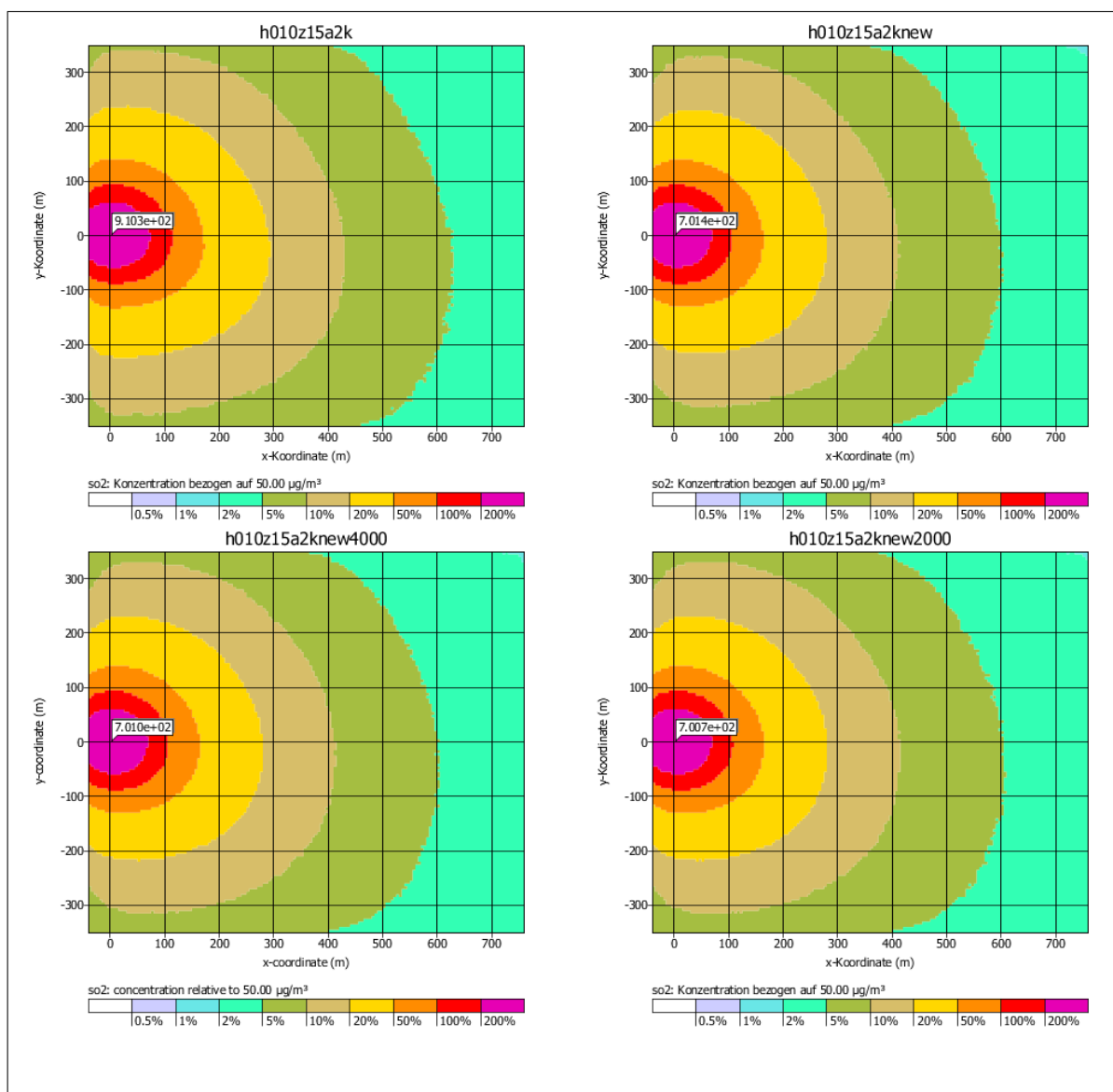


BILD 3.5: Quellhöhe 10 m, Rauigkeitslänge 1.5 m, Jahresmittel SO<sub>2</sub>.

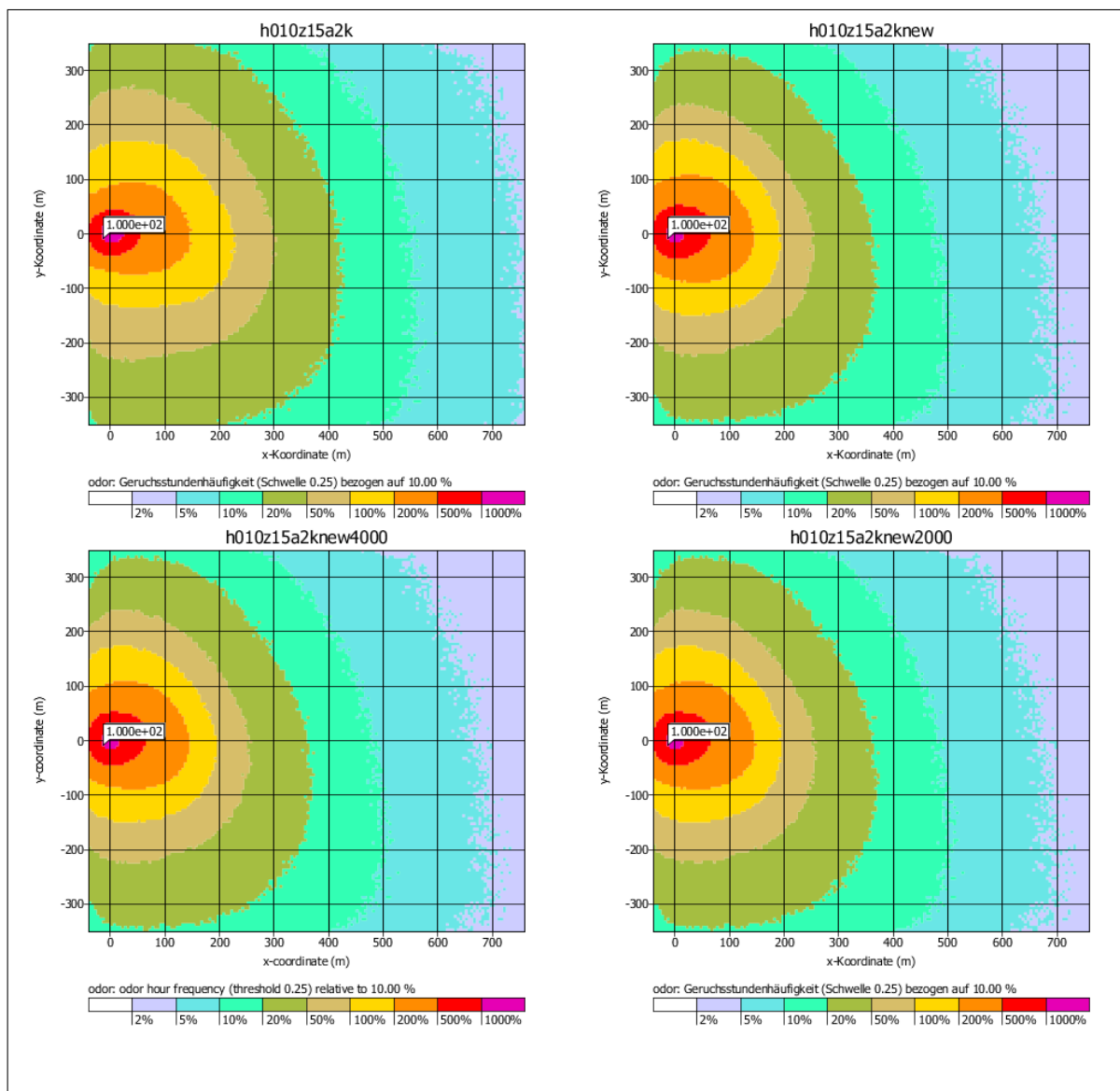


BILD 3.6: Quellhöhe 10 m, Rauigkeitslänge 1.5 m, Geruchsstundenhäufigkeit.

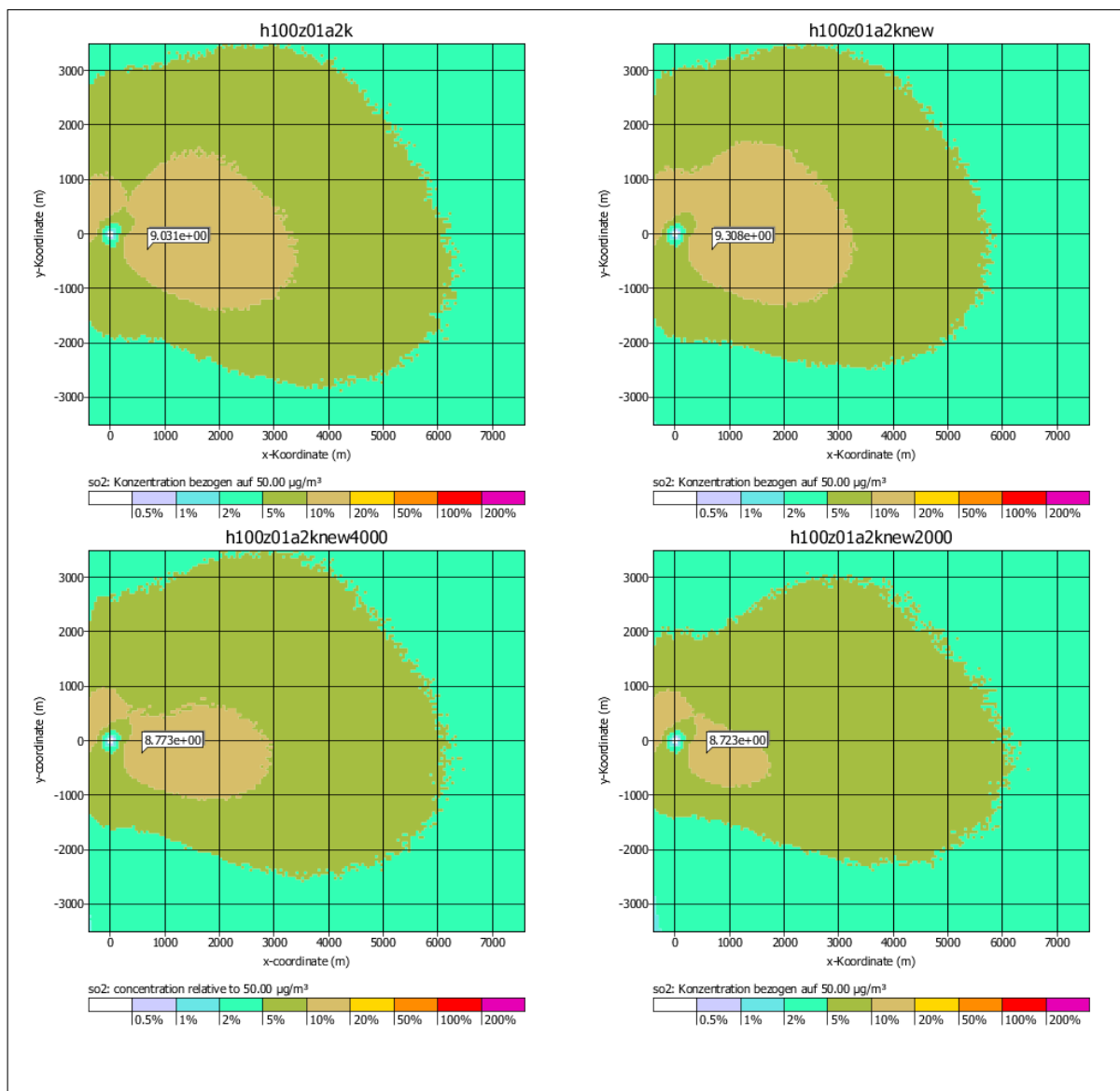


BILD 3.7: Quellhöhe 100 m, Rauiglängslänge 0.1 m, Jahresmittel SO<sub>2</sub>.

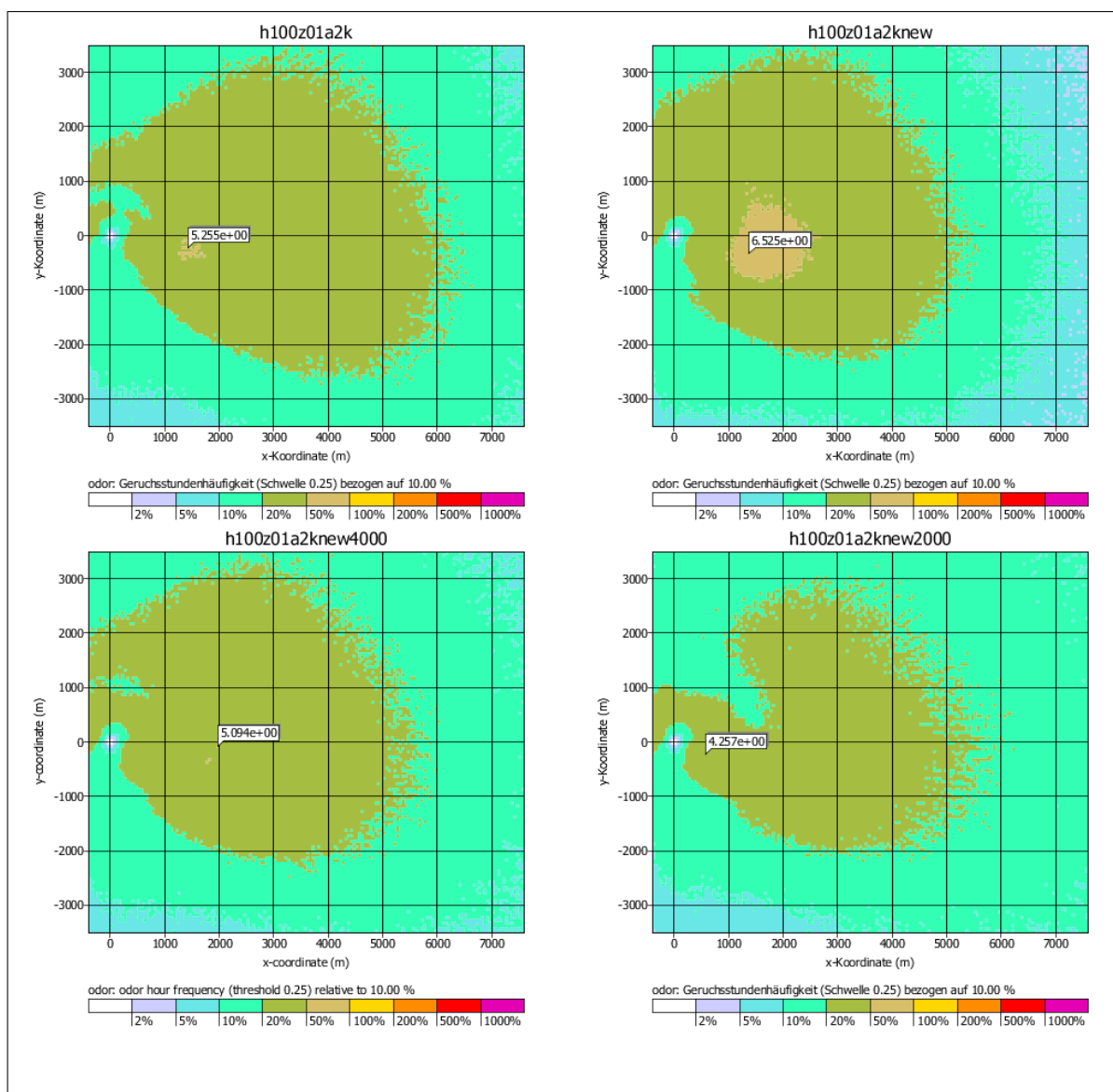


BILD 3.8: Quellhöhe 100 m, Rauigkeitslänge 0.1 m, Geruchsstundenhäufigkeit.

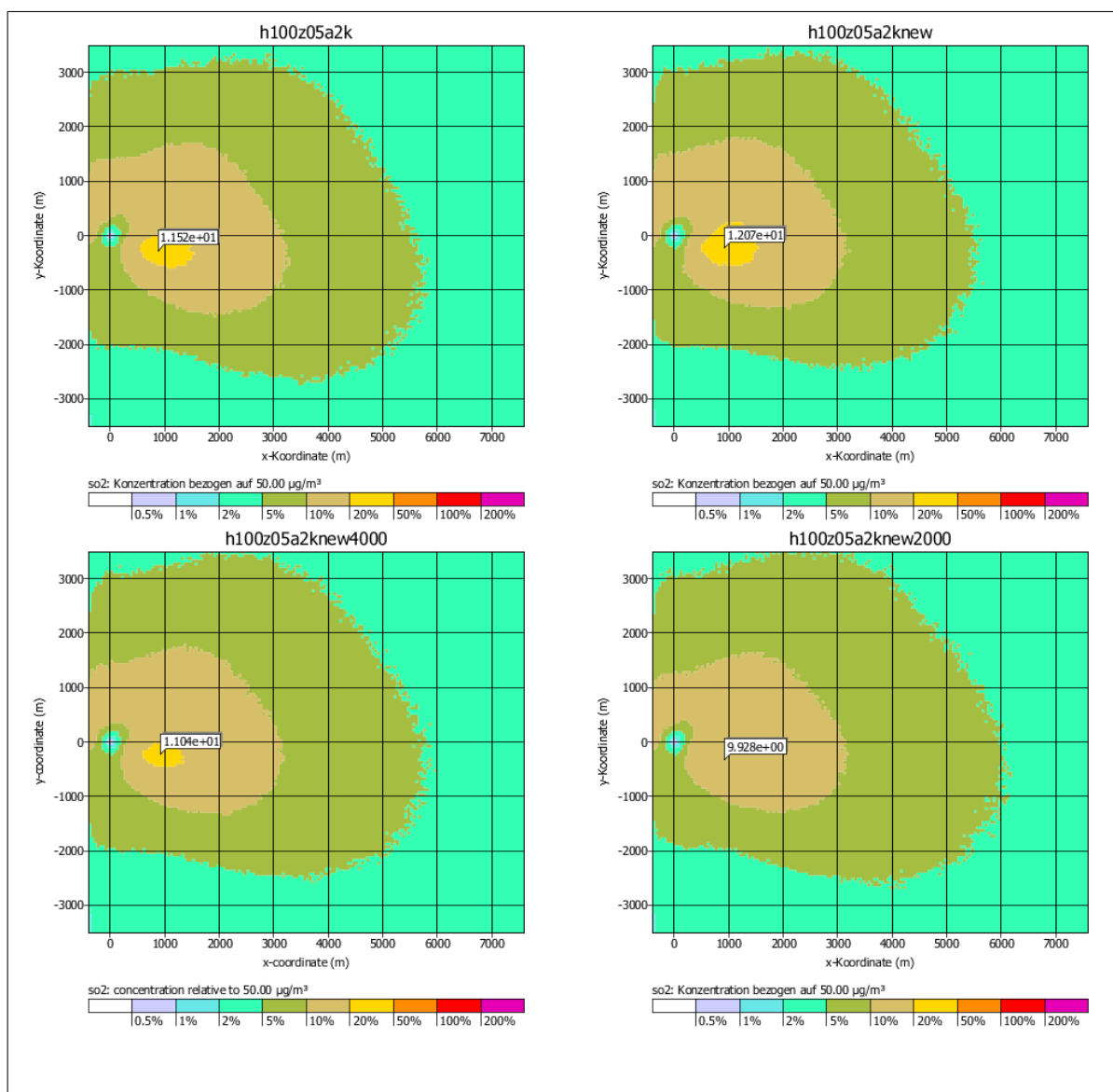


BILD 3.9: Quellhöhe 100 m, Rauigkeitslänge 0.5 m, Jahresmittel SO<sub>2</sub>.



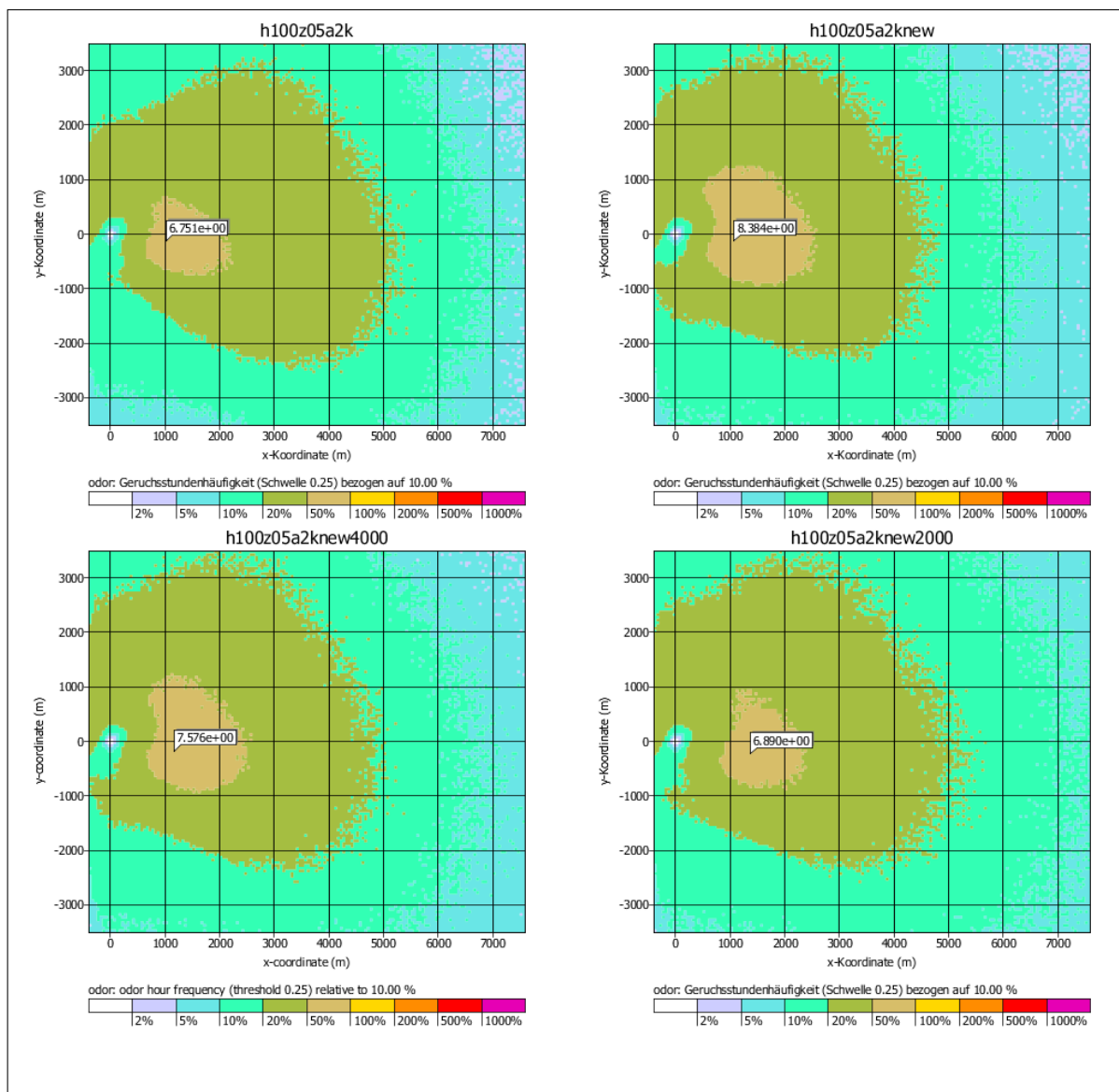


BILD 3.10: Quellhöhe 100 m, Rauigkeitslänge 0.5 m, Geruchsstundenhäufigkeit.

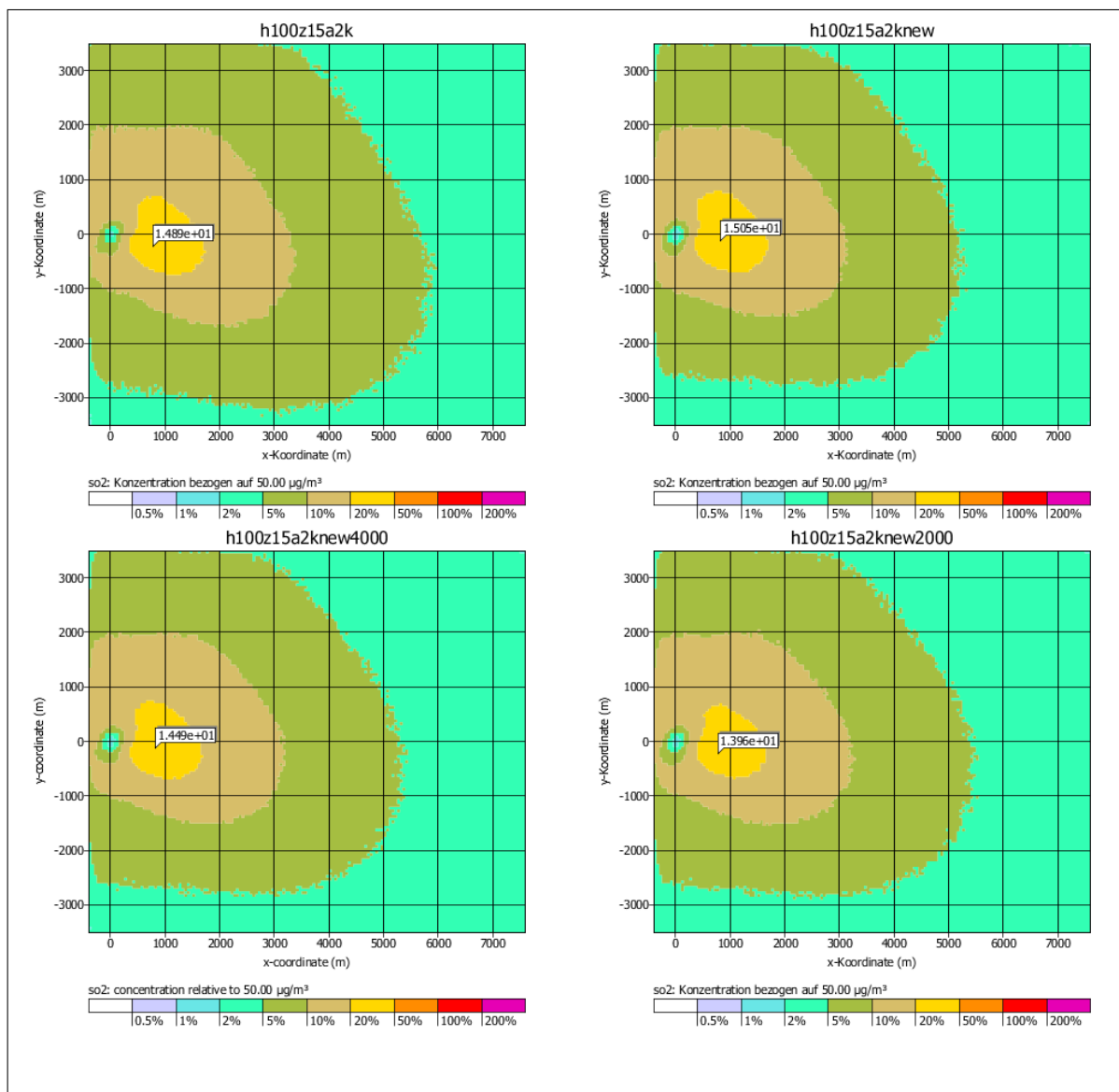


BILD 3.11: Quellhöhe 100 m, Rauiglängte 1.5 m, Jahresmittel SO<sub>2</sub>.

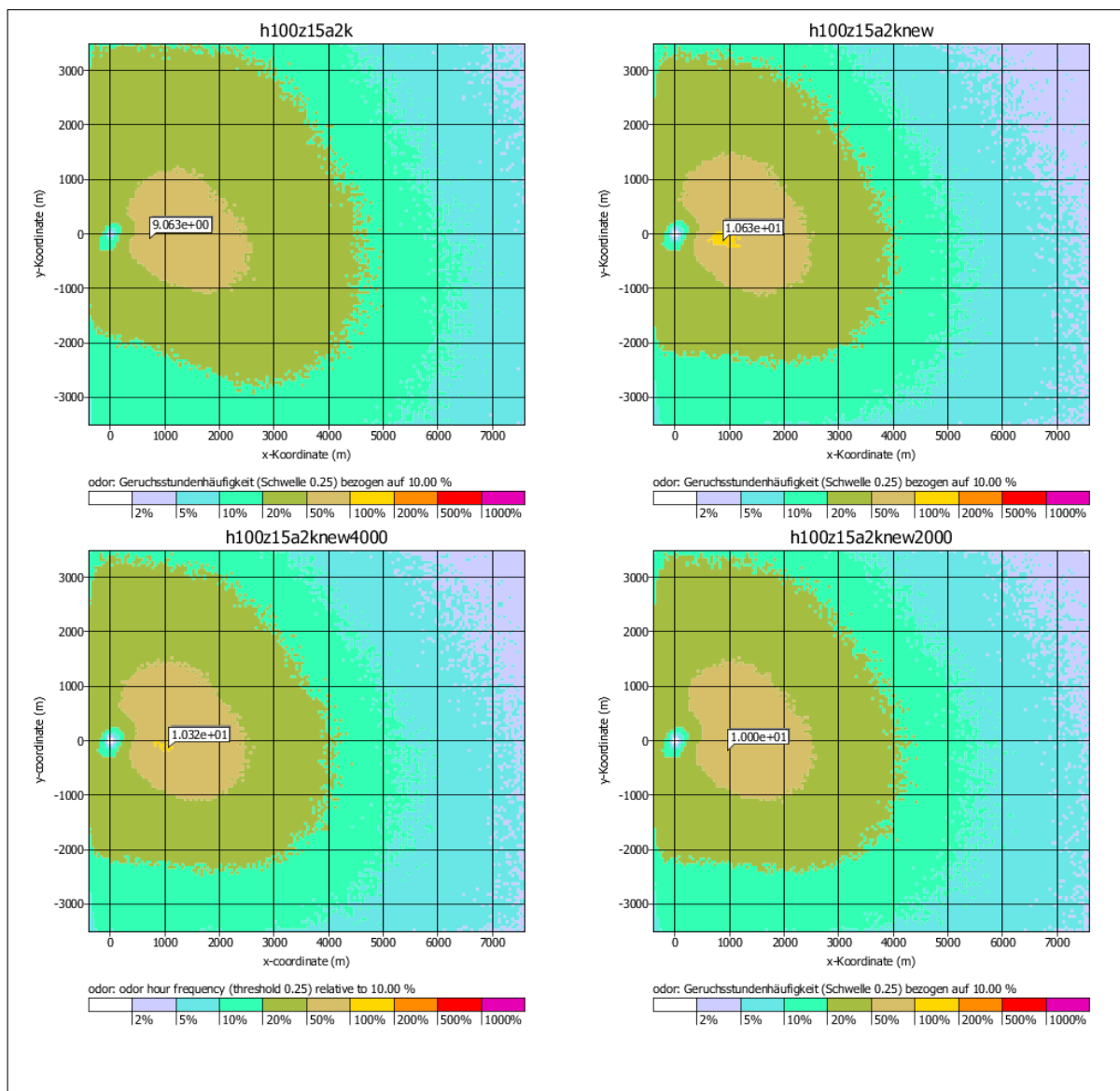


BILD 3.12: Quellhöhe 100 m, Rauigkeitslänge 1.5 m, Geruchsstundenhäufigkeit.

### 3.2.9.7 Mischungsschichthöhe

Die überarbeitete Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) legt die Bestimmung der Mischungsschichthöhe fest (konform zur TA Luft 2002), so dass eine eigene Festlegung in der TA Luft nicht mehr erforderlich ist.

Eine grundlegende Änderung impliziert die Tatsache, dass gemäß Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) die Mischungsschichthöhe für labile Schichtung jahreszeitabhängig ist. Zum einen findet hierdurch das erste Mal ein absoluter Zeitbezug in die rechentechnische Umsetzung AUSTAL2000 Eingang (intern konnten bisher alle Zeitangaben auf relative Zeitangaben abgebildet werden). Zum anderen wird hiermit ein (weiterer) grundsätzlicher Unterschied zwischen einer meteorologischen Zeitreihe und einer Ausbreitungsklassenstatistik (AKS) eingeführt, da in einer AKS keine zeitliche Variation abgebildet werden kann.

### 3.2.9.8 Verdrängungshöhe

Die überarbeitete Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) legt die Bestimmung der Verdrängungshöhe fest (konform zur TA Luft, 2002), so dass eine eigene Festlegung in der TA Luft nicht mehr erforderlich ist.

### 3.2.9.9 Niederschlagsintensität

Mit der in der überarbeiteten TA Luft neu hinzugekommenen Berechnung der nassen Deposition ist eine Vorgabe der Niederschlagsintensität erforderlich.

Standardmäßig sind solche Daten nicht an jedem Standort verfügbar. In dem Forschungsvorhaben RESTNI (HABERLANDT & BERNDT, 2017) wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem Niederschlagszeitreihen mit Hilfe eines geostatistischen Interpolationsverfahrens konsistent mit den üblichen meteorologischen Variablen auf einen vorgegebenen Standort übertragen werden können. Die Projektergebnisse zeigen, dass eine solche Übertragung in erster Linie für eine meteorologische Zeitreihe praktikabel ist, während die Erweiterung einer Ausbreitungsklassenstatistik auf den vierten Parameter *Niederschlag* mit erheblichen Annahmen verbunden ist.

In einem Folgeprojekt zu RESTNI (Forschungszahl 3715 53 200 0) wird ein Verfahren entwickelt, über das für einen vorgegebenen Standort und ein vorgegebenes Jahr eine Zeitreihe mit Niederschlagsintensitäten vom Umweltbundesamt bereitgestellt werden kann.

### 3.2.10 Abschnitt *Berücksichtigung der statistischen Unsicherheit*

Kein Änderungsvorschlag.

## 3.2.11 Abschnitt *Berücksichtigung von Bebauung*

### 3.2.11.1 Windfeldmodelle und Bebauung

Nach den Vorgaben der TA Luft (2002) sind Einflüsse der Bebauung auf die Immission im Rechengebiet zu berücksichtigen. Ob und wie dies geschieht, wird anhand des Verhältnisses von Schornsteinbauhöhe  $h_q$  zu den maßgeblichen Gebäudehöhen  $h_b$  und dem Abstand  $x$  der Gebäude vom Schornstein entschieden. Maßgeblich für die Beurteilung sind alle Gebäude, deren Abstand vom Schornstein (Emissionsquelle) geringer ist als das 6-fache der Schornsteinbauhöhe. Während bei einer Schornsteinbauhöhe von mehr als dem 1.7-fachen der Gebäudehöhen eine Berücksichtigung der Bebauung bei der Ausbreitungsrechnung über eine geeignete Rauigkeitslänge und Verdrängungshöhe als ausreichend gilt, werden bei Schornsteinbauhöhen zwischen dem 1.7-fachen und 1.2-fachen der Gebäudehöhen und bei Gewährleistung freier Abströmung geeignete diagnostische mikroskalige Windfeldmodelle empfohlen. Der Bereich von Schornsteinbauhöhen unter dem 1.2-fachen der Gebäudehöhen ist in der TA Luft (2002) nicht geregelt.

Dieser unregelte Bereich führt in der Praxis immer wieder zu Problemen bezüglich des Anwendungsbereiches mikroskaliger Windfeldmodelle. Unklar ist, in welchen Fällen ein diagnostisches Modell eingesetzt werden darf und in welchen ein prognostisches Modell eingesetzt werden muss. Ein diagnostisches mikroskaliges Modell ist nicht in der Lage, die Strömungsverhältnisse in unmittelbarer Gebäudenähe im Detail zu beschreiben. Diese beeinflussen jedoch stark das Ausbreitungsverhalten von Emissionen aus einer gebäudenahen Quelle und in Folge die Immissionen an Aufpunkten in der unmittelbaren Nachbarschaft. Andererseits erfordert ein prognostisches mikroskaliges Modell erheblich höhere Sachkenntnis in der Anwendung. Hinzu kommt, dass das mikroskalige diagnostische Modell TALdia gerade in dem Bereich von Emissionshöhen unter dem 1.2-fachen der Gebäudehöhen validiert worden ist (JANICKE & JANICKE, 2004).

Die Praxiserfahrungen der letzten Jahre zeigten, dass eine Abgrenzung des Anwendungsbereiches allein anhand des Verhältnisses von Quellhöhe zu den Höhen der Umgebungsbebauung nicht sinnvoll ist. Bei gebäudenahen Quellen ist es sachgerechter, die Entfernung des immissionsseitig relevanten Aufpunktes von Quelle und Gebäude als Grundlage heranzuziehen: Ist der zu betrachtende Aufpunkt weit genug von Quelle und Gebäude entfernt, dann spielen Modellierungsdetails in unmittelbarer Gebäudenähe keine so bedeutende Rolle mehr, da die Schadstoffkonzentration bis zum Erreichen des Aufpunktes aufgrund von Durchmischung und Aufweitung der Schadstofffahne bereits hinreichend homogen ist. Das gleiche Argument trifft für eine ausgedehnte Quelle oder eine größere Entfernung zwischen Quelle und Gebäude zu, auch wenn hier der relevante Aufpunkt nahe am Gebäude liegt: Die Konzentrationsfahne ist im Bereich des Gebäudes so aufgeweitet, dass Modellierungsdetails der Strömungsverhältnisse am Gebäude keine entscheidende Rolle mehr spielen, denn eine homogene Konzentrationsverteilung bleibt im wesentlichen homogen, auch wenn die Strömungsverhältnisse stark inhomogen sind.

Auch wenn künftig ein Teil der gebäudenahen Quellpositionen durch die Vorgabe in Bezug auf Rezirkulationszonen nach Richtlinie VDI 3781 Blatt 4 (2017) ausgeschlossen wird, wurde

in den Workshops zu diesem Forschungsvorhaben (siehe Kapitel 5) der Wunsch geäußert, auf Grundlage der bisherigen Erfahrungen den Abschnitt mit den anzuwendenden Windfeldmodellen neu zu formulieren und den unergelbten Bereich zu verkleinern.

Durch eine Auswertung älterer Daten aus Windkanaluntersuchungen mit bodennahen Quellen in Industrieanlagen (THEURER, 1993) wurde versucht, den Abstand zwischen Quelle und Aufpunkt zu bestimmen, ab dem der Einfluss einzelner Gebäude auf die Schadstofffahne vernachlässigbar gering ist. Spätestens ab diesem Entfernungsbereich spielt nicht nur die Art des eingesetzten Windfeldmodells, sondern auch der Störeinfluss des einzelnen Gebäudes selbst nur noch eine untergeordnete Rolle. Dieser Abstand wird auch Homogenisierungsradius genannt, weil bis dahin die Konzentrationsgradienten hinreichend klein geworden sind. Für einige nahe beieinander liegende, bodennahe Quellen in einer Industrieanlage wurde an mehreren festen Aufpunkten in verschiedenen Abständen  $x$  das Verhältnis der maximal beobachteten Konzentration  $c_{\max}$  zu der über die Quellen gemittelten Konzentration  $c_{\text{mittel}}$  bestimmt, siehe Bild 3.13. Die Quellentfernung wurde dabei mit der mittleren Höhe der Bebauung  $H$  normiert. Die rasterförmige Bebauung der Industrieanlage wurde zum einen parallel zu den Straßenzügen (Anströmungsrichtung 0 Grad) und zum anderen unter einem Winkel von 45 Grad angeströmt.

Mit zunehmender Entfernung von der Quelle nähern sich die maximalen Konzentrationen den mittleren Werten an den Aufpunkten an – Indiz dafür, dass hier die Konzentration immer homogener wird und der Einfluss einzelner Gebäude auf die Ausbreitung zurückgeht. Bei der Anströmung unter 0 Grad führte die Änderung einer Quellposition in einem Fall zu einem anderen Ausbreitungsverhalten der Fahne, was sich in Bild 3.13 in einer geringeren Abnahme des Verhältnisses  $c_{\max}/c_{\text{mittel}}$  mit zunehmendem Quellabstand widerspiegelt.

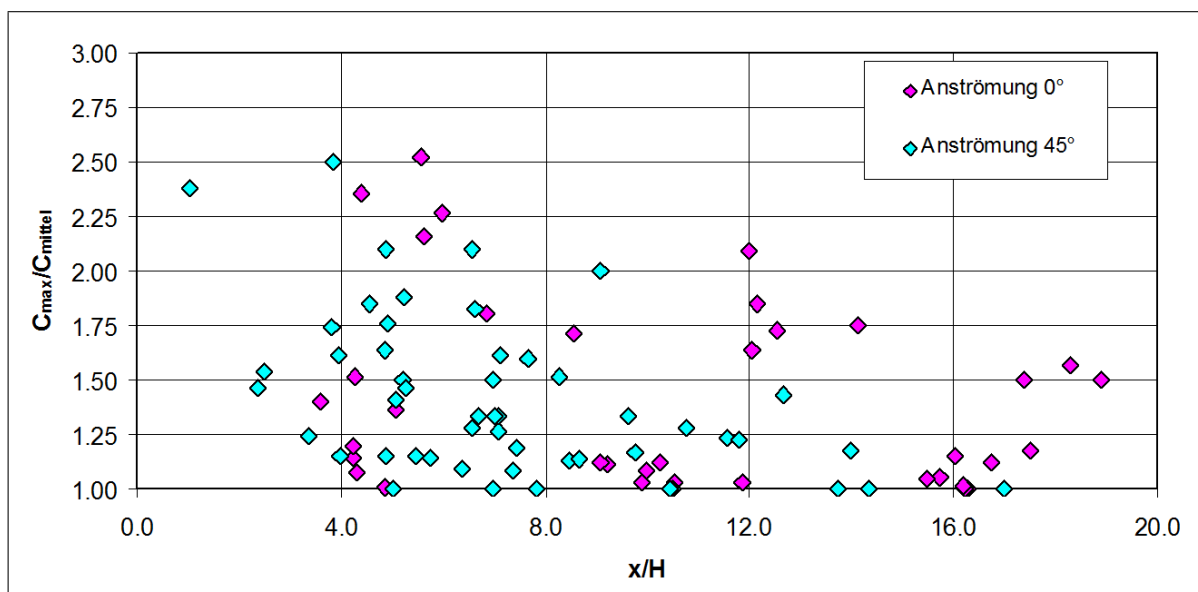


BILD 3.13: Vergleich der normierten maximalen Konzentrationen  $c_{\max}/c_{\text{mittel}}$  in Abhängigkeit von der normierten Quellentfernung  $x/H$  für zwei Anströmrichtungen.

Obwohl sich im Rahmen des Forschungsvorhabens erste Hinweise auf eine hinreichende Homogenisierung ab einem Abstand von etwa  $6H$  (für größere Abstände ist das Verhältnis  $c_{\max}/c_{\text{mittel}}$  meist kleiner als 2) ergaben, konnte aufgrund der insgesamt unzureichenden Datenlage keine

quantitative Neuformulierung eines Abgrenzungskriteriums im Bereich kleinerer Abstände zum Einsatz diagnostischer und prognostischer Windfeldmodelle erarbeitet werden.

Die Neuformulierung wurde daher auf allgemeine Hinweise beschränkt, siehe Bild 3.14 (vgl. das entsprechende Bild in Richtlinie VDI 3783 Blatt 13, 2010). Während bei Quellhöhen und Quellabständen im grauen Bereich der Bebauungseinfluss für die Ausbreitungsmodellierung als vernachlässigbar angesehen wird, wird er im gelben Bereich vereinfacht durch den Ansatz einer geeignet erhöhten Rauigkeitslänge erfasst. Im blau markierten Bereich wird der Einsatz eines diagnostischen Windfeldmodells empfohlen, das die Gebäude explizit auflöst. Befinden sich die immissionsseitig relevanten Aufpunkte innerhalb des unmittelbaren Einflussbereiches der quellnahen Gebäude, dann sollte der Einsatz eines prognostischen Windfeldmodells geprüft werden, das den Anforderungen der Richtlinie VDI 3783 Blatt 9 (2005) genügt.

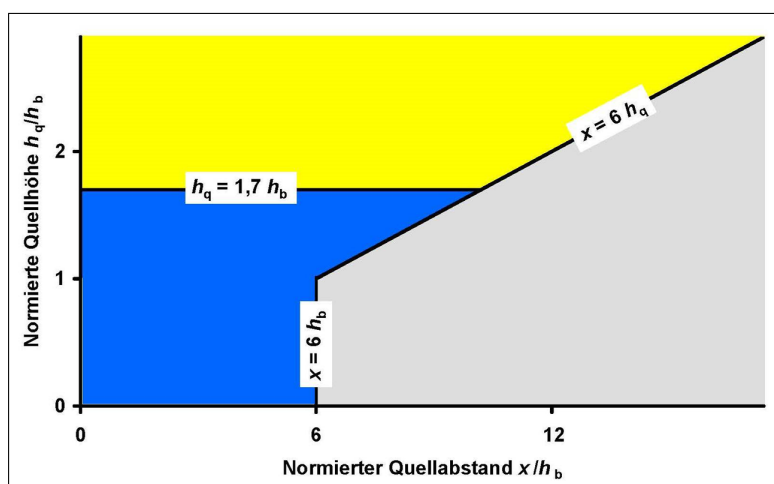


BIld 3.14: Darstellung zur vorgeschlagenen Neuformulierung der Abgrenzungen zur Berücksichtigung der Bebauung (Schornsteinbauhöhe  $h_q$ , Gebäudehöhe  $h_b$ , vgl. das entsprechende Bild in Richtlinie VDI 3783 Blatt 13, 2010). Hellgrau: vernachlässigbar. Gelb: über erhöhte Rauigkeit. Blau: über Windfeldmodell, in der Regel diagnostisch, gegebenenfalls prognostisch nach Prüfung der Lage der Aufpunkte.

### 3.2.11.2 Äquivalente Quaderhöhe

Im Zuge der Weiterentwicklung der methodischen Grundlagen der TA Luft wurde ein ergänzendes Forschungsvorhaben durch die Länder Baden-Württemberg, Bayern, Berlin, Hessen und Thüringen betreut, das sich mit der Bestimmung einer äquivalenten Quaderhöhe für nicht-quaderförmige Gebäude (Gebäude mit geneigten Dächern) bei der numerischen mikroskaligen Modellierung befasst. Im Folgenden werden die Problematik, die Vorgehensweise und das Ergebnis kurz beschrieben. Ausführliche Erläuterungen zu den im Windkanal durchgeführten Untersuchungen und ihren Ergebnissen finden sich in dem Bericht *Bestimmung der äquivalenten Quaderhöhe für die numerische mikroskalige Modellierung durch Untersuchungen im Windkanal* (THEURER & GAUWEILER, 2016).

Die meisten der derzeit bei der Ausbreitungsmodellierung verwendeten diagnostischen und auch prognostischen Windfeldmodelle können Gebäude nur vereinfacht als Quader mit einem Flachdach in ihrem Rechengitter abbilden, unabhängig von der Dachform des Originals. Bereits bei einfachen geneigten Dachformen, wie den häufig anzutreffenden Satteldächern, löst die Strömung aufgrund der unterschiedlichen Geometrien der Kanten wie dem First anders ab als bei Quadern. Dies wirkt sich, wie in Bild 3.15 schematisch dargestellt, auf die sich an den Gebäuden einstellenden Rezirkulationszonen aus.

Die Ähnlichkeit der Strömungsfelder ist aber Voraussetzung für eine möglichst naturgetreue Strömungsmodellierung und anschließende Ausbreitungsrechnung. Die in das Bild 3.15 eingetragene Schadstoffquelle auf dem leeseitigen Gebäude befindet sich beispielsweise innerhalb der Rezirkulationszone des vorgelagerten Originalgebäudes mit einem Satteldach. Wird das vorgelagerte Gebäude im Modell mit Hilfe eines Ersatzquaders mit einem Flachdach der mittleren Dachhöhe  $(H_{\text{First}} + H_{\text{Traufe}})/2$  abgebildet, liegt sie dagegen außerhalb dessen Rezirkulationszone. Gänzlich andere Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse können die Folge sein, mit erheblich voneinander abweichenden Immissionen, besonders in Gebäude- und Bodennähe.

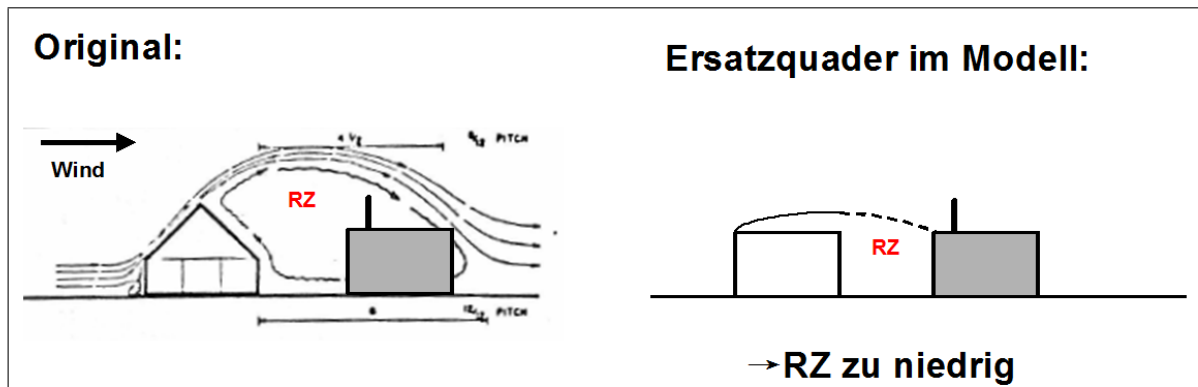


BILD 3.15: Rezirkulationszonen (RZ) eines Originalgebäudes mit einem 45-Grad-Satteldach und eines Ersatzquaders mit einer mittleren Höhe zwischen Traufe und First des Originals im numerischen Modell (schematische Darstellung).

Da die Grundflächen der Gebäude vorgegeben sind, stellt sich die Frage nach der bei der Modellierung zu wählenden Höhe der Ersatzquader, damit die Strömungsfelder in der Realität und ihre Umsetzung im Rechenmodell möglichst ähnlich sind.

In dem ergänzenden Forschungsvorhaben wurde durch Untersuchungen in einem Grenzschichtwindkanal geprüft, wie die Höhe der Ersatzquader in der Windfeldmodellierung bei der Reduktion von Gebäuden mit geneigten Dächern auf Quader mit Flachdächern zu wählen ist. Der Windkanal eignet sich hierfür besonders, da in ihm als physikalisches Modell beliebig geformte Originalgebäude unabhängig von einem Rechengitter nachgebildet werden können. Bei Einhaltung der Modellgesetze werden die Umströmung einschließlich der Rezirkulationszonen und die Ausbreitungsvorgänge in Gebäudenähe naturgetreu wiedergegeben, wie zum Beispiel der Vergleich von Windkanaldaten mit Feldmessungen von PERNPEINTNER ET AL. (1988) zeigt.

Die Untersuchung beschränkte sich auf die am häufigsten verbreiteten Satteldächer mit unterschiedlichen Dachneigungen. Bereits bei dieser einfachen Dachform gab es in der bisherigen Praxis verschiedene Vorgehensweisen bei der Wahl der Höhen des Ersatzquaders. Häufig verwendet wurde die mittlere Höhe zwischen Traufe und First des Satteldaches (nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 10, 2010) oder die Firsthöhe (nach Mitteilung verschiedener Modellierer).

Bei den Versuchen im Windkanal mit Modellgebäuden im Maßstab 1:200 wurde neben dem Neigungswinkel der Dächer auch das Längen- zu Breitenverhältnis und teils auch die Traufhöhe der Gebäude variiert, siehe Bild 3.16 mit einigen Beispielen. Betrachtet wurden sowohl Einzelgebäude als auch Gebäude mit Vorbebauungen bei mehreren Anströmrichtungen. Eine mäßig raue Grenzschicht mit einer Rauigkeitslänge von ca. 0.02 m repräsentierte ein offenes



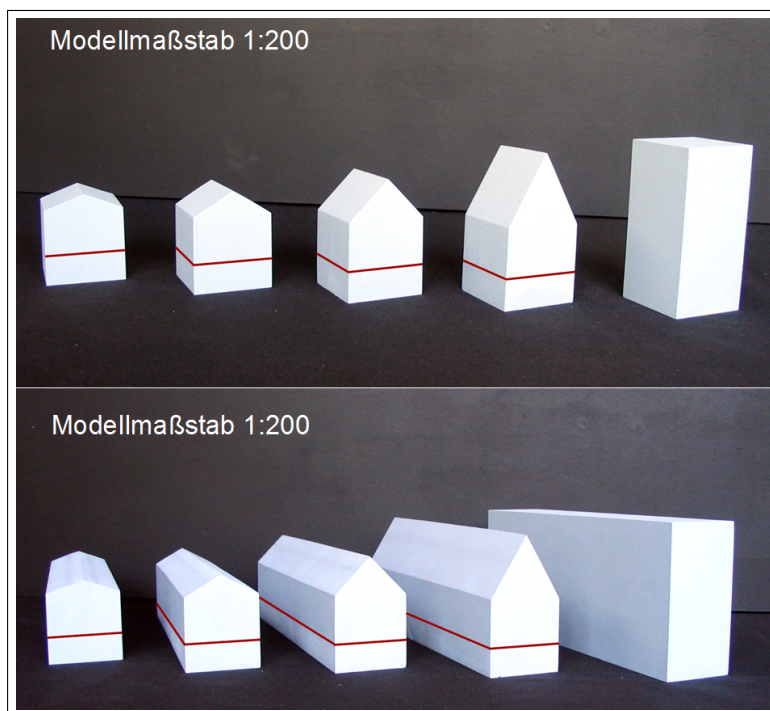


BILD 3.16: Gebäudemodelle mit Satteldächern. Von links: Dachneigungswinkel 20°, 30°, 45°, 60°, höhenverstellbarer Quader. Oben: Längen- zu Breitenverhältnisse 1:1. Unten: 1:5. Die bräunlichen Linien entsprechen einer simulierten Traufhöhe von 6 m.

Gelände, eine zweite Grenzschicht mit einer Rauigkeitslänge von 0.5 m ein mitteldicht bebauter Gelände. Bild 3.17 zeigt eine der zahlreichen untersuchten Konfigurationen im Windkanal.

Ausgegangen wurde von der Annahme, dass sich der Einfluss der Gebäude auf die Strömung und damit auf das Ausbreitungsverhalten von Emissionen aus gebäudenahen Quellen über die Rezirkulationszonen maßgeblich beschreiben lässt. Die Abmessungen der Rezirkulationszonen wurden mit verschiedenen, voneinander unabhängigen Methoden der Strömungssichtbarmachung bestimmt und mittels ergänzender Strömungsmessungen und Literaturdaten von HOSKER (1981) und weiteren Autoren überprüft.

Die experimentell ermittelten Abmessungen der Rezirkulationszonen der Gebäude mit den Satteldächern (als Originale) wurden mit denen von Quadern der gleichen Grundfläche, aber unterschiedlicher Höhe (gesetzt auf Traufhöhe, mittlerer Höhe zwischen First und Traufe und Firsthöhe der Satteldächer) verglichen. Besonderer Wert wurde auf die Höhe der Rezirkulationszonen gelegt. Sie spielt bei der Bestimmung der Höhe von Schornsteinen eine wichtige Rolle. Nur oberhalb dieser Zone findet ein – nach Richtlinie VDI 3781 Blatt 4 (2017) definierter – ungestörter Abtransport der Abgase mit der freien Luftströmung statt.

Aus dem Vergleich der Abmessungen wurden jeweils die Quader ermittelt, deren Höhen der Rezirkulationszonen zu denen der Originalgebäude mit den Satteldächern möglichst ähnlich waren, siehe Bild 3.18 für Einzelgebäude mit einem Längen- zu Breitenverhältnis 1:5 und verschiedenen Dachneigungen bei einer Anströmung unter 45 Grad. Auch die Längen und Breiten der Rezirkulationszonen wurden in die Überlegungen einbezogen.

Firsthohe Ersatzquader boten, unabhängig von den Gebäudemaßen und der Anströmrichtung, insgesamt eine bessere Übereinstimmung der Rezirkulationszonen mit denen der Originale als die niedrigeren Quader. Diese zunächst für frei stehende Einzelgebäude in offenem Gelände

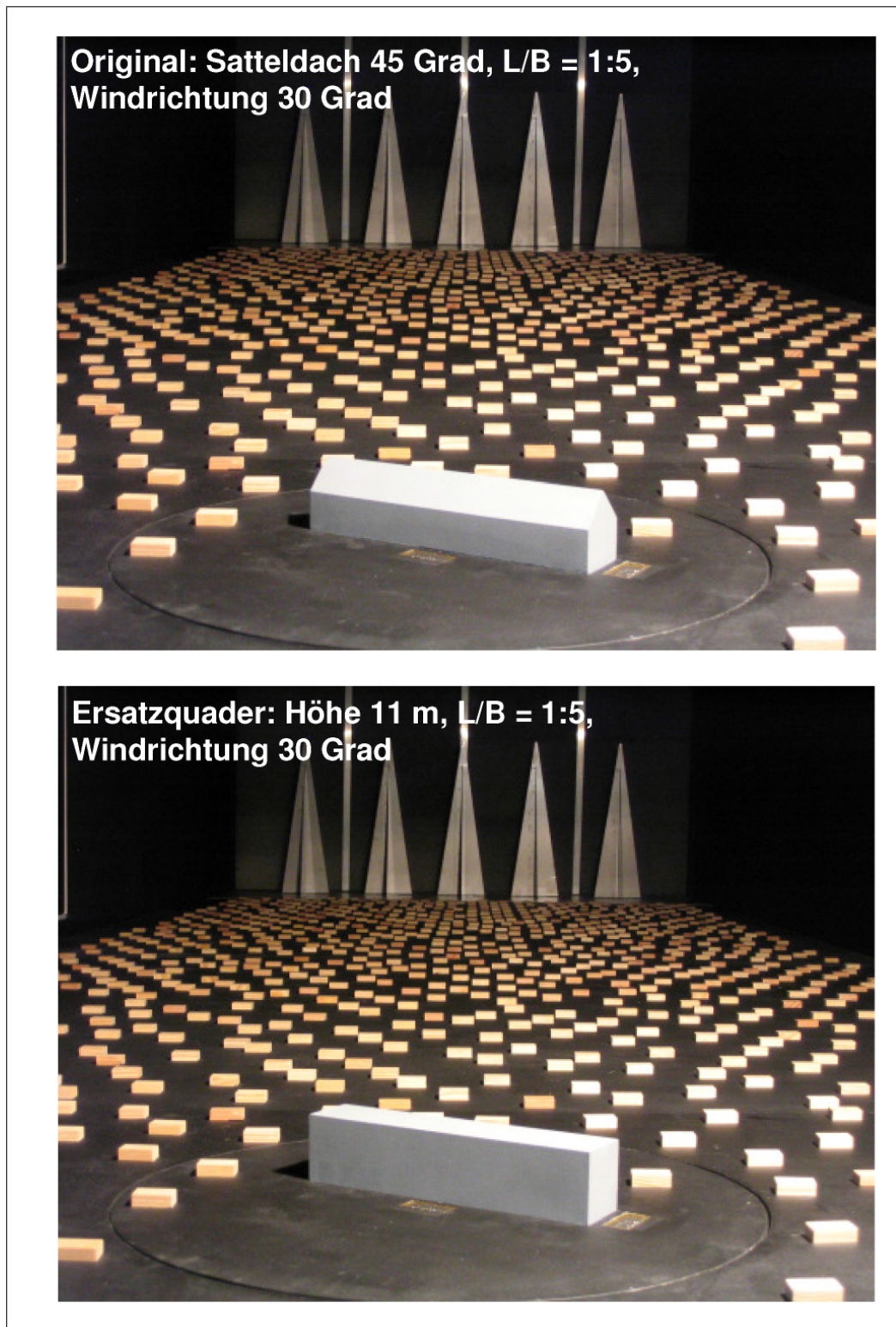


BILD 3.17: Originalgebäude und Ersatzquader der Höhe 11 m im Windkanal, mäßig raue Grenzschicht, Blick entgegen der Anströmung.

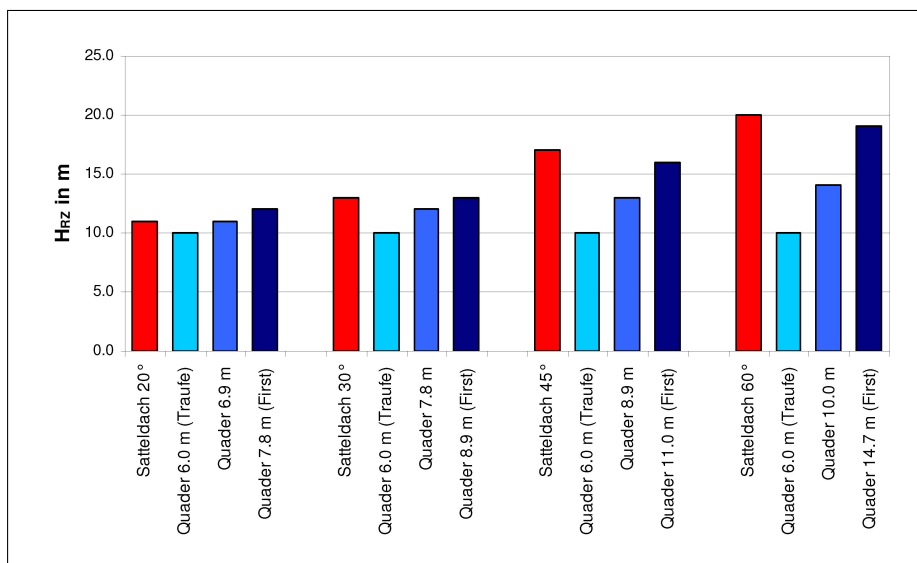


BILD 3.18: Beispiel für eine Auswertung der Windkanalversuche: Höhen der Rezirkulationszonen  $H_{RZ}$  für die Anströmrichtung 45 Grad und ein Längen- zu Breitenverhältnis des Einzelgebäudes von 1:5.

abgeleitete Regel gilt auch für Gebäude mit einer Vorbebauung.

Die größere Ähnlichkeit des Strömungsfeldes zwischen Original und firsthohem Ersatzquader im Vergleich zu den anderen Quaderhöhen sollte sich auch in dem Ausbreitungsverhalten von mit der Strömung transportierter Stoffe niederschlagen. Zur Verifizierung der aufgestellten Regel wurden daher Konzentrationsfelder im Nachlauf verschiedener Gebäudekonfigurationen verglichen. Bei den Konzentrationsmessungen mit einem bodennah in der Rezirkulationszone freigesetzten Spurenstoff lieferten die firsthohen Ersatzquader in den allermeisten Fällen eine bessere Übereinstimmung der Konzentrationsfelder mit denen des Originals als mittelhohe Quader.

Für die Neufassung der TA Luft wurde daher die Empfehlung ausgesprochen, die Ersatzquader firsthoch zu wählen.

### 3.2.12 Abschnitt *Berücksichtigung von Geländeunebenheiten*

Es wird auf die zwischenzeitlich erarbeitete Evaluierungs-Richtlinie VDI 3783 Blatt 7 (2015) und auf die Richtlinie VDI 3783 Blatt 16 (2015) zur Erstellung einer Windfeldbibliothek und der Wahl der Anemometerposition verwiesen.

### 3.2.13 Abschnitt *Verwendung einer Häufigkeitsverteilung der stündlichen Ausbreitungssituationen*

Die Bestimmung der Ausbreitungsklasse nach Klug/Manier wird inzwischen in einer eigenen Richtlinie festgelegt (VDI 3782 Blatt 6, 2017), die auch die Klassierung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung vorgibt (konform zur TA Luft, 2002). Daher ist eine eigene Festlegung in der TA Luft nicht mehr erforderlich.

### 3.2.14 Abschnitt *Ausbreitungsrechnung zur Bestimmung der Schornsteinhöhe*

In Kapitel 2 dieses Berichtes ist die überarbeitete Bestimmung der Schornsteinhöhe beschrieben. Grundlage sind — einmalige — Ausbreitungsrechnungen, die konsistent mit den Festlegungen des Anhangs *Ausbreitungsrechnung* der überarbeiteten TA Luft sind und darüber hinaus weitere Festlegungen erfordern. Diese Festlegungen werden in einem neuen Abschnitt des Anhangs *Ausbreitungsrechnung* aufgeführt, die programmtechnische Umsetzung ist das Programm *BESMIN*:

1. Die Ausbreitungsrechnungen sind für ebenes Gelände durchzuführen.
2. Die Rauigkeitslänge wird auf den Wert 0.5 m gesetzt (ein für Anwendungen in Deutschland typischer Wert), die Verdrängungshöhe auf das 6-fache der Rauigkeitslänge und die Anemometerhöhe auf 10 m über der Verdrängungshöhe.
3. Es werden die in einer Ausbreitungsklassenstatistik nach Richtlinie VDI 3782 Blatt 6 (2017) definierten, ungewichteten Einzelsituationen betrachtet ohne die Ausbreitungsklassen IV und V.
4. Eine Abgasfahnenüberhöhung wird berücksichtigt, indem als Freisetzungshöhe die effektive Quellhöhe (Bauhöhe plus Endüberhöhung) verwendet wird.
5. Die Ausbreitungsrechnung wird für ein passives, nicht deponierendes Spurengas durchgeführt.
6. Die relative statistische Streuung des Konzentrationswertes, der die Schornsteinhöhe bestimmt, soll 5 Prozent nicht überschreiten.

Für jede der meteorologischen Einzelsituationen wird die effektive Quellhöhe bestimmt, mit welcher der vorgegebene S-Wert gerade eingehalten wird (einmalig erstellte Datenbank, wird im Rahmen von *BESMIN* bereitgestellt). Für jede Einzelsituation wird danach mit Hilfe des Überhöhungsmodells durch Variation der Bauhöhe diejenige Bauhöhe bestimmt, die in Summe mit der dazugehörigen Endüberhöhung gerade die zuvor bestimmte effektive Quellhöhe ergibt. Die höchste dieser Bauhöhen ist die anzusetzende Schornsteinhöhe.

## 3.3 Abstandskurven für Ammoniak und weitere Stoffe

### 3.3.1 Einleitung

Der Anhang 1 der TA Luft (2002) enthält eine Abstandskurve für den Mindestabstand von Anlagen zu empfindlichen Pflanzen als Funktion der Ammoniakemission. Die Kurve beruht auf Ausbreitungsrechnungen gemäß Anhang *Ausbreitungsrechnungen* der TA Luft (2002), siehe Abschlussbericht zu AUSTAL2000 (JANICKE & JANICKE, 2003).

Es wurde geprüft, ob das überarbeitete Grenzschichtmodell nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) eine Anpassung der Abstandskurve erforderlich macht. Zum anderen wurden für bodennahe Quellen Abstandskurven für die Deposition von Stickstoff aufgrund von  $\text{NH}_3$ - und  $\text{NO}_x$ -Emissionen und die Deposition von Schwefel aufgrund von  $\text{SO}_2$ -Emissionen entwickelt. Diese Untersuchungen fanden im Zusammenhang mit der Entwicklung der Richtlinie VDI 3783 Blatt 15.1 statt (Umweltmeteorologie; Konzentration und Deposition von eutrophierenden und versauernden Luftbeimengungen; Methode zur vereinfachten Abstandsbestimmung; Quellen bis zu einer Höhe von 20 m).

### 3.3.2 Meteorologische Datensätze

Der  $\text{NH}_3$ -Abstandskurve der TA Luft (2002) liegen Ausbreitungsrechnungen mit Ausbreitungs-klassenstatistiken (AKS) an 17 Standorten in Deutschland zugrunde (siehe JANICKE & JANICKE, 2003). Diese Datensätze stehen nicht mehr zur Verfügung. Daher wurden für diese Untersuchungen 23 AKS verwendet, die im Rahmen der Richtlinie VDI 3894 Blatt 2 (2012) zum Einsatz gekommen waren. Die Standorte der AKS sind in Bild 3.19 dargestellt. Mit dieser Auswahl sollte sich der Einfluss der Variabilität meteorologischer Verhältnisse in Deutschland hinreichend gut abschätzen lassen.

Die AKS enthalten keine Niederschlagsinformationen. Daher wurde unter der vereinfachenden Annahme, dass während indifferenter Schichtung Niederschlag mit einer Intensität von 1 mm/h und einem (im Schnitt relativ hoch angesetzten) Jahresniederschlag von 800 mm fällt, ein Satz von 23 um Niederschlag erweiterte AKS erzeugt, im Folgenden als AKSN bezeichnet.

### 3.3.3 Theorie

Es wird das Jahresmittel der bodennahen Konzentration und der Deposition betrachtet, wobei für die betrachteten Substanzen  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$  und  $\text{SO}_2$  und bodennahen Quellen die trockene Deposition den Hauptbeitrag liefert. Ausbreitungsrechnungen zeigen, dass der Maximalwert  $j(r)$  der Immission im Abstand  $r$  von der bodennahen Quelle bis in Entfernungen von einigen 10 Kilometern näherungsweise durch folgendes Abstandsverhalten wiedergegeben wird:

$$j(r) = \tilde{F} \frac{Q}{r^2} \quad (3.12)$$

Hierbei ist  $Q$  die als konstant angenommene Emissionsrate und  $\tilde{F}$  ein empirischer Faktor. Er hängt von der eingesetzten meteorologischen Jahreszeitreihe und Rauigkeitslänge, den Depositionseigenschaften der betrachteten Substanz und der Art der Immission (Konzentration oder Deposition) ab.

Es wird gefordert, dass der Abstand  $r$  mindestens so groß sein soll, dass eine vorgegebene Immissionsschwelle  $j_s$  unterschritten wird. Aus der Bedingung  $j(r > r_s) < j_s$  folgt der Mindestabstand

$$r_s(Q) = \sqrt{\tilde{F} \frac{Q}{j_s}}. \quad (3.13)$$

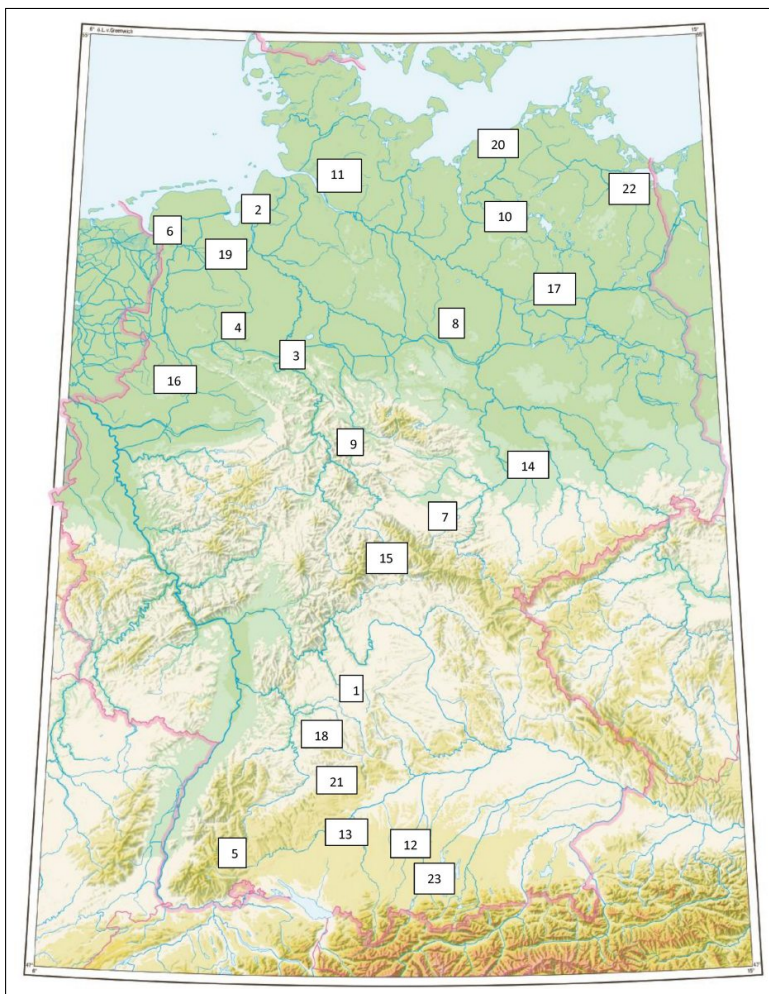


BILD 3.19: Standorte der in diesen Tests verwendeten 23 AKS (Hintergrundkarte: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main).

Aus einer Ausbreitungsrechnung kann der Verlauf des Mindestabstandes als Funktion der Emissionsrate unmittelbar bestimmt werden. Liest man aus der so gewonnenen Kurve für einen Abstand  $r_a$  die dazugehörige Emissionsrate  $Q_a$  ab, dann kann daraus der empirische Faktor zu

$$\tilde{F} = r_a^2 \frac{j_s}{Q_a} \quad (3.14)$$

bestimmt werden. Für den Abstand  $r_a$  sollte ein Wert gewählt werden, der für die betrachtete Problemstellung typisch ist, denn nur bei diesem Abstand stimmt der theoretische Verlauf  $j(r)$  exakt mit dem durch die Ausbreitungsrechnung bestimmten überein.

### 3.3.4 Tests und Vergleiche

#### 3.3.4.1 Das bisherige NH<sub>3</sub>-Abstandsdiagramm

Das NH<sub>3</sub>-Abstandsdiagramm der TA Luft (2002) beruht auf Testrechnungen für eine von 0 m bis 5 m über Grund verschmierte passive Quelle in ebenem Gelände mit 0.1 m Rauiglänge,

NH<sub>3</sub> mit der Depositionsgeschwindigkeit 0.01 m/s ohne nasse Deposition, 17 AKS an über Deutschland verteilten Standorten und einen Schwellenwert  $c_s = 7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Die Rechnungen und Abstandskurven sind im Abschlussbericht zu AUSTAL2000 erläutert (JANICKE & JANICKE, 2003), Bild 3.20 zeigt die Abstandskurven aus dem Bericht. Mit dargestellt sind für alle Kurven die Werte  $Q_a$  (in Mg/a) mit  $r_a = 500$  m. Als konservative Abschätzung wurde für die Abstandskurve der TA Luft (2002) per Konvention die vierthöchste Abstandskurve gewählt, für sie ist  $Q_a = 15$  Mg/a. Der Schwellenwert von  $7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  wurde bis zum Erscheinen der endgültigen TA Luft (2002) auf  $3.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  abgesenkt, so dass sich die Abstandskurve der TA Luft (2002) zu

$$r = \sqrt{\left(\frac{\tilde{F}}{j_s}\right) Q} \tag{3.15}$$

mit

$$\frac{\tilde{F}}{j_s} = \left(500^2 \frac{7.5}{15}\right) \frac{1}{3} \frac{\text{m}^2\text{a}}{\text{Mg}} = \frac{500^2}{6.0} \frac{\text{m}^2\text{a}}{\text{Mg}} = 41667 \frac{\text{m}^2\text{a}}{\text{Mg}} \tag{3.16}$$

ergab.<sup>3</sup>

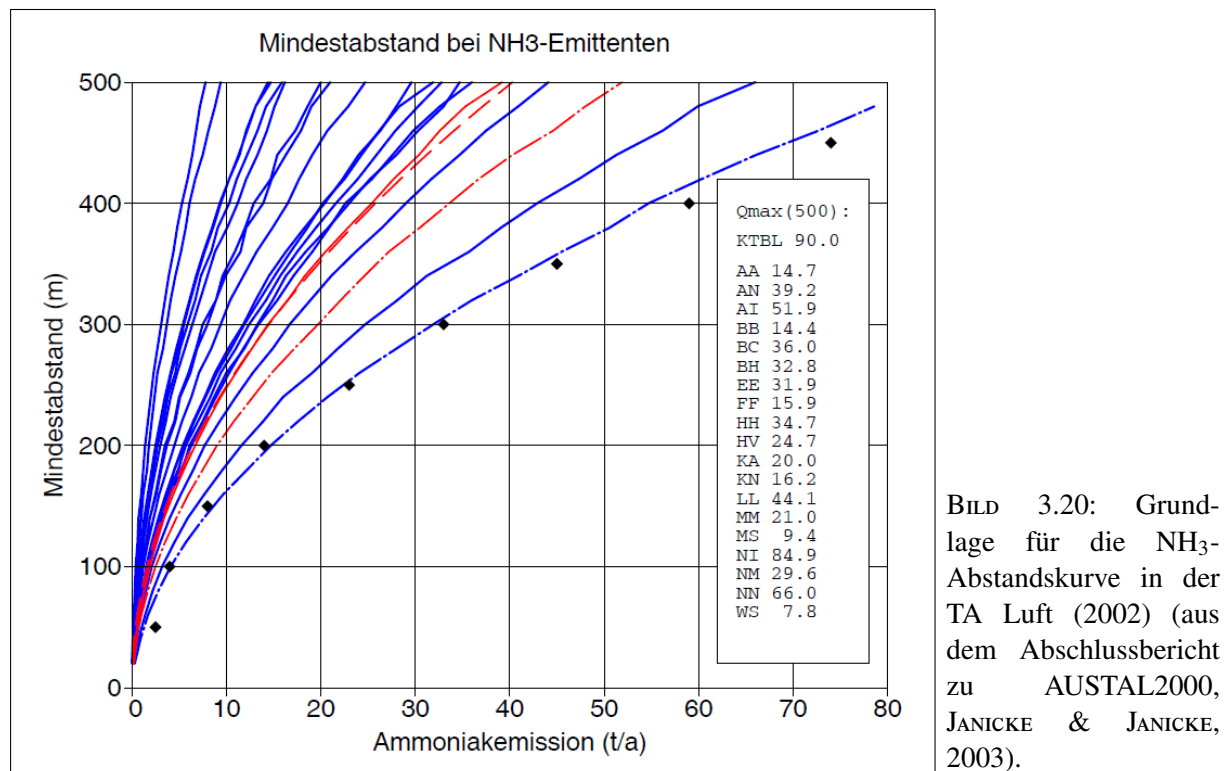


BILD 3.20: Grundlage für die NH<sub>3</sub>-Abstandskurve in der TA Luft (2002) (aus dem Abschlussbericht zu AUSTAL2000, JANICKE & JANICKE, 2003).

Diese Situation wurde mit den 23 AKS nachgerechnet, siehe Bilder 3.21 und 3.22. Die durchgezogenen Linien zeigen die aus den Konzentrationsverteilungen numerisch bestimmten Abstandskurven, die gestrichelten Linien die analytischen Näherungen. In dem Bild sind auch wieder die Werte  $Q_a$  für  $r_a = 500$  m aufgeführt, wobei der Wert, der 3 mal unterschritten wird, mit einem Stern versehen ist (in den kommenden Bildern sind die dazugehörigen zwei Kurven rot statt blau dargestellt).

<sup>3</sup>Der in der TA Luft (2002) aufgeführte Zahlenwert 41668 resultiert aus einer anderen Rundungsabfolge.

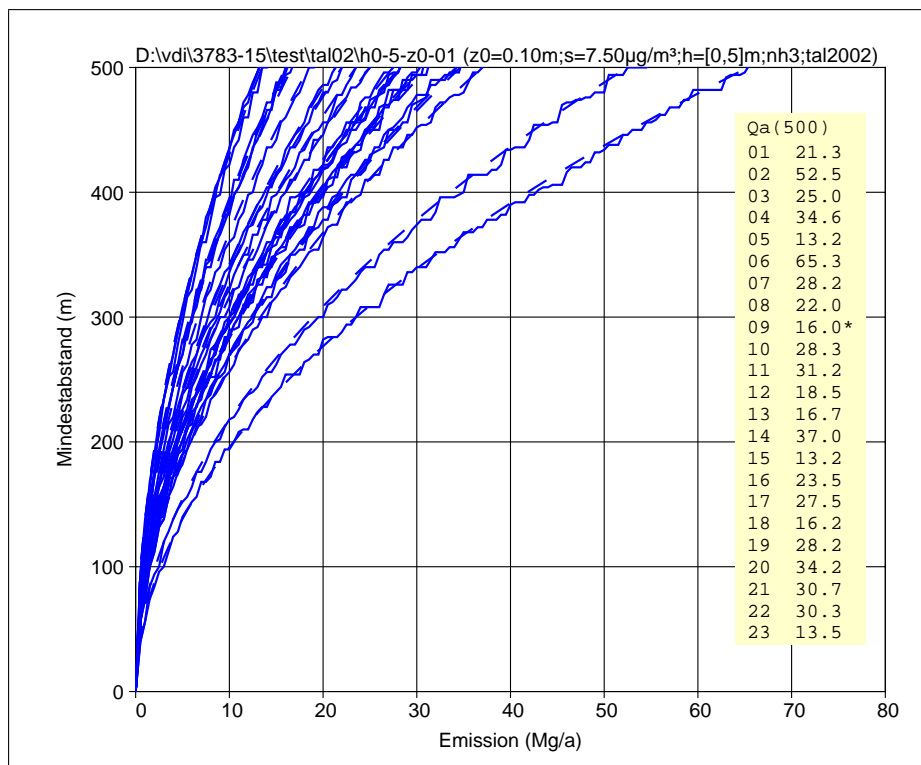


BILD 3.21: Nachrechnung der NH<sub>3</sub>-Abstandskurven im Abschlussbericht zu AUSTAL2000 mit dem neuen Satz von 23 AKS.

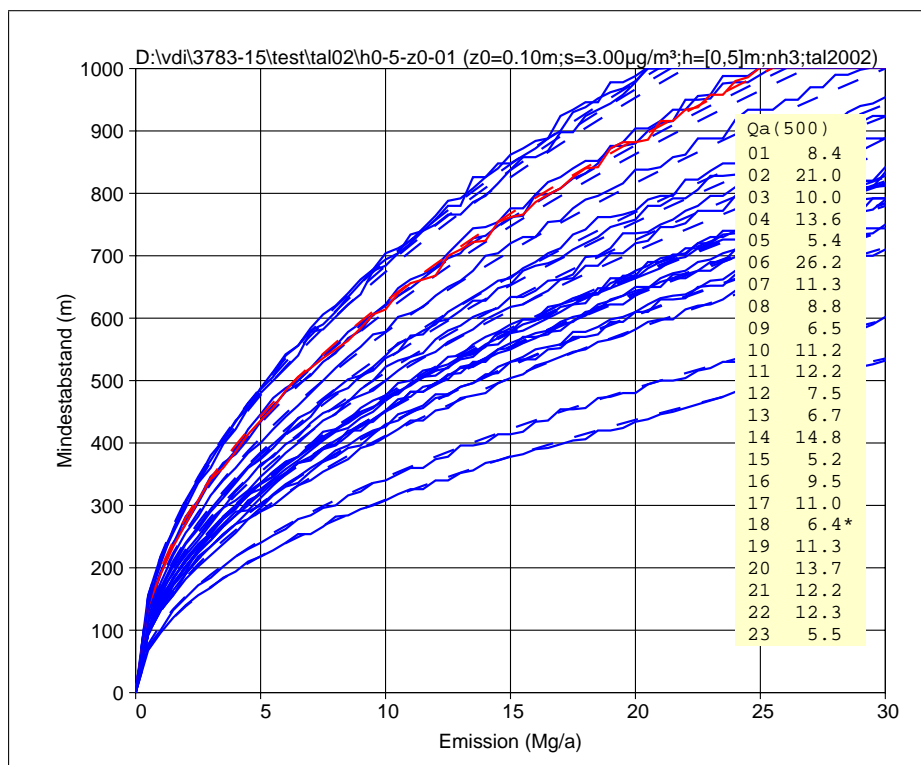


BILD 3.22: Nachrechnung der NH<sub>3</sub>-Abstandskurven mit dem neuen Satz von 23 AKS (wie Bild 3.21, aber mit anderem Schwellenwert und Achsenausschnitt).



Die Variation der Kurven auf Basis der neuen 23 AKS ist vergleichbar mit der der 17 AKS in der alten Untersuchung, der viertkleinste Wert für  $Q_a$  stimmt mit 16.0 Mg/a gut mit dem alten Wert 14.7 Mg/a überein. Es ist also möglich, mit dem Satz der 23 AKS relativ nahtlos an die alten Berechnungen anzuschließen.

### Einfluss des neuen Grenzschichtmodells

Für die Ausbreitungsrechnung nach der überarbeiteten TA Luft kommt das überarbeitete Grenzschichtmodell nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) zum Einsatz. Zur Prüfung, ob sich hierdurch die Ergebnisse systematisch ändern, wurden die in Bild 3.22 gezeigten Rechnungen, die mit dem Grenzschichtmodell der TA Luft (2002) durchgeführt wurden, mit dem neuen Grenzschichtmodell nachgerechnet. Die Ergebnisse sind in Bild 3.23 aufgeführt. Man sieht, dass sich hierdurch kaum Änderungen ergeben.

Alle folgenden Tests wurden mit dem neuen Grenzschichtmodell durchgeführt.

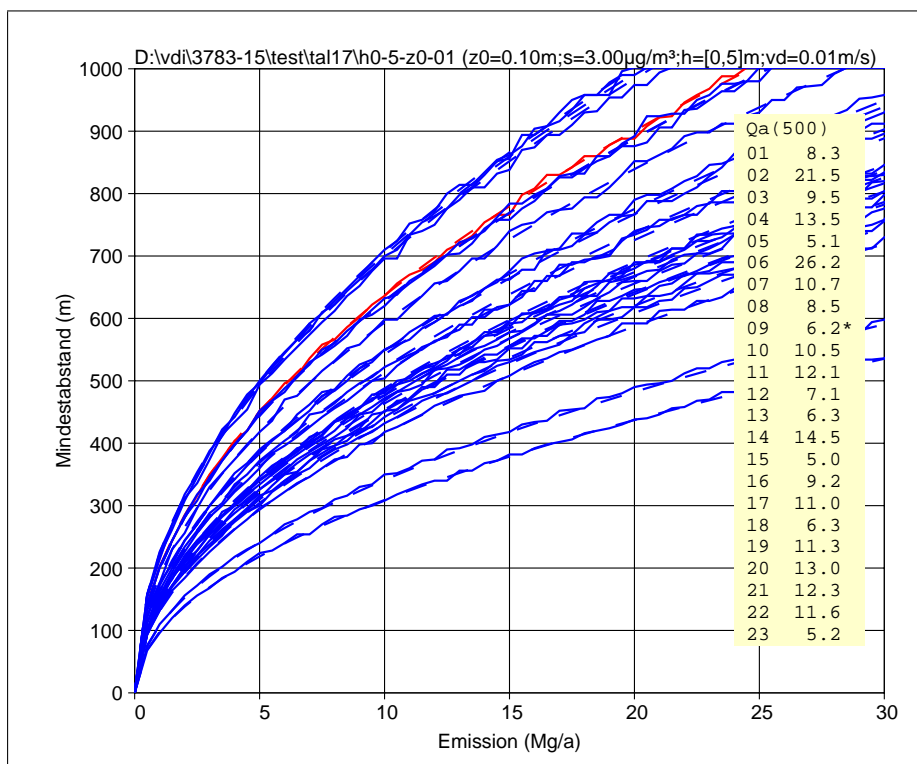


BILD 3.23: Nachrechnung der  $NH_3$ -Abstandskurven mit dem neuen Satz von 23 AKS und dem neuen Grenzschichtmodell nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017).

### Einfluss der Depositionsgeschwindigkeit

Bild 3.24 zeigt die  $NH_3$ -Abstandskurven, wenn ohne Deposition statt wie in Bild 3.23 mit der Depositionsgeschwindigkeit 0.01 m/s gerechnet wird. Ab einer Entfernung von wenigen 100 m ist die Konzentration bei Berücksichtigung trockener Deposition deutlich kleiner. Grund hierfür ist die durch die bodennahe Lage der Quelle bedingte starke Abreicherung. Der Unterschied

zwischen der Rechnung mit Depositionsgeschwindigkeit 0.01 m/s und einer mit 0.02 m/s ist wesentlich kleiner.

Alle folgenden Tests wurden daher mit Berücksichtigung einer Depositionsgeschwindigkeit (und Auswaschrate) durchgeführt.

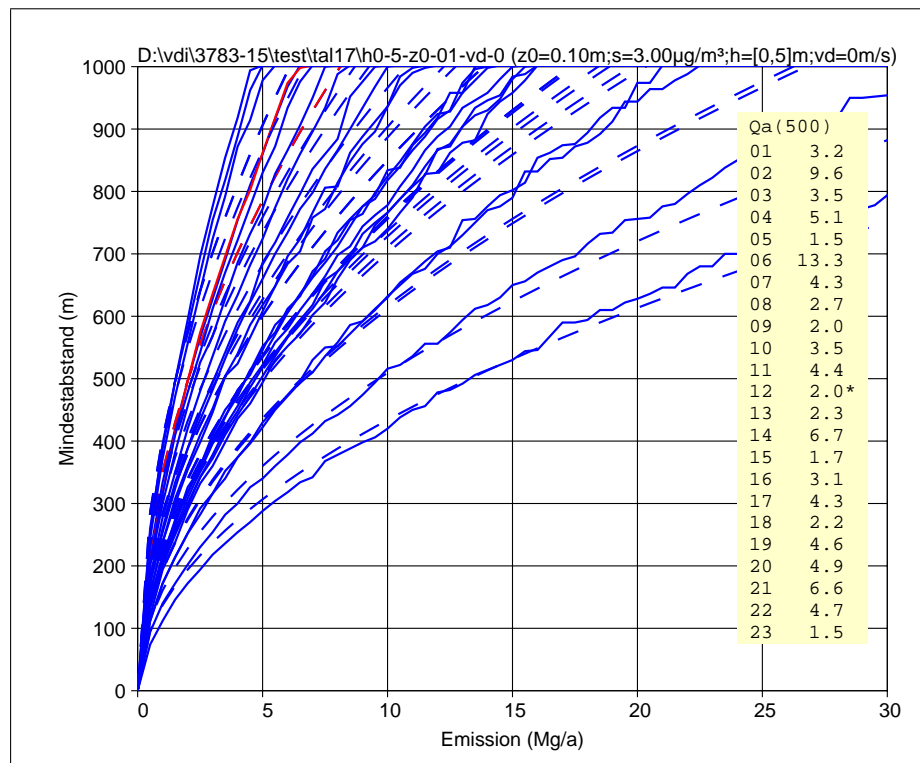


BILD 3.24: Nachrechnung der NH<sub>3</sub>-Abstandskurven mit dem neuen Satz von 23 AKS, dem neuen Grenzschichtmodell und ohne Deposition.

### 3.3.4.2 Erweiterte Rechnungen für bodennahe Quellen

Für die 23 um Niederschlag erweiterten AKS (AKSN) wurden LASAT-Ausbreitungsrechnungen für die Rauigkeitslängen 0.1 m (als eher kleinen Wert im Rahmen der Praxis) und 0.5 m (als typischen Wert im Rahmen der Praxis) und zwei vertikal verschmierte, passive Linienquellen (0 bis 5 m über Grund und 0 bis 20 m über Grund) durchgeführt.<sup>4</sup>

Für die Konzentration wurde die konstante Freisetzung von NH<sub>3</sub> betrachtet, für den Schwellenwert gemäß Referentenentwurf der TA Luft 3 µg NH<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> gewählt und der Fit-Abstand auf  $r_a = 500$  m gesetzt.

Für die Deposition wurde die konstante Freisetzung von N, einmal gebunden an NH<sub>3</sub> und einmal gebunden an NO<sub>x</sub>, sowie eine konstante Freisetzung von S gebunden an SO<sub>2</sub> betrachtet, für die Schwellenwerte gemäß Referentenentwurf der TA Luft 0.3 kg N/(ha·a) bzw. 0.3 kg S/(ha·a) gewählt und der Fit-Abstand auf  $r_a = 3000$  m gesetzt.

<sup>4</sup>Weitere Parameterwerte: Verdrängungshöhe 6-fache Rauigkeitslänge; Anemometerhöhe 10 m bzw. 19.0 m nach DWD-Umrechnungsmethode (siehe Richtlinie 3783 Blatt 8, 2017); Grenzschichtmodell nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017); Standard-Vertikalraster nach AUSTAL2000; geschachtelte Netze mit einer horizontalen Maschenweite von 20 m im feinsten Netz.

Für  $\text{NH}_3$  wurde in Anlehnung an Richtlinie VDI 3782 Blatt 5 (2007) und die TA Luft die Depositionsgeschwindigkeit auf 0.01 m/s und die Auswaschrates auf  $1.2 \cdot 10^{-4}(I/I_0)^{0.6}$  1/s mit  $I_0 = 1$  mm/h gesetzt. Für  $\text{NO}_x$  wurde anhand der Richtlinie und Annahme eines Anteils von  $\text{NO}_2$  in  $\text{NO}_x$  von 60% die Depositionsgeschwindigkeit zu 0.002 m/s bestimmt und für die Auswaschrates konservativ der (ohnehin sehr kleine) Wert für  $\text{NO}_2$  von  $1 \cdot 10^{-7}(I/I_0)$  1/s übernommen (nach der Richtlinie ist für  $\text{NO}$  die Auswaschrates 0). Für  $\text{SO}_2$  wurden gemäß der Richtlinie die Werte 0.01 m/s und  $0.2 \cdot 10^{-4}(I/I_0)$  1/s verwendet.<sup>5</sup>

Für jede Rauigkeitslänge  $z_0$ , Quelltyp und Trägersubstanz wurden aus den Ausbreitungsrechnungen die 23 Abstandskurven für die bodennahe Konzentration und die Deposition bestimmt. Die Ergebnisse sind grafisch in den Bildern 3.25 bis 3.28 aufgeführt.

Die resultierenden Parameter für die jeweils vierthöchste Abstandskurve – d.h. die Kurve, die nur in gut 10% der betrachteten Fälle überschritten wird – sind in der folgenden Tabelle aufgelistet.<sup>6</sup>

| Fall   |       | $\text{NH}_3$ -Konzentration |  | N-Deposition                 |  |                              |  | S-Deposition                 |  |
|--------|-------|------------------------------|--|------------------------------|--|------------------------------|--|------------------------------|--|
| Höhe   | $z_0$ | $Q_a$                        | $\tilde{F}$  | Träger $\text{NH}_3$         |  | Träger $\text{NO}_x$         |  | Träger $\text{SO}_2$         |  |
| m      | m     | $\frac{\text{Mg}}{\text{a}}$ | $\frac{\text{m}^2 \mu\text{g}/\text{m}^3}{\text{Mg}/\text{a}}$ | $\frac{\text{Mg}}{\text{a}}$ | $\frac{\text{m}^2 \text{kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})}{\text{Mg}/\text{a}}$ | $\frac{\text{Mg}}{\text{a}}$ | $\frac{\text{m}^2 \text{kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})}{\text{Mg}/\text{a}}$ | $\frac{\text{Mg}}{\text{a}}$ | $\frac{\text{m}^2 \text{kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})}{\text{Mg}/\text{a}}$ |
| 0 - 5  | 0.1   | 6.25                         | 120 000  | 10.29                        | 262 391  | 15.65                        | 172 524  | 10.79                        | 250 232  |
| 0 - 5  | 0.5   | 10.50                        | 71 429   | 13.56                        | 199 115  | 19.87                        | 135 883  | 14.18                        | 190 409  |
| 0 - 20 | 0.1   | 8.75                         | 85 714   | 7.88                         | 342 640  | 16.27                        | 165 950  | 8.36                         | 322 967  |
| 0 - 20 | 0.5   | 9.75                         | 76 923   | 9.36                         | 288 462  | 17.76                        | 152 027  | 9.83                         | 274 669  |

In diese Ergebnisse spielt eine Reihe von Effekten hinein. Bei der vertikalen Quellverschmierung von 5 m ist im Gegensatz zur Verschmierung von 20 m die bodennahe Konzentration im Nahbereich größer, daher liefert diese Quelle für die Konzentration kleinere Grenzmissionen  $Q_a$  (die maximal erlaubte Emission, damit im Abstand von 500 m der Schwellenwert  $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nicht überschritten wird).

Damit steht unmittelbar am Erdboden für diese Quelle aber auch mehr Masse zur Verfügung, die deponiert werden kann. In größerer Entfernung ist somit bei der 5 m-Quelle mehr dem luftseitigen Transport entzogen worden als bei der 20 m-Quelle. Daher liefert die 5 m-Quelle in Entfernungen von einigen Kilometern dann größere Grenzmissionen als die 20 m-Quelle, hier zu sehen an den Werten von  $Q_a$  für die N-Deposition durch  $\text{NH}_3$ .

<sup>5</sup>In einem weiteren Test wurden Ausbreitungsrechnungen für  $\text{NH}_3$  mit einer erhöhten Depositionsgeschwindigkeit von 0.02 m/s und einer erhöhten Rauigkeitslänge von 1.5 m (effektive Anemometerhöhe 31.4 m) durchgeführt, was einer Ausbreitung und Deposition über Wald entspricht. Die resultierenden Abstandskurven lagen innerhalb der Bandbreite der im Folgenden aufgeführten Abstandskurven und werden daher nicht weiter diskutiert.

<sup>6</sup>Da die vierthöchste Kurve Grundlage für die Festlegung der  $\text{NH}_3$ -Abstandskurve der TA Luft (2002) war, wurde diese Konvention für einen konsistenten Anschluss hier übernommen. Aufgrund der ähnlichen Depositionsparameter sind für  $Q_a$  ähnliche Werte für die N-Deposition durch die Trägersubstanz  $\text{NH}_3$  und für die S-Deposition durch die Trägersubstanz  $\text{SO}_2$  zu erwarten.

Die Werte von  $Q_a$  für den Träger  $\text{NO}_x$  zeigen ein etwas anderes Bild, weil  $\text{NO}_x$  im Vergleich zu  $\text{NH}_3$  wesentlich weniger deponiert und aus der Luft entfernt wird. Für die Rauigkeitslänge 0.1 m halten sich bei der 5 m-Quelle im Vergleich zur 20 m-Quelle die höhere Deposition und kleinere Anfangsverdünnung in etwa die Waage.

Beim Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Rauigkeitslängen ist zu beachten, dass mit höherer Rauigkeit die Turbulenz zunimmt, der Ansatz einer größeren Anemometerhöhe nach DWD-Umrechnungsmethode diesen Effekt jedoch abschwächt.<sup>7</sup>

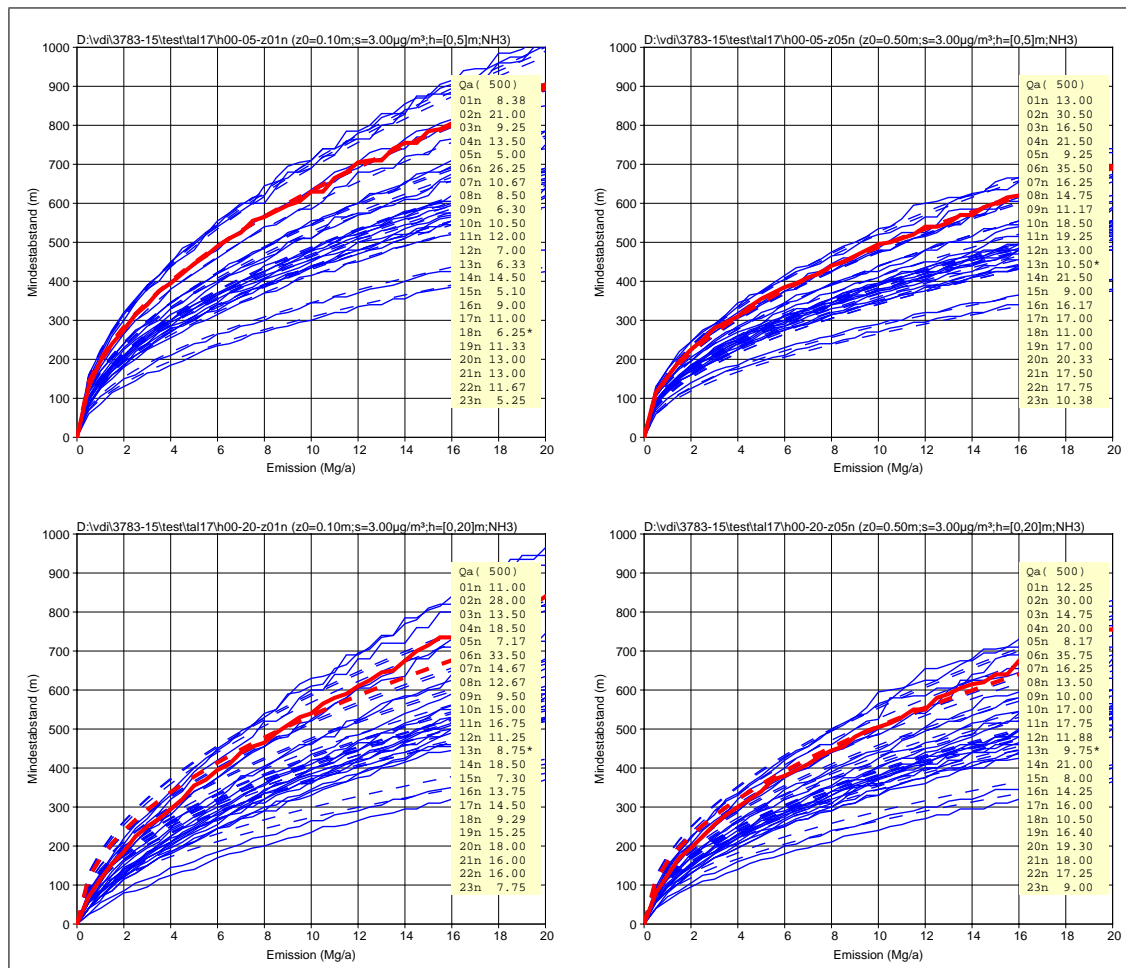
Wichtig zu beachten ist, dass die Werte von  $Q_a$  und damit von  $\tilde{F}$  auch etwas von der Entfernung abhängen, die für die Anpassung der theoretischen Kurve an die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung gewählt wird (hier 500 m bzw. 3000 m), denn der theoretisch postulierte Verlauf  $\propto 1/r^2$  stimmt nur näherungsweise mit dem beobachteten überein.<sup>8</sup> Der Fit-Abstand  $r_a$  sollte so gewählt werden, dass die dazugehörige Emissionsrate  $Q_a$  in einem für die Praxis typischen Bereich liegt. Die Fit-Abstand hängt auch von der Größe des verwendeten Schwellenwertes ab.

Für höhere Quellen können die Ergebnisse deutlich von den hier vorgestellten abweichen. Ohne eine Quellverschmierung bis zum Boden müsste auch ein Versatz der Kurven berücksichtigt werden.

---

<sup>7</sup>In die Bestimmung der Schubspannungsgeschwindigkeit geht das Verhältnis von Anemometerhöhe zu Rauigkeitslänge ein. Im einfachen Fall eines logarithmischen Windprofils ist  $u_* = u_a \kappa / \ln[(h_a - d_0)/z_0]$ .

<sup>8</sup>Bei Abständen von mehreren 10 km geht der Verlauf in ein  $1/r$ -Verhalten über.



**BILD 3.25: Abstandskurven für die  $\text{NH}_3$ -Konzentration:** Mindestabstand von der Quelle, ab dem im Jahresmittel die bodennahe  $\text{NH}_3$ -Konzentration den Wert  $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nicht überschreitet, als Funktion der  $\text{NH}_3$ -Emissionsrate.

Oben: Quellausdehnung 0 bis 5 m. Unten: Quellausdehnung 0 bis 20 m. Links: Rauigkeitslänge 0.1 m. Rechts: Rauigkeitslänge 0.5 m.

Dargestellt sind jeweils die aus den Ausbreitungsrechnungen für die 23 AKSN bestimmten Abstandskurven (durchgezogen), die hieran gefitteten theoretischen Verläufe (gestrichelt) und die dazugehörigen Parameter  $Q_a$  ( $r_a = 500$  m). In rot ist die Abstandskurve dargestellt, die nur von 3 Abstandskurven überschritten wird, der dazugehörige Wert von  $Q_a$  ist mit einem Stern versehen. Die teilweise sichtbaren Stufen in den durchgezogenen Kurven sind durch die Maschenweite von 20 m in den zugrunde liegenden Ausbreitungsrechnungen bedingt.

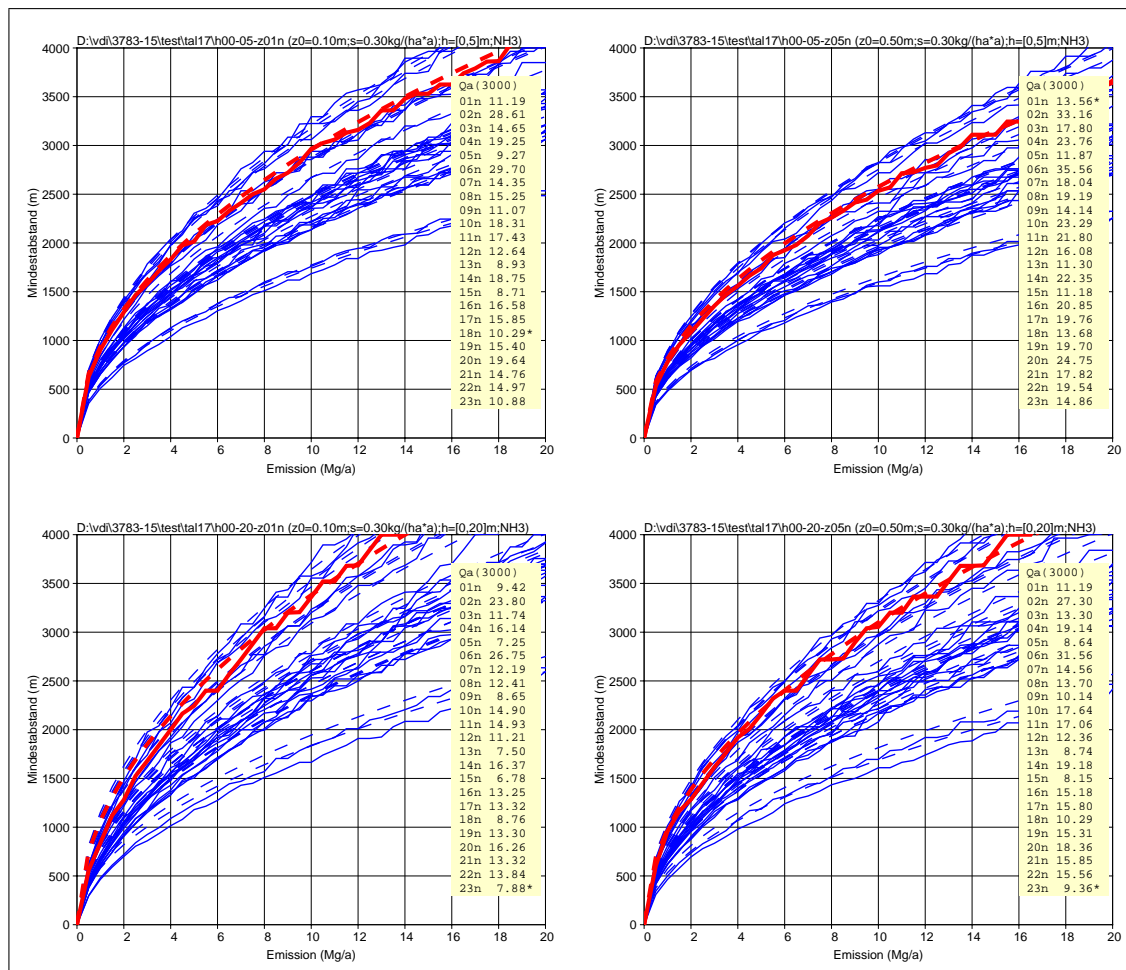
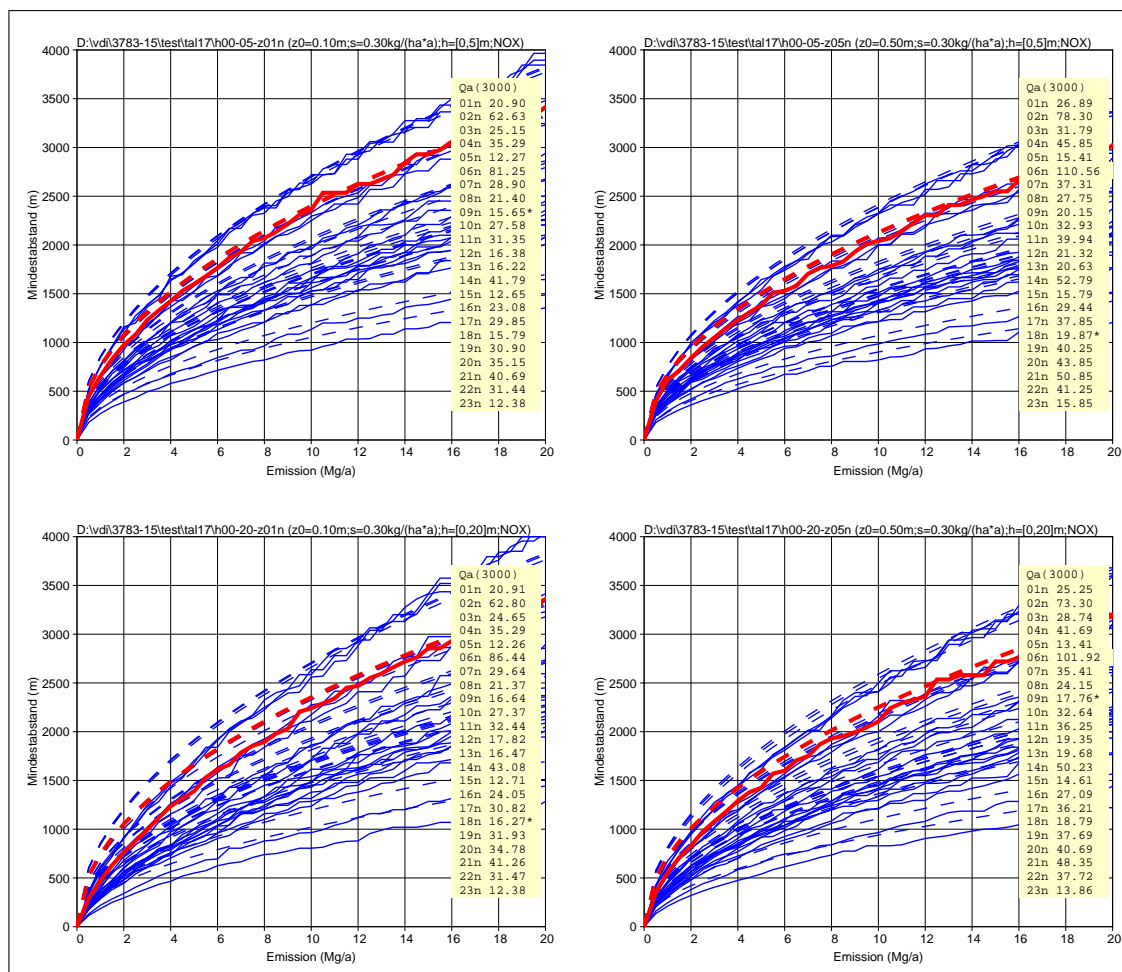


BILD 3.26: Abstandskurven für die N-Deposition durch den Träger  $\text{NH}_3$ : Mindestabstand von der Quelle, ab dem im Jahresmittel die Summe aus trockener und nasser Deposition von N den Wert  $0.3 \text{ kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})$  nicht überschreitet, als Funktion der N-Emissionsrate.

Oben: Quellausdehnung 0 bis 5 m. Unten: Quellausdehnung 0 bis 20 m. Links: Rauigkeitslänge 0.1 m. Rechts: Rauigkeitslänge 0.5 m.

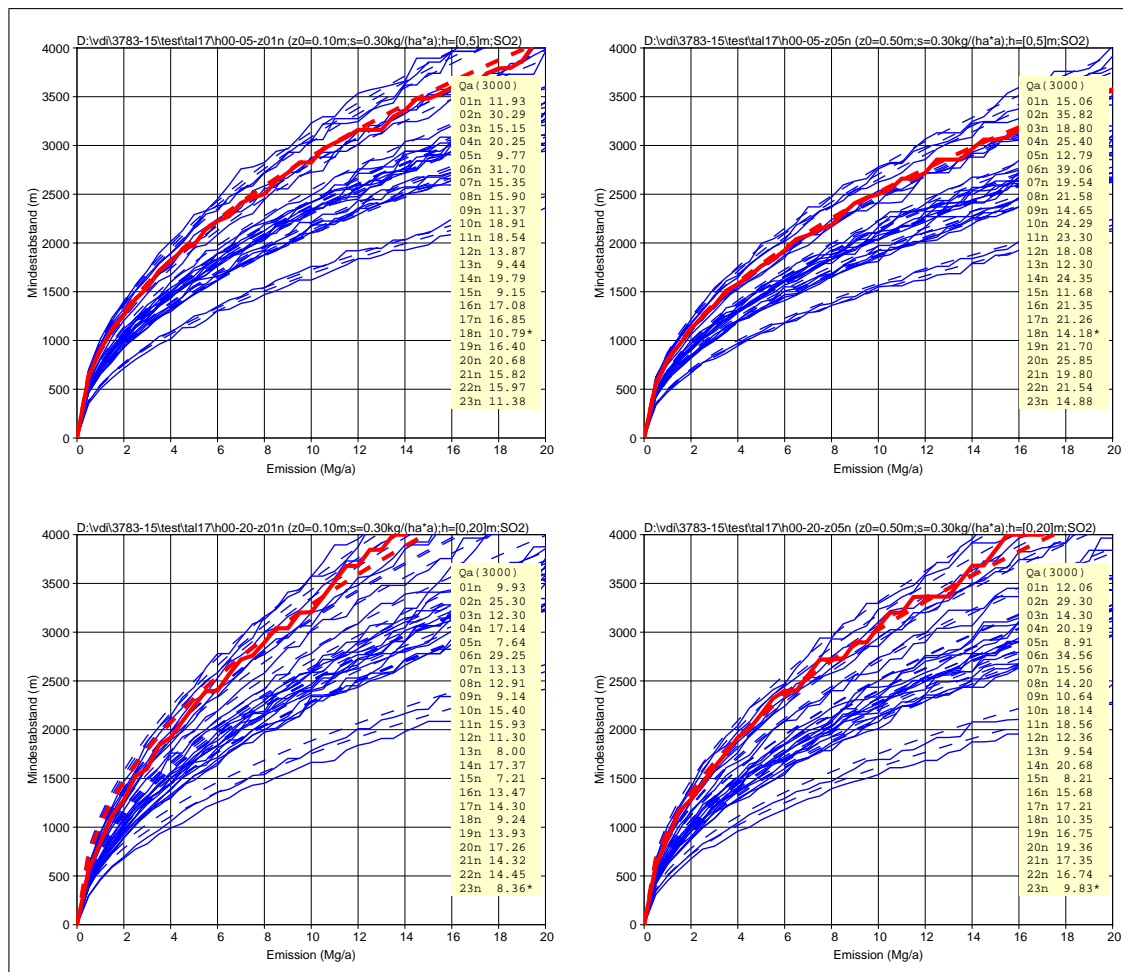
Dargestellt sind jeweils die aus den Ausbreitungsrechnungen für die 23 AKSN bestimmten Abstandskurven (durchgezogen), die hieran gefitteten theoretischen Verläufe (gestrichelt) und die dazugehörigen Parameter  $Q_a$  ( $r_a = 3000 \text{ m}$ ). In rot ist die Abstandskurve dargestellt, die nur von 3 Abstandskurven überschritten wird, der dazugehörige Wert von  $Q_a$  ist mit einem Stern versehen.



**BILD 3.27: Abstandskurven für die N-Deposition durch den Träger  $\text{NO}_x$ :** Mindestabstand von der Quelle, ab dem im Jahresmittel die Summe aus trockener und nasser Deposition von N den Wert  $0.3 \text{ kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})$  nicht überschreitet, als Funktion der N-Emissionsrate.

Oben: Quellausdehnung 0 bis 5 m. Unten: Quellausdehnung 0 bis 20 m. Links: Rauigkeitslänge 0.1 m. Rechts: Rauigkeitslänge 0.5 m.

Dargestellt sind jeweils die aus den Ausbreitungsrechnungen für die 23 AKSN bestimmten Abstandskurven (durchgezogen), die hieran gefitteten theoretischen Verläufe (gestrichelt) und die dazugehörigen Parameter  $Q_a$  ( $r_a = 3000 \text{ m}$ ). In rot ist die Abstandskurve dargestellt, die nur von 3 Abstandskurven überschritten wird, der dazugehörige Wert von  $Q_a$  ist mit einem Stern versehen.



**BILD 3.28: Abstandskurven für die S-Deposition durch den Träger  $\text{SO}_2$ :** Mindestabstand von der Quelle, ab dem im Jahresmittel die Summe aus trockener und nasser Deposition von S den Wert  $0.3 \text{ kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})$  nicht überschreitet, als Funktion der S-Emissionsrate.

Oben: Quellausdehnung 0 bis 5 m. Unten: Quellausdehnung 0 bis 20 m. Links: Rauigkeitslänge 0.1 m. Rechts: Rauigkeitslänge 0.5 m.

Dargestellt sind jeweils die aus den Ausbreitungsrechnungen für die 23 AKSN bestimmten Abstandskurven (durchgezogen), die hieran gefitteten theoretischen Verläufe (gestrichelt) und die dazugehörigen Parameter  $Q_a$  ( $r_a = 3000 \text{ m}$ ). In rot ist die Abstandskurve dargestellt, die nur von 3 Abstandskurven überschritten wird, der dazugehörige Wert von  $Q_a$  ist mit einem Stern versehen.



### 3.3.4.3 Folgerungen

Auf Grundlage der im letzten Abschnitt vorgestellten Rechnungen und Konventionen kann für Quellhöhen unter 20 m der Mindestabstand  $r$ , der nicht überschritten werden darf, im Rahmen einer konservativen Abschätzung wie folgt festgelegt werden:

$$r = \sqrt{\left(\frac{\tilde{F}}{j_s}\right) Q} \quad (3.17)$$

#### 1. NH<sub>3</sub>-Konzentration:

|             |  |
|-------------|--|
| $Q$         | NH <sub>3</sub> -Emissionsrate in Mg/a                                   |
| $j_s$       | Schwellenwert in µg/m <sup>3</sup> (z.B. 3 µg/m <sup>3</sup> )           |
| $\tilde{F}$ | $120\,000 \text{ m}^2 \frac{\mu\text{g}/\text{m}^3}{\text{Mg}/\text{a}}$ |

#### 2. N-Deposition durch den Träger NH<sub>3</sub>:

|             |  |
|-------------|--|
| $Q$         | N-Emissionsrate (gleich 14/17 der NH <sub>3</sub> -Emissionsrate) in Mg/a            |
| $j_s$       | Schwellenwert in kg/(ha·a) (z.B. 0.3 kg N/(ha·a))                                    |
| $\tilde{F}$ | $345\,000 \text{ m}^2 \frac{\text{kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})}{\text{Mg}/\text{a}}$ |

#### 3. N-Deposition durch den Träger NO<sub>x</sub>:

|             |  |
|-------------|--|
| $Q$         | N-Emissionsrate (gleich 14/46 der NO <sub>x</sub> -Emissionsrate) in Mg/a            |
| $j_s$       | Schwellenwert in kg/(ha·a) (z.B. 0.3 kg N/(ha·a))                                    |
| $\tilde{F}$ | $175\,000 \text{ m}^2 \frac{\text{kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})}{\text{Mg}/\text{a}}$ |

#### 4. S-Deposition durch den Träger SO<sub>2</sub>:

|             |  |
|-------------|--|
| $Q$         | S-Emissionsrate (gleich 32/64 der SO <sub>2</sub> -Emissionsrate) in Mg/a            |
| $j_s$       | Schwellenwert in kg/(ha·a) (z.B. 0.3 kg S/(ha·a))                                    |
| $\tilde{F}$ | $325\,000 \text{ m}^2 \frac{\text{kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})}{\text{Mg}/\text{a}}$ |

### 3.3.4.4 Emission mehrerer Substanzen

Wird die Immission aufgrund der Freisetzung mehrerer Substanzen mit Index  $i$  betrachtet, dann ergibt sich an einem Aufpunkt die Immission zu

$$j(r) = \frac{1}{r^2} \sum_i \tilde{F}_i Q_i \quad (3.18)$$

Die Bedingung  $j(r) < j_s$  liefert als Mindestabstand

$$r = \left[ \frac{1}{j_s} \sum_i \tilde{F}_i Q_i \right]^{1/2} \quad (3.19)$$



### 3.3.5 Abstandsdiagramm für die überarbeitete TA Luft

Nach Abschnitt 3.3.4.3 ergibt sich für den  $\text{NH}_3$ -Schwellenwert  $3.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  der Faktor  $F = \tilde{F}/j_s$  zu  $F = 120\,000/3 = 40\,000 \text{ m}^2\text{a}/\text{Mg}$ , was gut mit dem bisherigen Wert  $F = 41668 \text{ m}^2\text{a}/\text{Mg}$  übereinstimmt, der Unterschied in den resultierenden Abständen liegt bei lediglich 2%.

Nach diesen Betrachtungen ist keine Neuformulierung der Abstandskurve im Anhang 1 der TA Luft (2002) aufgrund des überarbeiteten Grenzschichtmodells in Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) erforderlich. Sollte sich der Schwellenwert ändern, kann der Faktor  $F$  entsprechend Abschnitt 3.3.4.3 bestimmt werden.

## Kapitel 4

# Überhöhungsmodell

### 4.1 Einleitung

Ein Fahnenüberhöhungsmodell beschreibt die Auswirkung der dynamischen Eigenschaften der Abluft (Impuls-, Temperatur- und Feuchtedifferenz zur Umgebungsluft) auf den mittleren Verlauf der Fahnenachse. Nach der Freisetzung wird Umgebungsluft in die Fahne eingemischt, so dass sich die über den Fahnenquerschnitt gemittelten Parameter wie Impuls, Temperatur und Feuchte sowie der Fahnenradius ändern. Dies alles führt im Vergleich zu einer passiven Freisetzung zu einem anderen Verlauf der Fahnenachse und zu einer Vergrößerung des Fahnenradius.

Das Einmischen wird durch eine sogenannte Einmischfunktion beschrieben, die in gängigen Modellen nur von Differenzgrößen in Bezug auf die Umgebungsluft abhängt. Hiermit wird das Einmischen aufgrund der fahneninduzierten Turbulenz beschrieben. Im Anfangsstadium der Fahne ist demgegenüber die Aufweitung aufgrund der ungestörten atmosphärischen Turbulenz in der Regel vernachlässigbar. Wenn die Fahnenparameter sich denen der Umgebungsluft angenähert haben, wird die weitere Aufweitung der Fahne durch die ungestörte atmosphärische Turbulenz bestimmt, so wie es in einem Ausbreitungsmodell beschrieben wird.

Es gibt daher einen Übergangsbereich zwischen beiden Modellkonzepten, der dynamischen Beschreibung der Fahne als Störung der atmosphärischen Strömung einerseits und der Modellierung einer passiven Spurenstoffwolke im Rahmen einer Ausbreitungsrechnung andererseits. Die beiden Bereiche können durch das Konzept einer Endüberhöhung miteinander verbunden werden. Hierbei wird ein Kriterium für die Annahme festgelegt, dass die Fahne ihre Eigenständigkeit verloren hat und sich in ihren mechanischen und thermodynamischen Eigenschaften nicht mehr von der Umgebungsluft unterscheidet.

Das Konzept der Endüberhöhung erlaubt es, in einer Ausbreitungsrechnung die Wirkung der Fahndynamik durch die Aufprägung einer Überhöhung der mittleren Fahnenachse zu berücksichtigen. Auch die durch die fahneninduzierte Turbulenz bewirkte zusätzliche Aufweitung der Fahne kann berücksichtigt werden, hierauf wird in Standardanwendungen jedoch oft verzichtet.

Mit dem Fahnenüberhöhungsmodell *PLURIS* können die für die Festlegung von Überhöhung



und zusätzlicher Aufweitung in einem Ausbreitungsmodell nach VDI 3945 Blatt 3 (2000) notwendigen Parameter ermittelt werden. Das Modell kann auch direkt für bestimmte Immissionsabschätzungen und – im Fall von Kühlturmschwaden – für Abschätzungen der Sichtbarkeit kondensierter Wasserdampfschwaden eingesetzt werden.

Die Arbeitsgruppe zur Überarbeitung der Richtlinien VDI 3782 Blatt 3 (1985) und VDI 3784 Blatt 2 (1990) plant, die in diesen Richtlinien beschriebenen Überhöhungsmodelle durch das Modell *PLURIS* zu ersetzen. Das Modell ist in einer Veröffentlichung beschrieben und validiert (JANICKE & JANICKE, 2001) und wurde unabhängig nachprogrammiert (PRESOTTO ET AL., 2005). Vom Ing.-Büro Janicke wird eine kostenfreie Programmimplementierung inklusive Quelltext zur Verfügung gestellt, die in den vergangenen 15 Jahren für gutachterliche Fragestellungen eingesetzt wurde.

Für die Einbindung in eine Richtlinie und die Anwendung im Rahmen der TA Luft waren mehrere Detailarbeiten erforderlich, die zum Großteil im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführt und in dem Programm *IBJpluris* implementiert wurden, das in diesem Forschungsvorhaben insbesondere für die Schornsteinhöhenbestimmung eingesetzt wurde.

Die Modellannahmen und Festlegungen werden in einem eigenen *Bericht zur Umweltphysik* zusammengefasst, der in der TA Luft zitiert werden kann. Somit ist eine Anwendung von *PLURIS* im Rahmen der überarbeiteten TA Luft möglich, auch wenn die überarbeitete Richtlinie VDI 3782 Blatt 3 noch nicht vorliegt.

## 4.2 Ergänzende Erläuterungen

Dieser Abschnitt enthält ergänzende Erläuterungen zur Beschreibung des Überhöhungsmodells in JANICKE & JANICKE (2001). Die wichtigsten der in diesem Abschnitt 4.2 verwendeten Symbole sind:

|       |  |
|-------|--|
| $a$   | Radius der sichtbaren Fahne  |
| $b$   | Breite des Radialprofils für eine skalare Größe                      |
| $b_u$ | Breite des Radialprofils für die Geschwindigkeit                     |
| $B$   | Verhältnis $R_v/R_d = 1.60783$                                       |
| $c_d$ | Spezifische Wärmekapazität (bei konstantem Druck) von trockener Luft |
| $c_v$ | Spezifische Wärmekapazität (bei konstantem Druck) von Wasserdampf    |
| $c_l$ | Spezifische Wärmekapazität (bei konstantem Druck) von Flüssigwasser  |
| $c_p$ | Spezifische Wärmekapazität (bei konstantem Druck) von feuchter Luft  |
| $h$   | Enthalpie  |
| $L$   | Verdampfungsenthalpie von Wasser am Tripelpunkt, 2454300 J/kg        |
| $m$   | Masse feuchter Luft, $m = m_d + m_v + m_l$                           |
| $m_d$ | Masse trockener Luft in einem vorgegebenen Volumen $V$               |
| $m_v$ | Masse Wasserdampf in einem vorgegebenen Volumen $V$                  |



|          |   |
|----------|---|
| $m_1$    | Masse Flüssigwasser in einem vorgegebenen Volumen $V$                 |
| $M_d$    | Molmasse trockene Luft, $M_d = 28.96546 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$ |
| $M_v$    | Molmasse Wasserdampf, $M_v = 18.01528 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$   |
| $p$      | Druck, $p = p_d + p_v$  |
| $p_d$    | Partialdruck trockene Luft, $p_d = (m_d/V)R_dT$                       |
| $p_v$    | Partialdruck Wasserdampf, $p_v = (m_v/V)R_vT$                         |
| $p_s$    | Sättigungsdruck Wasserdampf   |
| $q$      | Spezifische Feuchte, $q = m_v/m$                                      |
| $q_s$    | Spezifische Feuchte bei Sättigung                                     |
| $R$      | Fahnenradius im integralen Fahnenmodell                               |
| $R_g$    | Allgemeine Gaskonstante, $R_g = 8.314472 \text{ J/(mol K)}$           |
| $R_d$    | Gaskonstante von trockener Luft, $R_d = R_g/M_d$                      |
| $R_v$    | Gaskonstante von Wasserdampf, $R_v = R_g/M_v$                         |
| $T$      | Temperatur  |
| $u$      | Geschwindigkeit in der Fahne im integralen Fahnenmodell               |
| $\eta$   | Spezifischer Flüssigwassergehalt, $\eta = m_1/m$                      |
| $\rho$   | Dichte feuchte Luft, $\rho = m/V$                                     |
| $\rho_s$ | Dichte feuchter Luft bei Sättigung                                    |
| $\zeta$  | Spezifischer Gesamtwassergehalt, $\zeta = (m_v + m_1)/m$              |

Mit einer Tilde überschriebene Symbole beziehen sich auf die Umgebungsluft; beispielsweise ist  $\rho$  die Dichte in der Fahne und  $\tilde{\rho}$  die Dichte der Umgebungsluft.

## 4.2.1 Berechnung der Dichte

Die Dichte feuchter Luft

$$\rho = \frac{m_d + m_v + m_1}{V} \quad (4.1)$$

mit den drei Parametern  $m_d$ ,  $m_v$ ,  $m_1$  soll durch die drei Parameter  $q$ ,  $\eta$  und  $p$  dargestellt werden.

1. Aus  $\eta/q = m_1/m_v$  folgt

$$m_1 = \frac{\eta}{q} m_v \quad (4.2)$$

2. Aus  $p = p_d + p_v$  folgt  $m_d R_d + m_v R_v = pV/T$  und daraus

$$m_d = \frac{pV}{R_d T} - \frac{R_v}{R_d} m_v \quad (4.3)$$

3. Aus  $m_v = q(m_d + m_v + m_1)$  und Einsetzen der Ausdrücke für  $m_d$  und  $m_1$  folgt

$$m_v = \frac{pV}{R_d T} \frac{q}{1 + q(R_v/R_d - 1) - \eta} \quad (4.4)$$

Damit ergibt sich ( $B = R_v/R_d$ )

$$\rho = \frac{1}{V} \left( \frac{pV}{R_d T} - B m_v + m_v + \frac{\eta}{q} m_v \right) \quad (4.5)$$

$$= \frac{p}{R_d T} + \frac{1}{V} \left( 1 + \frac{\eta}{q} - B \right) m_v \quad (4.6)$$

$$= \frac{p}{R_d T} + \frac{p}{R_d T} \left( 1 + \frac{\eta}{q} - B \right) \frac{q}{1 + q(B-1) - \eta} \quad (4.7)$$

$$= \frac{p}{R_d T} \left[ 1 + \frac{q + \eta - Bq}{1 + q(B-1) - \eta} \right] \quad (4.8)$$

$$= \frac{p}{R_d T} \left[ \frac{1 + q(B-1) - \eta + q + \eta - Bq}{1 + q(B-1) - \eta} \right] \quad (4.9)$$

$$= \frac{p}{R_d T} \left[ \frac{1}{1 + q[(R_v/R_d) - 1] - \eta} \right] \quad (4.10)$$

In dieser Form wird die Dichte in JANICKE & JANICKE (2001) angegeben. Für  $\eta = 0$  (kein Flüssigwasser) entspricht sie der oft verwendeten Formulierung

$$\rho = \frac{p}{R_d T} \left[ 1 - \frac{p_v}{p} \left( 1 - \frac{R_d}{R_v} \right) \right] \quad (4.11)$$

## 4.2.2 Spezifische Wärmekapazität

Nach BAEHR & KABELAC (2012) kann die spezifische Enthalpie (hier Enthalpie pro Masse feuchter Luft) geschrieben werden (siehe Gleichung 5.70 und 5.72) als

$$h = (1 - q - \eta)c_d(T - T_3) + q[L + c_v(T - T_3)] + \eta c_1(T - T_3) \quad (4.12)$$

mit den spezifischen Wärmekapazitäten bei konstantem Druck für trockene Luft  $c_d$ , Wasserdampf  $c_v$  und Flüssigwasser  $c_1$ , der Tripelpunkt-Temperatur von Wasser  $T_3 = 273.16$  K, der spezifischen Feuchte  $q$  (Masse Wasserdampf pro Masse feuchter Luft), dem spezifischen Flüssigwassergehalt  $\eta$  und der Verdampfungsenthalpie  $L$  am Tripelpunkt.

Es wird die Änderung der Enthalpie durch Einmischung feuchter Umgebungsluft betrachtet, analog zu Gl. (17) in JANICKE & JANICKE (2001), und mit Weglassen des gravitativen Terms,

$$\{Mh\}' = \epsilon \tilde{h}, \quad (4.13)$$

mit  $M = A\rho u$  (Querschnittsfläche  $A$ ) und  $\epsilon = 2\pi\tilde{\rho}E$  (Einmischfunktion  $E$ ). Einsetzen liefert:

$$\begin{aligned} \{M[(1 - q - \eta)c_d + qc_v + \eta c_1](T - T_3) + qL\}' = \\ \epsilon [(1 - \tilde{q} - \tilde{\eta})c_d + \tilde{q}c_v + \tilde{\eta}c_1](\tilde{T} - T_3) + \epsilon \tilde{q}L \end{aligned} \quad (4.14)$$

Mit der Erhaltungsgleichung für  $q$  (Gl. 32 in JANICKE & JANICKE, 2001)

$$\{Mq\}' = \epsilon\tilde{q} - A\rho q f_c \quad (4.15)$$

(Kondensationsrate  $f_c$ ) folgt

$$\{M[(1 - q - \eta)c_d + qc_v + \eta c_1](T - T_3)\}' = \epsilon[(1 - \tilde{q} - \tilde{\eta})c_d + \tilde{q}c_v + \tilde{\eta}c_1](\tilde{T} - T_3) + A\rho Lq f_c . \quad (4.16)$$

Mit der Abkürzung für die Wärmekapazität des Gemisches

$$c_p = (1 - q - \eta)c_d + qc_v + \eta c_1 \quad (4.17)$$

folgt

$$\{Mc_p(T - T_3)\}' = \epsilon\tilde{c}_p(\tilde{T} - T_3) + A\rho Lq f_c . \quad (4.18)$$

Mit der Näherung  $c_p \approx c_d$  folgt die Gleichung unten links auf Seite 881 in JANICKE & JANICKE (2001). Für feuchte, nicht zu heiße Luft und für heiße, nicht zu feuchte Luft ist diese Näherung gut.

In *PLURIS* wird für eine einfachere Darstellung und in Anbetracht der typischen Anwendungsfälle die Näherung  $c_p \approx c_d$  verwendet.

### 4.2.3 Radialprofile

*PLURIS* ist ein integrales Fahnenmodell. Es berechnet die über den Fahnenquerschnitt gemittelten Kenngrößen der Fahne wie Temperatur und Geschwindigkeit. Dieser Ansatz erlaubt eine einfache und konsistente Formulierung der zugrunde liegenden Erhaltungssätze.

Tatsächlich gibt es ein Profil der Kenngrößen quer zur Fahnenachse, in der Regel mit einem Maximum (oder Minimum) im Bereich der Fahnenachse und einem Abfall (oder Anstieg) auf den Umgebungswert zum Fahnenrand hin. Ein solches Radialprofil quer zur Fahnenachse kann anhand der Ergebnisse von *PLURIS* im Nachhinein festgelegt werden.

Für eine skalare Größe wie Konzentration, Dichte oder Temperatur lässt sich an jedem Punkt entlang der Fahnenachse ein Gaußsches Glockenprofil in der Form

$$c_r(r) = \tilde{c} + c^* e^{-r^2/b^2} \quad (4.19)$$

definieren. Hierbei ist  $r$  der Abstand von der Fahnenachse,  $\tilde{c}$  der Umgebungswert,<sup>1</sup>  $c^*$  die maximale Differenz zum Umgebungswert auf der Fahnenachse bei  $r = 0$  und  $b$  ein Parameter, der die Breite der Gaußglocke festlegt.

Ein Bezug zu dem von *PLURIS* bestimmten Mittelwert  $c$  über den ebenfalls bestimmten Fahnenquerschnitt mit Flächeninhalt  $\pi R^2$  ergibt sich aus der Forderung, dass das Integral über die Ebene senkrecht zur Fahnenachse in beiden Beschreibungen übereinstimmen soll:

$$2\pi \int_0^\infty c_r(r)r \, dr = \pi R^2 c + 2\pi \int_R^\infty \tilde{c} r \, dr \quad (4.20)$$

<sup>1</sup>Für eine vereinfachte Formulierung werden sämtliche Umgebungsgrößen als räumlich konstant angenommen.

Hieraus folgt

$$2\pi \int_0^\infty (c_r(r) - \tilde{c}) r dr = \pi R^2 (c - \tilde{c}) \quad (4.21)$$

und damit

$$c^* b^2 = (c - \tilde{c}) R^2 . \quad (4.22)$$

Für die Geschwindigkeit entlang der Fahnenachse  $u$  lässt sich der gleiche Ansatz machen. Allerdings ist es sinnvoll, hier eine andere Breite für die Gaußglocke anzusetzen. Dem liegt die Vorstellung zugrunde, dass die Abluftfahne an ihren Rändern einen Teil der Umgebungsluft mitreißt (sogenannte *added mass*), die dann im weiteren Verlauf durch die fahneninduzierte Turbulenz in die Fahne eingemischt wird (BRIGGS, 1975; DAVIDSON, 1989).

Der Geschwindigkeitsverlauf quer zur Fahnenachse,  $u_r(r)$ , ist demnach breiter als die Kernfahne der Konzentration oder Temperatur. Mit dem Ansatz

$$u_r(r) = \tilde{u} + u^* e^{-r^2/b_u^2} \quad (4.23)$$

ergibt sich entsprechend

$$u^* b_u^2 = (u - \tilde{u}) R^2 . \quad (4.24)$$

Hierbei ist zu beachten, dass  $u$  die Geschwindigkeit entlang der Fahnenachse ist. Entsprechend ist  $\tilde{u}$  die Geschwindigkeitskomponente der Umgebungsluft parallel zur Fahnenachse an der aktuellen Position auf der Fahnenachse. Das ist trivial für eine näherungsweise senkrecht nach oben steigende Fahne (Umgebungskomponente ist 0) und einfach für eine annähernd horizontal verlaufende Fahne (Umgebungskomponente ist gleich der Windgeschwindigkeit). In den anderen Fällen lässt sich lokal das Koordinatensystem so drehen, dass eine Hauptachse in Richtung der Fahnenachse zeigt.

Die mitgerissene Masse ist etwa so groß wie die Masse der Kernfahne (BRIGGS, 1975). Da in der durch  $b_u$  beschriebenen Fahne beide Anteile enthalten sind, folgt

$$b_u^2 \approx 2b^2 \quad (4.25)$$

in Übereinstimmung mit anderen Untersuchungen (HANNA, 1975; CARHART & POLICASTRO, 1991).

Schließlich ergibt sich eine weitere Beziehung über die Forderung, dass der Fluss einer Kenngröße durch die Ebene senkrecht zur Fahnenachse in beiden Beschreibungen übereinstimmen soll:

$$2\pi \int_0^\infty c_r(r) u_r(r) r dr = \pi R^2 c u + 2\pi \int_R^\infty \tilde{c} \tilde{u} r dr \quad (4.26)$$

Hieraus folgt mit Gleichungen (4.22) und (4.24)

$$2\pi \int_0^\infty (c_r(r) - \tilde{c}) (u_r(r) - \tilde{u}) r dr = \pi R^2 (c - \tilde{c}) (u - \tilde{u}) \quad (4.27)$$





und daraus

$$b^2 + b_u^2 = R^2 . \quad (4.28)$$

Gleichungen (4.22), (4.24), (4.25) und (4.28) liefern damit folgenden Zusammenhang zwischen den vom Modell berechneten Größen  $c$ ,  $u$ ,  $R$  und den Parametern der Ähnlichkeitsprofile  $c^*$ ,  $u^*$ ,  $b$ ,  $b_u$  bei vorgegebenen Umgebungswerten  $\tilde{c}$  und  $\tilde{u}$ :

$$c^* = 3(c - \tilde{c}) \quad (4.29)$$

$$u^* = \frac{3}{2}(u - \tilde{u}) \quad (4.30)$$

$$b = \frac{1}{\sqrt{3}}R \quad (4.31)$$

$$b_u = \sqrt{\frac{2}{3}}R \quad (4.32)$$

Es ist zu beachten, dass der Ansatz von Ähnlichkeitsprofilen nicht in der Nähe der Austrittsöffnung angewendet werden darf. Dieser Bereich (*zone of flow establishment*) beträgt typischerweise ein paar Öffnungsdurchmesser.

### Anwendungsbeispiel

Mit Hilfe der Beziehungen (4.29) und (4.30) lässt sich zum Beispiel für eine heiße Abgasfahne die maximale Temperatur  $T_{\max}$  und Geschwindigkeit  $u_{\max}$  auf der Fahnenachse anhand der von *PLURIS* bestimmten Mittelwerte abschätzen:

$$T_{\max} = T^* + \tilde{T} = 3T - 2\tilde{T} \quad (4.33)$$

$$u_{\max} = u^* + \tilde{u} = \frac{3}{2}u - \frac{1}{2}\tilde{u} \quad (4.34)$$

Es wird ein heiße Abluftfahne (Gasfackel) betrachtet, die aus einem Kamin in 50 m Höhe mit einem Austrittsdurchmesser von 1.5 m, einer mittleren Austrittstemperatur von 400.0 °C und einer mittleren Austrittsgeschwindigkeit von 10.0 m/s in die Umgebungsluft eingeleitet wird. Die Windrichtung beträgt 270.0 Grad (Transport in  $x$ -Richtung), die Windgeschwindigkeit in Austrittshöhe 3.0 m/s, die Temperatur in Austrittshöhe 15.0 °C.

Der von *PLURIS* berechnete Verlauf ist:

| $x$ (m) | $z$ (m) | $s$ (m) | $R$ (m) | $u$ (m/s) | $T$ (°C) |
|---------|---------|---------|---------|-----------|----------|
| 0.0     | 50.0    | 0.0     | 0.75    | 10.0      | 400.0    |
| 0.1     | 51.0    | 1.0     | 1.21    | 5.7       | 194.3    |
| 0.6     | 51.9    | 2.0     | 1.75    | 4.2       | 110.0    |
| 1.2     | 52.7    | 3.0     | 2.28    | 3.7       | 73.0     |
| 1.9     | 53.4    | 4.0     | 2.76    | 3.5       | 54.9     |
| 2.7     | 54.0    | 5.0     | 3.19    | 3.4       | 44.8     |
| 3.5     | 54.5    | 6.0     | 3.58    | 3.3       | 38.5     |
| 4.4     | 55.0    | 7.0     | 3.95    | 3.3       | 34.3     |
| 5.3     | 55.5    | 8.0     | 4.30    | 3.3       | 31.2     |
| 6.1     | 56.0    | 9.0     | 4.63    | 3.3       | 28.9     |
| 7.0     | 56.4    | 10.0    | 4.95    | 3.2       | 27.2     |
| 8.8     | 57.3    | 12.0    | 5.56    | 3.2       | 24.6     |
| 10.7    | 58.1    | 14.0    | 6.13    | 3.2       | 22.9     |
| 12.5    | 58.9    | 16.0    | 6.68    | 3.2       | 21.6     |
| 14.4    | 59.6    | 18.0    | 7.20    | 3.2       | 20.7     |
| 16.2    | 60.4    | 20.0    | 7.71    | 3.2       | 19.9     |
| 25.7    | 63.7    | 30.0    | 10.02   | 3.1       | 17.9     |
| 35.2    | 66.7    | 40.0    | 12.10   | 3.1       | 16.9     |
| 44.8    | 69.5    | 50.0    | 14.01   | 3.1       | 16.3     |

Hierbei sind  $x$  und  $z$  die Koordinaten der Fahnenachse und  $s$  die Strecke entlang der Fahnenachse.

Der Ansatz von Ähnlichkeitsprofilen ist nach etwa 3 Quelldurchmessern, also für  $s > 4.5$  m anwendbar. Für  $s = 10$  m beträgt der Fahnenanstieg etwa 1:2 und mit  $T = 27.2$  °C,  $u = 3.2$  m/s,  $\tilde{T} \approx 15.0$  °C und  $\tilde{u} \approx 3.0 \sqrt{4/5}$  m/s ergibt sich  $T_{\max} = 51.6$  °C,  $u_{\max} = 3.5$  m/s.

Der Abfall der Temperatur auf den ersten 5 Metern ist im Zusammenhang mit der starken Aufweitung der Fahne in diesem Bereich zu sehen (die Querschnittsfläche nimmt um fast einen Faktor 20 zu). Dass ein so starker Abfall bei einer heißen, ausgedehnten Impulsfahne nicht unrealistisch ist, legt ein Vergleich mit Flugzeugtriebwerken nahe (BOEING, 2005; insbesondere Bilder 6.1.7 und 6.1.16). Bei Maximalschub nimmt die Abluftgeschwindigkeit hinter einer Boeing 373-100/200 von etwa 130 m/s unmittelbar hinter dem Flugzeug auf etwa 30 m/s in 70 m Entfernung ab. Die Temperatur (einige hundert Grad an der Triebwerksöffnung) fällt während der Transportzeit von weniger als einer Sekunde auf unter 40 °C ab.

#### 4.2.4 Berechnung des sichtbaren Fahnenradius

Die Enthalpie  $h$  der Fahne

$$h = c_p T - h_v \eta \quad (4.35)$$

kann mit dem Flüssigwassergehalt  $\eta = \zeta - q_s$  für  $\zeta > q_s$  geschrieben werden als

$$h' = T - \frac{h_v}{c_p} (\zeta - q_s) , \quad (4.36)$$

mit  $h' = h/c_p$ .

Die Sättigungsfeuchte ist eine Funktion der Temperatur,  $q_s = q_s(T)$ . Bei gegebenen Werten von  $h'$  und Gesamtwassergehalt  $\zeta$  ist Gleichung (4.36) eine implizite Bestimmungsgleichung für die Temperatur  $T$  (siehe JANICKE & JANICKE, 2001).

Nach Clausius-Clapeyron hat die Sättigungsfeuchte um eine Temperatur  $T_0$  herum die Form

$$q_s(T) \approx q_s(T_0)e^{A(T-T_0)} \approx q_0 \left[ 1 + A(T - T_0) + \frac{1}{2}A^2(T - T_0)^2 \right] \quad (4.37)$$

mit  $q_0 = q_s(T_0)$  und  $A = h_v/(R_v T_0^2)$ . Einsetzen in Gleichung (4.36) ergibt

$$0 = a_2 T^2 + a_1 T + a_0 \quad (4.38)$$

mit

$$a_2 = \frac{1}{2} \frac{h_v}{c_p} q_0 A^2 \quad (4.39)$$

$$a_1 = 1 + \frac{h_v}{c_p} q_0 (A - A^2 T_0) \quad (4.40)$$

$$a_0 = \frac{h_v}{c_p} q_0 \left( 1 - A T_0 + \frac{1}{2} A^2 T_0^2 \right) - h - \frac{h_v}{c_p} \zeta \quad (4.41)$$

und der Lösung

$$T = \frac{-a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4a_2 a_0}}{2a_2} . \quad (4.42)$$

Ist für die so bestimmte Temperatur  $q_s(T) < \zeta$  und damit (siehe Gleichung 4.36)  $h' < T$ , dann liegt kondensiertes Wasser und somit eine sichtbare Fahne vor.

Für die Berechnung des sichtbaren Fahnenradius wird statt einer über den Fahnenquerschnitt mit Radius  $R$  gemittelten skalaren Größe  $c$  ein Ähnlichkeitsprofil als Funktion des Abstandes  $r$  von der Fahnenachse verwendet:

$$c_r(r) = \tilde{c} + c^* e^{-r^2/b^2} \quad (4.43)$$

mit  $b = R/\sqrt{3}$  und  $c^* = 3(c - \tilde{c})$  (siehe Abschnitt 4.2.3).

Mit den Profilen  $h'_r(r)$ ,  $\zeta_r(r)$  und  $T_0 = T^* + \tilde{T}$  wird für absteigende Werte  $r = 2b \dots 0$  (d.h. vom Fahnenrand her zum Fahnenzentrum kommend) die lokale Temperatur  $T_r(r)$  bestimmt und für  $T_r(r) > h'_r(r)$  auf das Vorliegen von Flüssigwasser geschlossen.

Der sichtbare Radius ist

$$a = \max\{r \mid T_r(r) > h'_r(r)\} . \quad (4.44)$$



Aus dem lokalen Flüssigwassergehalt

$$\eta_r(r) = \frac{c_p}{h_v} [T_r(r) - h'_r(r)] \quad (4.45)$$

wird der über den Fahnenquerschnitt gemittelte Flüssigwassergehalt

$$\eta = \frac{2}{R^2} \int_0^a r \eta(r) dr \quad (4.46)$$

bestimmt. Hieraus folgt die mittlere Temperatur

$$T = h' + \frac{h_v}{c_p} \eta . \quad (4.47)$$

## 4.2.5 Berechnung der spezifischen Feuchte

Die erste Formulierung für den Sättigungsdampfdruck von GOFF & GRATCH (1946) wurde 1957 von Goff überarbeitet (GOFF, 1957). Diese Version diente dann als Vorlage für eine Empfehlung der WMO, die aber offenbar typografische Fehler enthielt und später korrigiert wurde, allerdings auf Kosten eines Vorzeichenfehlers im Exponenten.<sup>2</sup>

Ohne die Originalliteratur vorliegen zu haben, scheint nach Literatur- und Internet-Recherchen die Formulierung von 1957 in Bezug auf die Zahlenwerte wie folgt zu lauten ( $T_0 = 273.16$  K,  $p_0 = 100$  Pa):

$273.16 \text{ K} < T < 373.16 \text{ K}$ :

$$\begin{aligned} \log_{10}(p_s/p_0) = & 10.79574(1 - T_0/T) - 5.02800 \log_{10}(T/T_0) \\ & + 1.50475 \cdot 10^{-4} \left(1 - 10^{-8.2969(T/T_0-1)}\right) \\ & + 0.42873 \cdot 10^{-3} \left(10^{+4.76955(1-T_0/T)} - 1\right) \\ & + 0.78614 \end{aligned} \quad (4.48)$$

$T < 273.16 \text{ K}$ :

$$\begin{aligned} \log_{10}(p_s/p_0) = & -9.09718(T_0/T - 1) - 3.56654 \log_{10}(T_0/T) \\ & + 0.876793(1 - T/T_0) \\ & + \log_{10} 6.1071 \end{aligned} \quad (4.49)$$

Für  $T = T_0$  liefern die Gleichungen etwas unterschiedliche Werte ( $\log_{10} 6.1071 = 0.78584$ ).

In den Entwicklungsarbeiten zu *PLURIS* im Jahr 2000 war für die spezifische Feuchte bei Sättigung auf eine Formulierung von HANNA (1982) zurückgegriffen worden. In der Formulierung

<sup>2</sup><http://cires1.colorado.edu/~voemel/vp.html>.

wurde vereinfachend angenommen, dass zwischen dem Sättigungsdampfdruck und der spezifischen Feuchte bei Sättigung die Beziehung

$$q_s \approx \frac{p_s R_d}{p R_v} \quad (4.50)$$

besteht und es wurde der natürliche anstelle des dekadischen Logarithmus verwendet, was den Faktor  $\log 10 \approx 2.303$  bedingt.

273.16 K <  $T$  < 373.16 K:

$$\begin{aligned} \log q_s = & 2.303 \cdot 10.79574(1 - T_0/T) - 5.02800 \log(T/T_0) \\ & + 2.303 \cdot 1.50475 \cdot 10^{-4} (1 - 10^{-8.2969(T/T_0-1)}) \\ & + 2.303 \cdot 0.42873 \cdot 10^{-3} (10^{+4.76955(1-T_0/T)} - 1) \\ & + 1.355 - \log(p/p_0) \end{aligned} \quad (4.51)$$

$T < 273.16$  K:

$$\begin{aligned} \log q_s = & -2.303 \cdot 9.09685(T_0/T - 1) - 3.56654 \log(T_0/T) \\ & + 2.303 \cdot 0.87682(1 - T/T_0) \\ & + 1.335 - \log(p/p_0) \end{aligned} \quad (4.52)$$

Die Zahlenwerte stimmen in großen Teilen mit der Formulierung von GOFF (1957) überein, allerdings ist auch hier der Übergang bei  $T = T_0$  nicht stetig (1.355 versus 1.335). Mit  $0.78614 \log 10 - \log(R_v/R_d) = 1.3353$  liegt die Vermutung nahe, dass es sich bei dem Wert 1.355 um einen Schreibfehler handelt.

Die Näherung (4.50) wird für hohe Temperaturen und hohe Feuchte immer schlechter. Der genaue Zusammenhang zwischen  $q_s$  und  $p_s$  ergibt sich aus

$$p_s = \frac{m_v}{V} R_v T = q_s \rho_s R_v T \quad (4.53)$$

und

$$\rho_s = \frac{p}{R_d T} \left[ \frac{1}{1 + q_s [(R_v/R_d) - 1] - \eta} \right] \quad (4.54)$$

zu

$$q_s = \frac{p_s R_d}{p R_v} \left[ \frac{1 - \eta}{1 - (p_s/p)(1 - R_d/R_v)} \right] \quad (4.55)$$

In *PLURIS* 3 wird Gleichung (4.55) zusammen mit Gleichungen (4.48) und (4.49) für die Bestimmung von  $q_s$  bei vorgegebenen Werten von  $p$ ,  $T$  und  $\eta$  verwendet.

## 4.3 PLURIS Version 3

Das Modell *PLURIS* ist in JANICKE & JANICKE (2001) beschrieben. Für den praktischen Einsatz, insbesondere in Kombination mit einem Ausbreitungsmodell, sind weitere Festlegungen erforderlich, die im Folgenden aufgeführt sind. Modell und Zusatzfestlegungen werden zusammenfassend mit der Versionsnummer 3 (gegebenenfalls mit Unterversionsnummern) gekennzeichnet. Eine Referenzimplementierung ist das Computerprogramm *IBJpluris* Version 3.

### 4.3.1 Referenzimplementierung *IBJpluris*

Die Referenzimplementierung *IBJpluris* ist in der Programmiersprache JAVA geschrieben. Sie ist ein reines Text-Programm, läuft also unter UNIX in einem Terminalfenster, unter Windows in einem DOS-Fenster.

Das Programm arbeitet nicht interaktiv, sondern verwendet die Parameterdatei *IBJpluris.txt*, in der alle Parameter für die Rechnung spezifiziert sind. Am Ende der Rechnung schreibt das Programm ein Arbeitsprotokoll in die Datei *IBJpluris.log*, den Verlauf der Fahnenparameter in die Datei *IBJpluris.dmn* und eine grafische Darstellung des Verlaufs in die Datei *IBJpluris.pdf*. Alle diese Dateien befinden sich in einem eigenen Verzeichnis, dem Arbeitsverzeichnis, das vom Benutzer angelegt werden muss.

Die Parameterdatei *IBJpluris.txt* ist eine reine Textdatei, kann also vom Benutzer mit einem Text-Editor erstellt werden. Die Protokolldatei *IBJpluris.log* ist ebenfalls eine Textdatei, die vom Programm bei jedem Programmablauf angelegt wird. Die Rechenergebnisse werden in die DMN-Datei *IBJpluris.dmn* geschrieben. Sie enthält im Dateikopf die wesentlichen Eingabeparameter und die verwendeten meteorologischen Profile.

Die Parameterdatei besteht aus mehreren Abschnitten. Jeder Abschnitt definiert einen Parameterblock. Als Ergebnis der Überhöhungsrechnung erzeugt *IBJpluris* zusätzlich eine grafische Darstellung, Bild 4.1 zeigt ein Beispiel.

Eine detaillierte Beschreibung des Programms befindet sich im Programm-Handbuch.

### 4.3.2 Abbruchkriterium

Das Überhöhungsmodell bestimmt den Verlauf der Fahnenachse. Zur Ankopplung an ein Ausbreitungsmodell ist es hilfreich, eine Endüberhöhung auszuweisen (siehe Abschnitt 4.3.5). Sie wird auch für Anwendungen benötigt, in denen die Angabe einer effektiven Quellhöhe (Bauhöhe plus Endüberhöhung) erforderlich ist.

Bei hinreichend stabiler Schichtung ergibt sich im Überhöhungsmodell eine Endüberhöhung automatisch, da die anfängliche Aufwärtsbewegung unter dem Einfluss des rücktreibenden Temperaturgradienten der Inversionsschicht gebremst wird, bis die Fahne schließlich als Schwerewelle im Mittel horizontal verläuft. Bei indifferenten und labilen Schichtungen hingegen steigt die

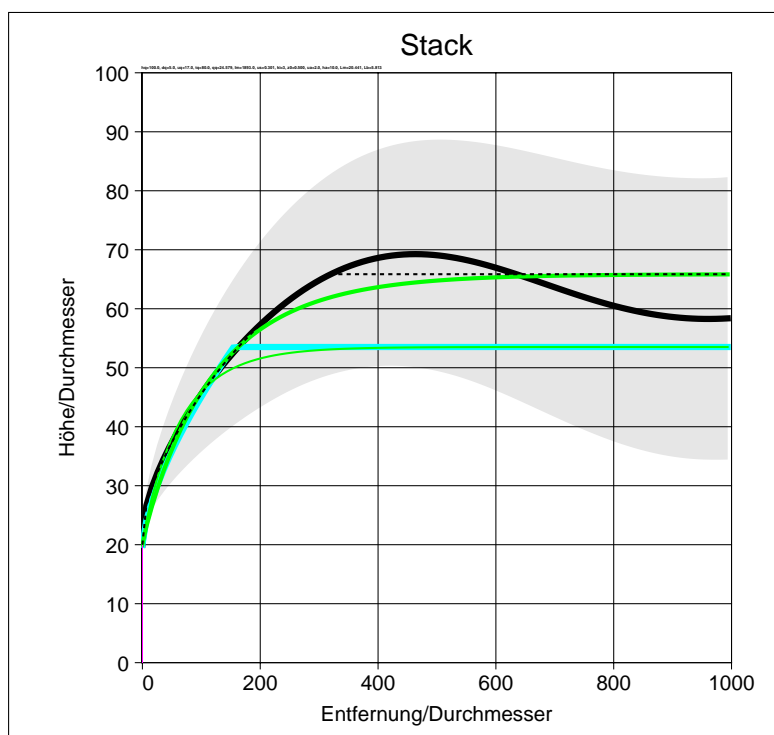


BILD 4.1: Beispieldarstellung von *IBJpluris* (Zusatzoption `--paint-extended`). Die schwarze Linie zeigt den Fahnverlauf (hier mit einer Schwerewelle), der graue Hintergrund den Fahndurchmesser. Die schwarz-gestrichelte Linie zeigt den Fahnverlauf mit Abbruchkriterium, die dicke grüne Linie den Verlauf, der durch Übergabe der Parameter Endüberhöhung und Entfernung in einem Partikelmodell realisiert wird (siehe Abschnitt 4.3.5). Die blaue Linie zeigt den Verlauf der Fahne nach der Richtlinie VDI 3782 Blatt 3 (1985), die dünne grüne Linie die Realisierung dieses Verlaufes im Partikelmodell.

Fahne im Prinzip immer weiter an. Hier ist zur Festlegung der Endhöhe ein Abbruchkriterium erforderlich.

Übliche Abbruchkriterien beruhen auf einer Festlegung, wann die Fahne im Vergleich zur Umgebungsluft ihre Eigenständigkeit verloren hat. Meist wird hierzu die Vertikalgeschwindigkeit der Fahne  $u_z$  mit den vertikalen Geschwindigkeitsfluktuationen  $\sigma_w$  der Umgebungsluft verglichen. Sind beide etwa gleich, wird die Fahne rasch von der Umgebungsturbulenz aufgebrochen und eine weitere Überhöhung kann vernachlässigt werden. Ein Vergleich der Dissipationsraten in der Fahne und in der Umgebungsluft läuft auf ein ähnliches Abbruchkriterium hinaus. Eine Übersicht über verschiedene Kriterien gibt WEIL (1988).

Ein allgemeiner Ansatz für ein Abbruchkriterium, der auch für nicht-horizontalen Austritt und den allgemeinen dreidimensionalen Fall geeignet ist, ist der Vergleich des Betrages der Relativgeschwindigkeit zwischen Fahne und Umgebungsluft  $w$  mit den mittleren Geschwindigkeitsfluktuationen der Umgebungsluft  $\bar{\sigma}$ :

$$w \stackrel{?}{<} f \bar{\sigma} \tag{4.56}$$

$$\text{mit } w = |\mathbf{u} - \tilde{\mathbf{u}}| \tag{4.57}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)/3} \tag{4.58}$$

$$f = \mathcal{O}(1) \tag{4.59}$$

Die Profilkfunktionen nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) enthalten Detailannahmen zum Höhenverhalten, zu stabilitätsabhängigen Korrekturtermen und zur Abhängigkeit von der Mitte-

lungszeit. Um das Abbruchkriterium einfacher und robuster zu gestalten, wurden die Werte für indifferente Schichtung, Bodennähe und unter Annahme einer Mittelungszeit von 10 Minuten bestimmt mit dem Ergebnis  $\bar{\sigma} = 1.5u_*$  (Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$ ).

Auf dieser Grundlage wurde das Abbruchkriterium festgelegt als

$$w \stackrel{?}{<} f u_* \quad (4.60)$$

mit einem Wert für  $f$  zwischen etwa 1 und 2.

Um auch für die wenigen Fälle insbesondere bei indifferenter und labiler Schichtung gewappnet zu sein, in denen das Abbruchkriterium nicht greift, wird zusätzlich per Konvention eine maximale Fahnenhöhe von 800 m über Grund festgelegt, was einer typischen Höhe der Mischungsschicht bei indifferenter Schichtung entspricht. Dieser Wert kam auch in den bisherigen Überhöhungsrichtlinien VDI 3782 Blatt 3 (1985) und VDI 3784 Blatt 2 (1990) zum Einsatz. Auf eine nähere Unterscheidung zwischen indifferenter und labiler Schichtung wird hierbei verzichtet, da zum einen effektive Quellhöhen in diesem Wertebereich nicht mehr von praktischer Relevanz für die bodennahe Konzentration sind und zum anderen so keine Vorgabe der Ausbreitungsklasse nötig ist.

### 4.3.3 Profile nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017)

*PLURIS* benötigt zur Berechnung der Fahnenüberhöhung Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Temperatur. Diese Profile werden gemäß der überarbeiteten Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) definiert.<sup>3</sup>

Die Profile nach VDI 3783 Blatt 8 (2017) werden über Vorgabe der Rauigkeitslänge, Verdrängungshöhe, Klug/Manier-Ausbreitungsklasse (oder Obukhov-Länge) sowie Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Temperatur in einer vorgegebenen Höhe initialisiert. Optional kann auch die Mischungsschichthöhe und, alternativ zur Windgeschwindigkeit, die Schubspannungsgeschwindigkeit vorgegeben werden.

Für das Temperaturprofil oberhalb einer Höhe  $z_T$  wird, abweichend von dem Standardprofil nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017), ein etwas schwächerer Temperaturgradient  $\Gamma_T$  als der trocken-adiabatische Gradient  $\Gamma = -0.00978 \text{ K/m}$  angesetzt. Hiermit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass in der Natur der Temperaturgradient auch durch Kondensationseffekte beeinflusst ist, die in der Richtlinie nicht betrachtet wurden, im Mittel aber zumindest ansatzweise berücksichtigt werden sollten; siehe auch die Diskussion in Abschnitt 3.2.9.6.

Für feuchte Umgebungsluft gibt es mehrere Varianten für die Festlegung des Feuchteprofils, hier diskutiert am Beispiel einer adiabatisch geschichteten Atmosphäre ohne Quellen und Senken für das Wasser:

<sup>3</sup>Die Profile wurden in einer eigenen Java-Klasse (`BLProfile2Layer.java`) implementiert, die auch der Arbeitsgruppe dieser Richtlinie zur Verfügung steht. Die Klasse wurde in das JAVA-Programm *IBJpluris* integriert.



1. Der spezifische Wasserdampfgehalt wird als vertikal konstant angenommen. Zusammen mit einem trocken-adiabatischen Temperaturgradienten ergibt das ein konsistentes Bild, denn es bedeutet, dass bei dem Vertikaltransport des Wasserdampfes keine Kondensation auftritt, entsprechend ändert sich auch der Temperaturgradient nicht.

Problematisch wird dieser Ansatz, wenn in größerer Höhe der spezifische Wasserdampfgehalt aufgrund abnehmender Temperatur größer als der Gehalt bei Sättigung wird. Dann sollte Kondensation eintreten und entsprechend müsste der Temperaturgradient angepasst werden.

2. Die relative Feuchte wird als vertikal konstant angenommen. Der Wasserdampfgehalt wird dann mit zunehmender Höhe kleiner, dann sollte Kondensation vorliegen und der Temperaturgradient betragsmäßig kleiner als der trocken-adiabatische sein.

In der Referenzimplementierung *IBJpluris* 3.0 wurde mit einer vertikal konstanten relativen Feuchte (standardmäßig 0.7, d.h. 70%) die zweite Variante implementiert und der Temperaturgradient oberhalb  $z_T = 200$  m wurde auf  $\Gamma_T = -0.0085$  K/m gesetzt, wobei die Werte eine einfache Konvention, basierend auf verschiedenen Tests und Vergleichen, darstellen.

Anstelle dieser Profile können von *IBJpluris* auch einfachere Profile, die auf einem Potenzansatz für die Windgeschwindigkeit bzw. auf einem vorgegebenen konstanten Temperaturgradienten basieren, oder extern über eine Datei vorgegebene Profile eingesetzt werden. Die verwendeten Profile werden in der Ergebnisdatei *IBJpluris.dma* protokolliert.

#### 4.3.4 Stacktip downwash

In Lee eines Schornsteins kann sich kurz unterhalb der Austrittsöffnung ein Unterdruckgebiet ausbilden, das zu einer Einmischung eines Teils der Abluftfahne führt (*stacktip downwash*). Im Rahmen eines integralen Überhöhungsmodells (es werden die über den Fahnenquerschnitt gemittelten Größen betrachtet) kann diese Einmischung nur näherungsweise über eine Reduzierung der Fahnenüberhöhung berücksichtigt werden.

Üblicherweise wird davon ausgegangen, dass das Verhältnis  $K$  von Austrittsgeschwindigkeit  $u_0$  zu Windgeschwindigkeit in Auslasshöhe  $\tilde{u}_h$  größer als etwa 1.5 sein muss, damit ein solcher *stacktip downwash* vernachlässigt werden kann, siehe zum Beispiel BRIGGS (1984). Für eine thermisch dominierte Fahne finden OVERCAMP & HOULT (1971) in ihren Messungen (dort Bild 8) kritische Werte  $K_{\text{krit}} = 1$  bei der densimetrischen Froude-Zahl am Auslass  $F_r = 4$ ,  $K_{\text{krit}} = 0.5$  für  $F_r = 1$  und  $K_{\text{krit}} = 0.3$  für  $F_r = 0.5$ , wobei die Abhängigkeit  $K_{\text{krit}} \propto F_r^{2/3}$  angenommen wird.

Diese Befunde werden in grober Näherung durch folgenden einfachen Ansatz wiedergegeben

$$K > K_{\text{krit}} = \frac{1.5}{1 + 2F_r^{-2/3}} \quad (4.61)$$

Diese Bedingung wird implementiert, indem die Überhöhung (genauer die ausgewiesene, in

einer Ausbreitungsrechnung zu verwendende Austrittsgeschwindigkeit) mit dem Faktor

$$f_{\text{red}} = \min(1, K/K_{\text{krit}}) \quad (4.62)$$

multipliziert wird.<sup>4</sup>

### 4.3.5 Parameter für die Ausbreitungsrechnung

Der mit einem Überhöhungsmodell berechnete Fahnenverlauf und die berechnete Endüberhöhung  $h_f$  müssen für die Anwendung in einem Lagrangeschen Partikelmodell in die Überhöhungsparameter  $v_0$  (gerichtete Austrittsgeschwindigkeit) und  $T_s$  (Abklingzeit, mit der  $v_0$  abgebaut wird) überführt werden, siehe Richtlinie VDI 3945 Blatt 3 (2000). Der Verlauf der Überhöhung im Partikelmodell hat die Form

$$h(t) = v_0 T_s (1 - e^{-t/T_s}) \quad (4.63)$$

mit der Transportzeit  $t$ . Für die zwei freien Parameter  $v_0$  und  $T_s$  werden zwei Bedingungen benötigt. Die eine ist offensichtlich  $v_0 T_s = h_f$ .

Als weitere Bedingung wird gefordert, dass die halbe Endüberhöhung in der Ausbreitungsrechnung nach derselben Transportzeit angenommen wird wie im Überhöhungsmodell. Ist  $t_{1/2}$  diese Zeit, dann folgt aus dieser Bedingung  $T_s = t_{1/2} / \ln 2$  und aus dem so bestimmten  $T_s$  folgt  $v_0 = h_f / T_s$ .<sup>5</sup>

Mit dieser Festlegung von  $T_s$  ist gewährleistet, dass der im Ausbreitungsmodell realisierte zeitliche Verlauf der Fahnenachse dem des Überhöhungsmodells recht nahe kommt. Ein anschauliches Beispiel hierfür ist eine mit hohem Impuls nach oben freigesetzte Fahne bei stabiler Schichtung: Wenn die Fahne nach oben steigt und gegen eine Inversionsschicht stößt, dann ist die Endhöhe rasch erreicht, aber die Fahne besitzt noch einen erheblichen Geschwindigkeitsüberschuss, der erst in wesentlich größerer Entfernung soweit abgebaut ist, dass das Abbruchkriterium (Gleichung 4.60) greift. Durch Anpassung von  $T_s$  an die halbe Endüberhöhung, die bereits in geringer Entfernung angenommen wird, ergibt sich der rasche Fahnenanstieg auch im Verlauf nach Gleichung (4.63).

*IBJpluris* weist zum Ende der Rechnung die Werte der beiden Modellparameter  $v_0$  und  $T_s$  aus.

<sup>4</sup>In *IBJpluris* kann die Multiplikation mit diesem Faktor über die Option `--skip-stacktip-downwash` unterbunden werden.

<sup>5</sup>Da bisher im allgemeinen kein Fahnenverlauf, sondern nur die Endüberhöhung vorlag, wurde in AUSTAL2000 und in LASAT die Abklingzeit mit  $T_s = 0.4x_f/u_q$  abgeschätzt mit der Entfernung  $x_f$ , in der die Endüberhöhung erreicht wird und der Windgeschwindigkeit in Bauhöhe der Quelle  $u_q$ . Diese Abschätzung ergibt sich aus der oben genannten Bedingung (halbe Endüberhöhung in derselben Transportzeit) bei Anwendung der Briggs-Formel für thermische Fahnen.

## 4.4 Zusätzliche Aspekte

### 4.4.1 Fahneninduzierte Turbulenz

Die Aufweitung der Fahne durch fahneninduzierte Turbulenz wird in dem Überhöhungsmodell berücksichtigt, bisher jedoch nicht in der Ausbreitungsrechnung nach TA Luft, wo nur die Änderung der Fahnenachse eingeht.

Standardmäßig stehen in einem Ausbreitungsmodell wie LASAT oder AUSTAL2000 als Modellierungsparameter quellspezifische Geschwindigkeitsfluktuationen  $\sigma_0$  (im Folgenden vereinfacht als isotrop angenommen) zur Verfügung, die mit derselben Zeitkonstante  $T_s$  wie die Austrittsgeschwindigkeit  $v_0$  abgebaut werden. Der räumliche Versatz aufgrund der Austrittsgeschwindigkeit (im einfachen Fall eines vertikalen Austritts also die Überhöhung)  $h$  und die räumliche Aufweitung (Standardabweichung der Verteilung um den Massenschwerpunkt)  $\sigma_{xyz}$  aufgrund der Geschwindigkeitsfluktuationen  $\sigma_0$  haben also die Form (siehe Abschnitt 4.3.5)

$$h(t) = v_0 T_s (1 - e^{-t/T_s}), \quad (4.64)$$

$$\sigma_{xyz}(t) = \sigma_0 T_s (1 - e^{-t/T_s}). \quad (4.65)$$

In diesem Rahmen der Ausbreitungsmodellierung ist also

$$\sigma_{xyz}(t) = \frac{\sigma_0}{v_0} h(t). \quad (4.66)$$

In einer vereinfachten Beschreibung des Überhöhungsmodells (siehe Abschnitt 4.5.1) ist der Radius der Fahne ebenfalls proportional zur Überhöhung,

$$R(t) = \mu h(t), \quad (4.67)$$

wobei der Wert von  $\mu$  von der Art der Umgebungsströmung und der Definition des Radius abhängt. Bei Fahnen in ruhender Umgebung wurden Werte für  $\mu$  anhand der Aufweitung und Vergleich mit theoretischen Querschnittsprofilen bestimmt (siehe JANICKE & JANICKE, 2001); für Rechteckprofile wie in dem integralen Fahnenmodell *PLURIS* liegt der Wert bei etwa  $\mu = 0.15$ . Für Fahnen im *bent over* Bereich wurden Werte für  $\mu$  anhand des Verlaufs der Fahnenachse bestimmt, in die  $\mu$  ebenfalls eingeht ( $\mu$  entspricht hier dem Faktor  $\beta$  der Briggs-Formeln, siehe Abschnitt 4.5.1); ein typischer Wert liegt bei  $\mu = 0.6$ , allerdings ist nicht klar, auf welche Annahmen zum Querschnittsprofil dieser zu beziehen ist.

Schließlich muss auch noch ein Proportionalitätsfaktor  $\nu$  zwischen  $R$  und  $\sigma_{xyz}$  von der Größenordnung 1 abgeleitet bzw. festgelegt werden. Damit ergibt sich aus den Gleichungen (4.66) und (4.67)

$$\sigma_0 = \frac{\mu}{\nu} v_0. \quad (4.68)$$

Angesichts der Unsicherheiten wird vorgeschlagen, für  $\mu/\nu$  den eher kleinen Wert 0.1 anzusetzen. Die im Ausbreitungsmodell durch die Zusatz-turbulenz bedingte zusätzliche Aufweitung der Fahne beträgt dann 10% der Endüberhöhung.

#### 4.4.2 Nahe beieinander liegende Quellen

Bei nahe beieinander liegenden Kaminen kann, je nach ihrer Anordnung zur Windrichtung und ihrem Betriebszustand, die Fahnenüberhöhung sich reduzieren oder zunehmen. Eine Zunahme ist denkbar, wenn der Betrieb aller Kamine zu einer Überlagerung und gegenseitigen Verstärkung der Aufstiegskräfte führt, so dass sie wie eine Fahne betrachtet werden können. Im Gegensatz dazu können die Strömungsverhältnisse um mehrere Kamine zu einer Überlagerung der Nachlaufzonen und einer Erhöhung der leeseitigen Unterdrücke führen. Insbesondere falls dann nur einzelne Kaminzüge in Betrieb sind, werden die Abluftfahnen, trotz unkritischer Werte für den Einzelkamin, nach unten gezogen.

Eine Festlegung der in solchen Fällen notwendigen Erhöhung der Austrittsgeschwindigkeit konnte im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens aufgrund fehlender, für diese Fragestellung geeigneter Messdaten nicht getroffen werden. Ersatzweise wurden Daten aus der Literatur herangezogen, die die verschiedenen Formen der Interaktion der Strömung zwischen mehreren Kaminen aufzeigen. Die Kamine werden dabei vereinfacht als lange zylindrische Körper mit dem Außendurchmesser  $D$  behandelt. Durch einen Vergleich der verschiedenen Strömungszustände lässt sich ableiten, ab welchen Abständen die gegenseitige Beeinflussung der Umströmung der Kamine als gering anzusehen ist.

In Bild 4.2 sind zwei Kamine in verschiedenen, dimensionslos dargestellten Abständen  $x/D$  hintereinander und  $y/D$  quer zur Strömung angeordnet. In Abhängigkeit von Abstand und Anströmrichtung stellen sich unterschiedliche Strömungszustände ein.

Bezieht man die Abstände auf die äußeren Wandungen der Kamine bzw. Zylinder, verhalten sich zwei in Strömungsrichtung hintereinander angeordnete Kamine wie ein einzelner Körper, wenn ihr Abstand  $x/D < 0.1$  ist. Bis zu einem Abstand  $x/D < 0.7$  hüllt die Scherschicht des stromauf liegenden Zylinders den stromab liegenden ein, wobei es zu Instabilitäten kommen kann. Die unmittelbare Beeinflussung der Nachlaufzonen reicht, je nach Art der Anströmung, bis zu einem Abstand von  $x/D$  zwischen 1.8 und 2.5.

Bei zwei quer zur Strömung nebeneinander angeordneten Kaminen findet eine Beeinflussung ebenfalls bei Abständen von etwa  $y/D < 2$  statt. Je nach Kamindurchmesser und Windgeschwindigkeit stellt sich eine instabile Spaltenströmung für Abstände  $y/D$  kleiner als etwa 0.7 bis 1.2 ein, wobei die höheren Werte eher für geringere Windgeschwindigkeiten gelten und umgekehrt. Bei derartigen Abständen können sich die bis dahin separaten Nachlaufzonen zweier nebeneinander angeordneter Zylinder schlagartig zu einer gemeinsamen Zone vereinigen (siehe SPIVACK, 1946).

In Bild 4.3 nach ZDRAVKOVICH (1985) ist die Zone direkter Beeinflussung zweier Zylinder als so genannte *proximity region* dargestellt. Sie umfasst, unabhängig von der Anströmrichtung, Abstände der Zylinder bzw. Kamine kleiner als  $2D$ , bezogen auf die äußeren Wandungen. Sind zwei Kamine näher zueinander angeordnet, ist daher von einer gegenseitigen Beeinflussung auszugehen.

Mehr als nur zwei nebeneinander zur Strömung angeordnete Kamine führen zu noch komplexeren und instabilen Strömungsmustern, wie das Bild 4.4 zeigt. Bei einem einreihigen, quer

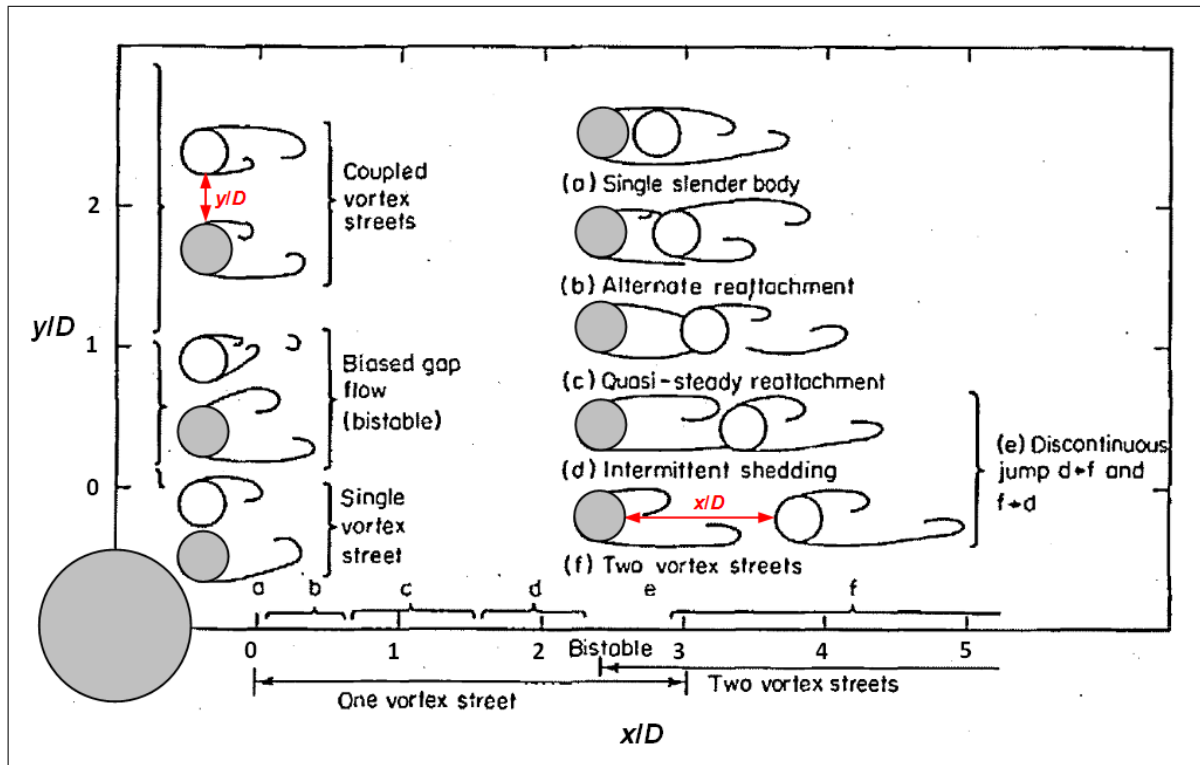


BILD 4.2: Strömungszustände bei zwei im dimensionslos dargestellten Abstand  $x/D$  hintereinander bzw. im Abstand  $y/D$  nebeneinander angeordneten Zylindern (modifiziert nach ZDRAVKOVICH, 1985). Die kleinen Teilzeichnungen in der Bildmitte verdeutlichen die jeweilige Situation, ihr Maßstab entspricht nicht denen der Achsenwerte, auf die sich die Situationen beziehen.

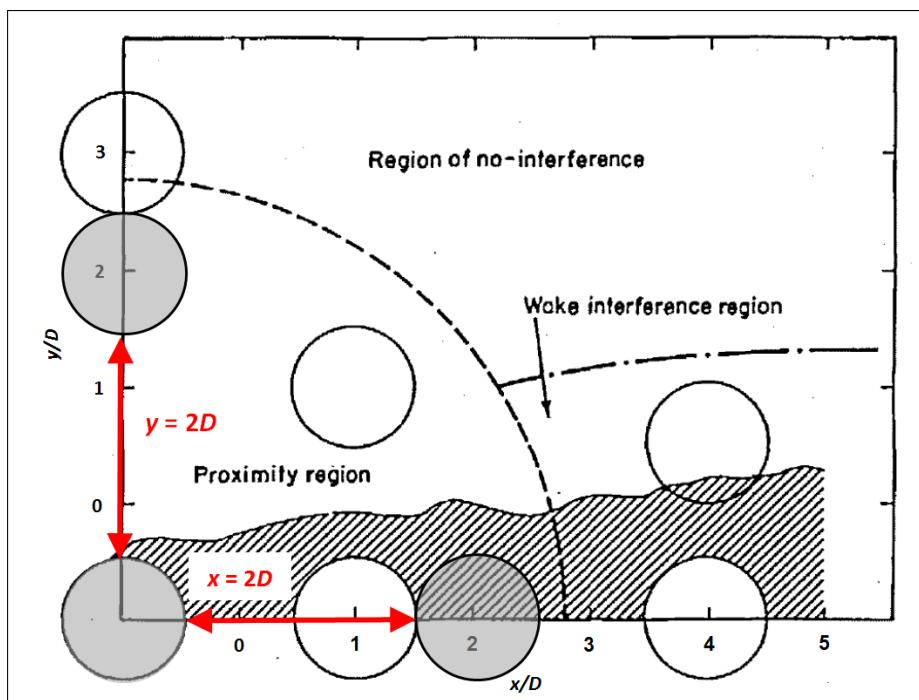


BILD 4.3: Bereiche der Interaktion zwischen zwei Zylindern bzw. Kaminen (modifiziert nach ZDRAVKOVICH, 1985).

angeströmten Rohrbündel, ähnlich einer gängigen Anordnung von Abluftkaminen in der Tierhaltung, vereinigen sich bei Abständen der Einzelkamine von  $y/D$  zwischen 0.5 und 1.2 jeweils zwei Strömungen zwischen zwei Kaminen paarweise. Diese Paarungen sind allerdings instabil und können sich schlagartig neu sortieren, was entsprechende Auswirkungen auf die Druckverteilungen und damit auf den *stacktip downwash* hat. Bei Abständen kleiner als  $0.5y/D$  erfolgt eine Gruppierung aus nicht nur zwei, sondern mehreren Zwischenströmungen. Diese Gruppierung ist allerdings ebenfalls instabil.

Die Interaktion zwischen mehreren, nahe beieinander liegenden Kaminen sollte in der Überarbeitung der Richtlinie VDI 3782 Blatt 3 (1985) bei der Festlegung, für welche Abstände und Anordnungen noch zuverlässig von einer ungestörten Überhöhung der Abluftfahnen ausgegangen werden kann, berücksichtigt werden.

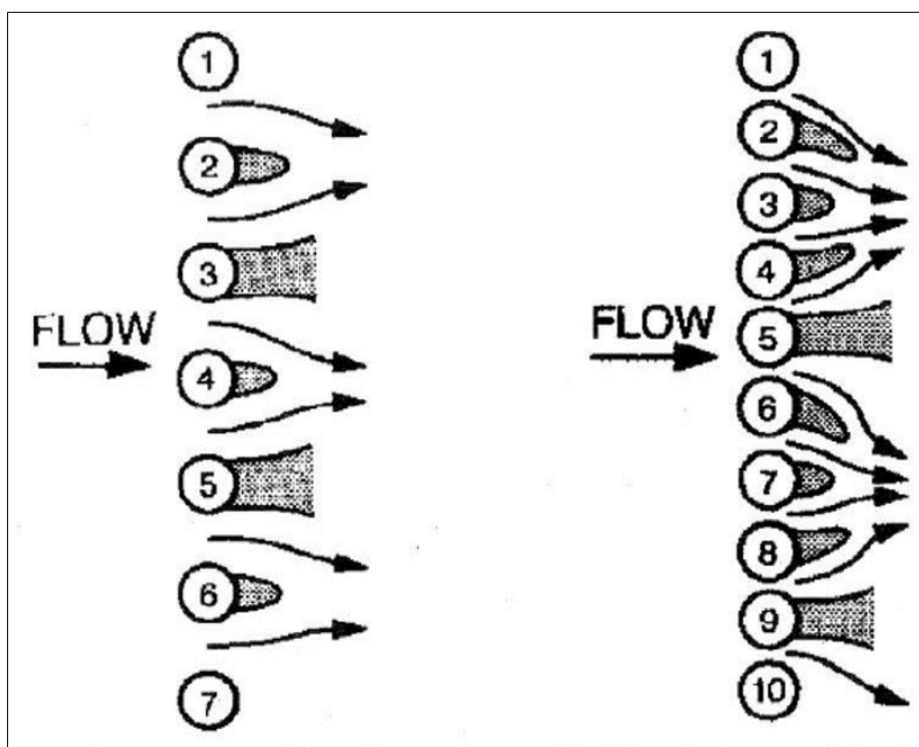


BILD 4.4: Links: Paarweise Vereinigung der Zwischenströmungen bei der Anströmung mehrerer, im Abstand  $y/D$  zwischen 0.5 und 1.2 nebeneinander angeordneter Zylinder. Rechts: Gruppierung der Zwischenströmungen bei der Anströmung mehrerer Zylinder im Abstand  $y/D < 0.5$ . Nach MORETTI (1993).

## 4.5 Überhöhungsformeln nach der Richtlinie VDI 3782 Blatt 3 (1985)

Die Formeln der aktuellen Richtlinie VDI 3782 Blatt 3 (1985) basieren im Wesentlichen auf den sogenannten Briggs-Formeln. Zusätzlich wurden Kriterien für die Festlegung der Endüberhöhung von Briggs übernommen und modifiziert. Im Folgenden werden ein paar grundlegende Herleitungen angegeben, um die Formeln der bisherigen Richtlinie VDI 3782 Blatt 3 (1985) und die Näherungen, auf denen sie basieren, zu beleuchten.

### 4.5.1 Herleitung der Briggs-Formeln

Eine von einem Kamin vertikal freigesetzte Abluftfahne sei bereits deutlich in Richtung der Umgebungsströmung umgebogen (*bent over plume*) und ihre Dichte unterscheide sich nur geringfügig von der der adiabatisch geschichteten Umgebungsluft. Die Horizontalgeschwindigkeit der Fahne  $u$  unterscheidet sich dann nur noch wenig von der der Umgebungsluft  $\tilde{u}$  und ist näherungsweise konstant. Die Vertikalgeschwindigkeit der Fahne  $u_z$  führt zu einer Erhöhung der Fahnenachse mit zunehmender Entfernung  $x$ . Der Verlauf der Fahnenachse  $h(x)$  relativ zur Freisetzungshöhe lässt sich mit diesen Näherungen analytisch bestimmen. Für die Herleitung gibt es unterschiedliche Ansätze, im Folgenden wird eine reine Impulsfahne und eine auftriebsdominierte Fahne betrachtet.<sup>6</sup>

Die Erhaltungsgleichung für die Masse, die durch den Fahnenquerschnitt mit Radius  $R$  transportiert wird, vereinfacht sich mit den Näherungen zu

$$(uR^2)' \approx u(R^2)' = 2E \quad (4.69)$$

mit der Einmischfunktion  $E$  und dem Hochstrich als Kurzschreibweise für die Ableitung nach  $x$ . Die Einmischfunktion wird festgelegt als  $E = \beta R u_z$  mit der empirischen Konstanten  $\beta$ . Damit ergibt sich

$$R' = \beta \frac{u_z}{u} . \quad (4.70)$$

Der Bruch auf der rechten Seite beschreibt den Fahnenanstieg  $h'(x)$ , also

$$R' = \beta h' \quad (4.71)$$

und somit

$$R(x) = R_0 + \beta h(x) . \quad (4.72)$$

Bei vernachlässigbarem Anfangsradius  $R_0$  ist der Radius der Fahne gleich  $\beta$  mal der Höhe der Fahne über Austrittsniveau. Tatsächlich wurde die Einmischfunktion gerade so gewählt, dass dieser experimentelle Befund wiedergegeben wird.

<sup>6</sup>Soweit erforderlich und nicht explizit anders dargestellt gelten SI-Einheiten. Beispielsweise ist im Ausdruck  $x^{1/3}$  die Länge  $x$  in m und im Ausdruck  $F^{1/3}$  der Auftriebsparameter  $F$  in  $\text{m}^4/\text{s}^3$  einzusetzen.

Die Erhaltungsgleichung für den Vertikalimpuls lautet näherungsweise

$$(R^2 uu_z)' = \frac{F}{u} \quad (4.73)$$

mit

$$F = guR^2 \frac{\tilde{\rho} - \rho}{\tilde{\rho}}. \quad (4.74)$$

Die Größe  $F$  entspricht der mit der Umgebungsdichte normierten Auftriebskraft pro Zeiteinheit. Bei adiabatischer Expansion der Fahne und adiabatisch geschichteter Umgebung ist sie näherungsweise konstant, so dass

$$F = F_0 = gu_0 R_0^2 \frac{\tilde{\rho} - \rho_0}{\tilde{\rho}} \quad (4.75)$$

gesetzt werden kann.

Fall 1: Impulsüberhöhung,  $F = 0$ .

Der Vertikalimpuls ist in diesem Fall konstant, also gleich seinem Anfangswert,

$$R^2 uu_z = R_0^2 u_0^2. \quad (4.76)$$

Mit den Abkürzungen  $K = u_0/\tilde{u}$  und  $D_0 = 2R_0$  sowie den Beziehungen  $R \approx \beta h$  und  $u_z = hu \approx h\tilde{u}$  folgt

$$4\beta^2 h^2 h' = D_0^2 K^2. \quad (4.77)$$

Einsetzen des Ansatzes  $h(x) = ax^b$  liefert

$$b = \frac{1}{3}, \quad a = \left(\frac{3}{4\beta^2}\right)^{1/3} (D_0 K)^{2/3} \quad (4.78)$$

und damit

$$h(x) = \left(\frac{3}{4\beta^2}\right)^{1/3} (D_0 K)^{2/3} x^{1/3} \quad (4.79)$$

oder mit dem Längenmaß  $l_m = D_0 K$

$$\frac{h(x)}{l_m} = \left(\frac{3}{4\beta^2}\right)^{1/3} \left(\frac{x}{l_m}\right)^{1/3}. \quad (4.80)$$

Fall 2: Thermische Überhöhung,  $F \neq 0$ .

Aus der Erhaltungsgleichung für den Vertikalimpuls folgt

$$\frac{F_0}{u^2} = (R^2 u_z)' \quad (4.81)$$





und hieraus mit  $u_z \approx h'u$ ,  $u'_z \approx h''u$  und  $u \approx \tilde{u}$

$$\frac{F_0}{\beta^2 \tilde{u}^3} = 2h(h')^2 + h^2 h'' . \quad (4.82)$$

Der Ansatz  $h(x) = ax^b$  liefert

$$b = \frac{2}{3} , \quad a = \left( \frac{3F_0}{2\beta^2 \tilde{u}^3} \right)^{1/3} \quad (4.83)$$

und damit

$$h(x) = \left( \frac{3F_0}{2\beta^2} \right)^{1/3} x^{2/3} \frac{1}{\tilde{u}} . \quad (4.84)$$

Dieser Ausdruck kann noch weiter umgeschrieben werden. Mit dem Quadrat der densimetrischen Froude-Zahl

$$F_{r,0}^2 = \frac{\tilde{\rho} u_0^2}{(\tilde{\rho} - \rho_0) g R_0} \quad (4.85)$$

folgt

$$h(x) = \left( \frac{3}{4\beta^2} \right)^{1/3} \left( \frac{u_0^3 D_0}{\tilde{u}^3 F_{r,0}^2} \right)^{1/3} x^{2/3} \quad (4.86)$$

und mit dem Längenmaß  $l_b = D_0 K^3 / F_{r,0}^2$

$$\frac{h(x)}{l_b} = \left( \frac{3}{4\beta^2} \right)^{1/3} \left( \frac{x}{l_b} \right)^{2/3} . \quad (4.87)$$

In die Ableitungen dieser sogenannten Briggs-Gleichungen sind folgende Annahmen eingegangen:

- Die Fahne ist stark umgebogen und unterscheidet sich in Geschwindigkeit und Dichte nur wenig von der Umgebungsluft.
- Die Geschwindigkeit der Umgebungsluft ist höhenunabhängig.
- Die Umgebungsluft ist adiabatisch geschichtet.
- Die Fahnenaufweitung ist wesentlich größer als der Anfangsradius.

### 4.5.2 Impulsüberhöhung

Nach BRIGGS (1975) gilt für die Impulsüberhöhung  $h(t)$  im *bent over* Bereich (vgl. Gleichung 4.79)

$$h(t) = \left( \frac{3}{\beta^2} \frac{F_m}{\tilde{u}} t \right)^{1/3} \quad (4.88)$$

mit dem empirischen Faktor  $\beta$ , dem durch  $\pi$  dividierten Geschwindigkeitsfluss  $F_m = u^2 D^2 / 4$  an der Kaminöffnung mit der Austrittsgeschwindigkeit  $u$  und dem Durchmesser  $D$ , der Windgeschwindigkeit an der Kaminöffnung  $\tilde{u}$  und der Transportzeit  $t$ .

Briggs legt als Endüberhöhung die Überhöhung fest, bei der die Dissipationsrate in der Fahne vergleichbar mit der Dissipationsrate der Umgebung  $\tilde{\epsilon}$  ist,

$$\eta \frac{w^3}{h} = \tilde{\epsilon} \quad (4.89)$$

mit der Vertikalgeschwindigkeit des Fahnenanstiegs  $w = \partial h / \partial t$  und dem empirischen Faktor  $\eta$  von der Größenordnung 1. Aus Gleichung (4.88) folgt

$$w = \frac{1}{\beta^2} \frac{F_m}{\tilde{u}} \frac{1}{h^2} \quad (4.90)$$

und aus Gleichung (4.89) ergibt sich die formale Endüberhöhung  $h_f$  zu

$$h_f = \left( \frac{1}{\beta^2} \frac{F_m}{\tilde{u}} \right)^{3/7} \left( \frac{\eta}{\tilde{\epsilon}} \right)^{1/7} . \quad (4.91)$$

Mit dem Ansatz (Überhöhung und absolute Höhe über Grund sind hier der Einfachheit halber gleichgesetzt)

$$\tilde{\epsilon} = \frac{u_*^3}{\kappa z} \quad (4.92)$$

folgt

$$h_f = \left( \frac{1}{\beta^2} \frac{F_m}{\tilde{u} u_*} \right)^{1/2} (\eta \kappa)^{1/6} . \quad (4.93)$$

Mit dem Ansatz  $u_* = \kappa \tilde{u} / \ln(z/z_0)$  (Rauigkeitslänge  $z_0$ ) und typischen Werten  $z = 100$  m und  $z_0 = 0.3$  m folgt  $u_* \approx \tilde{u} / 15$ . Zusammen mit  $\beta = 0.6$ ,  $\kappa = 0.4$  und der Schätzung  $\eta = 1.5$  (der genaue Wert ist aufgrund des kleinen Exponenten nicht kritisch) ergibt sich schließlich

$$h_f \approx 3 \frac{Du}{\tilde{u}} . \quad (4.94)$$

So ist in Richtlinie VDI 3782 Blatt 3 (1985) die Endüberhöhung für eine reine Impulsfahne definiert (Gleichung 18 der Richtlinie).

Richtlinie VDI 3945 Blatt 3 (2000) identifiziert die Endüberhöhung mit dem Erreichen von  $\partial z/\partial x < 0.005$  ( $x = \tilde{u}t$ ) oder  $w < \tilde{\sigma}_w$  (vertikale Geschwindigkeitsfluktuationen  $\tilde{\sigma}_w$ ). Mit  $\tilde{\sigma}_w \approx 1.3u_*$  und  $u_* \approx \tilde{u}/15$  ergibt sich

$$h_f \approx 11.8 \frac{Du}{\tilde{u}} \quad \text{bzw.} \quad h_f \approx 2.5 \frac{Du}{\tilde{u}}, \quad (4.95)$$

es ist in diesem Fall also immer das zweite Kriterium  $w < \tilde{\sigma}_w$  wirksam.

Allgemein ist nach diesen Überlegungen, die auf der Briggs-Formel basieren, die Endüberhöhung für das Abbruchkriterium  $w < \tilde{\sigma}_w$  gegeben als

$$h_f \approx \left[ 0.64 \sqrt{\frac{\tilde{u}}{u_*}} \right] \frac{Du}{\tilde{u}}. \quad (4.96)$$

Für niedrige Quellen ist der Vorfaktor in eckigen Klammern kleiner als für hohe Quellen. Richtlinie VDI 3782 Blatt 3 (1985) setzt dagegen den Vorfaktor auf den festen Wert 3.

### 4.5.3 Thermische Überhöhung

Es wird exemplarisch die Überhöhungsgleichung für indifferente Schichtung und einen Wärmestrom unter 6 MW nachvollzogen (Gleichung 11 der Richtlinie VDI 3782 Blatt 3, 1985).

Aus Gleichung (4.84) folgt mit dem Standardwert  $\beta = 0.6$

$$h(x) = 1.6F_0^{1/3} x^{2/3} \frac{1}{\tilde{u}}. \quad (4.97)$$

BRIGGS (1971) macht für die Entfernung  $x_*$ , in der die atmosphärische Turbulenz die Fahnenturbulenz überwiegt und zu einem Aufbrechen der Fahne führt, den Ansatz

$$F_0 > 55 \quad : \quad x_* = 34 \text{ m} \cdot F_0^{2/5} \quad (4.98)$$

$$F_0 < 55 \quad : \quad x_* = 14 \text{ m} \cdot F_0^{5/8} \quad (4.99)$$

und setzt die Distanz, in der die Endüberhöhung als erreicht angenommen wird, auf den Wert  $x_f = 3.5x_*$ .

Die Entfernung  $x_f$  hängt nur von den Quellparametern, nicht aber von atmosphärischen Parametern ab, insbesondere nicht von der Windgeschwindigkeit. Je nach Windgeschwindigkeit  $\tilde{u}$  ist aber die Steigung der Fahne an einem festen Ort  $x_f$  eine andere. Abbruchkriterien, die in Überhöhungsmodellen eingesetzt werden und sich an der Steigung der Fahnenachse orientieren, können also höchstens in einem gewissen Wertebereich von  $\tilde{u}$  die Ergebnisse von BRIGGS (1971) wiedergeben.

Für den Fall  $F_0 < 55$  ergibt sich damit die Endüberhöhung

$$h_f = h(x_f) = 1.6(3.5 \cdot 14)^{2/3} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \cdot F_0^{3/4} \frac{1}{\tilde{u}}. \quad (4.100)$$

Der Zusammenhang zwischen  $F_0$  und dem Wärmestrom  $Q$ , über den die Parametrisierung in der Richtlinie erfolgt, ist ( $T_n = 273.15 \text{ K}$ ,  $\rho_n = \rho(T_n) \approx 1.29 \text{ kg/m}^3$ ):

$$Q = c_p \rho_0 \pi R_0^2 u_0 (T_0 - \tilde{T}) \quad (4.101)$$

$$= c_p \rho_n T_n \pi R_0^2 u_0 \frac{T_0 - \tilde{T}}{T_0} \quad (4.102)$$

$$= c_p \rho_n T_n \pi R_0^2 u_0 \frac{\tilde{\rho} - \rho_0}{\tilde{\rho}} \quad (4.103)$$

$$= \left( \frac{c_p \rho_n T_n \pi}{g} \right) F_0 \quad (4.104)$$

$$= 110000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot F_0 \quad (4.105)$$

Der Grenzwert  $F_0 = 55 \text{ m}^4/\text{s}^3$  ist also gleichbedeutend mit  $Q = 6.05 \text{ MW}$ , in Übereinstimmung mit der Fallunterscheidung der Richtlinie (größer/kleiner 6 MW).

Der Wärmestrom  $Q$  kann geschrieben werden als

$$Q = c_p \rho_n \left[ \frac{\pi}{4} D_0^2 u_0 \frac{T_n}{T_0} \right] (T_0 - \tilde{T}). \quad (4.106)$$

Der Ausdruck in eckigen Klammern ist der Volumenstrom im Normzustand  $R_n$ . Die Richtlinie gibt dagegen folgende Formel für den Wärmestrom in MW an:

$$Q_{\text{VDI}} = 0.00136 \frac{\text{MWs}}{\text{K m}^3} \cdot R_n (T_0 - 283 \text{ K}) \quad (4.107)$$

Der Vergleich zeigt, dass hier von einer festen Umgebungstemperatur von 10 Grad Celsius und einer Abluftdichte im Normzustand von  $1.36 \text{ kg/m}^3$  ausgegangen wurde. Dieser Wert bzw. die ihm zugrunde liegende Molmasse wird in der Richtlinie als typisch für Abluft aus Steinkohlefeuerung angegeben. Für einen allgemeinen Einsatz des Überhöhungsmodells zu heutiger Zeit scheint es passender, hier standardmäßig normale Luft anzusetzen (Dichte im Normzustand  $1.29 \text{ kg/m}^3$ ).

Zurück zur Überhöhung. Die Richtlinie setzt aufgrund einer Auswertung weiterer Messungen nur 70% der Endüberhöhung nach Briggs (1971) an. Es ist also ( $Q_e = 1 \text{ MW}$ )

$$h_f = (0.7 \cdot 1.6(3.5 \cdot 14)^{2/3} 0.11^{-3/4}) \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \cdot \left( \frac{Q}{Q_e} \right)^{3/4} \frac{1}{\tilde{u}} \quad (4.108)$$

$$= 78.3 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \cdot \left( \frac{Q}{Q_e} \right)^{0.75} \frac{1}{\tilde{u}} \quad (4.109)$$

in guter Übereinstimmung mit der Richtlinie, die als Vorfaktor den Wert 78.4 angibt.

Auf ähnliche Weise lassen sich vermutlich auch die anderen Formeln der Richtlinie für die thermische Überhöhung nachvollziehen.

#### 4.5.4 Zusammenfassung

In die Überhöhungsformeln der Richtlinie VDI 3782 Blatt 3 (1985) gehen neben den Vereinfachungen der zugrunde liegenden Briggs-Gleichungen weitere Vereinfachungen und Annahmen ein, insbesondere:

- Die Entfernung, in der die Endüberhöhung erreicht wird, hängt nur von den Quelleigenschaften, nicht von der Windgeschwindigkeit ab. Oder anders interpretiert: Die Endüberhöhung bezieht sich implizit auf einen typischen Wertebereich der Windgeschwindigkeit.
- Die Endüberhöhung einer Impulsfahne bezieht sich implizit auf ein typisches Verhältnis von Windgeschwindigkeit zu Schubspannungsgeschwindigkeit.

Diese Aspekte müssen beachtet werden, wenn die Ergebnisse der Richtlinie denen eines weiter entwickelten Überhöhungsmodells wie *PLURIS* gegenübergestellt werden. Eine Übereinstimmung zwischen beiden Modellen kann höchstens in den Parameterbereichen erwartet werden, die den Vereinfachungen und Annahmen der Richtlinie zugrunde liegen. Dies sind insbesondere hinreichend große Quellhöhen, nicht zu große Queldurchmesser und typische Windgeschwindigkeiten.

## 4.6 Validierungen und Vergleiche

### 4.6.1 Validierungsrechnungen der Veröffentlichung

Es wurde der Großteil der Verifikations- und Validierungsrechnungen, die in der Veröffentlichung zu *PLURIS* (JANICKE & JANICKE, 2001) aufgeführt sind, mit dem Programm *IBJpluris* 3.0.16 nachgerechnet. Die Ergebnisse sind praktisch identisch mit denen der Veröffentlichung, so dass *IBJpluris* 3.0 in diesem Rahmen als verifiziert und validiert angesehen werden kann.

Die folgenden Bilder zeigen die Vergleiche analog zu denen in der Veröffentlichung.<sup>7</sup> Da die Übereinstimmung mit den dort aufgeführten Modellrechnungen fast exakt ist, wurde bei einigen Datensätzen auf Teilbilder verzichtet. Für eine nähere Erläuterung der Vergleiche und Daten siehe die Veröffentlichung.

---

<sup>7</sup>Die Auswertungen und grafischen Darstellungen können mit *IBJpluris* und dem Hilfsprogramm *IBJplurisValidate* erzeugt werden.

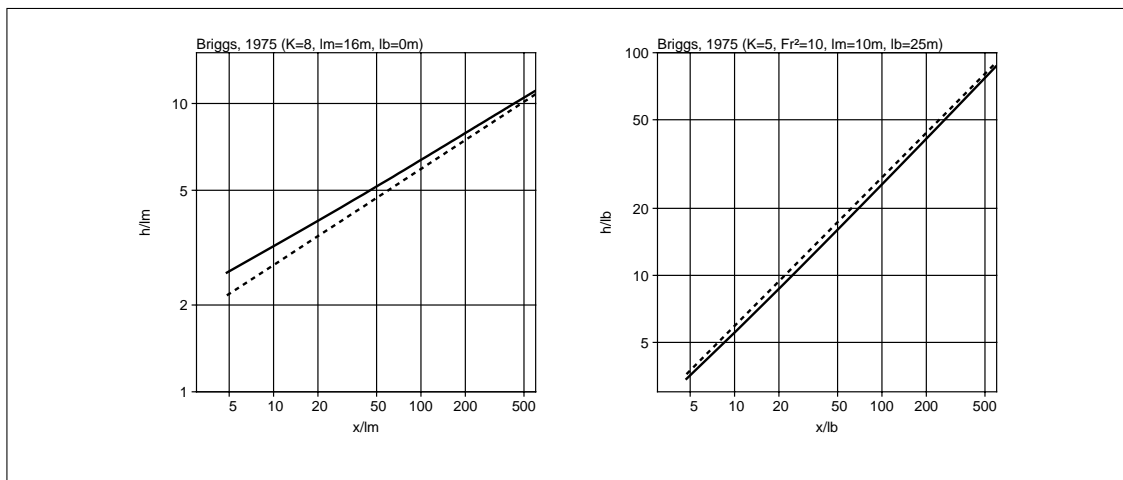


BILD 4.5: Vergleich mit Briggs'scher Näherungslösung (gestrichelt) für Impulsüberhöhung (links) und thermische Überhöhung (rechts).

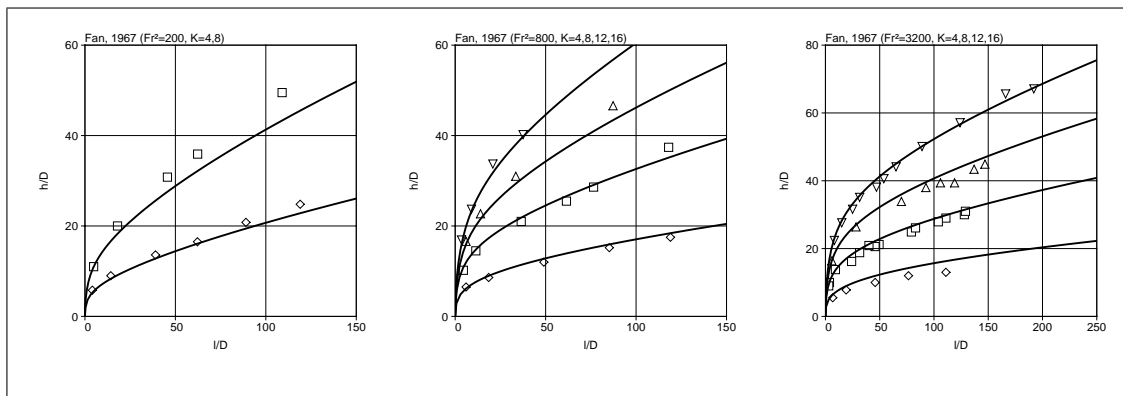


BILD 4.6: Vergleich mit Fan's Wassertankexperimenten (FAN, 1967) für drei verschiedene Froude-Zahlen  $Fr^2$  und unterschiedliche Geschwindigkeitsverhältnisse  $K = u(0)/\tilde{u}$ .

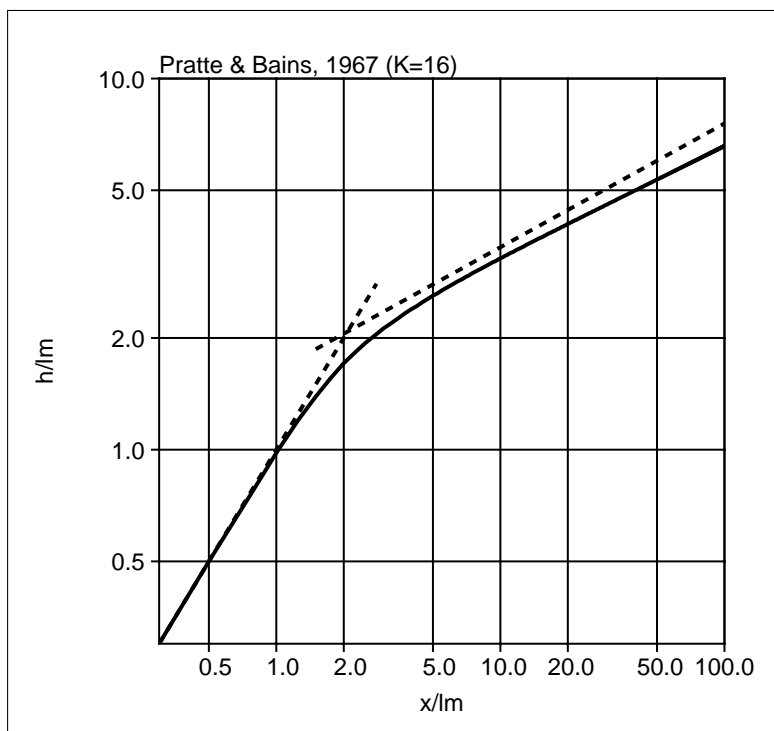


BILD 4.7: Vergleich mit den Analysen von PRATTE & BAINES (1967) für eine Impulsfahne.

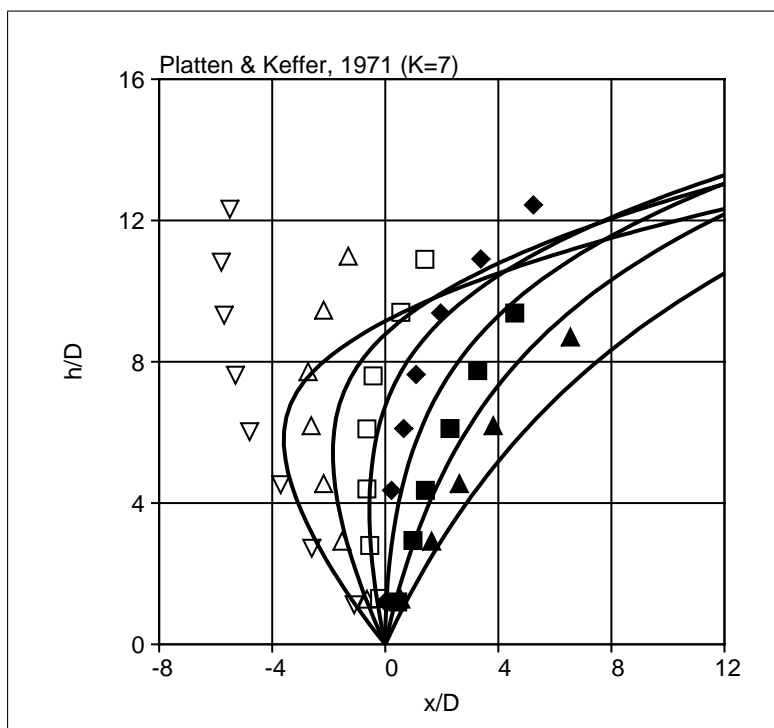


BILD 4.8: Vergleich mit den Messungen von PLATTEN & KEFFER (1971) für eine Impulsfahne bei nicht-vertikalem Austritt.

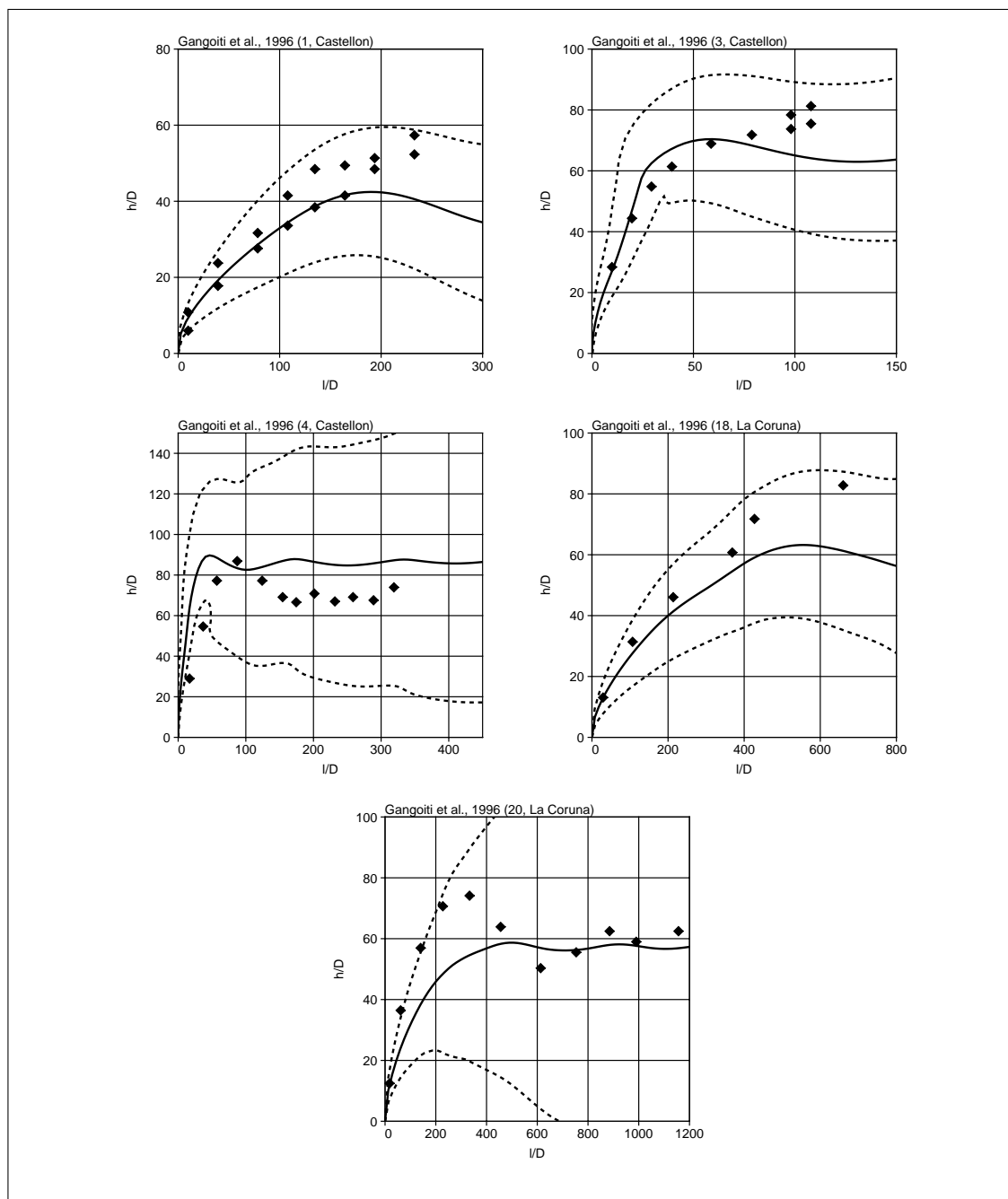


BILD 4.9: Vergleich mit den Messungen von GANGOITI ET AL. (1997) unter Verwendung der gemessenen meteorologischen Profile.



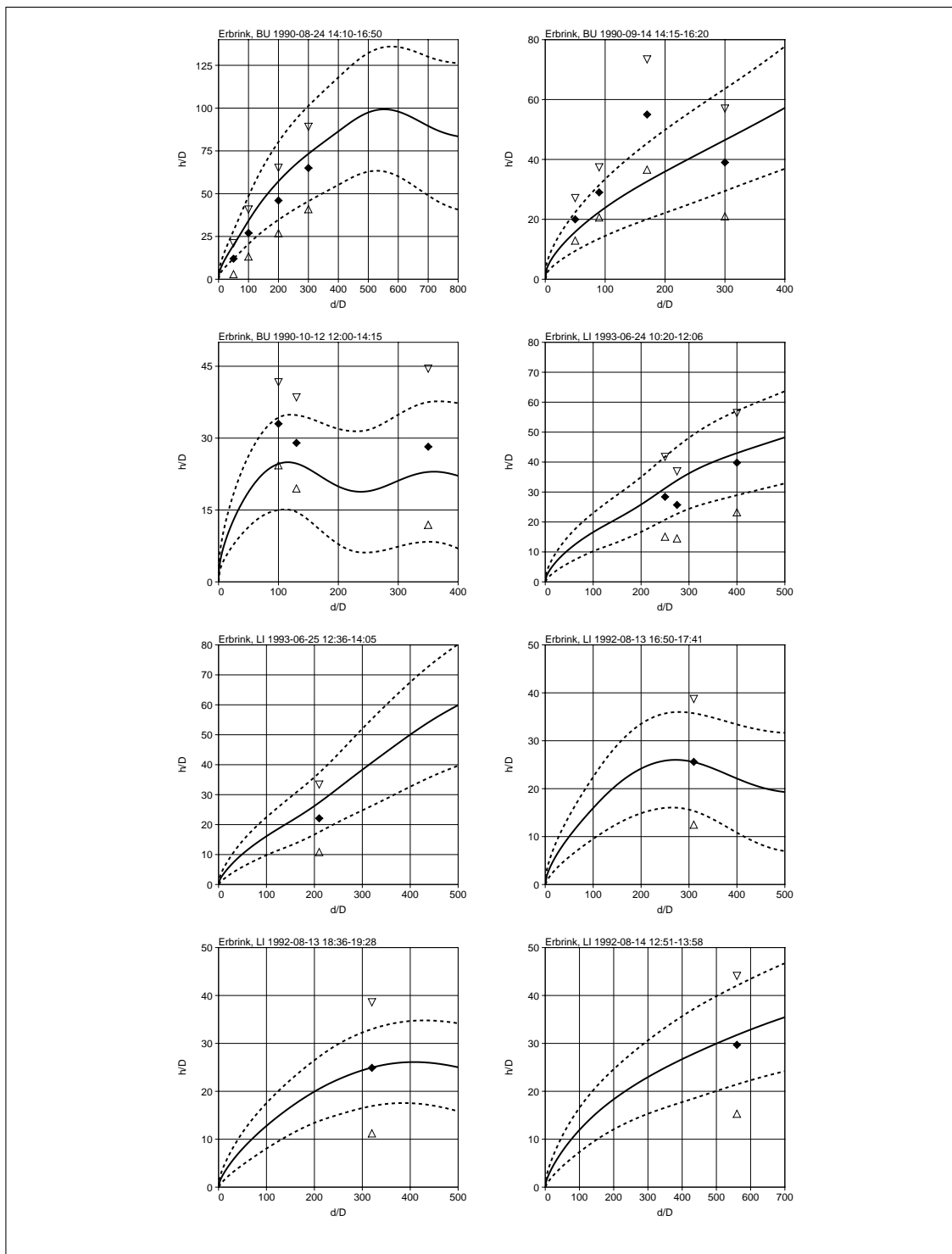


BILD 4.10: Vergleich mit den Messungen von ERBRINK (1994) unter Verwendung der gemessenen meteorologischen Profile (im Vergleich zu JANICKE & JANICKE, 2001, teilweise mit zusätzlichen Messwerten, extrahiert aus den Daten von Erbrink).

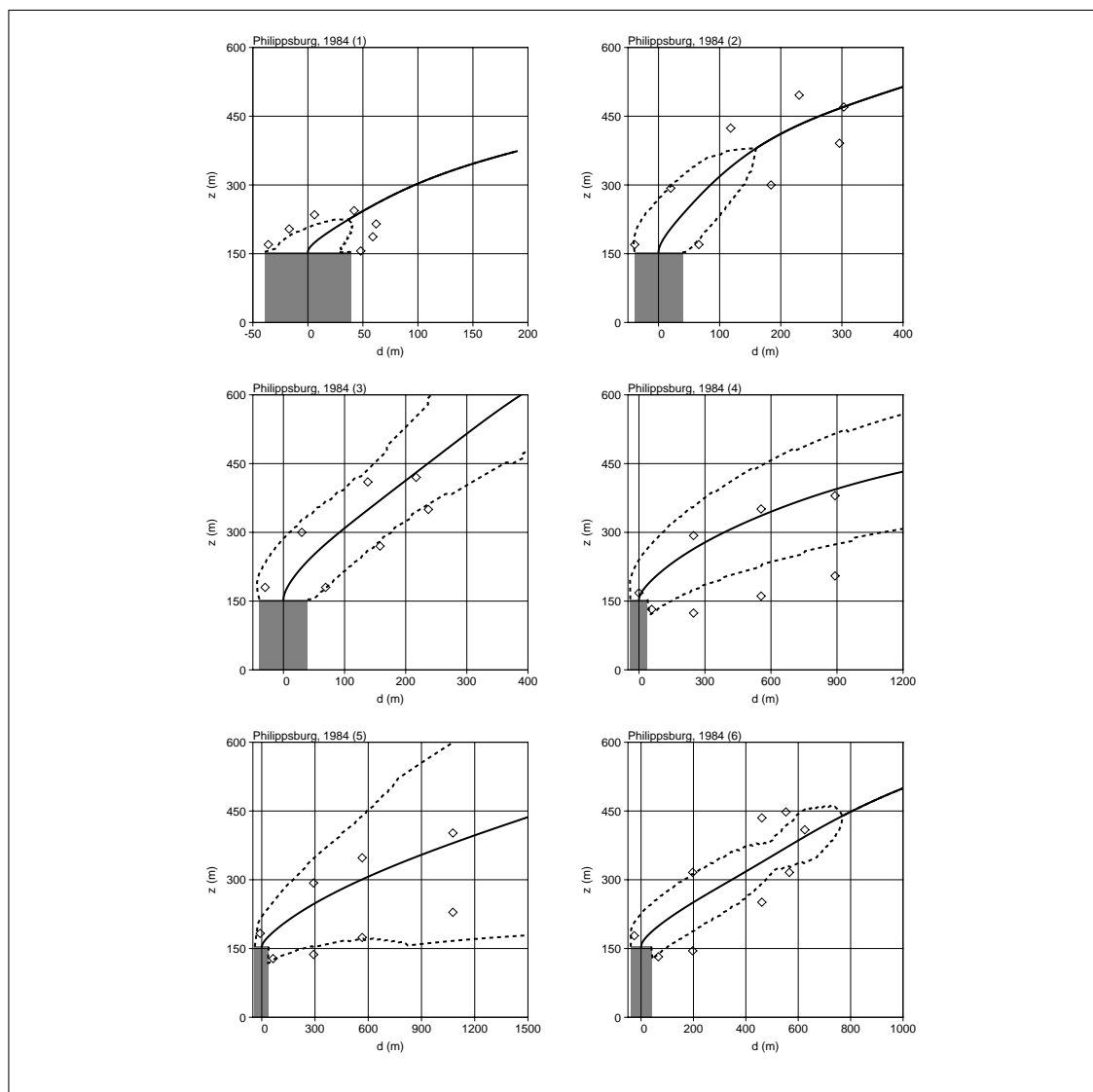


BILD 4.11: Vergleich mit den Messungen am Kühlturm Philippsburg (ERNST & WURZ, 1983; ERNST & SCHNABEL, 1984). Dargestellt sind die gemessenen sichtbaren Umrissse der kondensierten Fahne (Symbole) und die berechneten (gestrichelte Linien).

## 4.6.2 Vergleiche mit Richtlinie VDI 3782 Blatt 3 (1985)

Da in *IBJpluris* ab Version 3 ein Abbruchkriterium zur Bestimmung der Endüberhöhung eingeführt wurde, können die Ergebnisse direkt mit denen der Richtlinie VDI 3782 Blatt 3 (1985) verglichen werden. Für die Vergleiche wurden folgende Festlegungen getroffen:

1. Die Vertikalprofile von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und die Parameter  $u_*$ ,  $L$  (Obukhov-Länge),  $h_m$  werden gemäß Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) bestimmt.
2. Das Profil der Temperatur wird nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) bestimmt. Für Höhen größer als 200 m wird statt des trocken-adiabatischen Temperaturgradienten der Gradient  $\Gamma_T = -0.0085$  K/m verwendet (siehe Abschnitt 4.3.3).
3. Die Anemometerhöhe wird auf 10 m plus Verdrängungshöhe  $d_0 = 6z_0$  gesetzt.
4. Der Abbruchfaktor  $f$  wird auf den Wert 1.5 gesetzt (siehe Abschnitt 4.3.2).
5. Es werden jeweils zwei Rechnungen durchgeführt, einmal mit Berücksichtigung von *stacktip downwash* (Standardrechnung), siehe Abschnitt 4.3.4, und einmal ohne.

Für die Vergleiche wurde eine Vielzahl von Kombinationen von Quellparametern und meteorologischen Parametern einmal mit *IBJpluris* 3.0.17 und einmal nach VDI 3782 Blatt 3 (1985) durchgerechnet und die jeweiligen Endüberhöhungen in einer Datei gespeichert. Für einen einfacheren Vergleich mit der Richtlinie wurde für *IBJpluris* der Wärmestrom vorgegeben, der dann intern in die primäre Eingangsgröße Austrittstemperatur umgerechnet wurde.<sup>8</sup>

Für eine übersichtliche Darstellung wurde ein interaktives Grafikprogramm entwickelt, das die Ergebnisdatei einliest und die Werte in einem Streudiagramm für ausgewählte Parametersätze grafisch dargestellt.

In der Grafik wird jedes Wertepaar als ein gefülltes Rechteck dargestellt, die Werte eines Parameters werden durch die Farbe des Rechtecks unterschieden. Die Abfolge der Farben ist rot, grün, blau, orange, cyan, magenta, d.h. die Symbole für den ersten Wert werden in rot, die für den zweiten in grün usw. dargestellt. Bei mehr als 6 Werten erfolgt die Darstellung des Symbols nach dem sechsten Wert in schwarz. Im gelb hinterlegten Feld in der Grafik sind die ausgewählten Parametersätze aufgeführt. Der Parameter, auf den sich die Farbgebung bezieht, ist in Großbuchstaben dargestellt.

In allen Streudiagrammen der Standardrechnung ist zu sehen, dass *IBJpluris* im Bereich kleiner Überhöhungen (meist bedingt durch hohe Windgeschwindigkeiten) systematisch kleinere Werte als die Richtlinie liefert. Der Grund ist die Berücksichtigung des *stacktip downwash*, siehe Abschnitt 4.3.4. Ohne diese Korrektur verschwindet der systematische Unterschied in diesem Bereich.

<sup>8</sup>Nach der Vorschrift  $T_0 = \tilde{T} + Q(T_n + \tilde{T})/(a - Q)$  mit  $a = 0.00136(\pi/4)D_0^2 u_0 T_n$ , Austrittstemperatur  $T_0$  in °C, Normtemperatur  $T_n = 273.15$  °C, Umgebungstemperatur in Bodennähe  $\tilde{T}$  in °C (Standardwert 10 °C), Wärmestrom  $Q$  in MW, Quelldurchmesser  $D_0$  in m und Austrittsgeschwindigkeit  $u_0$  in m/s, siehe Gleichungen (4.106) und (4.107).

#### 4.6.2.1 Impulsfahne, kleine Quellhöhe

Bilder 4.12 und 4.13 zeigen den Vergleich für eine reine Impulsfahne (Wärmestrom  $Q = 0$ ) bei indifferenter Schichtung und kleiner Quellhöhe von 10 m. Die Farben beziehen sich auf unterschiedliche Rauigkeitslängen (rot 0.1 m, grün 0.5 m, blau 1.5 m).

Je größer die Rauigkeitslänge, desto stärker nimmt die Windgeschwindigkeit im Bereich der Quellhöhe zu, umso größer ist also die Windgeschwindigkeit oberhalb der Quellhöhe im Vergleich zu der in Quellhöhe und umso kleiner ist die Überhöhung nach *IBJpluris* im Vergleich zur Richtlinie, die die Windgeschwindigkeit in Quellhöhe für alle Höhen ansetzt.

Für niedrige Quellen und hohe Rauigkeit liefert *IBJpluris* also eine realistischere Modellierung als die Richtlinie. In den folgenden Vergleichen wird nur die Quellhöhe 100 m herangezogen, da sich hier dieses Manko der Richtlinie am wenigsten bemerkbar macht und andere Unterschiede nicht überdeckt.

#### 4.6.2.2 Impulsfahne, indifferente Schichtung

Bilder 4.14 und 4.15 zeigen den Vergleich für eine reine Impulsfahne (Wärmestrom  $Q = 0$ ) bei indifferenter Schichtung (Stabilitätsindex  $k = 3$ ), Quellhöhe 100 m und Rauigkeitslänge 0.5 m. Das sind die Wertekombinationen, die in etwa der entsprechenden Näherungsformel der Richtlinie zugrunde liegen, siehe Abschnitt 4.5.2. Die Farben im Bild kodieren die unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten. *IBJpluris* und die Richtlinie liefern hier erwartungsgemäß ähnliche Ergebnisse.

#### 4.6.2.3 Impulsfahne, alle Schichtungen

Bilder 4.16 und 4.17 zeigen den Vergleich für eine reine Impulsfahne ( $Q = 0$ ), Quellhöhe 100 m und Rauigkeitslänge 0.5 m für alle Schichtungen.

Für Werte unter etwa 50 m liefert *IBJpluris* bei stabiler Schichtung (rot) größere Überhöhungen als die Richtlinie. Bei labiler Schichtung (magentafarben) liefert *IBJpluris* systematisch kleinere Werte als die Richtlinie. Für Werte über etwa 50 m liefern beide Modelle sehr ähnliche Werte.

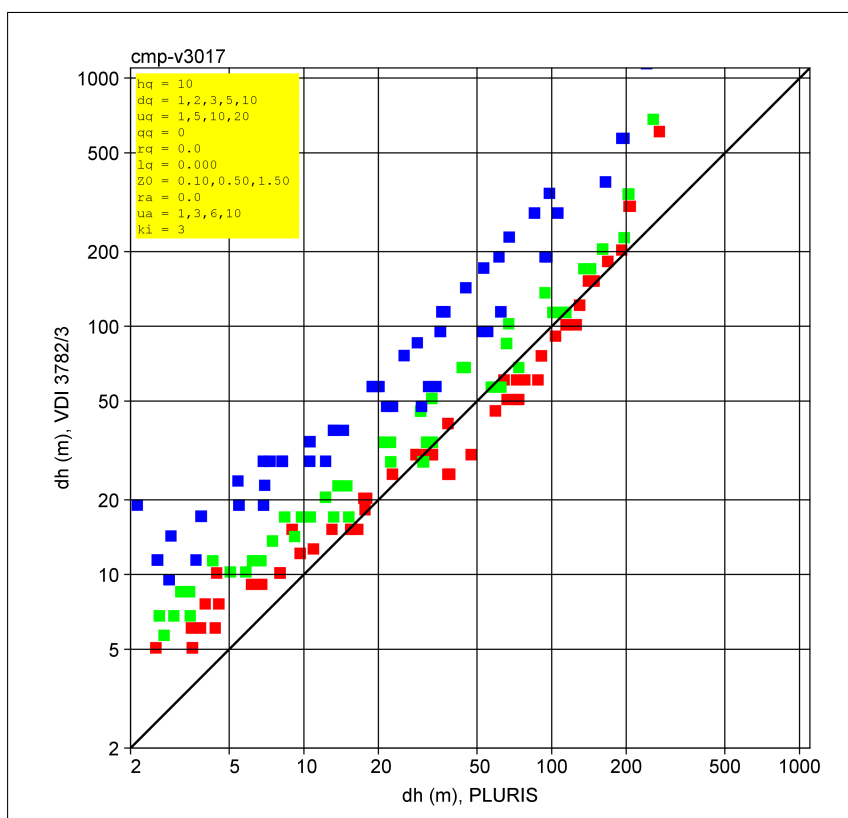


BILD 4.12: Vergleich für eine reine Impulsfahne und Quellhöhe 10 m.

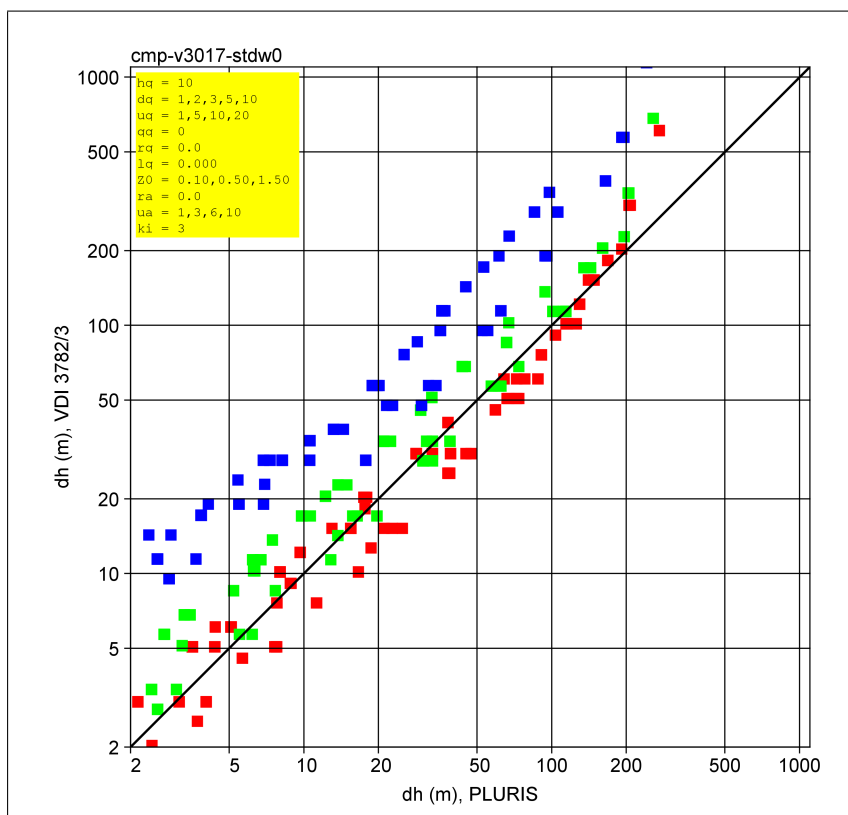


BILD 4.13: Vergleich für eine reine Impulsfahne und Quellhöhe 10 m; **ohne stack-tip downwash.**

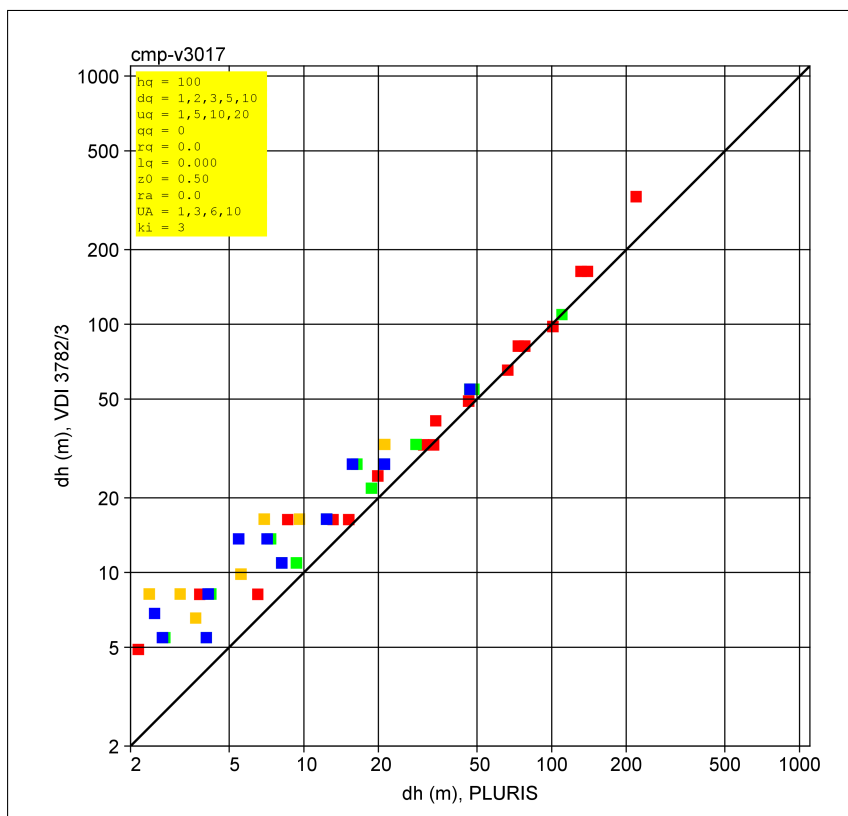


BILD 4.14: Vergleich für eine reine Impulsfahne, Quellhöhe 100 m und indifferente Schichtung (Klasse III/1).

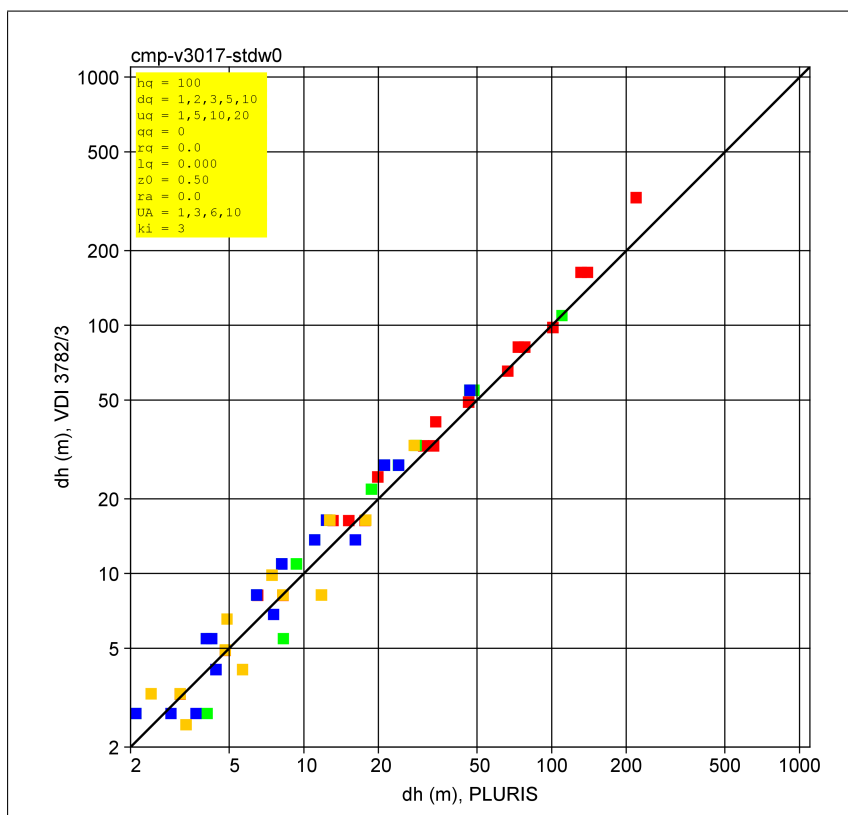


BILD 4.15: Vergleich für eine reine Impulsfahne, Quellhöhe 100 m und indifferente Schichtung (Klasse III/1); **ohne stacktip downwash.**

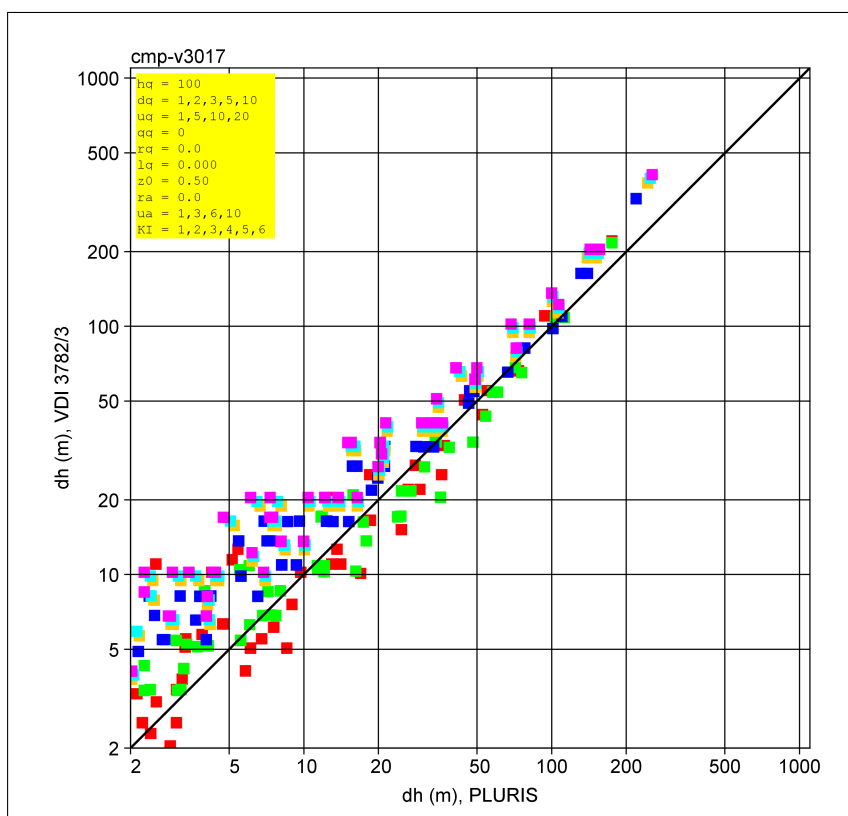


BILD 4.16: Vergleich für eine reine Impulsfahne, Quellhöhe 100 m und alle Schichtungen.

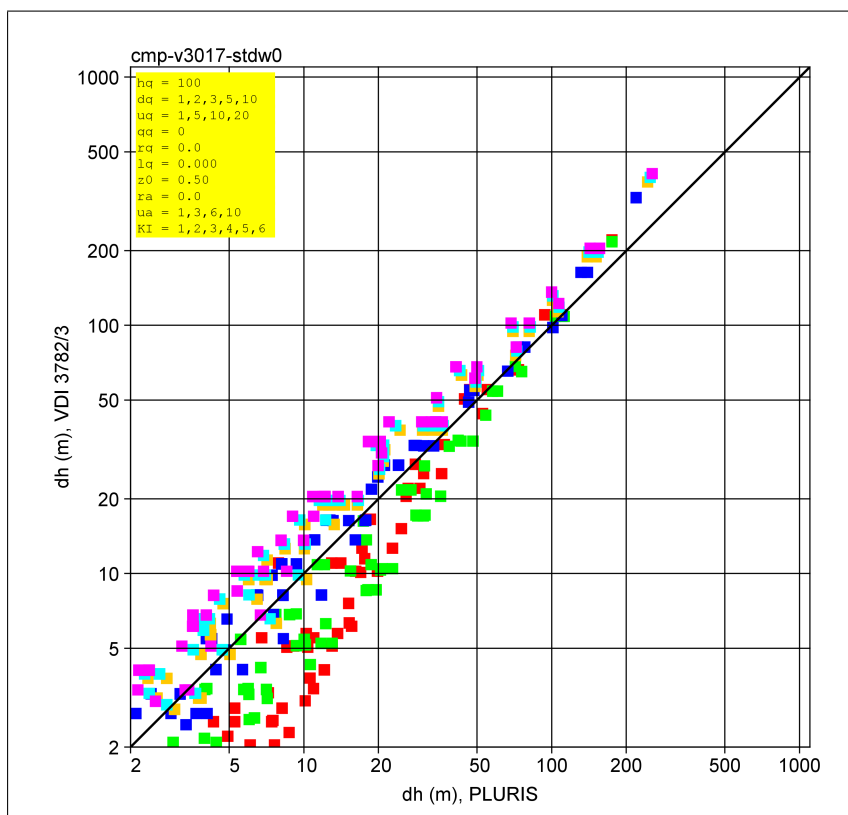


BILD 4.17: Vergleich für eine reine Impulsfahne, Quellhöhe 100 m und alle Schichtungen; **ohne stacktip downwash.**

#### 4.6.2.4 Thermische Fahne und feste Windgeschwindigkeit

Bilder 4.18 und 4.19 zeigen den Vergleich für eine 100 m hohe Quelle bei indifferenter Schichtung, festen Umgebungswerten und unterschiedlichen Wärmeströmen, Quelldurchmessern und Austrittsgeschwindigkeiten.

Für eine impulsdominierte Fahne (Wärmestrom unter 1.4 MW nach Richtlinie, rot und grün) berücksichtigt die Richtlinie die Abhängigkeit der Überhöhung vom Durchmesser und der Austrittsgeschwindigkeit der Quelle. Für Wärmeströme über 1.4 MW wird diese Abhängigkeit jedoch schlagartig vernachlässigt (siehe auch Abschnitt 4.5.3), was beispielsweise für 2 MW (blau) zu immer demselben Wert von knapp über 20 m führt, während die genauere Rechnung mit *IBJpluris* je nach Durchmesser und Geschwindigkeit Werte zwischen etwa 5 m und 100 m liefert. Dieser Effekt ist auch für die Wärmeströme größer 2 MW zu sehen, allerdings nimmt die Zahl der Datenpunkte ab, da die Wärmeströme nicht für alle vorgegebenen Kombinationen von Durchmesser und Austrittsgeschwindigkeit realisierbar sind.

Die Parametrisierung alleine über den Wärmestrom  $Q$ , wie sie die Richtlinie vornimmt, ist also insbesondere bei kleineren Wärmeströmen eine zu starke Vereinfachung und führt auf zum Teil erhebliche Abweichungen im Vergleich zur genaueren Modellierung.

Bilder 4.20 und 4.21 zeigen den Vergleich für den Wärmestrom 5 MW und alle Stabilitätsklassen (farbkodiert). Auch hier ist zu erkennen, dass *IBJpluris* bei stabiler Schichtung tendenziell größere und bei labiler Schichtung tendenziell kleinere Endüberhöhungen als die Richtlinie prognostiziert.



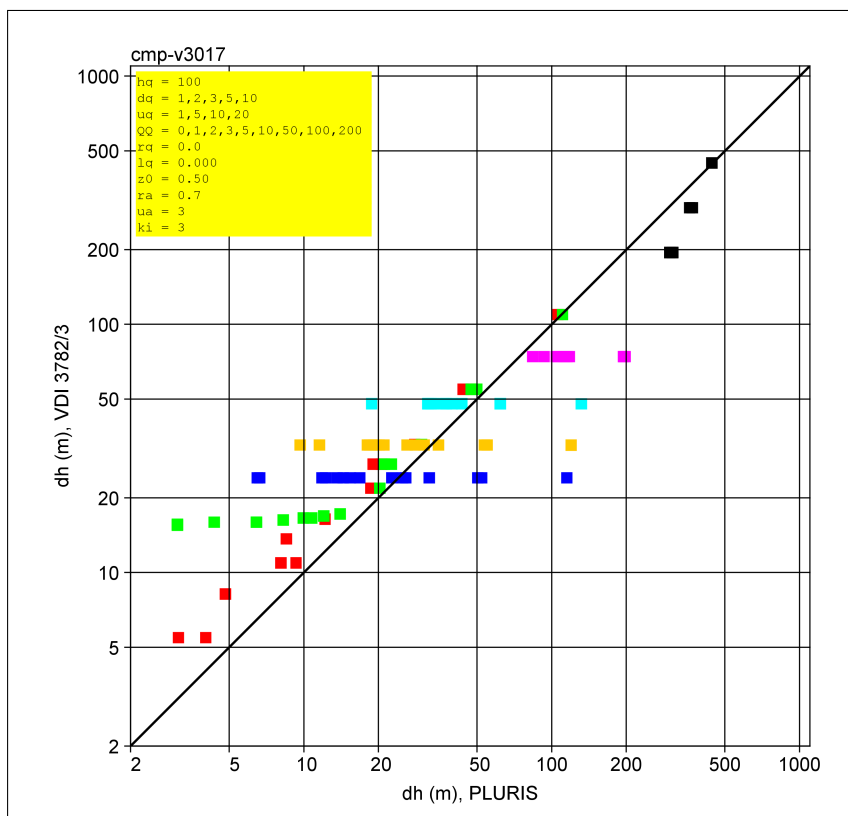


BILD 4.18: Vergleich für verschiedene Wärmeströme.

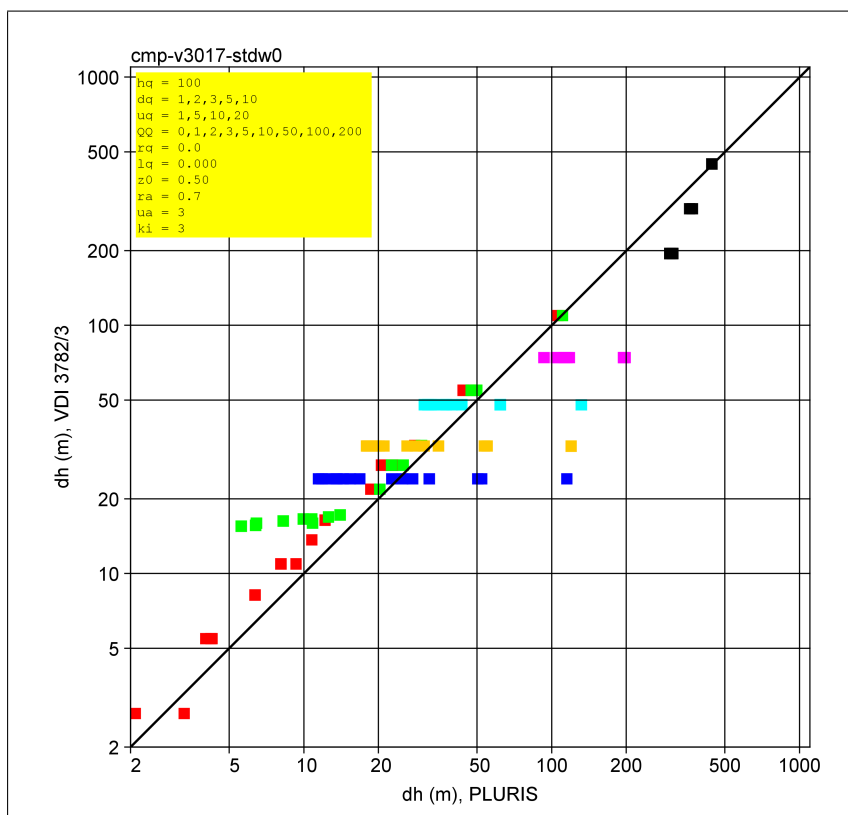


BILD 4.19: Vergleich für verschiedene Wärmeströme; **ohne stacktip downwash.**

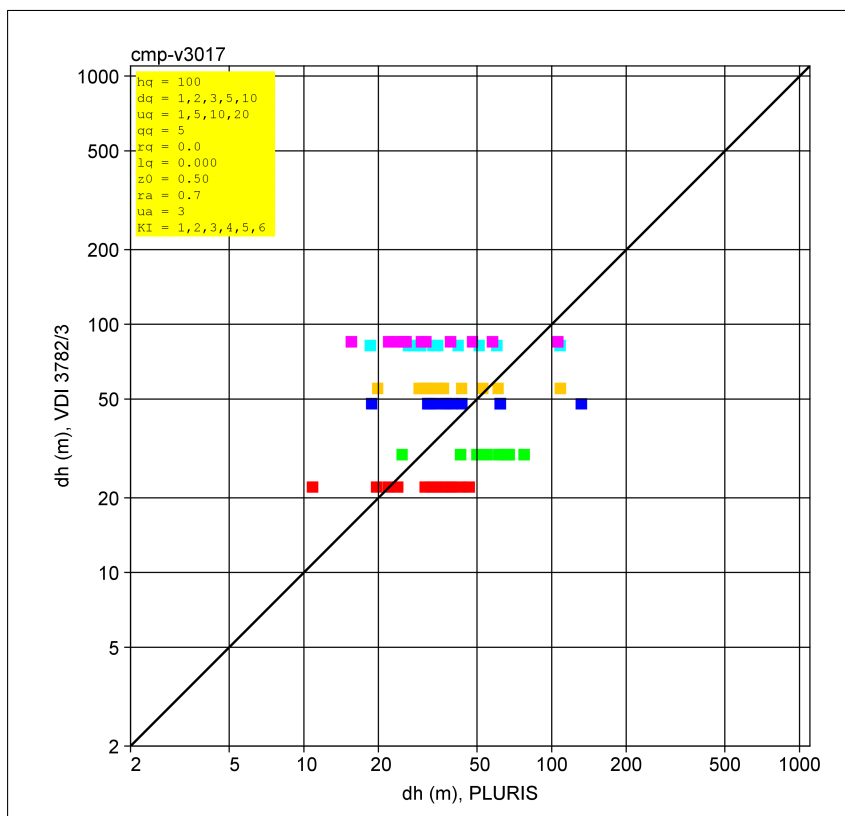


BILD 4.20: Vergleich für den Wärmestrom 5 MW und unterschiedliche Stabilitätsklassen.

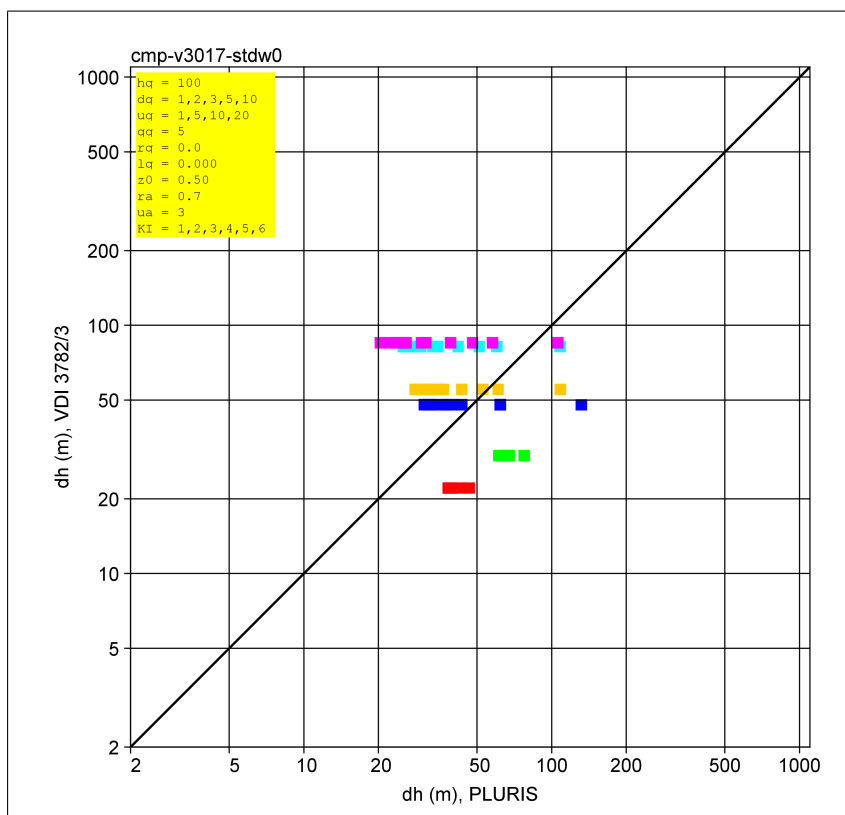


BILD 4.21: Vergleich für den Wärmestrom 5 MW und unterschiedliche Stabilitätsklassen; **ohne stacktip downwash.**

#### 4.6.2.5 Thermische Fahne und variable Windgeschwindigkeit

Bilder 4.22 und 4.23 zeigen den Vergleich für eine 100 m hohe Quelle bei indifferenter Schichtung, festem Wärmestrom und unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten  $\tilde{u}$ .

Die Überhöhung in einer festen Entfernung  $x$  ist proportional zu  $1/\tilde{u}$ , siehe Gleichung (4.97). Nach der Richtlinie wird die Endüberhöhung immer in derselben Entfernung ( $3.5x_*$ ) angenommen, egal wie hoch die Windgeschwindigkeit bzw. die Transportzeit ist, siehe Abschnitt 4.5.3. Damit ist auch die Endüberhöhung proportional zu  $1/\tilde{u}$ , siehe Gleichung (4.109).

Dieser Ansatz erscheint physikalisch nicht ganz plausibel und wurde von Briggs vermutlich nur gewählt, weil hiermit ein bestimmter experimenteller Datensatz mit einem bestimmten Geschwindigkeitsbereich beschrieben werden sollte. In Entfernung  $x$  hängt nämlich auch die Steigung der Fahnenachse von  $\tilde{u}$  ab. Je größer die Windgeschwindigkeit, desto kleiner ist die Steigung und in desto kleinerer Entfernung wird das Abbruchkriterium, das auf der Vertikalgeschwindigkeit der Fahne aufbaut (siehe Abschnitt 4.3.2), erreicht. Die Abhängigkeit der Endüberhöhung ist dann stärker als  $1/\tilde{u}$ .

Dieser Effekt ist in den Bildern zu erkennen. Je größer die Windgeschwindigkeit, desto kleiner ist die von *IBJpluris* berechnete Überhöhung im Vergleich zu derjenigen der Richtlinie.

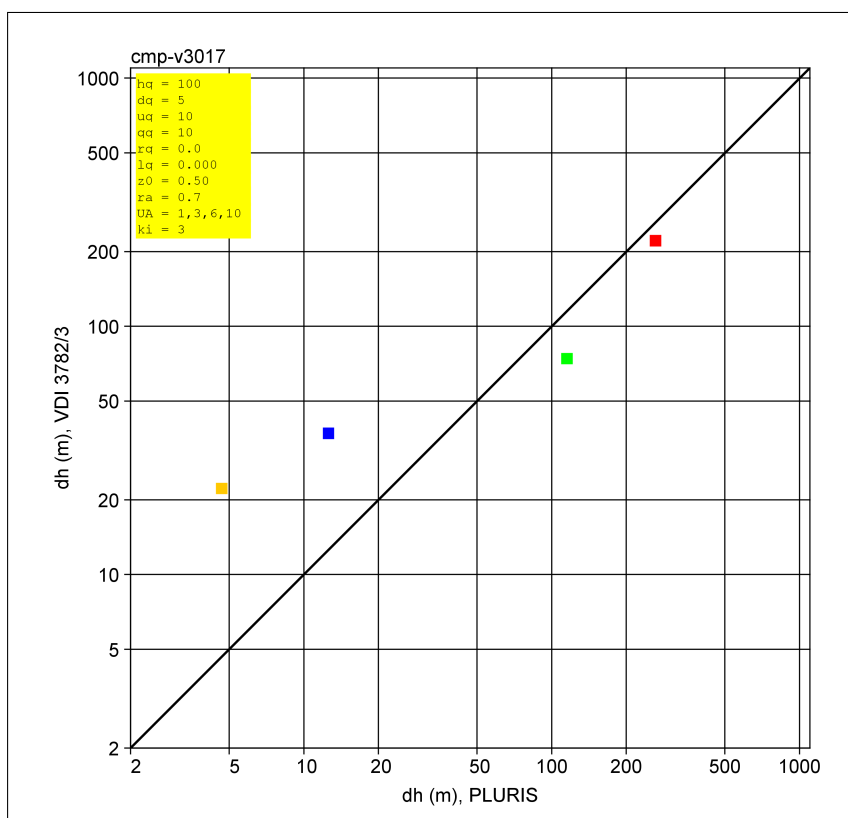


BILD 4.22: Vergleich für festen Wärmestrom und unterschiedliche Windgeschwindigkeiten.

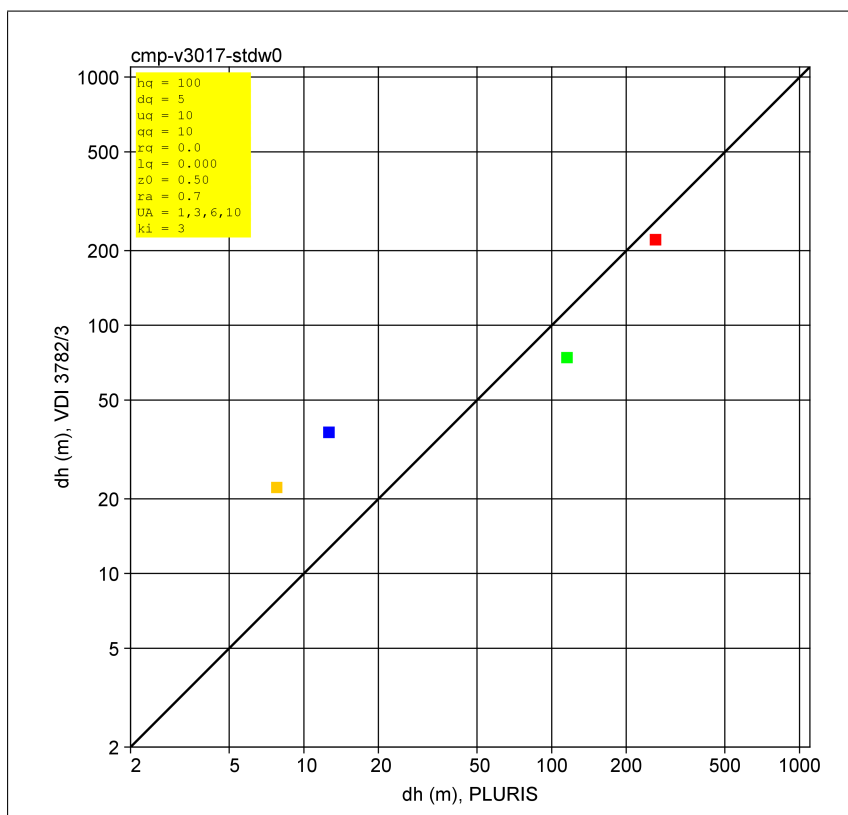


BILD 4.23: Vergleich für festen Wärmestrom und unterschiedliche Windgeschwindigkeiten; **ohne stacktip downwash.**

#### 4.6.2.6 Zusammenfassung

Die Formeln der Richtlinie VDI 3782 Blatt 3 (1985) basieren auf starken Vereinfachungen und implizit auf engen Wertebereichen einiger Eingangsparameter. Die Vergleiche zeigen, dass in den Parameterbereichen, in denen diese Näherungen und Annahmen erfüllt sind, *IBJpluris* ähnliche Endüberhöhungen liefert wie die Richtlinie. Außerhalb dieser Parameterbereiche liefert das Modell *IBJpluris* realistischere Überhöhungen, da es die relevanten physikalischen Prozesse berücksichtigt.

Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Richtlinie und denen von *IBJpluris* können im Einzelfall erheblich sein. Es gibt sowohl Situationen, in denen die Richtlinie stark unterschätzt (etwa wegen Vernachlässigung der Impulsüberhöhung), als auch Situationen, in denen sie stark überschätzt (etwa wegen Vernachlässigung der Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe).

Tendenziell fällt bei niedrigen Quellen mit *IBJpluris* die Endüberhöhung geringer aus als nach der Richtlinie (Berücksichtigung der Zunahme der Windgeschwindigkeit). Bei stabilen Schichtungen gibt es eine Tendenz zu größeren Endüberhöhungen, bei labilen Schichtungen eine Tendenz zu kleineren Endüberhöhungen. Letzteres kann sich bei hohen Quellen in einem größeren und quellnäheren Konzentrationsmaximum bemerkbar machen.

#### 4.6.3 Vergleiche mit Richtlinie VDI 3784 Blatt 2 (1990) bzw. *VDISP*

Das Modell *VDISP* ist das Rechenmodell der Richtlinie VDI 3784 Blatt 2 (1990). *VDISP* (siehe Richtlinie VDI 3784 Blatt 2 Anhang A, 1990, und SCHATZMANN & POLICASTRO, 1984) ist ein speziell für die Simulation der Kühlturmfahnenausbreitung entwickeltes Modell. Es berechnet die Fahnenüberhöhung in Abhängigkeit von der Entfernung vom Kühlturm und endet bei Erreichen der Endüberhöhung.

Es ist bemerkenswert, dass in *VDISP* kein Abbruchkriterium implementiert ist. Eine Endüberhöhung wird also nur ausgewiesen, wenn die Fahne in eine Schwerewelle umbiegt oder wenn die Fahne eine vorgegebene Maximalhöhe (in *VDISP* nicht konsistent mit Richtlinie VDI 3784 Blatt 2, 1990, implementiert) erreicht. Vielleicht ist das mit ein Grund, warum die vorgegebenen Temperaturgradienten der Richtlinie VDI 3784 Blatt 2 (1990) tendenziell stark auf der stabilen Seite liegen.

Für die Vergleiche wurden in *IBJpluris* 3.0.12 folgende Festlegungen getroffen:

1. Bei Verwendung der Profile nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) wurde für Höhen oberhalb 200 m statt des trocken-adiabatischen Temperaturgradienten  $\Gamma_T = -0.008 \text{ K/m}$  verwendet (siehe Abschnitt 4.3.3).
2. Der Abbruchfaktor  $f$  wurde auf den Wert 1.5 gesetzt (siehe Abschnitt 4.3.2).

### 4.6.3.1 Meteorologische Profile

VDISP verwendet als meteorologisches Profil ein Potenzgesetz für die Windgeschwindigkeit und einen linearen Verlauf für die Temperatur:

$$u(z) = u_a (\min(z, 200 \text{ m}) / h_a)^m \tag{4.110}$$

$$T(z) = T_a + \Gamma (z - h_T) \tag{4.111}$$

Für Höhen größer als 200 m wird die Windgeschwindigkeit konstant gehalten. Die Messhöhe  $h_a$  für die Geschwindigkeit  $u_a$  bzw. die Messhöhe  $h_T$  für die Temperatur  $T_a$  sind mit 10 m und 2 m fest vorgegeben. Die Werte für den Temperaturgradienten und den Exponenten  $m$  gibt die folgende Tabelle in Abhängigkeit von der Stabilitätsklasse an. Wird die Feuchte der Fahne am Kühlturmaustritt (Parameter PHIJP) mit null angegeben (Fahne eines Trockenkühlturms), so wird die relative Feuchte der Atmosphäre ebenso mit null angesetzt. Ansonsten wird für die relative Feuchte der Atmosphäre ein höhenkonstanter Wert von 77% angenommen.

| Stabilitätsklasse | $\Gamma$ in K/m | $m$  |
|-------------------|-----------------|------|
| I                 | 0.015           | 0.42 |
| II                | 0.005           | 0.37 |
| III/1             | -0.007          | 0.28 |
| III/2             | -0.007          | 0.22 |
| IV                | -0.008          | 0.20 |
| V                 | -0.011          | 0.09 |

Die maximale Endüberhöhung für die jeweilige Stabilitätsklasse ist in der folgenden Tabelle angegeben. Die Werte sind nicht konsistent mit den in Richtlinie VDI 3784 Blatt 2 (1990) angegebenen maximalen effektiven Quellhöhen, hier liegt also ein Fehler in der Umsetzung der Richtlinie vor.

| Stabilitätsklasse | Maximale Endüberhöhung in m |
|-------------------|-----------------------------|
| I                 | 800                         |
| II                | 800                         |
| III/1             | 800                         |
| III/2             | 800                         |
| IV                | 1100                        |
| V                 | 1100                        |

IBJpluris bietet drei Möglichkeiten zur Festlegung von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Temperatur. Zusätzlich zu dem oben beschriebenen Potenzgesetz für die Windgeschwindigkeit und linearem Verlauf für die Temperatur (im Folgenden meteorologisches Profil P1 genannt) können die Profile von Windgeschwindigkeit und Temperatur nach Richtlinie VDI 3783

Blatt 8 (2017) bestimmt werden (im Folgenden meteorologisches Profil P2 genannt) oder aus einer externen Datei eingelesen werden.

In *IBJpluris* wird für die maximale Endüberhöhung ein Wert von 800 m abzüglich der Bauhöhe der Quelle angesetzt. Die maximale Fahrenhöhe ist also nicht abhängig von der Stabilitätsklasse wie bei *VDISP*, außerdem ist sie unabhängig von der Bauhöhe – in Übereinstimmung mit Richtlinie VDI 3784 Blatt 2 (1990).

Wie *VDISP* setzt *IBJpluris* eine höhenunabhängige relative Feuchte an (siehe Abschnitt 4.3.3).

#### 4.6.3.2 Vergleichsrechnungen

Für alle Vergleiche zwischen den Modellen *IBJpluris* und *VDISP* wurden die folgenden, vom Kühlturm Philippsburg stammenden Daten verwendet:

| Größe   | Variablenname | Wert   |
|---|---------------|--------|
| Kühlturmbauhöhe   | hq            | 154 m  |
| Kühlturmmündungsdurchmesser                             | dq            | 78.5 m |
| Schwadenaustrittstemperatur an der Kühlturmmündung      | tq            | 30 °C  |
| Schwadenaustrittsgeschwindigkeit an der Kühlturmmündung | uq            | 4 m/s  |
| Umgebungstemperatur                                     | ta            | 10 °C  |

Basierend auf diesen festen Parametern wurden die Fahrenfeuchte, die atmosphärische Stabilität und die Windgeschwindigkeiten wie folgt variiert:

##### 1. Fahrenfeuchte

- (a) trockene Fahne ( $r_q = 0$ ,  $l_q = 0$ )
- (b) feuchte Fahne ( $r_q = 0.9$ ,  $l_q = 0$ )
- (c) nasse Fahne ( $r_q = 1.0$ ,  $l_q = 0.003$ )

##### 2. Atmosphärische Stabilität: 6 Klassen

##### 3. Windgeschwindigkeiten ( $h_a = 10$ m)

- (a)  $u_a = 2$  m/s
- (b)  $u_a = 4$  m/s

Das sind 36 Fälle. Hierbei bedeuten die Parameter  $r_q$  die relative Feuchte und  $l_q$  der spezifische Flüssigwassergehalt (Masse Flüssigwasser pro Masse feuchter Luft) jeweils bei Quellaustritt (d.h. an der Kühlturmmündung).

Unterschiede zwischen den Modellen *IBJpluris* und *VDISP* können am besten zu Tage treten, wenn beide Modelle mit möglichst denselben Randbedingungen betrieben werden. Aus diesem

Grund wurden für den Vergleich die Berechnungen für die 36 Fälle mit dem Modell *IBJpluris* zuerst mit dem meteorologischen Profil P1 (Potenzgesetz für die Windgeschwindigkeit und linearem Verlauf für die Temperatur entsprechend der Festlegungen in *VDISP* bzw. Richtlinie VDI 3784 Blatt 2, 1990) durchgeführt. Beide Modelle verwenden dann im wesentlichen identische meteorologische Profile.

Um den Einfluss unterschiedlicher Profile auf den berechneten Fahnenanstieg aufzeigen zu können, wurden für die 36 Fälle zusätzlich Berechnungen mit dem Modell *IBJpluris* mit dem meteorologischen Profil P2 (Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Temperatur nach VDI 3783 Blatt 8 (2017) und modifizierter Temperaturgradient in größerer Höhe) durchgeführt. Diese Ergebnisse wurden verglichen mit denen von *IBJpluris* unter Verwendung des meteorologischen Profils P1.

#### 4.6.3.3 Ergebnisse

Bild 4.24 zeigt die mit den Modellen *IBJpluris* und *VDISP* berechnete Endüberhöhung der Fahne bei Verwendung derselben meteorologischen Profile (P1). Für Endüberhöhungen unter 600 m ist die Korrelation zwischen den Ergebnissen der beiden Modelle für die trockene, feuchte und nasse Fahne sehr gut. Korrespondierende Wertepaare liegen nahezu auf einer Korrelationsgeraden mit der Steigung 1 (Winkelhalbierende im Streudiagramm). *VDISP* berechnet im Vergleich zu *IBJpluris* geringfügig höhere Endüberhöhungen.

Für die Stabilitätsklasse IV wird bei beiden Modellen in einigen Fällen die maximale Endüberhöhung erreicht. Für die Stabilitätsklasse V wird die maximale Endüberhöhung bei *IBJpluris* in allen und bei *VDISP* in den meisten Fällen erreicht. Da die maximale Endüberhöhung für die beiden Modelle unterschiedlich definiert ist, liegen diese Punkte im Streudiagramm nicht auf der Winkelhalbierenden.

Bild 4.25 zeigt den Vergleich (P1) der mit den beiden Modellen berechneten Entfernung, in der die Endüberhöhung erreicht wird. Die Streuung der Werte um die Winkelhalbierende ist größer als bei der berechneten Endüberhöhung. Ein genereller Trend, dass ein Modell größere oder kleinere Entfernungen berechnet, ist nicht abzuleiten.

Da sich die Modelle bei Verwendung derselben meteorologischen Profile in ihren Ergebnissen sehr ähnlich sind, wird im Folgenden der Vergleich nur noch mit *IBJpluris* durchgeführt, einmal mit den meteorologischen Profilen P1 (Potenzgesetz für die Windgeschwindigkeit und linearer Verlauf für die Temperatur) und einmal mit den meteorologischen Profilen P2 (Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Temperatur nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) mit modifiziertem Temperaturgradienten in größerer Höhe). Damit sind die Unterschiede allein durch Unterschiede in den meteorologischen Profilen bedingt.

Die mit den Profilen P1 und P2 berechneten Endüberhöhungen sind in Bild 4.26 dargestellt. Die Unterschiede sind nun etwas markanter, allerdings ist das aufgrund der unterschiedlichen Profilansätze auch zu erwarten.

Insgesamt ist die Übereinstimmung der Endüberhöhungen von *VDISP* und *IBJpluris* relativ



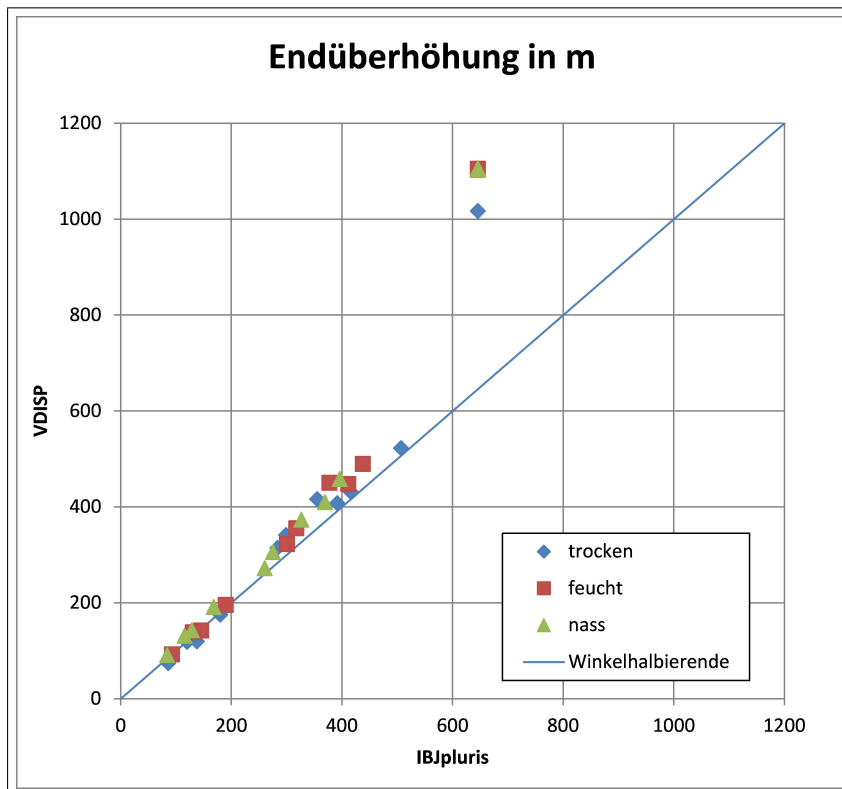


BILD 4.24: Vergleich der Endüberhöhung von VDISP und IBJpluris bei Verwendung derselben meteorologischen Profile (P1).

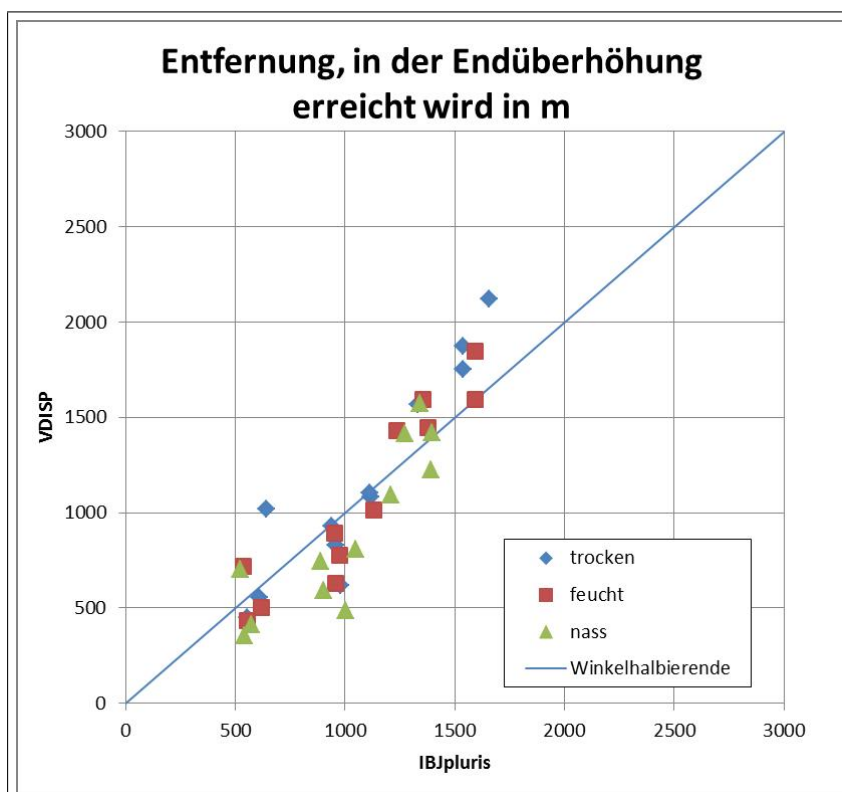


BILD 4.25: Vergleich der Entfernung, in der die Endüberhöhung erreicht wird, von VDISP und IBJpluris bei Verwendung derselben meteorologischen Profile (P1).

gut, insbesondere angesichts des Umstandes, dass *VDISP* kein Abbruchkriterium unterhalb der Maximalhöhe implementiert, sondern stattdessen tendenziell zu stabile Temperaturgradienten ansetzt.

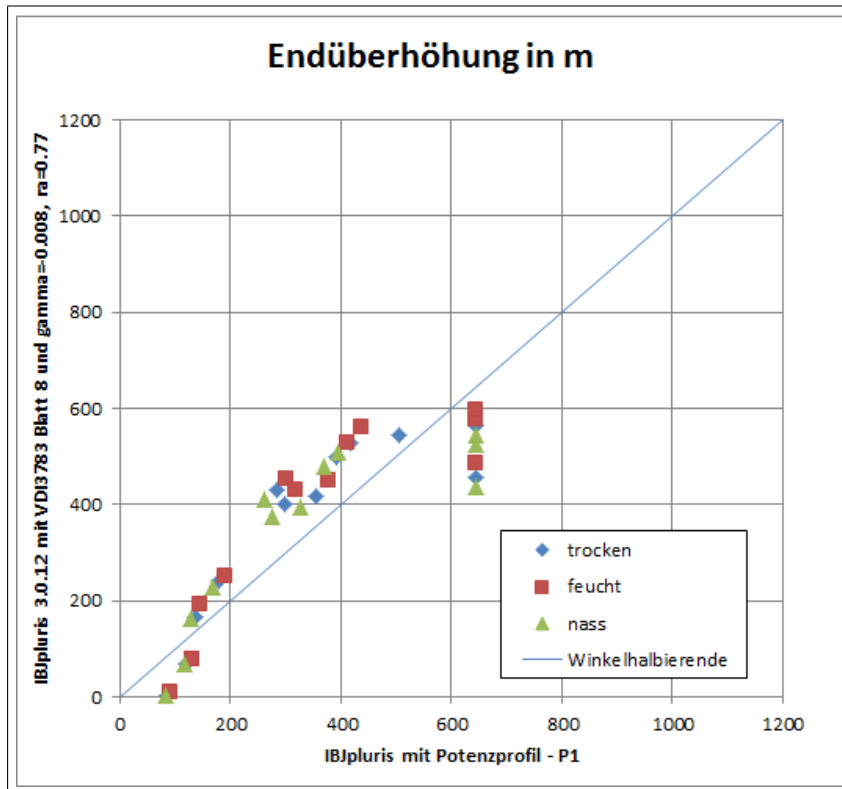


BILD 4.26: Vergleich der Endüberhöhung in *IBJpluris* bei Verwendung der meteorologischen Profile P1 (Potenzgesetz für die Windgeschwindigkeit und linearer Verlauf für die Temperatur) und P2 (Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Temperatur nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) mit modifiziertem Temperaturgradienten in größerer Höhe).

#### 4.6.4 Auswirkung von unterschiedlichen Werten des Abbruchfaktors im Jahresmittel

Bei indifferenter und labiler Schichtung ergibt sich die Endüberhöhung aus dem Abbruchkriterium, in das der semi-empirische Abbruchfaktor  $f$  eingeht, siehe Abschnitt 4.3.2. Um zu prüfen, in welchem Maß das Ergebnis eine Ausbreitungsrechnung vom konkreten Wert des Abbruchfaktors abhängt, wurden Ausbreitungsrechnungen mit LASAT durchgeführt, wobei wahlweise Grenzschicht- und Überhöhungsmodell nach TA Luft (2002) und nach der neuen TA Luft (2017) zum Einsatz kamen.

Die folgenden Bilder zeigen die Jahresmittel der Konzentration ( $\text{NO}_x$  und  $\text{SO}_2$ , mit Berücksichtigung der trockenen Deposition) für 4 typische Anwendungsfälle (Kaminhöhe  $H$ , Kamin-durchmesser  $D_0$ , Austrittsgeschwindigkeit  $u_0$ , Wärmestrom  $Q$ ):

| Fall | $H$ (m) | $D_0$ (m) | $u_0$ (m/s) | $Q$ (MW) | Bild |
|------|---------|-----------|-------------|----------|------|
| 1    | 10      | 1         | 10          | 0        | 4.27 |
| 2    | 100     | 5         | 25          | 0        | 4.28 |
| 3    | 100     | 3         | 10          | 5        | 4.29 |
| 4    | 100     | 5         | 10          | 30       | 4.30 |

Gerechnet wurde nach TA Luft (2002), nach TA Luft (2002) mit aktualisiertem Grenzschichtmodell (Richtlinie VDI 3783 Blatt 8, 2017) und nach TA Luft (2017), also mit aktualisiertem Grenzschichtmodell und aktualisiertem Überhöhungsmodell, wobei unterschiedliche Abbruchfaktoren zum Einsatz kamen (1.3 und 1.7). Die Rechnungen wurden aus Effizienzgründen mit relativ geringer, aber für diese Vergleiche ausreichender Partikelzahl durchgeführt.

Die Vergleiche zeigen, dass sich mit  $f = 1.7$  ein etwa doppelt so großes Maximum ergeben kann. Bei hohen, impulsbehafteten Freisetzungen ist die Endüberhöhung zwar im Mittel vergleichbar mit der der TA Luft (2002), d.h. der Richtlinie VDI 3782 Blatt 3 (1985), siehe Bild 4.16, aber bei hohen Quellen spielen die stabilen Schichtungen keine Rolle für die bodennahe Konzentration, so dass sich nur die kleinere Endüberhöhung bei labiler Schichtung bemerkbar macht. Mit dem Wert 1.3 ergeben sich nur etwas größere maximale Jahresmittel. Man erkennt auch, dass bei einer merkbar deponierenden Substanz wie  $\text{SO}_2$  eine größere Konzentration im Nahbereich mit einer kleineren Konzentration im Fernbereich einhergehen kann, da im Nahbereich durch Deposition mehr Masse dem atmosphärischen Transport entzogen wurde.

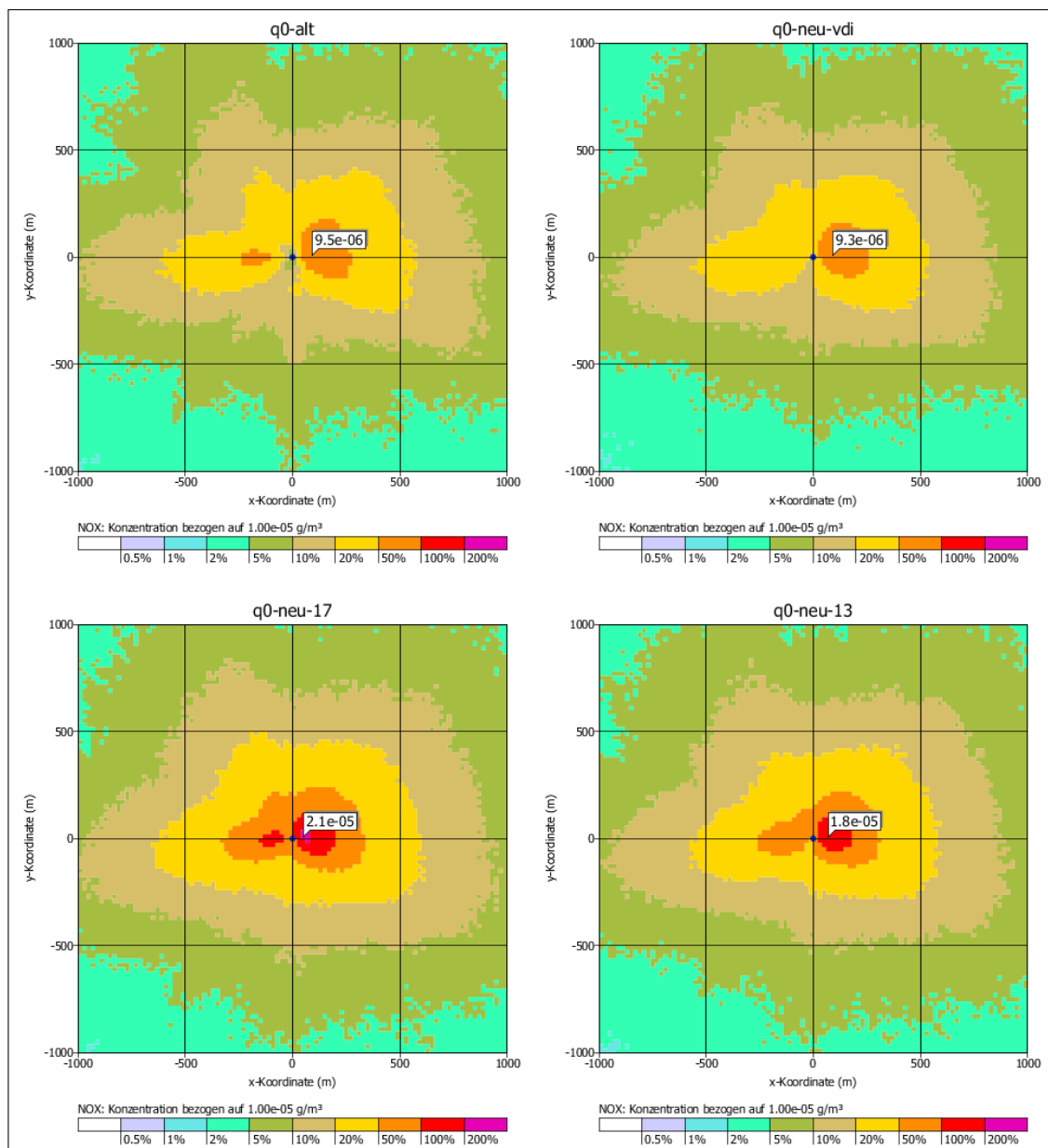


BILD 4.27: Vergleich der Jahresmittel: Kaminhöhe 10 m, Kamindurchmesser 1 m, Austrittsgeschwindigkeit 10 m/s, Wärmestrom 0 MW.

**Oben links:** TA Luft (2002). **Oben rechts:** TA Luft (2002) mit neuem Grenzschichtmodell (VDI 3783 Blatt 8, 2017). **Unten links:** TA Luft (2017) mit Abbruchfaktor  $f = 1.7$ . **Unten rechts:** TA Luft (2017) mit Abbruchfaktor  $f = 1.3$ .

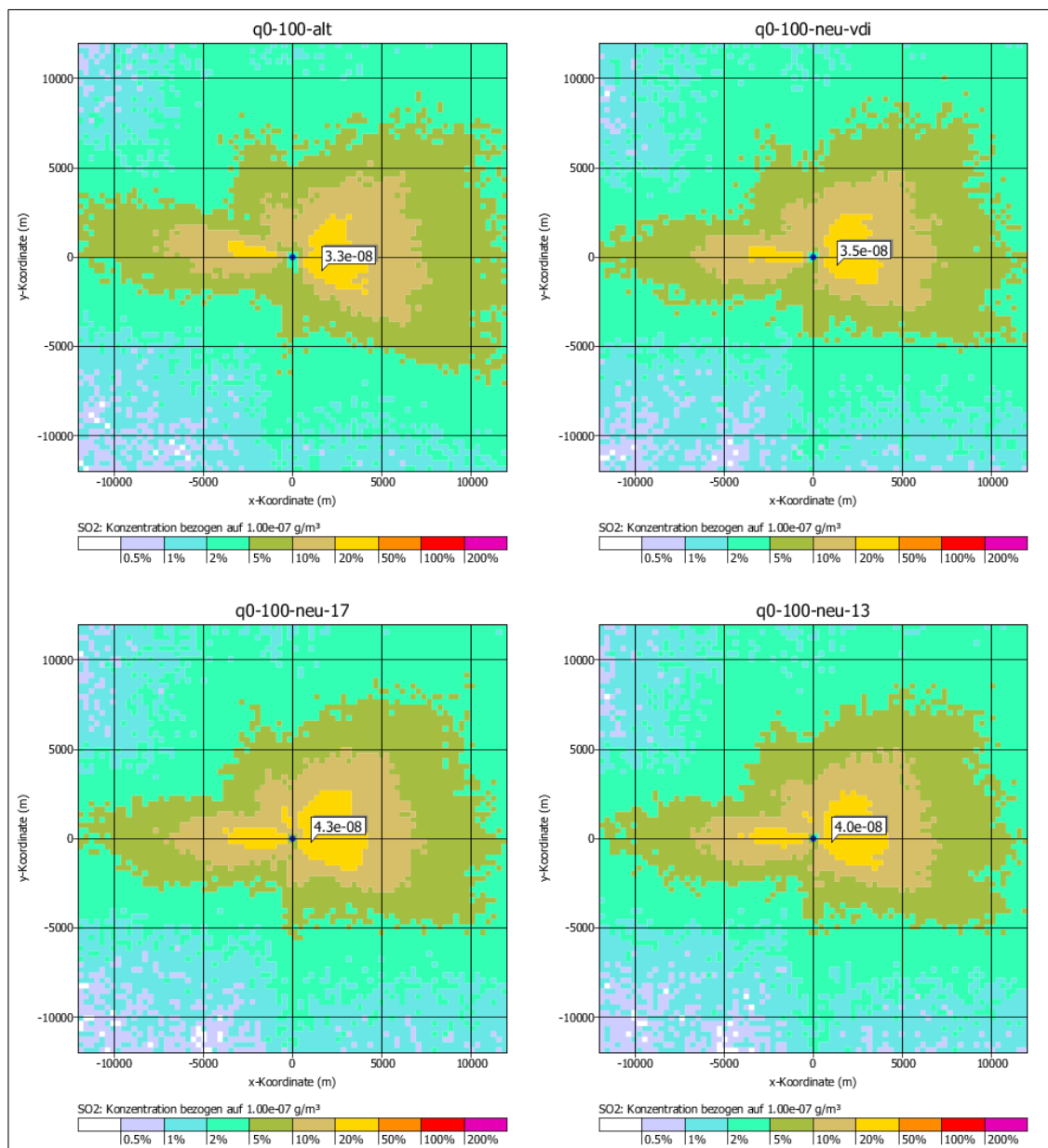


BILD 4.28: Vergleich der Jahresmittel: Kaminhöhe 100 m, Kamindurchmesser 5 m, Austrittsgeschwindigkeit 25 m/s, Wärmestrom 0 MW.

**Oben links:** TA Luft (2002). **Oben rechts:** TA Luft (2002) mit neuem Grenzschichtmodell (VDI 3783 Blatt 8, 2017). **Unten links:** TA Luft (2017) mit Abbruchfaktor  $f = 1.7$ . **Unten rechts:** TA Luft (2017) mit Abbruchfaktor  $f = 1.3$ .

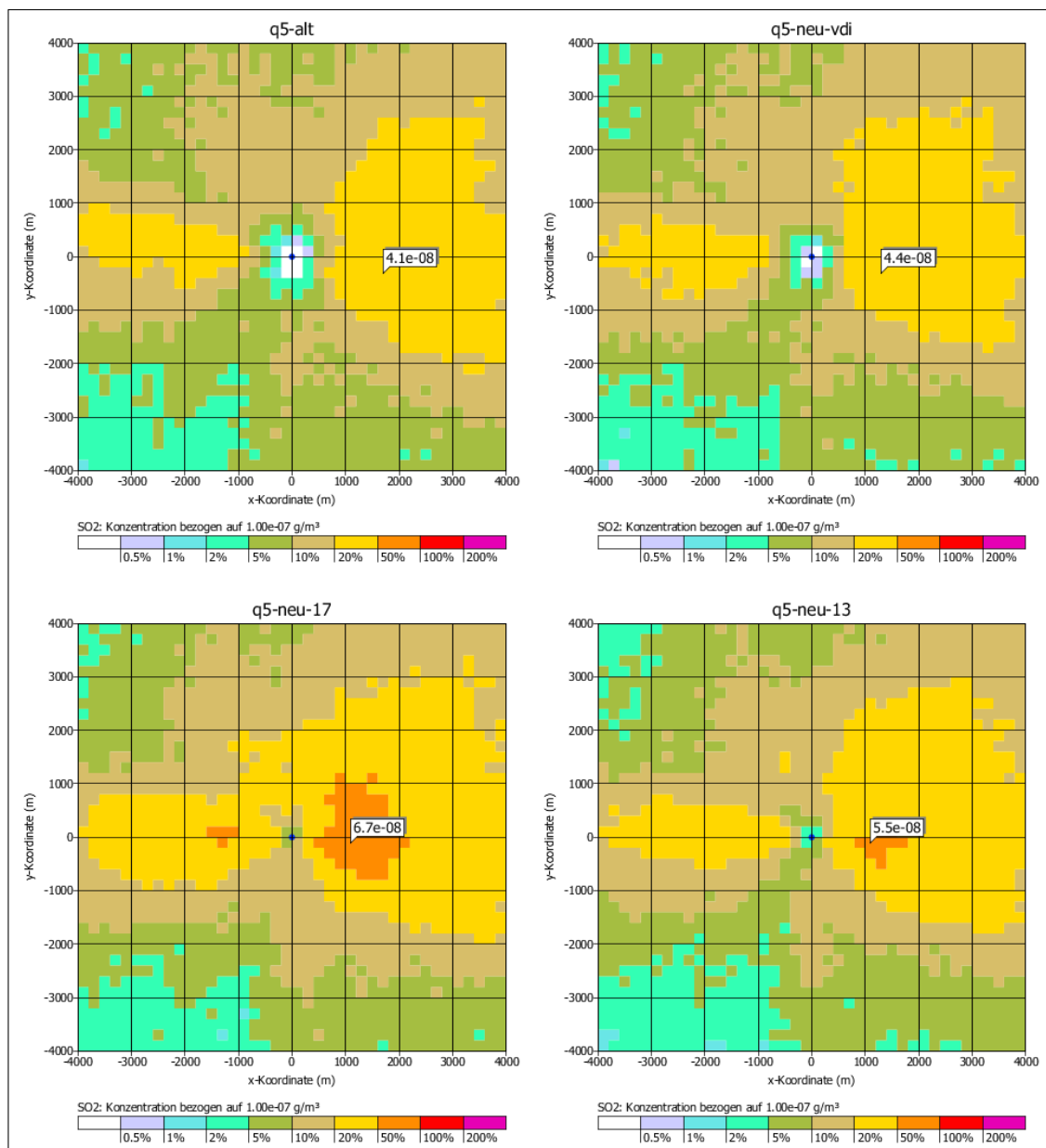


BILD 4.29: Vergleich der Jahresmittel: Kaminhöhe 100 m, Kamindurchmesser 3 m, Austrittsgeschwindigkeit 10 m/s, Wärmestrom 5 MW.

**Oben links:** TA Luft (2002). **Oben rechts:** TA Luft (2002) mit neuem Grenzschichtmodell (VDI 3783 Blatt 8, 2017). **Unten links:** TA Luft (2017) mit Abbruchfaktor  $f = 1.7$ . **Unten rechts:** TA Luft (2017) mit Abbruchfaktor  $f = 1.3$ .

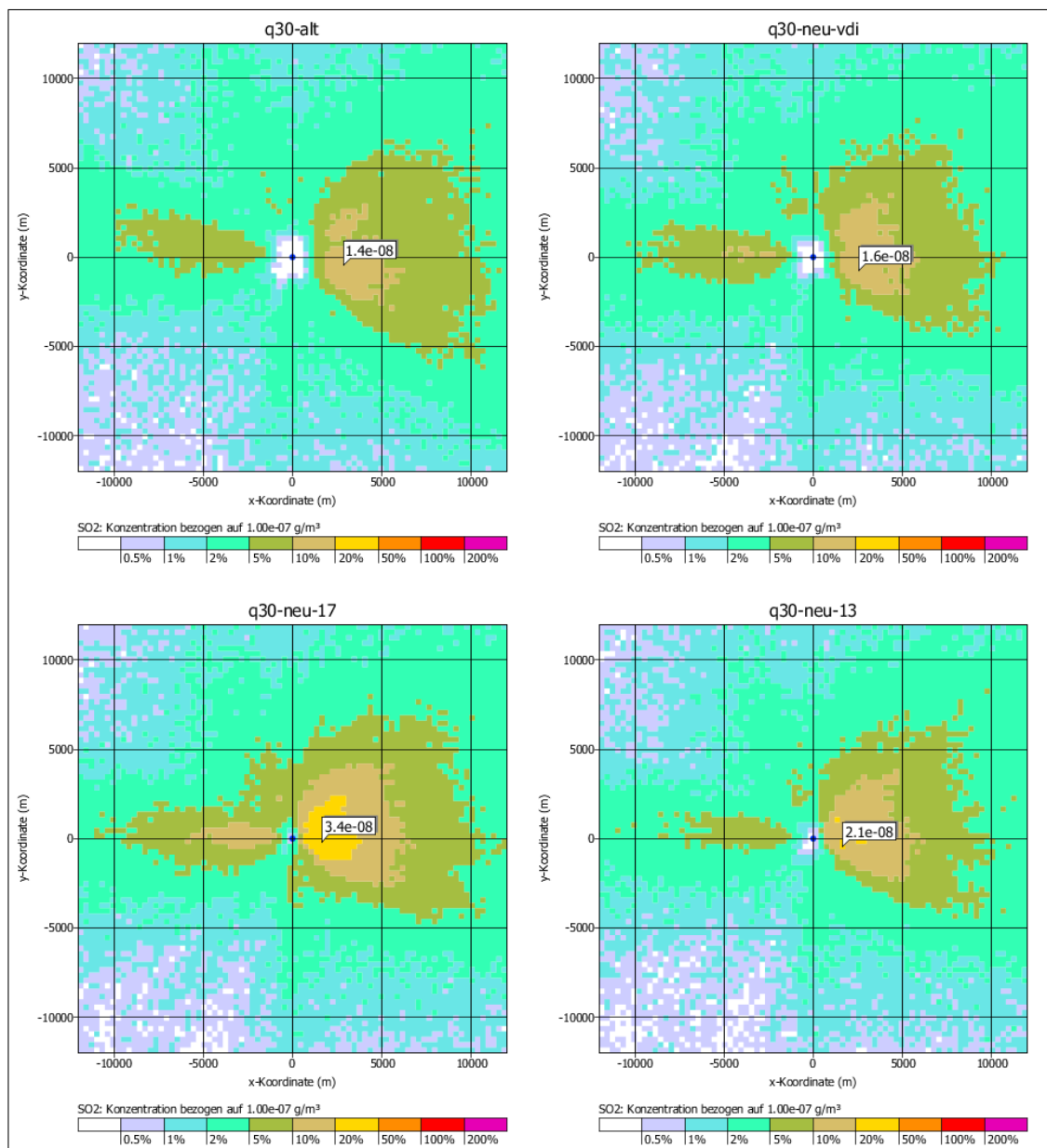


BILD 4.30: Vergleich der Jahresmittel: Kaminhöhe 100 m, Kamindurchmesser 5 m, Austrittsgeschwindigkeit 10 m/s, Wärmestrom 30 MW.

**Oben links:** TA Luft (2002). **Oben rechts:** TA Luft (2002) mit neuem Grenzschichtmodell (VDI 3783 Blatt 8, 2017). **Unten links:** TA Luft (2017) mit Abbruchfaktor  $f = 1.7$ . **Unten rechts:** TA Luft (2017) mit Abbruchfaktor  $f = 1.3$ .

#### 4.6.5 Vergleich mit dem Datensatz Indianapolis

Der Datensatz *Indianapolis* gehört zum sogenannten *Model Validation Kit* (OLESEN, 1994). Die Ausbreitungsexperimente wurden an einem 83.8 m hohen Kamin (Durchmesser 4.72 m) des Perry-K-Kraftwerkes in Indianapolis, Indiana, USA, durchgeführt. Die Abwärmestrom betrug etwa 30 MW. Als Spurengas wurde das inerte Gas SF<sub>6</sub> verwendet. Insgesamt wurden 170 Ausbreitungsexperimente über jeweils eine Stunde durchgeführt.

Da das Ausbreitungsmodell nach Richtlinie VDI 3945 Blatt 3 (2000) und das Grenzschichtmodell nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) anhand passiver Quellen umfangreich validiert worden sind, sollten Unterschiede zu den Messdaten dieses Datensatzes in erster Linie auf die Überhöhungsmodellierung und Eigenheiten des Datensatzes selbst zurückzuführen sein. Die Messdaten sind angesichts der starken Bebauungseinflüsse mit Vorsicht zu interpretieren, insbesondere für die Situationen mit formal stabiler Schichtung (TRUKENMÜLLER, 2008). Für die hier relevanten indifferenten und labilen Schichtungen sollte der Vergleich jedoch Rückschlüsse auf den Wert von  $f$  zulassen.

Es wurden die Originaldaten des *Model Validation Kit* verwendet. Austrittsgeschwindigkeit (um 10 m/s) und Austrittstemperatur (um 220 Grad Celsius) lagen als Stundenmittel vor. Aus der Reihe der zur Verfügung gestellten, gemessenen meteorologischen Parameter wurden die ausgewählt, die typischerweise auch in einer Ausbreitungsrechnung nach TA Luft Anwendung finden: Windgeschwindigkeit in einer Höhe (94 m) und Obukhov-Länge  $L$ , beides als Stundenmittel. Zusätzlich wurde die Zeitreihe der Stundenmittel der Umgebungstemperatur (um 10 bis 20 Grad Celsius) übernommen. Die Rauigkeitslänge ist im Datensatz mit 1 m angegeben, die Verdrängungshöhe wurde gemäß TA Luft auf den 6-fachen Wert der Rauigkeitslänge gesetzt.

Es wurden die 142 Stunden betrachtet, für die eine gültige Mischungsschichthöhe  $h_m$  (der ungültige Wert 0 deutet laut Datensatz auf eine bodennahe Inversionsschicht hin) und eine gültige Windgeschwindigkeit angegeben sind. Diese Stunden wurden als quasi-stationäre Ausbreitungssituationen mit LASAT unter Verwendung des Grenzschichtmodells nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017) und *IBJpluris* nachgerechnet.

In der Auswertung wurden nur Fälle mit indifferenter Schichtung ( $-1 < h_m/L < 1$ ) und labiler Schichtung ( $h_m/L < -1$ ) betrachtet. Diese Klassierung orientiert sich an einer früheren Evaluierung (ÖRTL, 2006). Formal stabile Schichtungen ( $h_m/L > 1$ ) wurden nicht betrachtet, da sie vermutlich sehr stark von lokalen Gebäudeeffekten beeinflusst waren.

Als Messdaten standen die maximalen bodennahen Konzentrationswerte für Entfernungen vom Kamin zwischen 250 m und 12 000 m zur Verfügung. Es wurden Messdaten mit einer Qualitätsstufe größer als 1 betrachtet, nur sie sind laut Datensatz für eine Modell-Evaluierung geeignet.

In den folgenden Grafiken ist der Verlauf der Maximalkonzentration als Funktion der Quellentfernung dargestellt, in schwarz die Messdaten, in grün die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung. Die über die Stunden mit labiler bzw. indifferenter Schichtung gemittelten Ergebnisse sind als Symbole dargestellt (indifferente Schichtung: Kreise; labile Schichtung: Sterne), die mit einer gestrichelten Linie verbunden sind. Die durchgezogenen Linien ohne Symbole zeigen das Mittel über alle Stunden mit labiler oder indifferenter Schichtung. Die Darstellung erfolgt



für verschiedene Werte des Abbruchfaktors  $f$ , zusätzlich sind die Ergebnisse nach TA Luft (2002) dargestellt.

Die Konzentrationswerte der Rechnung nach TA Luft (2002) zeigen im Mittel ein ähnliches Maximum wie die Messungen (Bild 4.31), jedoch in einer zu großen Entfernung von der Quelle. Mit den Ansätzen der TA Luft (2017) wird die Entfernung, in der das Maximum auftritt, wesentlich besser getroffen. Tests zeigten, dass der Grund hierfür im neuen Überhöhungsmodell und nicht im aktualisierten Grenzschichtmodell liegt. Mit dem Abbruchfaktor 1.3 wird die Höhe des Maximalwertes und der allgemeine Konzentrationsverlauf im Mittel sehr gut wiedergegeben. Mit dem Abbruchfaktor 1.7 ergibt sich eine deutliche Überschätzung des Maximums.

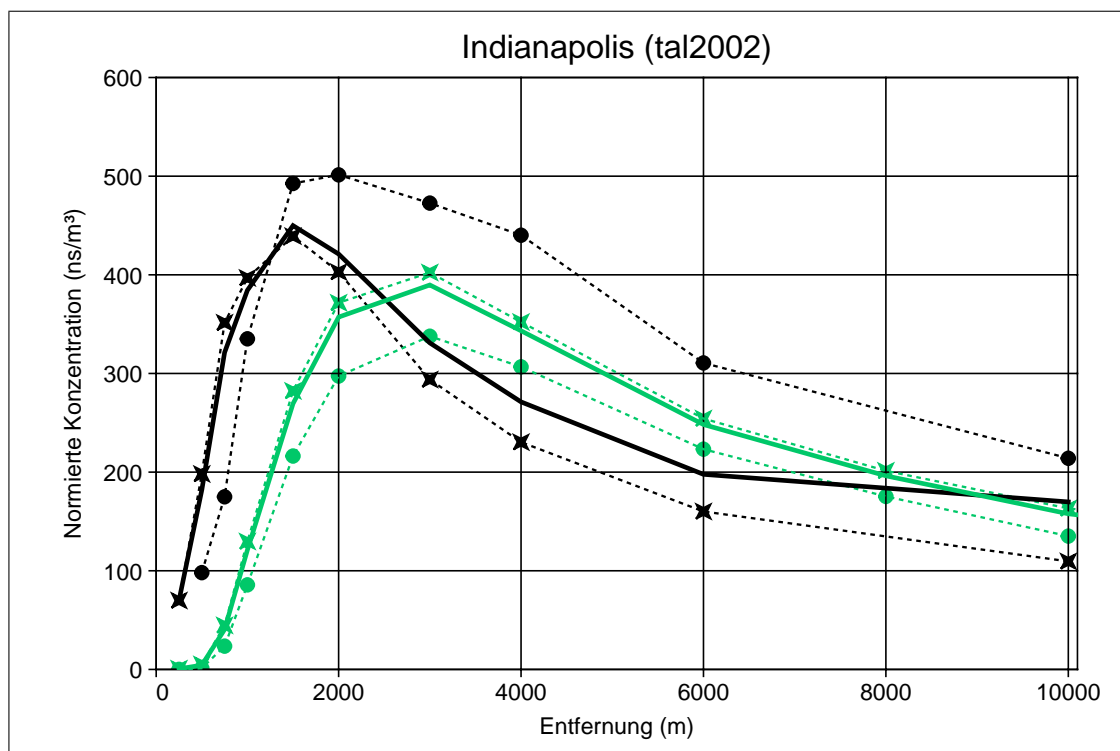


BILD 4.31: Vergleich mit dem Datensatz Indianapolis, Ausbreitungsrechnung nach TA Luft (2002). Dargestellt ist der Verlauf der Maximalkonzentration als Funktion der Quellentfernung, in schwarz die Messdaten, in grün die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung. Die über die Stunden mit labiler bzw. indifferenter Schichtung gemittelten Ergebnisse sind als Symbole dargestellt (indifferente Schichtung: Kreise; labile Schichtung: Sterne), die mit einer gestrichelten Linie verbunden sind. Die durchgezogenen Linien ohne Symbole zeigen das Mittel über alle Stunden mit labiler oder indifferenter Schichtung.

## 4.7 Diskussion des Abbruchfaktors

Für die Ankopplung eines Überhöhungsmodells an Ausbreitungsmodelle über die Parameter *Zusatzgeschwindigkeit* und *Abklingzeit* ist die Festlegung einer Endüberhöhung erforderlich. Bei stabiler Schichtung ergibt sie sich im Überhöhungsmodell durch die Ausbildung einer hori-

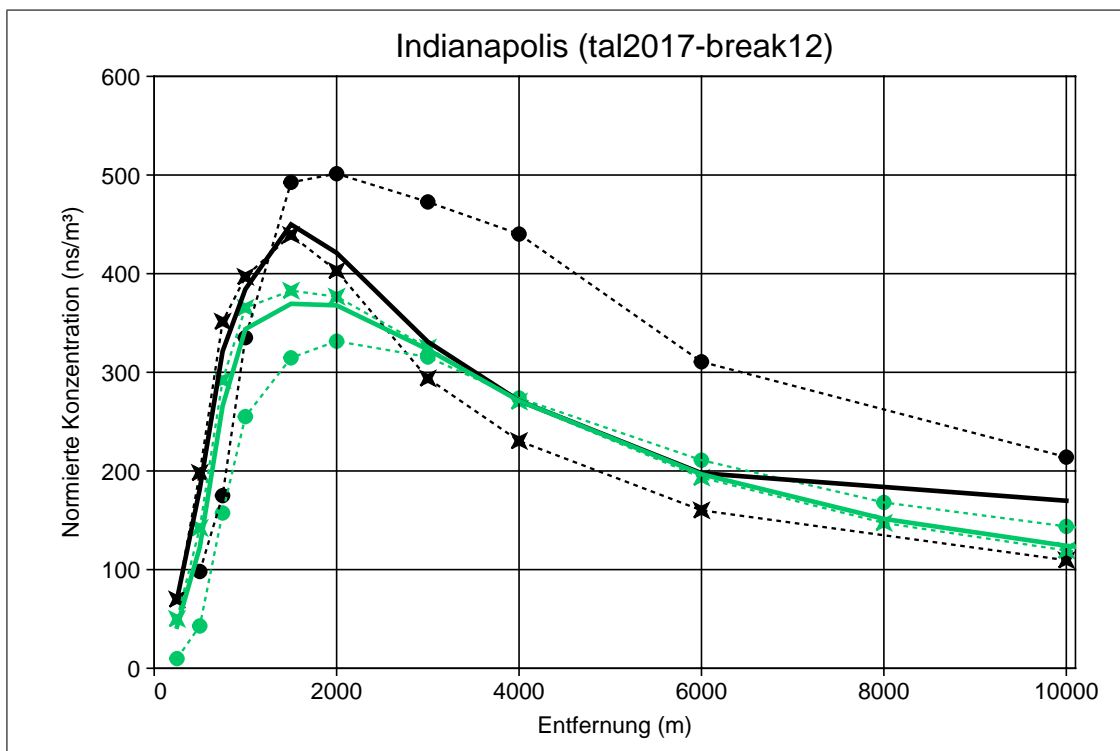


BILD 4.32: Vergleich mit dem Datensatz Indianapolis, Ausbreitungsrechnung nach TA Luft (2017) mit dem Abbruchfaktor  $f = 1.2$  für die Überhöhung. Für Erläuterungen siehe Bild 4.31.

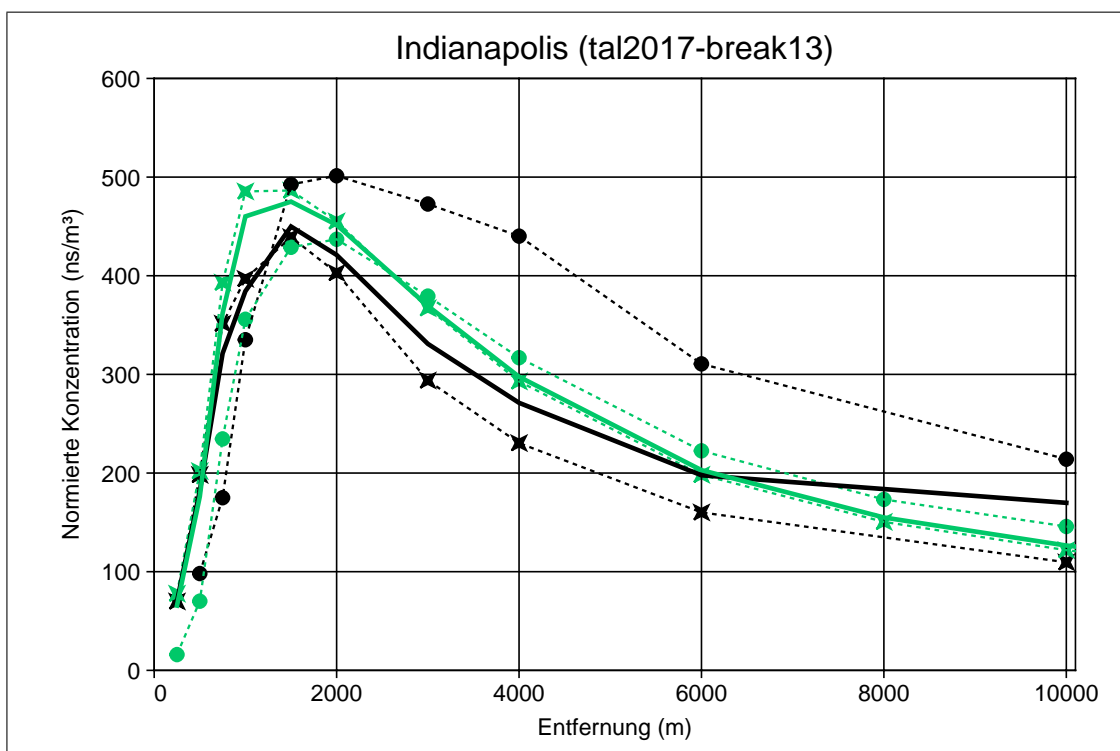


BILD 4.33: Vergleich mit dem Datensatz Indianapolis, Ausbreitungsrechnung nach TA Luft (2017) mit dem Abbruchfaktor  $f = 1.3$  für die Überhöhung. Für Erläuterungen siehe Bild 4.31.

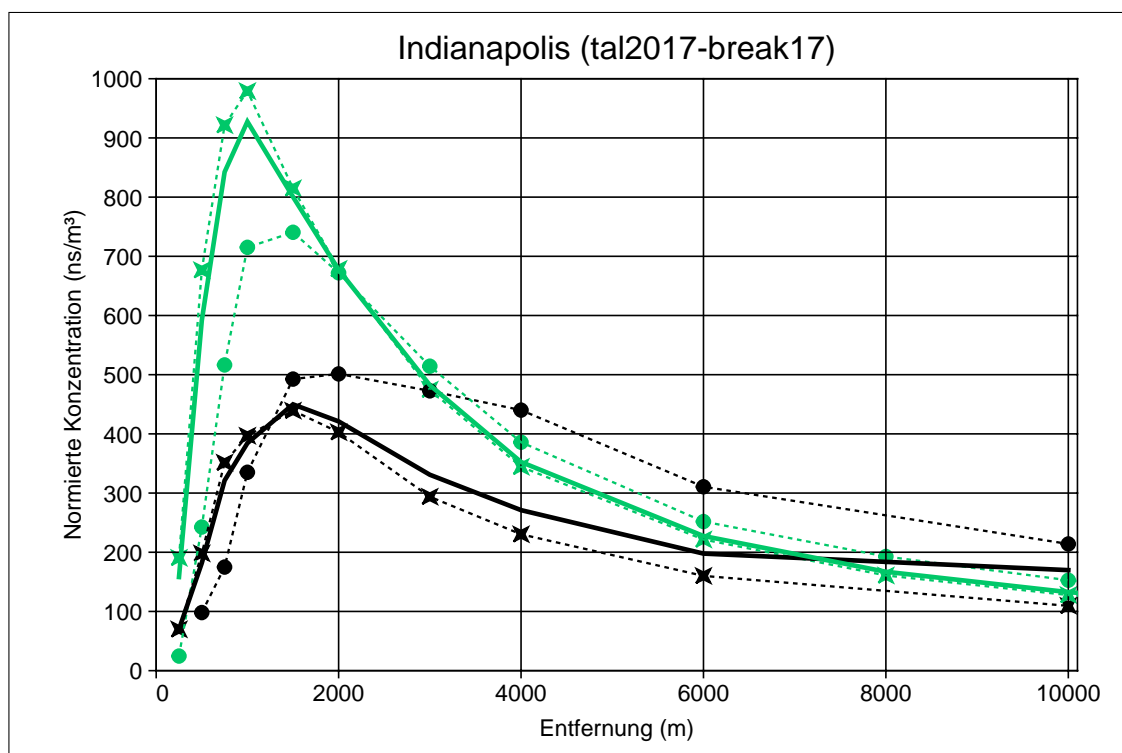


BILD 4.34: Vergleich mit dem Datensatz Indianapolis, Ausbreitungsrechnung nach TA Luft (2017) mit dem Abbruchfaktor  $f = 1.7$  für die Überhöhung. Für Erläuterungen siehe Bild 4.31.

zontalen Schwerewelle automatisch, bei indifferenter und labiler Schichtung muss sie im Überhöhungsmodell durch ein Abbruchkriterium festgelegt werden.

Im hier vorgestellten Überhöhungsmodell *IBJpluris* wird als Abbruchkriterium der Vergleich von Geschwindigkeitsunterschied  $w$  zwischen Fahne und Umgebungsströmung mit den mittleren turbulenten Geschwindigkeitsfluktuationen (mechanischer Anteil proportional zur Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$ ) der Umgebungsluft verwendet, siehe Abschnitt 4.3.2. Sind beide von ähnlicher Größe, dann wird die Fahne aufgebrochen und verliert ihre dynamische Identität, was dem Erreichen der Endüberhöhung gleichgesetzt wird. Das Abbruchkriterium wird als  $w < fu_*$  formuliert, der Faktor  $f$  sollte nach diesen Überlegungen und üblichen Parametrisierungen der Geschwindigkeitsfluktuationen, etwa nach Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2017), zwischen 1 und 2 liegen.

In den verschiedenen, in diesem Bericht vorgestellten Untersuchungen wurden aus unterschiedlichen Blickwinkeln und Anforderungen heraus Vergleiche durchgeführt, die eine nähere Festlegung des Abbruchfaktors  $f$  erlauben:

#### 1. Validierungen des Überhöhungsmodells, Abschnitt 4.6.1

In den Validierungstests kam das Abbruchkriterium gar nicht zum Einsatz, da die Messungen sich entweder auf stabile Schichtungen bezogen, für die der genaue Wert von  $f$  praktisch keine Rolle spielt, oder auf indifferente oder labile Schichtungen, für die experimentell keine Endüberhöhung bestimmt wurde.

2. Vergleich mit den Endüberhöhungen der Richtlinie VDI 3782 Blatt 3 (1985), Abschnitt 4.6.2

*IBJpluris* liefert im Vergleich zur Richtlinie für niedrigere Austrittsgeschwindigkeiten und für niedrige Bauhöhen grundsätzliche kleinere Überhöhungen, da es *stacktip downwash* und die dynamische Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe berücksichtigt. Für hohe Quellen und eine hinreichend große Impulsüberhöhung ist der vereinfachte Ansatz der Richtlinie näherungsweise gültig sollte eine zu *IBJpluris* vergleichbare Endüberhöhung liefern. Für Werte des Abbruchfaktors  $f$  im Bereich von 1.5 liefert *IBJpluris* für diesen Fall im Mittel über alle Stabilitätsklassen etwa dieselbe Endüberhöhung wie die Richtlinie, wobei sie tendenziell bei stabiler Schichtung etwas größer und bei labiler Schichtung etwas kleiner als nach der Richtlinie ausfällt.

3. Vergleich mit Konzentrationen nach der TA Luft (2002), Abschnitt 4.6.4

Vergleiche der maximalen Jahresmittel, berechnet einmal nach TA Luft (2002) und einmal nach TA Luft (2017) mit dem neuem Überhöhungsmodell *IBJpluris*,<sup>9</sup> zeigen, dass sich mit  $f = 1.7$  ein etwa doppelt so hohes Konzentrationsmaximum ergeben kann. Bei hohen, impulsbehafteten Freisetzungen ist die Endüberhöhung zwar im Mittel vergleichbar mit der der TA Luft (2002), aber bei hohen Quellen spielen die stabilen Schichtungen keine Rolle für die bodennahe Konzentration, so dass sich nur die kleinere Endüberhöhung bei labiler Schichtung bemerkbar macht. Mit dem Wert 1.3 ergeben sich nur etwas höhere maximale Jahresmittel.

4. Vergleich mit dem Datensatz *Indianapolis*, Abschnitt 4.6.5

Aussagen zur Endüberhöhung können indirekt durch Vergleich mit gemessenen Konzentrationen für Quellen mit thermischer oder mechanischer Überhöhung gewonnen werden. Ein klassischer Datensatz sind die Feldmessungen *Indianapolis*. Es handelt sich um Freilandmessungen in stark bebautem Gebiet für einen Kamin mit einer Bauhöhe von rund 80 m und einem Wärmestrom von rund 30 MW. Die maximale Konzentration auf der Fahnenachse und ihre Entfernung zur Quelle wird mit einem Wert von  $f$  um 1.3 sehr gut wiedergegeben, bei Werten im Bereich 1.5 bis 1.7 wird die Maximalkonzentration dagegen um bis zu einen Faktor 2 überschätzt.

5. Vergleich von BESMIN mit dem alten Nomogramm der TA Luft, Abschnitt 2.5

Die Ergebnisse der neuen Schornsteinhöhenbestimmung mit BESMIN wurden systematisch mit den Ergebnissen des alten Nomogramms verglichen. Für den in der Praxis besonders relevanten Wertebereich des Scharparameters  $E/S$  zwischen 1000 und 2000 (Austrittskonzentration  $E$  geteilt durch  $S$ -Wert) ergibt sich eine recht gute Übereinstimmung, wenn der Faktor  $f$  im Bereich 1.5/1.7 gewählt wird.

Schenkt man dem Datensatz *Indianapolis* Vertrauen, dann legen die Vergleiche einen Wert des Abbruchfaktor  $f$  um 1.3 nahe. In der Anwendung ergeben sich dann etwas größere maximale Jahresmittel als nach der TA Luft (2002). Das ist konsistent mit dem Befund, dass die TA Luft (2002) auf zu niedrige Maximalwerte im Vergleich mit diesem Datensatz führt.

<sup>9</sup>Der Einfluss des überarbeiteten Grenzschichtmodells ist hier nur gering.



Die Verwendung des Wertes 1.3 in der Schornsteinhöhenberechnung nach BESMIN führt in einem praxisrelevanten Bereich allerdings auf systematisch kleinere Bauhöhen als nach dem alten Nomogramm. Möchte man in diesem Bereich einen halbwegs glatten Übergang von Bauhöhen nach alter und nach neuer Berechnungsmethode erzielen, dann ist für den Abbruchfaktor in BESMIN ein Wert um 1.5/1.7 erforderlich. Dieser Wert führt auf etwas größere Bauhöhen als der Wert 1.3, was aus Sicht der Vorsorge auch als Sicherheitszuschlag in Anbetracht der konzeptionellen Vereinfachungen in BESMIN gewertet werden könnte.

# Kapitel 5

## Workshops

### 5.1 Einleitung

Die Arbeiten zu dem Forschungsvorhaben wurden von drei aufeinander aufbauenden Workshops begleitet, die von den Auftragnehmern des Forschungsvorhabens organisiert und moderiert wurden.

Auf dem ersten Workshop lag der Schwerpunkt auf der Vorstellung des Konzeptes des Forschungsvorhabens seitens der Auftragnehmer. Auf dem zweiten Workshop wurden die bis dato vorliegenden Ergebnisse aus dem Vorhaben vorgestellt und diskutiert. Im dritten Workshop schließlich wurden die Ergebnisse abschließend diskutiert und in Formulierungen umgesetzt, die als Grundlage für den Auftraggeber für die Erstellung des Referentenentwurfs zur Neufassung der TA Luft dienten.

### 5.2 Durchführung der Workshops

Der Teilnehmerkreis der Workshops bestand aus Fachleuten zur Luftreinhaltung des Umweltbundesamtes, der Länder, des Deutschen Wetterdienstes, aus Vertretern von Wissenschaft und Industrie und aus zahlreichen, in der gutachterlichen Praxis tätigen, unabhängigen Sachverständigen. Die Teilnehmer der einzelnen Workshops sind in den Teilnehmerlisten, die den Protokollen der Workshops beigelegt sind, in Abschnitt 5.3 aufgeführt.

Die Durchführung und Moderation der drei Workshops sowie die anschließende Protokollstellung oblag den Vertretern der Ingenieurbüros Janicke, Lohmeyer und Theurer als Auftragnehmer des Forschungsvorhabens.

Der Ablauf der einzelnen Workshops und die im Einzelnen vorgestellten und diskutierten Themenbereiche können den Tagesordnungen entnommen werden, die im Abschnitt 5.2.4 aufgeführt sind.



Durch die drei Workshops fand ein reger Informationsaustausch unter den teilnehmenden Experten aus den verschiedenen Bereichen statt, begleitet durch zahlreiche konstruktive Beiträge und dem Wunsch nach Konsensfindung.

### **5.2.1 Erster Workshop – Umweltbundesamt in Dessau, 06./07.07.2015**

Thema: *Vorstellung des Konzeptes*

Auf dem ersten Workshop wurden die Arbeitspakete des Forschungsvorhabens und eines ergänzenden Vorhabens zum Thema *Bestimmung der äquivalenten Quaderhöhe für die numerische mikroskalige Modellierung durch Untersuchungen im Windkanal* durch die Auftragnehmer vorgestellt. Es folgte eine fachliche Diskussion zur Vorgehensweise, bei der erste Entscheidungen getroffen wurden. Offene Fragen, die im Rahmen des Forschungsvorhabens zu klären sind, wurden bestimmt, wie auch die Untersuchungen, die bis zum nächsten Workshop zur Klärung der Fragen durchzuführen waren.

### **5.2.2 Zweiter Workshop – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 16./17.11.2015**

Thema: *Umsetzung in Ergebnisse*

Auf diesem Workshop wurden die seit dem ersten Workshop gewonnenen Untersuchungsergebnisse vorgestellt und ausführlich diskutiert. Die im ersten Workshop aufgestellten Fragen wurden im Grundsatz beantwortet. Daraus ergaben sich erste Textvorschläge zu Abschnitt 5.5 und Anhang 2 für die Neufassung der TA Luft.

### **5.2.3 Dritter Workshop – Umweltbundesamt in Dessau, 18./19.01.2016**

Thema: *Formulierung der Textvorschläge für die TA Luft*

Auf dem dritten Workshop erfolgte eine Diskussion der bis dahin noch ausstehenden Ergebnisse. Vor allem wurde die Formulierung der Texte abschließend diskutiert, die als Vorlage für die entsprechenden Abschnitte in der neuen TA Luft dienen sollen.



## 5.2.4 Tagesordnungen

Für Mensch & Umwelt

**Weiterentwicklung ausgewählter methodischer Grundlagen der Schornsteinhöhenbestimmung und der Ausbreitungsrechnung nach TA Luft**  
(FKZ 3714 43 2040)

### 1. Workshop im Umweltbundesamt in Dessau, Raum 0.163

**Tagesordnung**

**Montag, 6.07.2015, 13:00 Uhr bis ca. 17:30 Uhr**

1. Begrüßung und Einführung  
*(UBA-Projekt, Vorstellung Teilnehmer, Arbeitspakete)*
2. Ausreichende Verdünnung (U. Janicke)  
*(TAL 5.5.3, Nomogramm, 15 min. Diskussion)*  
**Kaffeepause ca. 15.00 Uhr bis 15.30 Uhr**
3. Ungestörter Abtransport (W. Bächlin)  
*(TAL 5.5.2, VDI 3781/4, 15 min. Diskussion)*
4. Äquivalente Quaderhöhe (W. Theurer)  
*(TAL A3.10, Gebäudemodellierung, 15 min. Diskussion)*
5. Zusammenfassung des ersten Tages

**Dienstag, 7.07.2015, 8:30 Uhr bis ca. 15:00 Uhr**

1. Abgasfahnenüberhöhung (U. Janicke)  
*(TAL A3.6, VDI 3782/3, VDI 3784/2, 10 min. Diskussion)*
2. Fortschreibung der Ausbreitungsrechnung (U. Janicke)  
*(TAL A2 „Ausbreitungsrechnung“ in der Entwurfsfassung)*  
**Kaffeepause ca. 10.00 Uhr bis 10.30 Uhr**
3. Querverbindungen innerhalb und außerhalb der TA Luft  
*(z. B. neue Anhänge – GIRL, FFH, BAE; VDI-RL; Leitfäden)*
4. Feststellung der bisherigen Ergebnisse  
**Mittagessen ca. 12.00 Uhr bis 13.00 Uhr**
5. Festlegung der Arbeiten für den 2. Workshop
6. Verschiedenes

BILD 5.1: Tagesordnung des ersten Workshops.





Für Mensch & Umwelt

Umwelt  
Bundesamt

**Weiterentwicklung ausgewählter  
methodischer Grundlagen der Schornsteinhöhenbestimmung  
und der Ausbreitungsrechnung nach TA Luft**  
(FKZ 3714 43 2040)

## **2. Workshop im Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit in Bonn, Raum 0.112**

### **Tagesordnung**

**Montag, 16.11.2015, 13:00 Uhr bis ca. 17:30 Uhr**

1. Begrüßung (M. Langner)
  2. Rückblick Protokoll Workshop 1 - Aufgabenliste (U. Janicke)
  3. Fortschrittsberichte:
    - Abgasfahnenüberhöhung – PLURIS (U. Janicke)
    - Aktueller Stand Ersatzquaderhöhe (W. Theurer)
- Kaffeepause ca. 15.30 Uhr bis 16.00 Uhr**
4. Querverbindungen innerhalb und außerhalb der TA Luft:  
Anhang 7 – GIRL; Anhang 8 – FFH; Anhang 9 – Deposition
  5. Konkrete Anmerkungen aus dem FB II der KRdL (U. Janicke)

**Dienstag, 17.11.2015, 8:30 Uhr bis ca. 15:30 Uhr**

1. Sachstandsbericht TA Luft (H.-P. Ewens)
  2. Sachstand Arbeiten Nomogramm (U. Janicke)
  3. Diskussion: Abgasableitung (U. Janicke)
    - zu Nr. 5.5: Zusammenfassung von Schornsteinen, Berücksichtigung von bestehenden Schornsteinen, Gelände und Bebauung
    - zu Nr. 2: Aufnahme von weiteren Definitionen
- Kaffeepause ca. 10.30 Uhr bis 11.00 Uhr**
4. Textvorschläge zu Entwürfen TA Luft 5.5 und Anhang 2 (U. Janicke)
- Mittagessen ca. 13.00 Uhr bis 14.00 Uhr**
5. Offene, noch nicht behandelte Punkte
  6. Festlegung der Arbeiten für den 3. Workshop
  7. Verschiedenes

BILD 5.2: Tagesordnung des zweiten Workshops.



Für Mensch & Umwelt

Umwelt  
Bundesamt

Weiterentwicklung ausgewählter methodischer Grundlagen der  
Schornsteinhöhenbestimmung und der Ausbreitungsrechnung nach TA Luft  
(FKZ 3714 43 2040)

### 3. Workshop

im Umweltbundesamt, Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau-Roßlau

Raum 0.163

#### Tagesordnung

**Montag, 18.01.2016, 13:00 Uhr bis ca. 17:30 Uhr**

1. Begrüßung, Übersicht (*M. Langner*)
2. 2. Workshop: Verabschiedung Protokoll, Aufgabenliste
3. Textvorschläge TA Luft Nummer 5.5  
Vorstellung, Diskussion, Verabschiedung  
**Kaffeepause ca. 15:00 Uhr bis 15:30 Uhr**
4. Textvorschläge TA Luft Nummer 5.5  
Vorstellung, Diskussion, Verabschiedung

**Dienstag, 19.01.2016, 8:30 Uhr bis ca. 15:00 Uhr**

1. Textvorschläge TA Luft Anhang 2  
Vorstellung, Diskussion, Verabschiedung  
**Kaffeepause ca. 10:00 Uhr bis 10:30 Uhr**
2. Textvorschläge TA Luft Anhang 2  
Vorstellung, Diskussion, Verabschiedung  
**Mittagessen ca. 12:00 Uhr bis 13:00 Uhr**
3. Nomogramm – bisherige/neue Vorgehensweise (*U. Janicke*)
4. Offene oder nicht behandelte Punkte
5. Verschiedenes

BILD 5.3: Tagesordnung  
des dritten Workshops.



## **5.3 Protokolle**



### 5.3.1 Erster Workshop

#### Weiterentwicklung ausgewählter methodischer Grundlagen der Schornsteinhöhenbestimmung und der Ausbreitungsrechnung nach TA Luft (FKZ 3714 43 2040)

##### 1. Workshop im Umweltbundesamt in Dessau, 6.-7.7.2015

#### Protokoll

##### Teilnehmer:

| Name                       | Institut  | Kürzel |
|----------------------------|---|--------|
| Bächlin, Wolfgang          | Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, Karlsruhe   | Bä     |
| Bigalke, Klaus             | METCON Umweltmeteorologische Beratung, Pinneberg  | Bi     |
| Buttermann, Ralf           | ThyssenKrupp Steel Europe AG, Duisburg  | Bu     |
| Falb, Andreas              | Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg  | Fa     |
| Fleischer, Peter           | Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden                          | Fl     |
| Geupel, Markus             | Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau (nur 7.7.2015)   | Geu    |
| Hartmann, Uwe              | ANECO Inst. für Umweltschutz GmbH & Co., Mönchengladbach  | Har    |
| Hasel, Markus              | iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG, Gerlingen   | Has    |
| Hebbinghaus, Heike         | Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, Recklinghausen                           | Heb    |
| Heidmann, Ilona            | Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, Karlsruhe   | Hei    |
| Janicke, Ulf               | Ingenieurbüro Janicke, Überlingen   | Ja     |
| Kienz, Robert              | Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie MV, Güstrow                                      | Ki     |
| Kunka, Rainer              | Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Jena   | Ku     |
| Langner, Marcel            | Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau  | La     |
| Lehmhaus, Joachim          | Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, Itzehoe | Le     |
| Lutz-Holzauer, Christiane  | Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg, Stuttgart                          | Lu     |
| Maßmeyer, Klaus            | Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Standort Höxter, Höxter  | Ma     |
| Metzschker, Andreas        | Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Halle/Saale  | Me     |
| Müller, Wolfgang J.        | Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, Laatzen   | Mü     |
| Namyslo, Joachim           | Deutscher Wetterdienst, Offenbach   | Na     |
| Nielinger, Jost            | iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG, Gerlingen   | Ni     |
| Nordmann, Stephan          | Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau  | No     |
| Pavelt, Tina               | Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden   | Pa     |
| Puhlmann, Gerhard          | TÜV Nord Umweltschutz GmbH & Co. KG, Hamburg  | Pu     |
| Schlünzen, K. Heinke       | Meteorologisches Institut der Universität Hamburg, Hamburg (nur 6.7.2015)                       | Sch    |
| Strotkötter, Uwe           | Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim, ZUS Luftreinhaltung und Gefahrstoffe, Hildesheim    | St     |
| Theurer, Wolfgang          | Ingenieurbüro Theurer, Hanhofen   | Th     |
| Trukenmüller, Alfred       | Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau  | Tr     |
| von Richthofen, Carl-Georg | Evonik Industries AG, Marl  | vR     |
| Wohlfahrt, Thomas          | Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg, Potsdam                     | Wo     |
| Zimmer, Matthias           | Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz, Mainz               | Zi     |

Beginn: 06.07.2015, 13.00 Uhr, Ende: 06.07.2015, 17.30 Uhr

Beginn: 07.07.2015, 08.30 Uhr, Ende: 07.07.2015, 15.00 Uhr

Protokollführerin: Dr. Ilona Heidmann

1

Montag, 06.07.2015

K=Kommentar, A=Arbeitsauftrag, E=Entscheidung, V=Vorschlag

| Inhalt  | Typ  |
|---|--|
| <p><b>TOP1 Begrüßung und Einführung</b></p> <p>Begrüßung durch Frau Busse, Leiterin des Fachbereichs II am UBA.</p> <p>Begrüßung durch Herrn Langner, Leiter des Fachgebiets II 4.1 am UBA. Vorstellung des Zeitplans der TA-Luft-Anpassung (Stand März 2015). Alle Ergebnisse des Vorhabens sollen in Absprache mit dem BMUB in das Gesetzgebungsverfahren (3. Quartal 2015 bis 1. Quartal 2017) einfließen. Die Textvorschläge müssen bis Januar 2016 vorliegen.</p> <p>Präsentation und Diskussion einiger Änderungen und Begriffe</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) „Gesamtzusatzbelastung“</li> <li>b) 4.2.1 Tab. 1: neuer Immissionswert: <math>PM_{2,5}</math> 25 <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math></li> <li>c) 4.5.1 Tab. 6: Depositionswerte neu für Pb, Cd, Cr, B(a)P und Dioxine und Dioxinähnliche Substanzen</li> <li>d) Streichung Bagatellmassenströme in Tab. 7, Vorstellung des neuen Verfahrens</li> </ul> <p>Die Diskussion ergibt, dass für den Punkt d) die Anforderung für den Fall sinkender Emissionen präzisiert werden muss, um beispielsweise bei gleichzeitigem Rückbau des Schornsteins den Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu gewährleisten.</p> <p>Begrüßung durch Herrn Trukenmüller (UBA), Organisatorisches.</p> <p>Begrüßung durch Herrn Bächlin, Überblick über die Arbeitspakete im UBA-Vorhaben</p>   | <p>K</p> <p>A</p>                            |
| <p><b>TOP 2 Ausreichende Verdünnung (TAL 5.5.3, Nomogramm)</b></p> <p>Herr Janicke präsentiert den Vorschlag zum neuen Vorgehen der Schornsteinhöhenbestimmung. Das standardisierte Verfahren erlaubt die Bestimmung der Schornsteinhöhe auf Basis eines maximalen Stundenmittels der Konzentration in Bodennähe, das unter einem vorgegebenen Wert liegen muss. Sofern keine lokalen Besonderheiten (Gelände, Gebäude) vorliegen, ist diese Vorgehensweise standortunabhängig.</p> <p>Verschiedene Möglichkeiten zum Umgang mit der Rauigkeitslänge <math>z_0</math> (z.B. die Annahme eines mittleren Wertes von 0.5 m) werden diskutiert. Der Umgang mit <math>z_0</math> wird unterschiedlich gesehen.</p> <p>Das vorgeschlagene neue Vorgehen zur Schornsteinhöhenbestimmung wird akzeptiert.</p> <p>Gebäude und Gelände sind zusätzlich zu berücksichtigen. J-Werte können/sollen übernommen werden.</p> <p>Mit Verweis auf Folie 19 des Vortrages von Herrn Janicke wird festgestellt, dass die Beschränkung auf die Ausbreitungsklassen I bis III/2 im Verfahren B für effektive Quellhöhen über 100 m zu einer leichten, systematischen Unterschätzung der maximalen Konzentrationen führt.</p> <p>Es wird die Festlegung eines Verfahrens für komplexe Situationen gefordert. Von anderer Seite wird gefordert, die Schornsteinhöhenbestimmung sollte als Vorsorgeanforderung grundsätzlich standortunabhängig sein – ggf. unter Verzicht auf die Berücksichtigung von komplexem Gelände.</p> | <p>K</p> <p>E</p> <p>K</p> <p>K</p> <p>K</p> |

|  |               |
|--|---------------|
| <p>Es wird entgegnet, dass es bei komplexem Gelände und Schornsteinen, deren Höhe nach der Schornsteinhöhenbestimmung für ebenes Gelände ermittelt wurde, es in der Ausbreitungsrechnung zu Schwierigkeiten bei der Einhaltung der Immissionswerte kommen kann.</p>  | K             |
| <p>Als Kriterium für die Wahl des Verfahrens wird die Definition der Begriffe „homogenes bzw. komplexes Gelände“ angeregt.</p>   | K             |
| <p>Es wird nach einem Verfahren zum Zusammenfassen von benachbarten Quellen gefragt. Das Verfahren zum Zusammenfassen gemäß TAL 5.5 gilt weiterhin und ist unabhängig von der hier diskutierten Vorgehensweise.</p>  | K<br>K        |
| <p><b>TOP 3 Ungestörter Abtransport</b> (TAL 5.5.2, VDI 3781/4)<br/>Herr Bächlin präsentiert einen Vorschlag zur Vorgehensweise bei der Bestimmung der Anordnung und Höhe von Schornsteinen für einen ungestörten Abtransport der Emissionen mit der freien Luftströmung. Emissionen in sogenannte Rezirkulationszonen sind danach nicht zulässig. Die entsprechenden Grundzüge der VDI 3781/4 sollen mit Verweis auf die Richtlinie in die TA-Luft übernommen werden.</p>     |               |
| <p>Es wird ein Abgleich mit der VDI 3783/9 (Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle) bezüglich der Rezirkulationszone (bzw. Stör- oder Nachlaufzone) angeregt.</p>  | A             |
| <p>Es wird auf Schwierigkeiten bei der Zusammenfassung von Kaminbauten und von Batterien von Kaminen hingewiesen. Es folgt eine Diskussion über hierbei möglicherweise auftretende Effekte (Downwash). Es wird eine Regelung bezüglich der Zusammenfassung von Kaminbauten gefordert. Die Festlegung, wann Fahnenüberhöhung berücksichtigt werden darf, soll in der VDI 3782/3 in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit erfolgen.</p>                                       | K<br>A        |
| <p><b>TOP 4 Äquivalente Quaderhöhe</b> (TAL A3.10, Gebäudemodellierung)<br/>Herr Theurer stellt sein Konzept zur Ermittlung der Ersatzquaderhöhe für nicht-quaderförmige Gebäude (z.B. geneigte Dächer) vor.</p>   |               |
| <p>Es wird eine Empfehlung für die Behandlung von Quellen unmittelbar am Dach gefordert.</p>   | A             |
| <p>Es wurde nach einem Kriterium zur Unterscheidung zwischen den relevanten, zu modellierenden, und den zu vernachlässigenden Gebäuden gefragt.</p>  | K             |
| <p>Es wird die Ermittlung der Unsicherheiten der Windkanalergebnisse gefordert.</p>  | A             |
| <p><b>TOP 5 Zusammenfassung des ersten Tages</b><br/>Bezüglich „Ausreichende Verdünnung“</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorgestelltes Vorgehen bei der Schornsteinhöhenbestimmung wird grundsätzlich akzeptiert</li> <li>• Nur Berücksichtigung der Klassen I bis III/2 in den grundlegenden Berechnungen (Fall B) wird akzeptiert</li> <li>• Unklarheiten bestehen bei der Berücksichtigung von <math>z_0</math>, Gelände, Gebäuden und den S-Werten</li> </ul> | E<br>E<br>K/A |
| <p>Es wird darauf hingewiesen, dass Diskrepanzen zwischen der Schornsteinhöhenbestimmung und der Ausbreitungsrechnung bei der Zusammenfassung nahegelegener Quellen bestehen, die noch nicht geklärt sind.</p>   | K             |
| <p>Bezüglich „Ungestörter Abtransport“</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Es ist auf Konsistenz zu VDI 3783/9 zu achten</li> <li>• Der Umgang mit Kamineinhausungen und Kaminbatterien ist offen</li> </ul>  | A<br>K/A      |

|  |             |
|--|-------------|
| (keine freie Abströmung, Downwash)   |             |
| Bezüglich „Äquivalente Quaderhöhe“   | A           |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Es soll eine Ersatzquaderhöhe festgelegt werden, die sich aus dem Mittel über die Windrichtungen ergibt.</li> <li>• Frage nach relevanten zu modellierenden Gebäuden im Untersuchungsgebiet (Grundsatzfrage)</li> <li>• Empfehlungen für Quellgeometrien bei Quellen unmittelbar am Dach</li> <li>• Quantifizierung der Unsicherheiten</li> </ul> | K<br>A<br>A |
| Es wird angeregt, dass bezüglich der Berücksichtigung der Überhöhung das Verhältnis von Windgeschwindigkeit zu Abluftgeschwindigkeit in die Überhöhungsrichtlinie aufgenommen werden soll.   | K           |
| Es wird darauf hingewiesen, dass es Windfeldmodelle gibt, die geneigte Dächer abbilden können.   | K           |

**Dienstag 7.7.2015**

K=Kommentar, A=Arbeitsauftrag, E=Entscheidung, V=Vorschlag

| Inhalt   | Typ |
|--|-----|
| <b>TOP 1 Abgasfahnenüberhöhung</b> (TAL A3.6, VDI 3782/3, VDI 3784/2)<br>Herr Janicke präsentiert einen Vorschlag zum neuen Vorgehen zur Bestimmung der Abgasfahnenüberhöhung mit dem Modell PLURIS. PLURIS ist ein integrales Fahnenmodell. Es werden keine größeren Unterschiede beim Übergang von der bisherigen zur neuen Berechnungsmethode erwartet. |     |
| Es wird nach einem Kriterium bezüglich der Windgeschwindigkeit zur Anwendung des Überhöhungsmodells PLURIS gefragt.  | K   |
| Ein gebräuchliches Kriterium für den Ansatz einer Überhöhung ist das Verhältnis von Austritts- zu Windgeschwindigkeit $u_a / u > 1.5$ , da dann Downwash Effekte vernachlässigbar sind.  | K   |
| Es wird auf das aktuelle Kriterium einer Mindestgeschwindigkeit von 7 m/s hingewiesen, das zu einem sprunghaften Übergang ( $> 7$ m/s oder $< 7$ m/s) führt. Es wird ein fließender Übergang gefordert.  | K   |
| Es wird die Berücksichtigung des Wärmestroms in dem Kriterium gefordert.   | K   |
| Die Betrachtung von Überlagerungsfällen von nahe beieinander liegenden Fahnen ist mit PLURIS nicht möglich und im Rahmen dieses Projektes nicht durchführbar.  | K   |
| Es wird eine Prüfung der Auswirkung der Zusammenfassung von Quellen gewünscht und eine Empfehlung für das Vorgehen beim Zusammenfassen von Quellen bei einem Abstand kleiner 5D (vgl. TAL 5.5) gefordert.  | K   |
| Es wird gefordert, dass ein Abschneidekriterium für die Endüberhöhung verbindlich festgeschrieben wird.  | V   |
| Es wird gefordert bei einem Vergleich der neuen mit der alten Methode nicht nur Einzelsituationen, sondern auch Jahresmittelwerte zu berücksichtigen.  | A   |
| Es wird angeregt, den anzusetzenden Volumenstrom genau zu definieren.<br>Vorschlag: Normgröße wie bei der Emissionsbestimmung (0 °C, trocken)  | A   |
| Ferner soll der Bezugssauerstoffgehalt festgelegt werden.  | V   |

4

|  |        |
|--|--------|
| Es wird nach der Berücksichtigung von Temperaturprofilen gefragt.  | K      |
| Es wird ein einheitliches Vorgehen beim Zusammenfassen von Quellen in Ausbreitungsrechnung und Fahnenüberhöhung gefordert und die Klärung, wann Batterien von Schornsteinen wie berücksichtigt werden müssen.  | K      |
| <b>TOP 2 Fortschreibung der Ausbreitungsrechnung</b> (TAL A2 „Ausbreitungsrechnung“)<br>Herr Janicke präsentiert Teile des nicht öffentlichen Entwurfs der TA-Luft vom 12.05.2015 einschließlich der Änderungsvorschläge.  |        |
| Textvorschläge für den Abschnitt 5.5 und den Anhang 2 (neu) sind erwünscht und, neben der fachlichen Begleitung, ein Ziel der Workshops. Textvorschläge zu anderen Abschnitten werden als Hinweise aufgenommen.  | A      |
| Es wird über die S-Werte als Konzentrationen diskutiert.<br>Zu Folie 6: statt „Gesamtzusatzbelastung“ muss es „Zusatzbelastung“ heißen   | K<br>K |
| Begriff „große Emissionsmassenströme“ sollte quantitativ festgelegt werden.  | K      |
| Es wird das Vorgehen diskutiert, wenn die reale Schornsteinhöhe von der berechneten abweicht. Es wird eine Abgrenzung und Definition von Mindestschornsteinhöhe und Schornsteinhöhe gefordert. Wie wird verfahren, welche Schornsteinhöhe ist anzusetzen (z.B. bei Ausbreitungsrechnung, Bestimmung der Irrelevanz, Bestimmung des Rechengebiets, usw.), wenn die Mindestschornsteinhöhe ungleich der realisierten Schornsteinhöhe (z.B. bei Nutzung von bestehenden Kaminen) ist?                                   | K      |
| Es wird die uneinheitliche Vorgehensweise bei der Ausbreitungsrechnung mit Depositionsgeschwindigkeiten diskutiert und eine Regelung gefordert, mit welchen Depositionsgeschwindigkeiten gerechnet werden soll. Der Verweis auf die Richtlinie (VDI 3782/5) ist zu überdenken und gewünscht.   | K      |
| Die Empfehlung aus dem Projekt ist, mit einer räumlich homogenen Depositionsgeschwindigkeit zu rechnen. Für Berechnungen für FFH-Gebiete kann es einen Verweis auf die VDI 3782/5 geben.   | K      |
| Zu Folie 12: Es wird der Begriff „für den Standort der Anlage charakteristisch“ in Bezug auf die Meteorologie diskutiert, da der Anemometerstandort auch an anderer Stelle als am Anlagenstandort liegen kann. Relevant für die Ausbreitung sind die Verhältnisse am Standort und auf dem Ausbreitungsweg. Der Begriff steht im Widerspruch zur VDI 3783/16 zur Bestimmung der Anemometerposition. Vorschlag: „Die verwendeten Werte sollen für den Standort der Anlage und das Rechengebiet charakteristisch sein“. | K<br>V |
| Hinweis, dass der Begriff „charakteristisch“ und nicht „repräsentativ“ sein sollte, da letzterer Begriff schärfer ist. VDI 3783/21 fordert auch die Ungestörtheit der Windmessung. Diese Anforderung sollte Eingang in die TA-Luft finden.   | K      |
| Der Niederschlag sollte auch in die meteorologischen Daten aufgenommen werden, da dieser für die nasse Deposition benötigt wird.   | V      |
| Der DWD als nationaler Wetterdienst sollte in der TA-Luft nicht gestrichen werden.   | K      |
| Es wird das weitere Vorgehen der Arbeit am Textentwurf diskutiert. Die Verteilung des vollständigen Textentwurfs wird gewünscht und eine Diskussion der  | A      |

5



|  |        |
|--|--------|
| <p>Vorschläge mit den Workshop-Teilnehmern. Der Textentwurf soll rechtzeitig vor dem 2. Workshop verschickt werden.</p>  |        |
| <p>Zu Folie 13 des Vortrags von Herrn Janicke: „... bereitgestellten Daten <i>im Berechnungsgebiet</i> zu verwenden “ sollte eingefügt werden.</p>   | V      |
| <p>Der Abstand von der Quelle zum betrachteten Immissionsort sollte mitentscheidend für die Wahl des Windfeldmodells sein. Herr Janicke merkt an, dass bisher alle Validierungsrechnungen des diagnostischen Modells und Vergleichsrechnungen mit prognostischen Strömungsmodellen für Quellhöhen unter 1.2-facher Gebäudehöhe durchgeführt wurden. Die Validierungsrechnungen und die Vergleichsrechnungen sollten in die Überlegungen einbezogen werden.</p> | K      |
| <p>Es wird nach einem Referenzmodell für prognostische Windfeldmodelle gefragt und Rechtssicherheit gefordert.</p>   | K      |
| <p>METRAS steht als freies Referenzmodell für die Mesoskala voraussichtlich mit Erscheinen der neuen TA-Luft bereit, jedoch ohne Quelltext. Perspektivisch könnte auch ein Referenzmodell für die Mikroskala entwickelt werden.</p>  | K      |
| <p>Es wird die kontinuierliche Weiterentwicklung der Windfeldmodelle für den routinemäßigen Einsatz bis zur nächsten Anpassung der TA-Luft (in ca. 15 Jahren) gefordert.</p>   | K      |
| <p>Es wird auf Nachfrage bestätigt, dass auch für Stäube nasse Deposition zu berücksichtigen ist.</p>  | K      |
| <p>Es wird über die Relevanz der AKS diskutiert. Bei bodennahen Quellen können im Einzelfall auch Nebenwindrichtungen wichtig sein. Diese werden u. U. über eine AKS besser abgebildet als über Daten eines zwar repräsentativen, aber einzelnen Jahres.</p>   | K      |
| <p><b>TOP 3 Querverbindungen innerhalb und außerhalb der TA Luft</b> (z. B. neue Anhänge – GIRL, FFH, BAE; VDI-RL; Leitfäden)</p>  |        |
| <p><b>Vorstellung Anhang 8</b> (Gebiete von gemeinschaftlicher Bedeutung) durch Herrn Langner</p>  |        |
| <p>Der Einwirkbereich wird durch eine Zusatzbelastung &gt;0.3 kg/(ha a) definiert. Es wird die Aufnahme des Säureeintrags gefordert.</p>   | K      |
| <p>Herr Hasel erwähnt darauf hin, dass sowohl für Stickstoff als auch für Schwefel 0.3 kg/(ha a) festgelegt und somit der Säureeintrag berücksichtigt ist.</p>   | K      |
| <p><b>Vorstellung Anhang 9</b> (Deposition) durch Herrn Langner<br/>Es wird auf räumlich variierende Depositionsgeschwindigkeiten verwiesen und konsistente Vorgehensweise gewünscht.</p>  | K      |
| <p>Der Stand der Technik zur Festlegung der Depositionsgeschwindigkeit bei der Modellierung der trockenen Deposition ist im Übergang. Es existieren unterschiedliche Depositionsgeschwindigkeiten und wenn niedrige Immissionswerte gefordert sind, werden die unterschiedlichen Depositionsgeschwindigkeiten in der Praxis genutzt.</p>   | K      |
| <p>Die Begriffe „empfindliche Pflanzen“ und „geeignete Immissionswerte“ sind zu wenig konkret. Die Betrachtung von Immissionswerten an Punkten oder auf Flächen sollte ggf. über eine Mindestfläche (z.B. Mindestseitenlänge 250 m) verbindlicher geregelt werden.</p>   | K<br>V |

6



|  |   |
|--|---|
| Es existieren Listen von empfindlichen Pflanzen. Es können critical loads verwendet werden.  | K |
| <b>Anhang 10</b> (Bioaerosole) durch Herrn Langner<br>Hinweis, dass die Bioaerosolausbreitung schwierig ist und die Konzentration eher überschätzt wird. Es existieren nur Emissionsfaktoren für Hühner und Schweine.  | K |
| Diskussion über die Verwendung von Absterberaten, da auch tote Mikroorganismen z.B. für Allergiker relevant sein können. Absterberaten sind bislang kaum quantifizierbar, das konservative Vorgehen ist die Betrachtung ohne Absterberaten. Eine VDI-Richtlinie „Anlagenbezogene Ausbreitungsmodellierung von Bioaerosolen“ wird gerade veröffentlicht (VDI 4251/3). | K |
| Diskussion über die Ausbreitung von Bioaerosolen an den unterschiedlichen Staubklassen. Es ist nicht bekannt, an welcher Staubklasse Bioaerosole hauptsächlich anhaften. Die Annahme der Klasse 1 ist in Bezug auf die luftseitige Konzentration konservativ.  | K |
| Der juristische Charakter des Orientierungswertes und das Fehlen einer Dosis-Wirkung-Beziehung werden diskutiert. Eine Überschreitung ist ein Anhaltspunkt für eine Sonderfallprüfung. Da der Orientierungswert oft überschritten wird, führt dieser Ansatz zu einem großem ungeregelten Bereich, eine Regelung wird gefordert.                                      | K |
| Hinweis, dass Bioaerosole so zu dem kritischen Schadstoff in der Genehmigungspraxis werden.  | K |
| Ein Verweis auf die VDI 4251/3 wird gefordert.   | K |
| Es wird vorgeschlagen, Frau Tesseraux (LUBW) als Expertin zum nächsten Workshop einzuladen.  | V |
| <b>Anhang 7</b> (GIRL) durch Herrn Langner<br>Die GIRL gibt Ermittlungsverfahren vor. Die Schornsteinhöhenberechnung könnte hier entfallen, falls in der TA-Luft neu geregelt. Der Bagatellmassenstrom ist abhängig von der Quellhöhe und gilt pro Anlage.   | K |
| 250 m für die Beurteilungsfläche sollten weicher formuliert werden, also auch kleinere Rasterweiten zulassen.  | K |
| Tierartspezifische Gewichtungsfaktoren, z.B. für Pferde und Mastbullen, werden gefordert.  | K |
| Für weitere tierartspezifische Gewichtungsfaktoren sind messtechnische Nachweise notwendig.  | K |
| Es wird ein Programm zur Beurteilungsflächenbildung konsistent zu den Begehungsflächen gewünscht.  | K |
| Vorgehensweise bei Kurzzeitquellen (s. a. Verschiedenes)   | K |
| Vorstellung von <b>VDI-Richtlinien</b> mit Relevanz für die TA Luft.   |   |
| Dank für Mitarbeit bei VDI-Richtlinien!  |   |
| <b>TOP 4 Feststellung der bisherigen Ergebnisse</b>  |   |



|   |                           |
|---|---------------------------|
| <p>Bezüglich Abgasfahnenüberhöhung</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wann ist mit Überhöhung zu rechnen? Bestimmung weiterer Kriterien</li> <li>• Regelung für die Zusammenlegung von Quellen</li> <li>• Konsistente Definition des Volumenstroms</li> </ul>   | A<br>A<br>A               |
| <p>Bezüglich Anhang Ausbreitungsrechnung</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verfahren, wie mit Textvorschlägen umgegangen wird: Der aktuelle Vorentwurf wird den Workshop-Teilnehmern zur Verfügung gestellt. Textentwürfe bzw. Änderungen können bis zum 15.08.2015 eingereicht werden. Die Workshop-Teilnehmer werden gebeten, sich ggf. zu den einzelnen Themen untereinander abzustimmen</li> <li>• Einarbeitung wird auf dem 2. Workshop diskutiert</li> </ul>   | A<br><br>A                |
| <p>Bezüglich Querverbindungen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bioaerosole sind mit vielen offenen Fragen verbunden. Dies führt zu Unsicherheiten und zu unregelmäßigem Zustand</li> <li>• Umgang mit räumlich differenzierter N-Deposition</li> </ul>  | K<br><br>K                |
| <b>TOP 5 Festlegung der Arbeiten für den 2. Workshop</b>  |                           |
| <p><b>Ausreichende Verdünnung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• grundsätzliches Vorgehen wird akzeptiert</li> <li>• Behandlung von <math>z_0</math> wird uneinheitlich gesehen. Projektpartner suchen eine Lösung</li> <li>• Vorschlag machen zum Umgang mit Gelände und Gebäuden</li> <li>• Vergleich von S-Werten/Schornsteinhöhen alte vs. neue Methode</li> <li>• Bei kleinem Quellabstand ist ein Zusammenfassen der Quellen zu prüfen. Festlegung wie zu prüfen und was dann zu tun ist</li> </ul> | E<br>A<br><br>K<br>A<br>A |
| <p><b>Ungestörter Abtransport</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rezirkulationszone abgleichen mit Evaluierungsrichtlinie (VDI 3783/9)</li> <li>• Downwash bei Kaminbatterien und Kaminumhausungen</li> </ul>   | A<br>A                    |
| <p><b>Äquivalente Quaderhöhe</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Behandlung von Quellen unmittelbar am Gebäude</li> <li>• Darstellung von Unsicherheiten</li> </ul>  | A<br>A                    |
| <p><b>Abgasfahnenüberhöhung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wann wird mit Überhöhung gerechnet</li> <li>• Wann werden Quellen zusammengefasst</li> <li>• Konsistente Definition des Volumenstroms</li> </ul>   | A<br>A<br>A               |
| <p><b>Fortschreibung der Ausbreitungsrechnung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Textvorschläge für Anhang Ausbreitungsrechnung mit dem Ziel eines Formulierungsvorschlags bis zum und Diskussion auf dem 2. Workshop</li> </ul>  | A                         |
| <p>Es wird eine Regelung zu den relevanten zu modellierenden Gebäuden gewünscht. Es gibt Probleme, wenn mit diagnostischen Windfeldmodellen viele Gebäude berücksichtigt werden.<br/>Dies ist nicht im Projekt realisierbar.</p>  | K<br>K                    |
| <p>Schornsteinhöhenberechnung wird immer komplizierter. Bei komplexen Situationen ist eher eine Ausbreitungsrechnung mit Immissionswerten anzuraten.</p>  | K                         |
| <b>TOP 6 Verschiedenes</b>  |                           |

|   |   |
|---|---|
| <p>Vortrag von Herrn Namyslo: <b>DWD-Daten im Kontext der TA-Luft</b><br/>         Die Ermittlung der Ausbreitungsklassen nach Klug/Manier mit Daten des Gesamtbedeckungsgrades via Satellit stimmt gut mit den durch Augenbeobachtung gewonnenen Ausbreitungsklassen überein. Zukünftig sind Daten eines noch laufenden Forschungsprojektes zur „Weiterentwicklung von Testreferenzjahren (TRY)“ zu u.a. Windrichtung und Windgeschwindigkeit in 10 m über Störungsniveau im 1 km-Raster verfügbar. Ihre Anwendung im Rahmen der Luftreinhaltung setzt aber noch eine „Ampel-Bewertung“ eines jeden Rasterpunktes zur fachlichen (eingeschränkten) Verwendbarkeit oder Nichtverwendbarkeit der Ergebnisse voraus. Es ist derzeit davon auszugehen, dass diese neuen klimatologischen Basiszeitreihen der TRY nach Abschluss des Forschungsprojektes in geeigneter Weise bereitgestellt werden.</p> <p>Dies wird begrüßt. Es wären in vielen Fällen keine Übertragungen gemessener Daten mehr nötig oder die Ergebnisse könnten für eine Objektivierung von Übertragungsverfahren verwendet werden und eine einheitliche Datengrundlage stände zur Verfügung.</p> |   |
| <p><b>Überlegungen zur Rauigkeitslänge und Anemometerhöhe</b> (note-ha-z0.pdf)</p>  | K |
| <p><b>Berechnung der nassen Deposition im Nahbereich hoher Quellen</b> (note-wetdep.pdf)</p>  | K |
| <p><b>Anmerkungen zur Behandlung kurzzeitiger Geruchsemissionen</b> (note-geruch-emission.pdf)<br/>         Der Umgang mit <b>kurzzeitigen Emissionen</b> sollte geregelt werden. Z. B. könnte die Beurteilungsschwelle für diese Emissionen gesenkt werden. Eine Kurzzeitquelle ist meistens eine Quelle von vielen. Daher ist die Umsetzung der Heraufsetzung der Geruchsschwelle schwierig. Eher sollte man einen Zwischenwert zwischen dem „Verschmieren“ über eine Stunde und dem Kurzzeitwert für eine Stunde annehmen.</p>   | K |
| <p>Wie sollen <b>sekundäre Feinstäube</b> behandelt werden? Stellungnahme vom UBA wird gewünscht.<br/>         Weder UBA noch Länder haben eine Meinung parat. Sekundäre Feinstäube werden nicht berücksichtigt.</p>  | K |
| <p>Es wird ein Statement vom UBA bezüglich <b>NO/NO<sub>2</sub></b> gewünscht.<br/>         Dies liegt eher beim LAI oder im Begründungstext. Die TA-Luft spiegelt Stand der Technik und der Modellierung wider. Bezüglich der Umsetzungsraten könnte in eine Fußnote, dass, so lange keine genaueren Daten vorliegen, die der VDI-Richtlinie zu verwenden sind.</p>  | K |
| <p>Die nasse Deposition ist neu in der TA-Luft. Es werden die Schadstoffe abgehandelt, die nach TA-Luft relevant sind.</p>  | K |
| <p>Der CO 8 Std-Mittelwert wurde ebenso wie die Cd-Konzentration nicht in die neue TA-Luft übernommen, da diese Werte von der Immissionsseite her nicht mehr relevant sind.</p>   | K |
| <p>Die Abschnitte 4.4.1 (Immissionswerte für Schwefeldioxid und Stickstoffoxide), 4.6.2.6 (Festlegung der Beurteilungspunkte) und 4.7.2 (Immissions-Tageswert) wurden diskutiert und kritisiert. Es wurde eine Verbesserung und Konkretisierung im Rahmen der TA-Luft Anpassung angeregt.</p>   | K |



### 5.3.2 Zweiter Workshop

#### Weiterentwicklung ausgewählter methodischer Grundlagen der Schornsteinhöhenbestimmung und der Ausbreitungsrechnung nach TA Luft (FKZ 3714 43 2040)

#### 2. Workshop im Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit in Bonn, 16.-17.11.2015

##### Protokoll

##### Teilnehmer:

| Name                        | Institut   | Kürzel |
|-----------------------------|--|--------|
| Bigalke, Klaus              | METCON Umweltmeteorologische Beratung, Pinneberg   | Bi     |
| Buttermann, Ralf            | ThyssenKrupp Steel Europe AG, Duisburg   | Bu     |
| Ewens, Hans-Peter           | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Bonn            | Ew     |
| Falb, Andreas               | Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg   | Fa     |
| Hartmann, Uwe               | ANECO Inst. für Umweltschutz GmbH & Co., Mönchengladbach                                     | Har    |
| Hasel, Markus               | iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG, Gerlingen  | Has    |
| Hebbinghaus, Heike          | Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, Recklinghausen                        | Heb    |
| Hummel, Hans-Joachim        | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Bonn            | Hu     |
| Janicke, Ulf                | Ingenieurbüro Janicke, Überlingen  | Ja     |
| Kamp, Martin                | Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Münster   | Ka     |
| Kienz, Robert               | Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, Güstrow               | Ki     |
| Kunka, Rainer               | Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Jena  | Ku     |
| Langner, Marcel             | Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau   | La     |
| Lutz-Holzhauser, Christiane | Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Karlsruhe      | Lu     |
| Maßmeyer, Klaus             | Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Standort Höxter, Höxter                                       | Ma     |
| Morrison, Daniel            | Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, Karlsruhe  | Mo     |
| Müller, Wolfgang J.         | Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, Laatzen                                      | Mü     |
| Namyslo, Joachim            | Deutscher Wetterdienst, Offenbach  | Na     |
| Nielinger, Jost             | iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG, Gerlingen  | Ni     |
| Pavelt, Tina                | Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden                                      | Pa     |
| Richter, Cornelia           | Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln                              | Ri     |
| Schlünzen, K. Heinke        | Meteorologisches Institut der Universität Hamburg, Hamburg                                   | Sch    |
| Strotkötter, Uwe            | Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim, ZUS Luftreinhaltung und Gefahrstoffe, Hildesheim | St     |
| Theurer, Wolfgang           | Ingenieurbüro Theurer, Hanhofen  | Th     |
| Trukenmüller, Alfred        | Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau   | Tr     |
| Wohlfahrt, Thomas           | Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg, Potsdam                  | Wo     |
| Zimmer, Matthias            | Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz, Mainz            | Zi     |

16.11.2015 Beginn: 13.00 Uhr, Ende: 17.30 Uhr

17.11.2015 Beginn: 08.30 Uhr, Ende: 15.30 Uhr

Protokollführer: Daniel Morrison



Montag, 16.11.2015

K=Kommentar, A=Arbeitsauftrag, E=Entscheidung, V=Vorschlag

| Inhalt   | Typ  |
|--|--|
| <p><b>TOP1: Begrüßung</b></p> <p>Begrüßung durch Herrn Hummel, BMUB<br/>Referentenentwurf der TA Luft soll/muss bis zum 1. Quartal 2016 fertig sein, damit erste Befassung im Bundesrat 2016 erfolgen kann.</p> <p>Begrüßung durch Herrn Langner, UBA<br/>Ziel des 1. Workshops ist, die Aufgabenstellung und Vorgehensweisen zu erarbeiten; des 2. Workshops, die Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten für die anstehenden Entscheidungen vorzustellen und Textentwürfe zu erarbeiten; des 3. Workshops, endgültige Textentwürfe als Vorschläge für die TA Luft zu verabschieden.</p> <p>Begrüßung durch Herrn Trukenmüller, UBA, und Herrn Janicke mit Vorstellung der Tagesordnung.</p>   |  |
| <p><b>TOP 2: Rückblick 1. Workshop/Aufgabenliste (Folien: Aufgaben, Kommentare und offene Punkte aus dem 1. Workshop gemäß Protokoll)</b></p> <p>Fol. 2: TA Luft neu, 4.6.1.1: Bestimmung Immissionskenngrößen bei Änderungsgenehmigung: Unterpunkt b) wurde um Anhaltspunkte für etwaige Immissionserhöhungen ergänzt. → allgemeine Zustimmung</p> <p>Fol. 6: Für die Schornsteinhöhenbestimmung wurde vereinbart, ein festes z0 von 0.5 m zu verwenden → Bestätigung der Zustimmung aus dem 1. Workshop</p> <p>Fol. 12: Vorgehen bei realer Schornsteinhöhe im Bestand ungleich der bei einer erneuten Schornsteinhöhenbestimmung berechneten Schornsteinhöhe<br/>- wenn ein bestehender Kamin höher gebaut ist als über eine neue Schornsteinhöhenberechnung ermittelt, führt es zu einem Genehmigungshemmnis, wenn der bestehende Kamin in der Ausbreitungsrechnung nicht mit der tatsächlich gebauten Höhe berücksichtigt wird.</p> <p>Öffnungsklausel für Einzelfallbetrachtung, für bestehende Schornsteine sollte die tatsächlich bestehende Höhe in der Ausbreitungsrechnung angesetzt werden.</p> <p>Vermeidung der „Politik der hohen Schornsteine“, da so ggf. Irrelevanzschwelle ausgenutzt wird. Dies könnte zur Benachteiligung von Neuanlagen führen, die nicht über einen bestehenden „höheren“ Schornstein verfügen und damit unter Umständen die Emissionen mindern müssen, um z.B. die Irrelevanzschwelle einzuhalten.</p> <p>→ keine Einigung, Einwand wird in BLAG eingebracht, Entscheidung muss unter Umständen dort getroffen werden.</p> <p>Fol. 14: In den Auslegungshinweisen zur GIRL wird ausgeführt, dass kleinere Beurteilungsflächen bis hin zur Punkt Betrachtung gewählt werden können.</p> <p>- Anregung an GIRL-Gruppe: Beurteilungsfläche mit 250 m stehen „sehr prominent“ im Text, Chance auf flexiblere Formulierung und Vereinheitlichung mit TA Luft sollte nicht vergeben werden.</p> <p>- Verankerung der bestehenden GIRL in der TA Luft (als Verwaltungsvorschrift), die Auslegungshinweise zur GIRL behalten ihre Gültigkeit und werden nicht obsolet.</p> <p>- durch Änderungen an GIRL würden Hemmnisse aufgebaut bzw. unter Um-</p> | <p>V</p> <p>E</p> <p>K</p> <p>V</p> <p>K</p> <p>K</p> <p>K</p> <p>K</p> <p>K</p> |

2

|  |  |
|--|--|
| <p>ständen Angriffspunkte geschaffen, um die GIRL nicht in die TA Luft aufzunehmen.</p> <p>- „Eine Verkleinerung der Beurteilungsflächen <u>soll</u> gewählt werden..“ ist weich genug formuliert.</p>   | K  |
| <p>Mit Verlesung der Aufgaben, Kommentare und offenen Punkten aus dem 1. Workshop gemäß Protokoll formaler Abschluss des 1. Workshops → allgemeine Zustimmung.</p>   | E  |
| <p><b>TOP 3 Fortschrittsberichte:</b></p> <p>- <b>Abgasfahnenüberhöhung (Folien: Fortschrittsbericht Abgasfahnenüberhöhung)</b></p> <p>- Vorgabe einer Schornsteinhöhe im Größenbereich von z0 sollte verhindert werden → AG der VDI-Richtlinie (VDI 3782 Blatt 3) sollte dies aufnehmen.</p> <p>Die Entscheidung, ob mit Überhöhung gerechnet wird, erfolgt nach der Überhöhungsrichtlinie künftig stundenfein, unter Berücksichtigung des Verhältnisses zwischen Austrittsgeschwindigkeit und Windgeschwindigkeit und unter Berücksichtigung der Froude-Zahl.</p> <p>Aufforderung an AG für Überhöhungsrichtlinie (VDI 3782 Blatt 3), die Richtlinie möglichst schnell fertig zu stellen, da die Überhöhung in Schornsteinhöhenbestimmung eingeht, die Zeit drängt.</p> <p>- Arbeiten an Richtlinie werden ehrenamtlich durchgeführt, Zeitplan: Informationsaustausch im Dezember 2015, dann Treffen im Februar 2016, Gründruck im September 2016 geplant.</p> <p>- Angebot von Hr. Janicke, die Richtlinienarbeit zu unterstützen, um schnelleres Vorankommen zu ermöglichen.</p> <p>Diskussion über die Verankerung der Richtlinie in Referentenentwurf für TA Luft, wenn noch kein Gründruck bis dahin vorhanden sein sollte.<br/>→ Tag 2 – Top 1</p> <p>- <b>Ersatzquaderhöhe (Folien: Äquivalente Quaderhöhe bei numerischer Modellierung)</b></p> <p>Ein firsthoher Ersatzquader gibt die Abmessungen der Rezirkulationszone (nahe Nachlauf) eines Gebäudes mit Satteldach gut wieder. Die Höhe der Rezirkulationszone wird selbst mit einem firsthohen Ersatzquader in einigen Fällen nicht ganz erreicht. Die Länge des Nachlaufes wird mit einem firsthohen Ersatzquader in Einzelfällen überschätzt. Als Kompromiss ist ein firsthoher Ersatzquader zu wählen.</p> <p>Quellen im Bereich unterhalb des Firsts bei Anwendung des firsthohen Ersatzquaders?<br/>→ wird noch untersucht.</p> <p>Bildet ein diagnostisches Modell die Windkanalergebnisse ab?<br/>→ Es wird angenommen, dass die evaluierten Modelle die Windkanalergebnisse zum Windfeld hinreichend genau wiedergeben.</p> <p>→ Es wird beschlossen, bei der Modellierung von Gebäuden den firsthohen Ersatzquader in die TA Luft aufzunehmen.</p> | <p>V<br/>an AG</p> <p>K</p> <p>K</p> <p>K</p> <p>V</p> <p>K</p> <p>A</p> <p>K</p> <p>E</p> |
| <p><b>TOP 4 Querverbindungen innerhalb und außerhalb der TA Luft: Anhang 7 – GIRL; Anhang 8 – FFH, Anhang 9 – Deposition; Richtlinien (Folien: Querverbindungen in und außerhalb der TA Luft)</b></p> <p>- <b>Anhang 7 – GIRL</b></p>  |  |

|  |   |
|--|---|
| Hinweise auf den Unterschied bei der Bestimmung der Schornsteinhöhe nach Abschnitt 5.5 und nach GIRL.  | K |
| Vorstellung der Historie der GIRL. Die aktuelle GIRL wurde über den LAI zwischen den Bundesländern harmonisiert. Weiterer Einsatz der GIRL so wie bisher, nur jetzt in Form einer Verwaltungsvorschrift, was zu einer Erhöhung der Rechtssicherheit und zu bundeseinheitlichem Vollzug führt.        | K |
| Es sollen möglichst wenige Änderungen gemacht werden, um keine Angriffspunkte zu schaffen. Änderungen sollen bisherige Praxis nicht in Frage stellen (Anlagen, die bisher keine Geruchsimmissionsprognose liefern mussten, sollten dies auch zukünftig nicht müssen).                                | K |
| - VDI-Arbeitsgruppe (geplante Richtlinie VDI 3886 Blatt 1) soll klären, wann die GIRL im Rahmen der TA Luft anzuwenden ist.  | K |
| - Auch die Bagatell-Geruchsstoffstromkurve in Anhang 7 dient dem Ausschluss von Emittenten mit irrelevanten Immissionsbeitrag (Häufigkeit von Geruchsstunden unter 2 %)  | K |
| - Testrechnungen mit überarbeiteter Richtlinie VDI 3783/8 E zeigen: Bei bodennahen Quellen stellt die Bagatell-Geruchsstromkurve nicht sicher, dass Immissionsbeiträge unterhalb von 2 % Geruchsstundenhäufigkeit liegen.  | K |
| → Kurve des Bagatell-Geruchsstoffstroms sollte mit VDI 3783/8 E nachgerechnet werden.  | A |
| - Befürchtung wird geäußert, dass, wenn GIRL zur Verwaltungsvorschrift erhoben wird, der Eindruck entstehe, dass alle Bereiche der GIRL gut abgesichert seien und keine Unsicherheiten, Unklarheiten bzw. Verbesserungsbedarf mehr bestehen.   | K |
| - Kritikpunkte an der GIRL sind u. a. die Ausbreitung von Geruch als inerter Stoff, die Verwendung eines mittleren z0 für gesamtes Rechengebiet, die unterschiedlichen Immissionsbestimmungen bei Begehungen im Vergleich zu Labormessungen und die Vernachlässigung möglicher Deposition.           | K |
| → Wenn Hinweise und belastbare Daten zur Deposition oder Umwandlung von Geruchsstoffen vorliegen, kann dies im Modell berücksichtigt werden, bis jetzt liegen sie nicht vor. Mittleres z0 ist gerade bei vielen Quellen angemessen, im Zweifel unterschiedliche Rechnungen mit unterschiedlichem z0. | V |
| - Es wird das Problem gesehen, dass Verbesserungen und Konkretisierungen nicht in die GIRL eingebracht werden können, wenn diese in die TA Luft aufgenommen wird.  | K |
| → Auslegungshinweise zur TA Luft bleiben bestehen und können um Verbesserungen und Konkretisierungen ergänzt werden, Stand der Erkenntnisse kann weiterhin über Richtlinien der KRdL und Beschlüsse des LAI angepasst werden.  | V |
| - In aktueller GIRL wird in Tabelle 2 vorgegeben, die Vorbelastung über Messungen zu bestimmen, in der Praxis wird diese aber meist über Literaturwerte bestimmt, dies sollte angepasst werden.  | V |
| → Verbesserungsvorschläge für Anhang 7 können bei der Anhörung der beteiligten Kreise (§ 51 BImSchG) eingebracht werden. Der KRdL steht es offen, dies zu tun.   | K |
| Allgemein wird bemerkt, dass in den letzten Jahren wenig zur Verbesserung der GIRL getan wurde.  | K |
| → Aufnahme der GIRL in die TA Luft kann als Anlass genommen werden, die Bemühungen hierzu wieder zu verstärken.  | V |
| - <b>Anhang 8 – FFH, Anhang 9 – Deposition</b>   |   |
| - Müssen die Grenzwerte für Stickstoffeintrag angepasst werden, da künftig mit nasser Deposition gerechnet wird?   | K |
| → die Grenzwerte sind nicht darauf ausgelegt, dass nur die trockene Deposition betrachtet wird.  | K |
| - Es gibt keine Messdaten zur Validierung der berechneten anlagenbezogenen   | K |



|   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| <p>Zusatzbelastung, dies stellt einen Bruch mit dem bisherigen Prinzip der TA Luft dar.</p> <p>→ Bei Werten zu Bioaerosolen und Stoffwerten der Anhänge 8 und 9 handelt es sich nicht um Grenzwerte. Ziel ist es, eine Erleichterung für das Genehmigungsverfahren zu schaffen, um im Vorfeld solche Anlagen auszusortieren, die sicher nicht das Potential haben, die Belange des Naturschutzes zu tangieren (eine Art gebietsbezogene Irrelevanzgrenze). Es handelt sich um konservative Abschätzungen zur Vermeidung verwaltungsrechtlicher Probleme. Änderungswünsche am Leitfaden sollten beim LANA eingebracht werden, da sie zu komplex für die TA Luft sind.</p> <p>- <b>Richtlinien</b></p> <p>- Mindestanforderung von 7 m/s Austrittsgeschwindigkeit wird nicht in die RL VDI 3782 Blatt 3 einbezogen (vgl. TOP 3).</p> <p>→ in TA Luft kann schlecht auf VDI 4251 Blatt 3 verwiesen werden, da in VDI 4251 Blatt 3 auf die TA Luft verwiesen wird.</p> <p>- Wie belastbar sind die Orientierungswerte bei Bioaerosolen?</p> <p>→ Untersuchung dient nur zum Ausschluss von Anlagen, die vertieft zu untersuchen sind.</p> | <p>K</p> <p>K</p> <p>K</p> <p>K</p> |
| <p><b>TOP 5 Diskussion: Anmerkungen aus FB II/KRdL (Folien: Anmerkungen und Anregungen aus dem Fachbeirat FB II/KRdL)</b></p> <p>Fol. 2: Wie verfahren, wenn der Ort, an dem das Maximum der Konzentration auftritt, sich auf dem Werksgelände befindet → Da es sich um Vorsorge handelt, wird die genaue Lage des Maximums nicht betrachtet.</p> <p>→ Mehrheitliche Zustimmung.</p>  | <p>K</p> <p>E</p>                   |

Dienstag 17.11.2015

K=Kommentar, A=Arbeitsauftrag, E=Entscheidung, V=Vorschlag

| Inhalt  | Typ      |
|---|----------|
| <p><b>TOP 1: Sachstandsbericht TA Luft</b></p>  |          |
| <p>Die TA Luft hat sich als normenkonkretisierende Verwaltungsvorschrift bewährt, wird auch als Erkenntnisquelle für nicht genehmigungsbedürftige Anlagen herangezogen und schafft Rechts- und Planungssicherheit.</p>  | <p>K</p> |
| <p>„Proaktive Anpassung“ 2002, bisher wenig weiterer Anpassungsbedarf. Seit 2014 intensive Überprüfung der neuen Anforderungen, so dass bei der jetzigen Anpassung eine Berücksichtigung des neuen Standes der Technik und europarechtlicher Belange erfolgt. Mitte 2015 Arbeitsentwürfe mit neuem Stand der Technik. Neufassung der TA Luft als Verwaltungsvorschrift unter Beibehaltung der jetzigen Struktur. Frühzeitige Miteinbeziehung der Länder und Verbände.</p> | <p>K</p> |
| <p>Weiterer Zeitplan:<br/>Gespräche bis 1. Quartal 2016, danach Referentenentwurf zur Abstimmung mit den zuständigen Ressorts, Anhörung Mitte 2016, danach Ressortabstimmung für das Kabinett, Kabinettsbeschluss und Bundesratsbeschluss, ggf. Maßgabenbeschlüsse und Rückverweisung. Ziel: Veröffentlichung der neuen TA Luft Mitte 2017.</p>   | <p>K</p> |
| <p>Wie soll mit der benötigten Überhöhungsrichtlinie umgegangen werden, wenn der Gründruck für Herbst 2016 erwartet wird?</p>   | <p>K</p> |
| <p>Der Passus „bis zur Veröffentlichung einer geeigneten Richtlinie..“ ist aus rechtlichen Gründen nicht möglich, rechtlich anfechtbar ist eine Aktualisierung der bis-</p>   | <p>V</p> |

5

|  |  |
|--|--|
| <p>herigen Version über den LAI.<br/>         → Es bleiben 3 rechtssichere Möglichkeiten:<br/>         - Einbringen vor Ressortabstimmung.<br/>         - Einführung einer neuen Liste von VDI-Richtlinien über eine Verwaltungsvorschrift.<br/>         - Einbringen über Änderungsantrag eines Bundeslandes nach der Kabinettabstimmung.<br/>         Daneben wird diskutiert, die Richtlinie zurückzuziehen und bis zu einer Neuerscheinung die Überhöhung auf andere Weise in der TA Luft zu regeln (z.B. Verweis auf einen Projektbericht).</p> <p><b>TOP 2: Fortschrittsbericht Nomogramm (Folien: Fortschrittsbericht Nomogramm)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Neues Verfahren liefert tendenziell niedrigere Schornsteinbauhöhen, weitere Vergleiche mit dem alten Nomogramm sind vorgesehen.</li> <li>- Welche Hintergrundmeteorologie wurde für die Überhöhungsberechnung angesetzt?</li> <li>- Windgeschwindigkeit gilt für 10 m über Verdrängungshöhe.</li> </ul> <p>→ Hinweis: Umgebungstemperatur 10°C und rel. Feuchte 70 %, sollte in AG VDI 3782 Blatt 3 nochmals besprochen werden.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Die meteorologischen Randbedingungen müssen im Text der TA Luft eindeutig definiert werden.</li> </ul> <p>Bisherige S-Werte ohne zugrunde liegende Einheiten angegeben, neu: mit Einheiten</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- S-Werte sollten so angepasst werden, dass Schornsteinhöhen etwa bleiben wie bisher</li> <li>- Nachjustierte S-Werte werden nicht in jedem Fall zu denselben Schornsteinhöhen führen wie bisher.</li> </ul> <p>→ richtige Feststellung, kann höchstens im Mittel gelten</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Werden S-Werte abgeleitet, mit denen auch die Immissionswerte für die Deposition von Metallen und Dioxinen eingehalten werden?</li> </ul> <p>→ Problem noch nicht gelöst, Arbeiten zu S-Werten beginnen erst.</p> <p>-&gt; Außenfeuchte und z0 sollten für die Schornsteinhöhenbestimmung nicht variabel sein, sondern standortunabhängig festgelegt werden.</p> <p>→ Von den Teilnehmern wird das neue Verfahren zu Bestimmung der Schornsteinhöhe als geeignet und sinnvoll anerkannt.</p> | <p>K<br/>K<br/>K<br/>an AG<br/>V<br/>K<br/>V<br/>K<br/>K<br/>V<br/>E</p> |
| <p><b>TOP 3: Diskussion (Folien: Diskussionspunkte zu Abschnitt 5.5 und Anhang 2)</b></p> <p><b>Diskussionspunkte zu Nr. 5.5: Zusammenfassung von Schornsteinen, Berücksichtigung von bestehenden Schornsteinen, Gelände und Bebauung</b></p> <p>Maßgeblicher Umkreis mit Radius der 15fachen Schornsteinhöhe</p> <p>Fol. 4: Müsste es nicht <u>mind.</u> 5 % heißen?</p> <p>→ Nein, wenn Mittelwert über größeren Bereich als 5 % gewählt wird, kann das durch kleinere Gebäude im äußeren Rand zu einer niedrigeren mittleren Bebauungshöhe führen.</p> <p>Behandlung hoher Einzelgebäude – und deren Nachlaufzonen?</p> <p>→ Konzentrationen an hohen Einzelgebäuden gehören nicht zur Vorsorge, sondern zur Einzelfallbetrachtung bei Prüfung des Schutzes (Konzentrationsbe-</p>  | <p>V<br/>K<br/>K<br/>K</p>   |



|   |                  |
|---|------------------|
| <p>rechnung), daher hier nicht behandelt. Einfluss vorgelagerter hoher Einzelgebäude auf freie Abströmung in Neufassung von VDI 3781 Blatt 4 behandelt.</p> <p>→ Harte Formulierung für nahen Nachlauf in VDI 3781 Blatt 4, Betrachtung des fernen Nachlaufes weiterhin über weiche Formulierung im Merkblatt Schornsteinhöhenbestimmung möglich, nicht direkt über die TA Luft bzw. VDI 3781 Blatt 4. Ferner Nachlauf kam aufgrund der Größe der kleinen Feuerungsanlagen nicht in die VDI 3781 Blatt 4 hinein.</p> <p>- Es wird Bedarf zur Überarbeitung des Schornsteinhöhenmerkblatts angemeldet.</p> | K                |
| <p>Fol. 4: „eine mittlere Höhe“ anstelle von „die mittlere Höhe“, da unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung einer mittleren Höhe existieren.</p>   | V                |
| <p>Fol. 5: Begriff „Horizont“ sollte vermieden werden, da nicht eindeutig.</p>  | V                |
| <p>Die Mehrheit ist dafür, auf VDI 3781 Blatt 2 (1981) zu verzichten und lediglich nur die Mindestanforderung nach einer Mündung des Schornsteines außerhalb der Kavitätszonen aufgrund des Geländes in die TA Luft zu übernehmen.</p>  | E                |
| <p>Fol. 6: Die Formulierung „ist die Schornsteinhöhe so weit zu erhöhen“ ist durch „soll so weit erhöht werden“ zu ersetzen.</p>  | V                |
| <p>Fol. 7: Mit dem neuen Vorgehen ist das Zusammenfassen von Schornsteinen nicht mehr nötig. Unklar ist noch, wie mit sehr nahe beieinander liegenden Schornsteinen zu verfahren ist, deren Fahnen sich bzgl. des Impulses überlagern</p> <p>→ Muss noch näher betrachtet werden.</p>   | K<br>A           |
| <p>Unklar ist, ob und wie bestehende Schornsteine bei der Schornsteinhöhenbestimmung für einen neuen Schornstein mit berücksichtigt werden müssen und wenn ja, bis in welche Entfernung zum geplanten Schornstein.</p> <p>- Bisherige Praxis: Bestehende Schornsteine innerhalb eines Abstands der 1,4-fachen Schornsteinhöhe werden in Form einer rechnerischen Zusammenfassung berücksichtigt, die ermittelte Höhe wird jedoch nur auf den neuen Schornstein angewendet.</p> <p>→ Abschneidekriterium hinsichtlich der Entfernung, wie z. B. 1.4-fache Schornsteinhöhe, notwendig.</p>                  | K<br>A           |
| <p><b>- zu Nr. 2: Aufnahme von Definitionen</b></p>   |                  |
| <p>Fol. 8: Explizite Formel für die Austrittsgeschwindigkeit aufnehmen, stets angeben, welche(r) Form/Zustand einer Größe gemeint ist, möglichst Normgrößen, Feuchtegehalt mit Normbezug (Gl.4).</p>  | V                |
| <p>→ Die Aufnahme der Definitionen wird begrüßt, über die Platzierung innerhalb der TA Luft (Abschnitt 2 oder Abschnitt 5.5) muss noch entschieden werden.</p>  | E<br>K           |
| <p><b>TOP 4 Diskussion: Textvorschläge TA Luft 5.5, Anhang 2 (Folien: Texte und Kommentare zu Kapitel 5.5 und Anhang 2)</b></p>   |                  |
| <p><b>- Textvorschläge TA Luft 5.5</b></p>  |                  |
| <p>Fol. 4: „10 m über <u>Grund</u>“ -&gt; Begriff „Grund“ wird akzeptiert.</p> <p>- c) „bei Wohngebäuden...“ ersetzen durch „und von Fenstern und Türen von Wohngebäuden in...“</p> <p>- Frage nach 7 m/s Mindestgeschwindigkeit: 7 m/s wurde aus VDI 2280 in VDI 3781 Blatt 4, übernommen.</p> <p>- Für Ausbreitungsrechnungen wird der Ansatz einer Überhöhung vermutlich über das Verhältnis Austrittsgeschwindigkeit / Anströmgeschwindigkeit &gt; 1.5 geregelt, evtl. zzgl. der Froude-Zahl.</p>   | E<br>E<br>K<br>V |

|  |             |
|--|-------------|
| Fol. 5: Wird die 20°-Regel aus der TA Luft entfernt und nur noch in der VDI 3781 Blatt 4, erwähnt?<br>→ Einige dagegen → 20°-Regel bleibt in TA Luft.  | K<br>E      |
| Fol. 6: Begründung für Vorschlag, Streichung rückgängig zu machen, findet keine Unterstützung  | K           |
| Fol. 8: Konkretisierung: „innerhalb weniger Stunden“<br>→ in weniger als 300 h?<br>- 300 h erscheinen als bei Sicherheitsbetrachtung zu viel, bei Ausfall einer Abluftreinigung werden 2 – 3 Tage toleriert. Geringe Massenströme werden in 5.5.3 definiert.<br>- Verweis auf VDI 3781 Blatt 4 kann an dieser Stelle entfallen, da ohne und mit Verweis gleiche Anforderungen gelten   | K<br>V<br>K |
| Fol. 10: Notwendigkeit eines Schornsteingutachtens kann nicht nachvollzogen werden. Forderung: Abschneidekriterium, bis zu dem andere Schornsteine zu berücksichtigen sind, wie z.B. die 1.4-fache Schornsteinhöhe, ist notwendig.   | K           |
| Fol. 12: Passus für das Zusammenfassen der Emissionsmassenströme bei neuen und geplanten Kaminen ist aufzunehmen, ob auch mit bestehenden Kaminen zusammengefasst werden soll, wird noch näher geprüft.  | A           |
| Fol. 13: Textvorschlag wird überarbeitet   | A           |
| Fol. 14-17: „einen vorgegebenen Wert (S-Wert) nicht überschreitet“<br>→ „ <b>den</b> vorgegebenen Wert (S-Wert) nicht überschreitet“<br>- „die in einer Ausbreitungsklassen-Statistik nach Anhang 2 auftretenden Situationen betrachtet“<br>→ Besser „die in einer <u>per Definition</u> in einer Ausbreitungsklassen-Statistik nach Anhang 2 auftretenden Einzelsituation betrachtet“?<br>→ Verweis auf das vom UBA zur Verfügung gestellte Rechenverfahren (Hilfsprogramm) vorziehen hinter den ersten Satz, Textvorschlag: „Hierzu kann ein Programm des UBA herangezogen werden. Dieses stellt sicher, dass dieser Wert mit einer Ausbreitungsrechnung nach ... ermittelt wird.“ | E<br>V<br>V |
| Fol. 18: Es werden auch S-Werte für Komponenten benötigt, die keinen Immissionswert haben, da ansonsten für diese keine Ableitung über einen Kamin erforderlich ist.   | K           |
| Fol. 19: Entsprechend dem Text der aktuellen TA Luft wieder aufnehmen<br>→ ...in nach § 44 Abs. 3 ... (5.5.3 letzter Absatz).<br>→ Grund für Streichung kritisch prüfen.   | V<br>A      |
| Fol. 22: Angabe von Q als Stunden- oder Tagesmittel?<br>Im Rechenverfahren werden quasi-stationäre Stundenmittel verwendet, der Zeitbezug von Q lt. Merkblatt ist in der Regel ein Tag.  | K           |
| Fol. 23: Genehmigung hat sich auf den Normzustand zu beziehen - die neue TA Luft setze verstärkt auf Betriebszustände statt auf Normzustand, was eine falsche Entwicklung sei.<br>- „sind <b>jeweils</b> die Werte einzusetzen“<br>→ Die Betrachtung der jeweils ungünstigsten Werte führt u. U. zu nicht realisierbaren Betriebsbedingungen - wenn keine Begründung für das „jeweils“ gefunden wird, dieses streichen und nur mögliche Parametersätze von t, v, r, l und  | K<br>V      |



|   |   |
|---|---|
| Q prüfen.   |   |
| Fol. 24: Umwandlung von Stickstoffmonoxid zu Stickstoffdioxid: Textzusatz wird aufgenommen in TA Luft.  | E |
| <b>- Anhang 2</b>   |   |
| Fol. 30: Berücksichtigung von Niederschlag:<br>→ Festlegung eines repräsentativen Niederschlags nur für den Aufpunkt, z.B. ein FFH Gebiet und den Anlagenstandort, nicht für ein Raster über das gesamte Rechengebiet oder ein Raster über das FFH-Gebiet.  | K |
| Hinweis auf Niederschlagsmessungen Dritter, die zu Einsprüchen führen können: Diese Daten können u.U. nur mit sehr hohem Rechercheaufwand ermittelt werden.   | K |
| → Konkretisierung angebracht, nach den Ausführungen von Herrn Hummel zur Bedeutung dieser Anhänge aber nicht innerhalb der TA Luft, sondern in ergänzenden Dokumenten (Leitfäden, VDI-Richtlinien).   | K |
| Fol. 31: Faktor-4-Modell für Geruch soll nicht angepasst werden, keine Abweichung von der Standardbeurteilungsschwelle, auch nicht bei z.B. Flächenquellen.   | V |
| Fol. 32: Wahl von LBM-DE (für Ausbreitungsmodell) und Anpassung der Rauigkeitsklassen in der Landwirtschaft und der Erweiterung des Radius von der 10-fachen auf die 15-fache Schornsteinhöhe wird zugestimmt.  | E |
| Windfeldmodelle nutzen andere Rauigkeiten<br>→ keine Festlegung von Rauigkeitslängen für Windfeldmodelle.   | V |
| - Bei Neueinteilung von Laubwald (Vorschlag Namyslo) bitte Email mit Begründung an Herrn Janicke.   | A |
| Fol. 33: Sollen Niederschlagsdaten repräsentativ sein für Anlagenstandort oder für Rechengebiet, z.B. FFH-Gebiet?   | K |
| - Unterschiedliche Meinungen:<br>→ für Rechengebiet wie FFH-Gebiet, da dort der Eintrag stattfindet.<br>→ für Anlagenstandort, da dort Schwerpunkt der nassen Deposition auch für z.B. Dioxine, Chrom etc., und Beurteilung der menschl. Gesundheit.  |   |
| - Niederschlag ist über längere Zeiträume zu betrachten als die Windverhältnisse. Hinsichtlich der repräsentativen Niederschlagsintensitäten soll es gebrauchsfertige Datensätze geben. Die Niederschlagsdaten sollen vom UBA zeitnah aktualisiert werden, um auch künftige repräsentative Jahre für die Windverhältnisse mit abzudecken. | K |
| Fol. 37 Formulierung zur Ersatzquaderhöhe: Zustimmung.  | E |
| Fol. 38: Vorschlag findet keine Zustimmung.   |   |
| Horizontale Auflösung von Geländedaten: Bei Bezug der Auflösung auf die Schornsteinhöhe, wie Erfassung der Geländeneigung, wenn kein Schornstein vorhanden ist?   | K |
| → Hr. Janicke überlegt sich etwas (nicht Maschenweite, da nur technischer Parameter).   | A |
| <b>TOP 5: Offene, noch nicht behandelte Punkte</b>  |   |
| - Abgrenzung der Anwendungsbereiche diagnostisches / prognostisches Windfeld.   | A |
| → Im Projekt konnte noch keine Lösung gefunden werden   | K |
| → Abgrenzung über Entfernung Quelle / Gebäude zu Beurteilungspunkt.   | V |



|  |  |
|--|--|
| <p>→ Anwendungsbereich des diagnostischen Windfelds für alle Quellkonfigurationen ermöglichen. Herr Hartmann liefert einen Textvorschlag.</p> <p>→ Widerspruch: nicht für alle Quellkonfigurationen sinnvoll, z. B. bei Punktquellen zwischen Gebäuden.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Verweis auf das Fehlen eines prognostischen Referenzmodells.</li><li>- Auswaschraten für Quecksilber in Tabelle 2 ergänzen.</li></ul> <p>- Weitere Stoffe der VDI 3782 Blatt 5 sind keine Stoffe der TA Luft und werden daher nicht aufgenommen.</p>   | <p>V/A</p> <p>K</p> <p>K</p> <p>V</p> <p>A</p> <p>K</p>        |
| <p><b>TOP 6: Festlegung der Arbeiten für den 3. Workshop</b></p> <p>Hinweis, dass der nächste Workshop im UBA in Dessau stattfindet.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Nachlieferung Textentwurf zu 5.5 bis Ende Nov.</li><li>- Vergleiche Schornsteinhöhe alt zu neu (Aufgabe an alle).</li><li>- Erstellung der Überhöhungsrichtlinie VDI 3782 Blatt 3 soll unterstützt werden.</li><li>- Untersuchungen dachnaher Quellpositionen auf dem Ersatzquader.</li><li>- Neuordnung von Rauigkeitslängen zu einzelnen CORINE-Klassen</li></ul> <p><b>Top 7: Verschiedenes</b></p> <p>→ Beim nächsten Workshop den Themenbereich Querverbindungen an den Schluss stellen.</p> <p>Abschluss des 2. Workshops mit Dank an die Vertreter des BMUB und UBA, die Teilnehmer und den Protokollanten</p> | <p>K</p> <p>A</p> <p>A</p> <p>A</p> <p>A</p> <p>A</p> <p>V</p> |



### 5.3.3 Dritter Workshop

#### Weiterentwicklung ausgewählter methodischer Grundlagen der Schornsteinhöhenbestimmung und der Ausbreitungsrechnung nach TA Luft (FKZ 3714 43 2040)

##### 3. Workshop im Umweltbundesamt in Dessau-Roßlau, 18.-19.01.2016

#### Protokoll

##### Teilnehmer:

| Name                        | Institut   | Kürzel |
|-----------------------------|--|--------|
| Bächlin, Wolfgang           | Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, Karlsruhe  | Bä     |
| Behnke, Anja                | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Berlin                 | Be     |
| Bigalke, Klaus              | METCON Umweltmeteorologische Beratung, Pinneberg   | Bi     |
| Buttermann, Ralf            | ThyssenKrupp Steel Europe AG, Direktionsbereich Umwelt- und Klimaschutz, Duisburg            | Bu     |
| Falb, Andreas               | Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg   | Fa     |
| Fleischer, Peter            | Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden                       | FI     |
| Hartmann, Uwe               | ANECO Inst. für Umweltschutz GmbH & Co., Mönchengladbach                                     | Har    |
| Hasel, Markus               | iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG, Gerlingen  | Has    |
| Hebbinghaus, Heike          | Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, Recklinghausen                        | Heb    |
| Heidler, Doreen             | Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau   | Heid   |
| Janicke, Ulf                | Ingenieurbüro Janicke, Überlingen  | Ja     |
| Kamp, Martin                | Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Münster   | Ka     |
| Kienz, Robert               | Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, Güstrow               | Ki     |
| Kunka, Rainer               | Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Jena  | Ku     |
| Langner, Marcel             | Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau   | La     |
| Lutz-Holzhauser, Christiane | Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Karlsruhe      | Lu     |
| Maßmeyer, Klaus             | Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Standort Höxter, Höxter                                       | Ma     |
| Metzschker, Andreas         | Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Halle/Saale                                       | Me     |
| Morrison, Daniel            | Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, Karlsruhe  | Mo     |
| Müller, Wolfgang J.         | Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, Laatzen                                      | Mü     |
| Namyslo, Joachim            | Deutscher Wetterdienst, Offenbach  | Na     |
| Nielinger, Jost             | iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG, Gerlingen  | Ni     |
| Pavelt, Tina                | Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden                                      | Pa     |
| Puhlmann, Gerhard           | TÜV Nord Umweltschutz GmbH & Co. KG, Hamburg   | Pu     |
| Remus, Rainer               | Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau   | Re     |
| Strotkötter, Uwe            | Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim, ZUS Luftreinhaltung und Gefahrstoffe, Hildesheim | St     |
| Theurer, Wolfgang           | Ingenieurbüro Theurer, Hanhofen  | Th     |
| Trukenmüller, Alfred        | Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau   | Tr     |
| von Richthofen, Carl-Georg  | Evonik Industries AG, Marl   | vR     |
| Wohlfahrt, Thomas           | Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg, Potsdam                  | Wo     |
| Zorn, André                 | Büro für Immissionsprognosen, Frankenhain  | Zo     |

18.01.2016 Beginn: 13.00 Uhr, Ende: 17.30 Uhr

19.01.2016 Beginn: 08.30 Uhr, Ende: 15.30 Uhr

Protokollführer: Daniel Morrison



Montag, 18.01.2016

K=Kommentar, A=Arbeitsauftrag, E=Entscheidung, V=Vorschlag

| Inhalt  | Typ |
|---|-----|
| <b>TOP1: Begrüßung</b>  |     |
| Begrüßung durch Herrn Langner, Umweltbundesamt:<br>Zusammenfassung des bisherigen Projektablaufes. Mitteilung, dass die verschiedenen Textbausteine der TA Luft noch in Bearbeitung sind und Treffen der BLAG ausstehen.  | K   |
| Vorstellung von Frau Behnke, BMUB, und Herr Remus, Umweltbundesamt:<br>Frau Behnke ist seit April 2015 als Referentin am BMUB zuständig für die TA Luft Anpassung. Herr Remus koordiniert seitens des UBA die Arbeiten zur TA Luft.<br>Beide arbeiten gruppenübergreifend am gesamten Textentwurf der TA Luft.<br>→ Verabschiedung des Referentenentwurfs der TA Luft soll im 2. Quartal 2016 stattfinden.                  | K   |
| Vorstellung von Frau Heidler, Umweltbundesamt:<br>Frau Heidler ist am UBA für die Holzindustrie zuständig und führt ein Forschungsprojekt mit Schnittpunkten zur TA Luft bzgl. Emission/ Immission der Holzindustrie durch.   | K   |
| Begrüßung durch Herrn Janicke   | K   |
| <b>TOP 2: Verabschiedung Protokoll und Aufgabenliste des 2. Workshops</b>   |     |
| <b>Aufgaben aus 2. Workshop:</b>  |     |
| Untersuchung dachnaher Quellposition unterhalb des Firstes in Bezug auf Ersatzquader<br>→ Wird noch untersucht, Ergebnisse sollen in das Merkblatt Schornsteinhöhenberechnung des LAI oder in VDI 3783 Blatt 13 aufgenommen werden.   | A   |
| Bestimmung von Abstandskurven bzw. Bagatellkurven<br>→ Die verschiedenen beteiligten Gruppen (Ammoniak, Geruch, Stickstoffeintrag) sollten versuchen, ein gemeinsames Vorgehen zu finden. Besprechung in einem Treffen am Rande des Workshops.  | K   |
| → Zusammenfassung von Schornsteinen bei Bedarf in LAI-Merkblatt regeln, die Zusammenfassung von Volumenströmen bei Bedarf in VDI 3782 Blatt 3 regeln  | K   |
| Nachforschung zum Wegfall von Textteil aus 5.5.3 „... Für S kann die zuständige oberste Landesbehörde in nach § 44 Abs. 3 BImSchG festgesetzten Untersuchungsgebieten und in den Fällen nach Nummer 4.8 kleinere Werte vorschreiben ...“ ergab, dass der genannte Absatz nicht mehr besteht. § 44 Absatz 2 liest sich ähnlich, meint aber etwas anderes.<br>→ Textteil entfällt, auch aufgrund der geringen Praxisrelevanz. | E   |
| Festlegung der Geländeauflösung<br>→ Kann in VDI 3783 Blatt 13 erfolgen.  | E   |
| Umgang mit bestehenden Schornsteinen: welche Höhe ist in der Ausbreitungsrechnung zu berücksichtigen, die tatsächlich gebaute Höhe oder die nach Nomogramm bzw. mit BESMIN bestimmte Höhe?<br>→ Noch keine Entscheidung aus BLAG vorliegend.<br>→ Bitte um Vorlage von Textentwürfen, die die unterschiedlichen Haltungen zu diesem Problem wiedergeben (Texte bitte an Ja senden).   | K/A |





|  |   |
|--|---|
| Im Protokoll des 2. Workshops unter TOP 4, Spiegelstrich 7 (Seite 4) folgendes anpassen:<br>„...in der aktuellen GIRL wird in Tabelle 2 vorgegeben, die Vorbelastung über Messungen zu bestimmen, in der Praxis wird diese aber meist über <i>Modellrechnungen auf Basis von Literaturwerten</i> bestimmt...“  | A   |
| <b>TOP 3: Textvorschläge TA Luft Nummer 5.5<br/>Vorstellung, Diskussion, Verabschiedung</b>  |   |
| Folie 10 → keine Anmerkungen   |   |
| Folie 11:<br>„muss“ ist in VDI 3781 Blatt 4 und 1. BImSchV enthalten. Die TA Luft kann damit nicht hinter diese Anforderungen zurückfallen.<br>Ist das „muss“ auch für Tierhaltungen anzuwenden?<br>Für Abgase ist das „muss“ ausschlaggebend, bei „harmloser“ Abluft ist keine Ableitung in den freien Luftstrom gefordert.<br>Es wird darauf hingewiesen, dass Tierhaltungsanlagen (BImSch-Anlagen) wie Anlagen der TA Luft zu behandeln sind und der Wunsch geäußert, dass das UBA eine Differenzierung für Abluft und Abgas durchführt und Regelungen für die Abluft definiert.<br>Im aktuellen Entwurf der TA Luft ist keine Unterscheidung zwischen Abluft und Abgas vorgesehen. In den Teilen, in denen besondere Regelungen für Tierhaltungsanlagen getroffen werden, wird auch von Abgas gesprochen. D.h. eine Unterscheidung von Abgas und Abluft müsste explizit geregelt werden, zumal der Begriff „Abluft“ im aktuellen Entwurf der TA Luft nicht mehr auftaucht. Aufgrund der Inhaltsstoffe des Abgases (Ammoniak, Staub etc.) wird durchaus die Notwendigkeit gesehen, das Abgas der Tierhaltungsanlagen zu fassen, um es ggf. Abgasreinigungsanlagen zuzuführen.<br>Die Unterscheidung zwischen Abgas und Abluft ist bei Definition über Massenkonzentration nicht zielführend, da Abluft mit großem Volumenstrom ggf. größeren Emissionsmassenstrom transportiert als Abgas mit geringem Volumenstrom<br>Vorschlag: Verweis auf VDI 3781 Blatt 4 hervorzuheben mit → „danach muss der Schornstein..a)..b)..c).“<br>Es wird eine klare Abgrenzung gewünscht, welche Anlagen der Landwirtschaft von der Regelung betroffen sind.<br>Das Thema Schornsteinhöhe bei Tierhaltungsanlagen ist noch nicht abschließend diskutiert. Allerdings soll der Schutzanspruch unabhängig von der Anlagenart sein, um ein einheitliches Schutzniveau zu gewährleisten.<br>Hinweis, dass die TA Luft auch für kleine Anlagen als Erkenntnisquelle herangezogen wird.<br>Seitens des BMUB ist man sich des erweiterten Wirkkreises bewusst.<br>Formulierungsvorschlag als Öffnungsklausel: „... für nicht nach dem BImSchG genehmigungspflichtige Anlagen können andere Regelungen getroffen werden...“ | K<br>K<br>K<br>K<br>K<br>K<br>V<br>V<br>K<br>K<br>V |
| Hr. Bächlin hält einen Vortrag zu der Anwendung der 20-Grad-Regel bei großen Hallen und einem alternativen Abschneidekriterium bei der Bestimmung der maximalen Schornsteinhöhe<br>- Dem vorgestellten Abschneidekriterium wird zugestimmt.<br>- Das vorgestellte Abschneidekriterium soll in VDI 3781 Blatt 4 integriert und in das Merkblatt Schornsteinhöhenbestimmung des LAI (LAI-Merkblatt) aufgenommen werden.  | E<br>E  |

|   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Auch über die Position des Kamins (in Dachmitte) könnte eine Ausnahme für eine niedrigere Höhe entwickelt werden.</li> <li>- Das überarbeitete LAI-Merkblatt sollte zeitnah mit der Neufassung der TA Luft erscheinen. Dies wird in der nächsten Sitzung des LAI im März 2016 diskutiert.</li> </ul>   | <p>V</p> <p>K</p>   |
| <p>Die Formulierung unter Punkt c) ..."einem Umkreis von 50 m..." betrifft durch Aufnahme in die TA Luft auch Anlagen, die bisher nicht von der VDI 2280 abgedeckt wurden. Bei der Betrachtung fehlt der stetige Übergang zwischen Anlagen verschiedener Leistung. Eine Skalierung des Umkreises über z.B. die Leistung (pro KW) wie in der 1. BImSchV würde das Problem lösen.</p> <p>Bei der Forderung des „Umkreises von 50 m“ handelt es sich um eine einfache Forderung, die nicht dezidiert begründet ist. Eine Vergrößerung des Umkreises würde diesem vereinfachten Ansatz nicht gerecht. Da die Bagatellmassenströme entfallen sollen, ist der Schutz in jedem Einzelfall zu prüfen.</p>   | <p>K</p> <p>K</p>   |
| <p><u>Folie 12:</u></p> <p>Hr. Janicke erklärt am Flipchart das Vorgehen bei der Schornsteinhöhenbestimmung zur Berücksichtigung der Emissionen bestehender Kamine (s. Anhang des 4. Zwischenberichtes 2015). Vorgeschlagen wird, diese jeweils mit ihrem halben Emissionsmassenstrom zu berücksichtigen. Die maximalen bodennahen Konzentrationen ergeben in dem betrachteten einfachen Beispiel eine geometrische Reihe, die gegen das 2fache des S-Wertes konvergiert.</p> <p>→ Dem Vorschlag wird zugestimmt</p> <p>Die Formulierung „aller betrachteten Schornsteine“ in Nr. 5.5.2 Abs. 5 ist nicht eindeutig.</p> <p>→ Die Reihenfolge der Absätze 5 („Die Nummern 5.5.3 ...“) und 6 („Bei mehreren Schornsteinen ...“) muss vertauscht werden.</p> <p>Diskutiert wird, wie mit bestehenden Schornsteinen von Nachbarbetrieben umzugehen ist, wenn als Abgrenzung des zu betrachtenden Bereiches das 1.4-fache der Schornsteinhöhe entfällt. In der Praxis ist es oft schwierig Emissionsdaten für Schornsteine von Nachbarbetrieben zu bekommen.</p> <p>→ In der bisherigen Praxis werden meist nur die Schornsteine der Anlage des betreffenden Betreibers und nur in Ausnahmefällen die der Nachbarbetriebe betrachtet.</p> <p>Da es sich um Vorsorge handelt, sollte die Betrachtung auf die Schornsteine der betreffenden Anlage begrenzt werden.</p> <p>Allgemeine Zustimmung.</p> <p>Der Vorschlag „Bei mehreren Schornsteinen der Anlage...“ wird aufgenommen und in der BLAG diskutiert.</p> | <p>V</p> <p>E</p> <p>K</p> <p>A</p> <p>K</p> <p>K</p> <p>V</p> <p>A</p> |
| <p><u>Folie 13</u></p> <p>Bei Naturzugkaminen, die aus anderen Gründen als der Abgasverdünnung höher gebaut werden müssen, führt die vorgeschlagene Bestimmung „... ist die maßgebliche Bauhöhe...“ zu Problemen.</p> <p>Der eingeräumte Spielraum („...kann um max. 10 Prozent überschritten werden...“) ergibt Probleme im juristischen Verfahren. Die Schornsteinhöhenbestimmung sollte eine eindeutige Bauhöhe liefern.</p> <p>Die Toleranzangabe von 10 Prozent sollte u.a., der früheren Ablesegenauigkeit bei dem Nomogramm und einem „dicken Bleistift“ Rechnung tragen.</p> <p>Mit „...maßgebliche Bauhöhe...“ führt man einen neuen Begriff ein, ohne diesen zu definieren. Nachgefragt wird, ob diese Bauhöhe dann maßgeblich für Ausbreitungsrechnung ist. Ziel sollte die Festlegung der Schornsteinbauhöhe sein.</p>  | <p>K</p> <p>K</p> <p>K</p> <p>K</p>                                     |

|   |   |
|---|---|
| Die Problematik ist erkannt und wird nochmals in der BLAG diskutiert. Grundsätzlich soll kein Vorteil durch höhere Schornsteine entstehen.  | A |
| „5.5.2 Ableitung über Schornsteine“ ist die übergeordnete Nummer für „5.5.3 Bestimmung der Schornsteinhöhe“ und „5.5.4 Berücksichtigung von Bebauung...“. Es wird geprüft, ob die Nummerierung angepasst werden kann (5.5.3 → 5.5.2.1 und 5.5.4 → 5.5.2.2)  | A |
| Die Diskussionspunkte zu den Formulierungen in der Folie 13 werden in der BLAG durchgesprochen.   | A |
| Frage nach der Berücksichtigung bestehender Schornsteine bei Änderungsgenehmigungen: Sind diese mit der gebauten Höhe oder mit der nach BESMIN berechneten Bauhöhe bei der Ausbreitungsrechnung zu berücksichtigen? Wie ist Abgrenzung zu „maßgebliche Bauhöhe“?  |   |
| Hinweis auf Genehmigungshemmnisse, die in der Realität nicht bestehen, wenn in der Ausbreitungsrechnung nicht die tatsächlich vorhandene Schornsteinhöhe von bestehenden Kaminen, sondern die rechnerische Höhe angesetzt werden würde.   | K |
| Politik der hohen Schornsteine soll vermieden werden.   | K |
| → Hinweis auf eventuell notwendigen Rückbau bestehender Schornsteine  |   |
| Bitte an UBA bzw. BLAG um Klarstellung, wie mit bestehenden Schornsteinen zu verfahren ist. Wenn „maßgeblich“ im Text enthalten bleibt, muss klar gestellt sein, dass sich dies nicht auf bestehende Schornsteine bezieht, die sonst rückgebaut werden müssten.   | K |
| <u>Folie 14</u> → keine Anmerkungen   |   |
| <u>Folie 15/16</u>  |   |
| In BLAG prüfen, ob die Möglichkeit, in der Sonderfallprüfung nach TA Luft Abschnitt 4.8 kleinere S-Werte zu verwenden, gestrichen werden kann, da keine Relevanz in der Praxis vorliegt. Dem „besondere Schutz“ wird heutzutage auf andere Weise Rechnung getragen (z.B. Umweltzone).                                       | A |
| Für die Ausbreitungsrechnung sollten Norm- statt Betriebsbedingungen verwendet werden, um eine Vereinheitlichung mit dem Genehmigungsantrag zu erreichen.   | K |
| → Die Ausbreitungsrechnung muss mit realen Bedingungen durchgeführt werden.   | K |
| Bei Bezugs-/Betriebssauerstoff sollte klar definiert sein, mit welcher Größe zu rechnen ist.  | K |
| Die Festlegung der ungünstigen Betriebsbedingungen sollte durch den Gutachter erfolgen, was auch bisher leistbar war.   | K |
| <u>Folie 17</u>   |   |
| Wird entsprechend dem Vorgehen im LAI-Merkblatt sowohl NO als auch NO <sub>2</sub> als Prozentsatz von NO <sub>x</sub> angegeben (z.B. 90%/10%), kann die vorgeschlagene Formulierung zur Fehlinterpretation führen, da dann keine Molmassenkorrektur erforderlich ist.<br>Herr Janicke macht einen Formulierungsvorschlag. | A |
| <u>Folie 18</u> → keine Anmerkungen   |   |
| <u>Folie 19</u>   |   |
| Begriff „Bereich“ ist nicht definiert (Kreis, Quadrat, beliebige Form etc.).  | K |
| Der Flächenanteil von 5 % kommt aus der Überlegung eines 20°-Sektors (5% von 360° ergeben ca. 20° Sektor). Betrachtung als Kreisausschnitt ist nicht sinnvoll, da die quellnahen Gebäude dabei unterrepräsentiert sind.   | K |



|   |   |
|---|---|
| Die bisherige Formulierung entspricht einer Abschätzung und erweckt nicht den Anschein einer genauen Betrachtung. Könnte eine mittlere Bebauungshöhe im Bereich 5 - 25 m als fester Wert vorgegeben werden? | K |
| Kann die mittlere Bebauungshöhe an die Rauheitslänge $z_0$ gekoppelt werden bzw. aus dieser abgeleitet werden?  | K |
| → Auflösung des Rauigkeitskatalogs zu gering.   | K |
| → Grundsätzlich werden ein neues Vorgehen und die damit einhergehende Konkretisierung begrüßt, eine Obergrenze für die Korrektur wäre wünschenswert.  | K |
| → 2. Absatz Folie 19 wird umformuliert, Bezug Flächendefinition sollte deutlicher und anschaulicher beschrieben werden.   | A |

**Dienstag 19.01.2016** K = Kommentar, A = Arbeitsauftrag, E = Entscheidung, V = Vorschlag

| Inhalt   | Typ                                     |
|--|---|
| <b>Fortsetzung TOP 1 vom 18.01.2016</b>  |   |
| <u>Folie 20</u><br>In dem Textentwurf ist der Verweis auf VDI 3781 Blatt 2 nicht mehr enthalten. Lediglich die Forderung, nicht in der Kavitätszone freizusetzen, ist übernommen worden.<br>Die 15°-Forderung könnte in engen Tälern zu unverhältnismäßig hohen Schornsteinen z. B. bei BHKWs führen, mit größeren Problemen bei der Genehmigung.<br>Ein erster Test ergab nur wenige Stellen, an denen es kritisch werden könnte.<br>Fragen nach weiteren Tests und der Auflösung der Höhenmodelle.<br>→ Durchführung einer systematischen Auswertung, in welchen Bereichen Forderung zu Problemen führen kann.<br>Unter 5.5 „Vorbehaltlich besserer Erkenntnisse“ eröffnet auch der aktuelle Textentwurf die Möglichkeit einer Einzelfallbetrachtung durch die Behörde.<br>...“bis dieser kleiner als 15° ist“ in „bis dieser kleiner oder gleich 15° ist“ ändern. | K<br><br>K<br><br>K<br>K<br>A<br>K<br>A |
| <u>Folie 21</u> → keine Anmerkungen  |   |
| <b>TOP 1 (19.01.2016) Textvorschläge TA Luft Anhang 2</b>  |   |
| <u>Folie 23</u><br>Die Formulierung „unter Verwendung der Parameter Depositionsgeschwindigkeit und Auswaschrage gemäß ...“ kann zu Missverständnissen führen, da in VDI 3782 Blatt 5 z. B. für Ammoniak abweichende Depositionsgeschwindigkeiten angegeben sind.<br>→ Die Formulierung verweist nur auf die Parameter der VDI 3782 Blatt 5 als solche, nicht auf die dortigen Parameterwerte.<br>→ Die Formulierung wird angepasst auf „...beschriebenen Verfahren unter Verwendung der in Tabelle 1, 2 und 3 aufgeführten Parameterwerte...“  | K<br><br>K<br>A                         |
| <u>Folie 24</u><br>Für Geruch gibt es keine „Zeitreihe der gemessenen Vorbelastung“.<br>→ Formulierung anpassen auf „...die Zusatzbelastung und dienen für Gase und Stäube, zusammen mit der Zeitreihe...“<br>Bei Bioaerosolen wird die Emission nicht als Emissionsmassenstrom angegeben, sondern als Anzahl (KBE) pro Zeit.  | K<br>A<br>K                             |

|   |   |
|---|---|
| → Hinweis muss im Anhang für Bioaerosole geklärt werden.<br>Diskussion über bestimmungsgemäßen Betrieb und ungünstigste Betriebsbedingungen bei Geruch.   | K |
| Bei Geruch war es bisher Konvention, den Durchschnittswert zu verwenden.  | K |
| → in VDI 3894 Blatt 1 sind keine Durchschnittswerte, sondern Konventionswerte enthalten.  | K |
| Der bestimmungsgemäße Betrieb soll abgebildet werden.   |   |
| In der Praxis hat sich die Formulierung meist als problemlos erwiesen.  | K |
| Ungünstigster bestimmungsgemäßer Betrieb ist meist nur ein Betriebszustand.   | K |
| <u>Folie 25</u><br>Definition für Auswaschrates und Depositionsgeschwindigkeit explizit einfügen, falls der Hinweis auf VDI 3782 Blatt 5 unter „Allgemeines“ entfallen sollte.  | A |
| <u>Folie 26</u> → keine Anmerkungen   |   |
| <u>Folie 27</u><br>Da zwei Richtlinien genannt werden, besteht die Gefahr, dass bei Einsprüchen immer nach dem Verfahren gefragt wird, das gerade nicht angewendet wurde. Daher wird eine Klarstellung benötigt, dass VDI 3783 Blatt 19 durch einen Erlass eingeführt wird und ab diesem Zeitpunkt zu verwenden ist.  | K |
| → Über Kommentar klarstellen, dass eine offizielle Einführung durch einen LAI-Beschluss und einen Erlass der obersten Landesbehörde stattzufinden hat.  | A |
| <u>Folie 28/29</u> → keine Anmerkungen  |   |
| <u>Folie 30</u><br>Bei diffusen Quellen und nicht bekannter Korngrößenverteilung ergibt sich mit der dargestellten Regelung kein Ergebnis für PM <sub>2,5</sub> .<br>→ Dies trifft nur auf unbekannte Korngrößenverteilungen zu, in den meisten Fällen kann eine entsprechende EU-einheitliche Korngrößenverteilung angenommen werden. <sup>1</sup>   | K |
|   | K |
| <u>Folie 31</u><br>Frage nach dem expliziten Ausschluss der Deposition für Geruchsstoffe auch bei ggf. neuen Erkenntnissen.<br>Aufgrund der Systematik für die anderen Stoffe wie Gase ist ein explizierter Ausschluss der Deposition notwendig.<br>→ Neue Erkenntnisse können auf anderem Wege eingeführt werden. Eine Festlegung wie in der TA Luft schafft Rechtssicherheit durch ein einheitliches Vorgehen bei der Genehmigung.<br>→ Es sind in nächster Zeit keine neuen Erkenntnisse in Bezug auf die Deposition von Geruchsstoffen zu erwarten. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit einer Änderungsverwaltungsvorschrift <sup>2</sup> | K |
|   | K |

<sup>1</sup> Eine nachträgliche Recherche ergab: Die EU-weite Berichterstattung nach E-PRTR-Verordnung berücksichtigt PM<sub>2,5</sub> nicht. In Deutschland allerdings werden PRTR-Daten zusammen mit Emissionserklärungen nach 11. BImSchV und nach 13. BImSchV von den Betreibern über die Software BUBE (Betriebliche UmweltdatenBerichtErstattung) übermittelt. In BUBE sind für viele Abgasreinigungsanlagen PM<sub>2,5</sub>- und PM<sub>10</sub>-Anteile an Gesamtstaubfrachten hinterlegt. Ist keine Abgasreinigungsart vorhanden bzw. zur Abgasreinigung kein PMx-Anteil bekannt, ist dort der allgemeine Faktor (PM<sub>10</sub> = 35 %, PM<sub>2,5</sub> = 10 %) anzuwenden ([https://www.bube.bund.de/content/BUBE\\_Fachhilfe\\_11bimsv.pdf](https://www.bube.bund.de/content/BUBE_Fachhilfe_11bimsv.pdf)). In BUBE wird bei unbekannter Korngrößenverteilung also ein Verhältnis Klasse 1 zu Klasse 2 von etwa 30:70 angenommen, im Textentwurf dagegen bei Punktquellen 70:30, bei diffusen Quellen 0:100. Im Lichte dieser neuen Information wird überlegt, ob in den Textentwurf ein Hinweis auf BUBE aufgenommen wird und ob die Vorgaben für den Fall unbekannter Korngrößenverteilung geändert werden.

<sup>2</sup> vgl. Protokoll des 2. Workshops zum 17.11.2015, TOP 1

|  |   |
|--|---|
| <p><u>Folie 32/33</u><br/>         Aufruf an das UBA, ein neues Hilfsprogramm „rl_inter“ zur Verfügung zu stellen.<br/>         →UBA sieht dies aus Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen nicht vor, eher Aufgabe des freien Marktes.<br/>         Vortrag Herr Kunka: „Vergleich der Landnutzungskataster“<br/>         Vortrag Herr Namyslo: „Anpassung der Rauigkeitslänge <math>z_0</math> für Wälder“<br/>         → Die Rauigkeitslängen für Wälder (Nadelwälder <math>z_0 = 1,5</math> m und Laubwälder <math>z_0 = 2</math> m) werden entsprechend dem Vorschlag von Herrn Namyslo angepasst, für Mischwälder ändert sich <math>z_0</math> nicht.<br/>         → Korrektur von „Natürliches Grünland (321)“ nach Rauigkeitsklasse 0,20 m wird zugestimmt.</p>   | <p>V<br/><br/><br/><br/><br/><br/><br/><br/><br/><br/>E<br/><br/>E</p>          |
| <p><u>Folie 34</u><br/>         Vortrag zur Mittelung der Rauigkeitslänge <math>z_0</math> → Es ist sinnvoll, bei der arithmetischen Mittelung zu bleiben, da diese bei typischen Bauhöhen der TA Luft tendenziell zu höheren Konzentrationen als die geometrische Mittelung führt und in den betrachteten Fällen auch besser mit dem Ergebnis einer korrekten Flussmittelung übereinstimmt.<br/>         Anmerkung, dass ein Radius von 150 m für die Mittelung des <math>z_0</math> für bodennahe Quellen zu hoch ist.<br/>         Es soll der Ausbreitungspfad zwischen Quelle und Immissionsort betrachtet werden.<br/>         → Prüfung des Mindestradius von 150 m für bodennahe Quellen</p>   | <p>E<br/><br/><br/><br/><br/><br/><br/>K<br/><br/>K<br/><br/>A</p>              |
| <p><u>Folie 35</u><br/>         Vorschlag: Den zweiten Absatz streichen, da sonst unterschiedliche Ergebnisse darzustellen sind, was im Vollzug zu Problemen führt.<br/>         Es handelt sich hier um eine Verwaltungsvorschrift, die Rechtssicherheit bieten soll. Da „sehr stark“ nicht definiert ist, ist der Absatz aus Sicht der fachlichen Praxis zu streichen.<br/>         Bei großer Variation der Rauigkeitslänge im Sektor zwischen Quelle und Immissionsort...ist der Einfluss des verwendeten Wertes der Rauigkeit ...zu prüfen.<br/>         Mittelung der Rauigkeitslänge <math>z_0</math> über das gesamte Rechengebiet, da bei der Berechnung nur ein <math>z_0</math> betrachtet wird.<br/>         Hinweis, dass besonders die quellnahen Verhältnisse relevant sind, und daher eine Variation von <math>z_0</math> sinnvoller als eine Mittelung über das gesamte Rechengebiet ist.<br/>         Wichtung von <math>z_0</math> über eine Sektorbetrachtung und Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen.<br/>         Wenn der Absatz gestrichen wird, fällt die Möglichkeit weg im Einzelfall von der Rauigkeit abzuweichen.<br/>         → Generelle Anmerkung zu der Diskussion: Im Workshop wird die Rückkopplung mit der Praxis gesucht. Insbesondere soll die Verfahrenssicherheit gewährleistet werden sowie, wenn möglich, das Verfahren vereinfacht werden. Bei der Prüfung des Schutzanspruches nach Anhang 2 ist jedoch eine Würdigung des Einzelfalls notwendig, was im diskutierten Absatz zum Ausdruck kommt. Es soll ein einheitliches Schutzniveau eingehalten werden und kein Rückfall hinter die TA Luft 2002 erfolgen.</p> | <p>V<br/><br/>K<br/><br/>V<br/><br/>V<br/><br/><br/>V<br/><br/>K<br/><br/>E</p> |

|  |                            |
|--|----------------------------|
| <p><u>Folie 36</u><br/>Semikolon einfügen in:<br/>„Berichte zur Umweltphysik Nr. 9, 2016, ISSN 1439-8303; bei Vorliegen einer geeigneten VDI-Richtlinie...“<br/>Anfrage an das UBA, ob diese Art der Zitierung möglich ist, ansonsten prüfen, ob Herausgabe des Textes als Folgeblatt VDI 3782 Blatt 3.x sinnvoll wäre</p>   | <p>A</p>                   |
| <p><u>Folie 37</u> → keine Anmerkungen</p>   |                            |
| <p><u>Folie 38</u><br/>Wenn keine Stundenmittelwerte vorliegen und auf 10 min-Mittelwerte zurückgegriffen werden kann, können diese dann angewendet werden?<br/>→ Sollte möglich sein, da auch bisherige AKTerm-Werte keine echten Stundenmittel sind.</p>   | <p>K<br/>K</p>             |
| <p><u>Folie 39</u><br/>→ Fußnote mit Verweis auf DWD als Quelle für die Niederschlagsdaten.<br/>Nachfrage nach dem Erscheinungsdatum einer Testversion für die Niederschlagsdaten.<br/>→ Die Daten sind noch in Bearbeitung. Nach dem Endbericht werden Testdaten zur Verfügung gestellt.</p>  | <p>A<br/>K<br/>K</p>       |
| <p><u>Folie 40</u><br/>Frage, ob, falls eine geeignete Messstation im Rechengebiet liegt, nicht mehr a) und b) geprüft werden müssen?<br/>→ Nein, da keine Übertragung stattfindet. Jedoch müssen die Daten für die Aufgabenstellung geeignet sein. Der Nachweis, dass sie für den Standort der Anlage charakteristisch sind, ist zu führen.<br/>Vorgehen bei Messlücken über VDI 3783 Blatt 21 regeln.<br/>→ "Messlücken und die Verfügbarkeit sind nach VDI 3783 Blatt 21 zu behandeln."<br/>Die Messstationen sollen nicht nur nach VDI 3783 Blatt 21 ausgerüstet sein, sondern auch entsprechend betrieben (Kalibrierintervall etc.) werden. Daher ist der Text anzupassen in "...einer nach VDI 3783 Blatt 21 ausgerüsteten und betriebenen Messstation..."</p> | <p>K<br/>K<br/>V<br/>V</p> |
| <p><u>Folie 41</u> → keine Anmerkungen</p>   |                            |
| <p><u>Folie 42</u> → keine Anmerkungen</p>   |                            |
| <p><u>Folien 43/44</u><br/>Frage nach der Auswirkung der angepassten Klassierung der Obukhov - Länge bei der Verwendung alter AKTerm-Daten.<br/>→ Keine, da in der AKTerm nur Klassenangaben und keine Obukhov-Länge enthalten sind. Dies gilt nicht für existierende Zeitreihen (zeitreihe.dmna), da in diesen die Obukhov-Länge explizit aufgeführt ist. Diese Dateien müssten angepasst werden.</p>   | <p>K<br/>K</p>             |
| <p><u>Folie 45</u><br/>Nach VDI 3783 Blatt 8 (Entwurf) wird der Standardwert der Mischungsschichthöhe bei labiler Schichtung jahreszeitabhängig festgelegt. Hierdurch gelangt zum ersten Mal ein absoluter Zeitbezug in die Ausbreitungsrechnung. Der jahreszeitliche Bezug ist im Rahmen einer AKS-Rechnung nicht möglich.</p>  | <p>K</p>                   |
| <p><u>Folie 46</u><br/>Für AKS wird der Anwendungsbereich in der TA Luft immer kleiner. Frage nach der weiteren Relevanz.<br/>→ Für bodennahe Quellen kann die Anwendung einer AKS sinnvoll sein, wenn die relevante Windrichtung (Richtung von Quelle zum Beurteilungs-</p>   | <p>V<br/>K</p>             |





|   |                  |
|---|------------------|
| <p>→ weichere Formulierung finden, die eine Prüfpflicht für den Gutachter enthält, ob ein diagnostisches oder ein /prognostisches Modell zu verwenden ist, und Hinweise für die Entscheidung benennt, aber ohne Bezug auf die „1.2-fache Gebäudehöhe“.</p> <p>→ Das Standardverfahren ist die diagnostische Windfeldmodellierung → im Nahbereich besteht aber eine Prüfpflicht, ob prognostisch zu modellieren ist.</p>   | A                |
| <p>Anmerkungen hinsichtlich der Zitierung von Forschungsberichten:<br/>Verweise auf Forschungsberichte sind nicht üblich, da in der TA Luft die Erkenntnisse aus den Forschungsprojekten umgesetzt werden sollen. Als Anhang zur TA Luft wäre es eher möglich, wobei nicht auf den gesamten Bericht verwiesen werden kann, sondern auf Auszüge.</p> <p>In Forschungsberichten werden auch die Mängel der Modelle aufgezeigt. Dies kann zu Diskussionen im Erörterungstermin führen.</p>   | K                |
| <p><u>Folie 49</u><br/>Der Satz „Die in der Ausbreitungsrechnung explizit berücksichtigte Bebauung...“ wird gestrichen. Die Frage wird bereits in der VDI 3783 Blatt 13 behandelt.</p>  | A                |
| <p><u>Folie 50</u><br/>Es sind auch Steigungen von 1:4 mit dem diagnostischen Modell behandelbar. Der Anwendungsbereich wird durch die Ablösung der Strömung vom Gelände begrenzt, siehe VDI 3783 Blatt 13.</p> <p>Sofern kein Zitat des Forschungsberichtes zulässig, ist es auch möglich, eine Ausgliederung aus VDI 3783 Blatt 13 in ein Folgeblatt 13.1 zu erstellen.</p> <p>Ein Antrag auf eine entsprechende Arbeitsgruppe wird an den VDI gestellt.</p>  | K<br>K<br>A      |
| <p><u>Folien 51-52:</u> keine Anmerkungen</p>   |                  |
| <p><u>Folie 53</u><br/>Frage nach der Forderung einer relativen statistischen Streuung von maximal 5 % im Maximum der Einzelfahne bei der Überlagerung von mehreren Fahnen.</p> <p>→ Formulierung wird auf Eindeutigkeit überprüft.</p>   | A                |
| <p><b>TOP 3 Nomogramm – bisherige/neue Vorgehensweise</b></p>   |                  |
| <p>Der ursprüngliche Anwendungsbereich des Nomogramms wird von der Version in der TA Luft seit 1986 deutlich überschritten (Verlängerung der Linien).</p> <p>Heutige Emissionsmassenströme passen nicht mehr zum ursprünglichen Anwendungsbereich des Nomogramms. Die Grundlagen und Vereinfachungen des Nomogramms sind inkonsistent zu aktuellen VDI-Richtlinien (Ausbreitungsmodell, Überhöhung) und entsprechen nicht dem Stand der Technik.</p> <p>In einer kommenden Überarbeitung wäre eine Überprüfung der S-Werte von der Wirkungsseite her möglich.</p> <p>Änderungen in der Schornsteinhöhe werden auch durch den Sprung von Benzol in Klasse II und der Einführung eines S-Wertes für Formaldehyd erwartet.</p> | K<br>K<br>K<br>K |
| <p><b>TOP 4 Offene oder nicht behandelte Punkte</b></p>   |                  |
| <p>Offene Punkte mit Ideen zur Lösung:</p> <p>→ Kurzzeitemission Geruch (Dokument comment-note-geruch-emission.pdf) wird in LAI eingebracht.</p> <p>→ Abschneidekriterium für die Schornsteinhöhe bei großen Hallen: VDI 3781 Blatt 4 oder Merkblatt Schornsteinhöhenberechnung.</p> <p>→ Emission aus dachnahen Quellen: VDI 3783 Blatt 13 oder Merkblatt</p>  |                  |



|  |  |
|--|--|
| Schornsteinhöhenberechnung.  |  |
| <ul style="list-style-type: none"><li>➔ UBA prüft, ob Verweis auf FKZ 200 43 256 (mesoskaliges diagnostisches Windfeldmodell) über VDI 3783 Blatt 13.X erfolgen kann.</li></ul> <p>Offene nicht behandelte Punkte:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>➔ Stickstoffdeposition mit Skalierung in Anhängen 8 und 9 der TA Luft.</li></ul>  |  |
|  |  |
| <b>Aufgabenliste aus dem 3. Workshop</b>   |  |
| <ul style="list-style-type: none"><li>➔ In BLAG prüfen, ob die Möglichkeit, in der Sonderfallprüfung nach TA Luft, Abschnitt 4.8, kleinere S-Werte zu verwenden, gestrichen werden kann, da keine Relevanz in der Praxis vorliegt. Dem „besondere Schutz“ wird heutzutage auf andere Weise Rechnung getragen (z.B. Umweltzone).</li><li>➔ Textentwürfe zur Begründung der unterschiedlichen Ansichten bei der Berücksichtigung bestehender Kamine in der Ausbreitungsrechnung an Ja schicken.</li><li>➔ Anpassung des Protokoll des 2. Workshops ...“in der aktuellen GIRL wird in Tabelle 2 vorgegeben, die Vorbelastung über Messungen zu bestimmen, in der Praxis wird diese aber meist über <i>Modellrechnungen auf Basis von Literaturwerten</i> bestimmt...“</li><li>➔ Sind bei der Schornsteinhöhenbestimmung Schornsteine von Nachbarbetrieben zu berücksichtigen? Vorschlag „Bei mehreren Schornsteinen der Anlage...“ (Folie 12)</li><li>➔ 2. Absatz auf Folie 13 in BLAG prüfen, ob diese Formulierung (10 % - Regelung) aufgenommen wird</li><li>➔ Unternummern zu 5.5.2 vergeben (5.5.3 -&gt; 5.5.2.1 und 5.5.4 -&gt; 5.5.2.2)</li><li>➔ In BLAG prüfen, ob der Streichung kleinerer S-Werte für den Einzelfall zugestimmt wird (Folie 15)</li><li>➔ Formulierungsvorschlag für NOx/NO2 Umrechnung (Folie 17)</li><li>➔ Umformulierung des 2. Absatzes (Folie 19)</li><li>➔ Durchführung einer systematischen Auswertung, in welchen Gegenden die Forderung zur Schornsteinhöhe bei Berücksichtigung der Topografie zu Problemen führen kann (Folie 20)</li><li>➔ ...“bis dieser kleiner als 15° ist“ in „bis dieser kleiner oder gleich 15° ist“ ändern (Folie 20)</li><li>➔ Anpassung der Formulierung:„...beschriebenen Verfahren unter Verwendung der in Tabelle 1, 2 und 3 aufgeführten Parameterwerten...“(Folie 23). Bei Wegfall des Verweises auf VDI 3782 Blatt 5 unter Allgemeinen, Verweis auf VDI 3782 Blatt 5 in Festlegung der Emissionen Folie 25 einfügen</li><li>➔ Formulierung anpassen auf „...die Zusatzbelastung und dienen für Gase und Stäube, zusammen mit der Zeitreihe...“ (Folie 24)</li><li>➔ Über Kommentar klarstellen, dass eine offizielle Einführung von VDI 3783 Blatt 19 durch einen Erlass der obersten Landesbehörden stattgefunden hat (Folie 27)</li></ul> |  |
| ➔ Prüfung des Mindestradius von 150 m für bodennahe Quellen (Folie   |  |

|  |  |
|--|--|
| <p>34)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>→ Anfrage an das UBA, ob diese Art der Bericht-Zitierung möglich ist, ansonsten evtl. Herausgabe des Textes als Unterblatt VDI 3782, Blatt 3.x (Folie 36)</li> <li>→ Fußnote mit Verweis auf DWD als Quelle für die Datengrundlage (Folie 39)</li> <li>→ Nach Vorliegen des Endberichtes Bereitstellung von Testdaten zum Niederschlag</li> <li>→ Weichere Formulierung finden, die eine Prüfpflicht für den Gutachter enthält, ob ein diagnostisches oder ein prognostisches Modell zu verwenden ist, aber ohne Bezug auf die „1.2-fache Gebäudehöhe“ (Folie 48/49)</li> <li>→ „Die in der Ausbreitungsrechnung explizit berücksichtigte Bebauung...“ wird gestrichen. Detail, wird bereits in VDI 3783 Blatt 13 behandelt (Folie 49)</li> <li>→ Antrag an den VDI auf eine Arbeitsgruppe zur Erstellung von zitierfähigen Unterblättern (ggf. Folie 36, Folien 48, 50)</li> <li>→ Überprüfung der Formulierung auf Eindeutigkeit (Folie 53)</li> </ul> |  |
| <p><b>Liste an Inhalten, die in anderen Dokumenten zu regeln sind</b></p>  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>→ Ergebnisse der Untersuchung dachnaher Quellpositionen unterhalb des Firstes in Bezug auf Ersatzquader</li> <li>→ sFestlegung der Maschenweite bzgl. Gelände</li> <li>→ sNeue Definition des Abschneidekriteriums der Schornsteinhöhe bei großen Hallen</li> <li>→ Ist für die Praxis ein fester Radius erforderlich, bis zu dem bestehende Schornsteine zu berücksichtigen sind bei der Schornsteinhöhenbestimmung?</li> <li>→ Zusammenfassung von Quellen bzgl. Überhöhung</li> </ul>  |  |
| <p><b>Liste an Inhalten, über die in anderen Kreisen entschieden werden soll</b></p>   |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>→ Sind bei der Schornsteinhöhenbestimmung Schornsteine von Nachbarbetrieben zu berücksichtigen?<br/>Vorschlag „Bei mehreren Schornsteinen der Anlage...“ (Folie 12)</li> <li>→ Ist für die Praxis ein fester Radius erforderlich, bis zu dem bestehende Schornsteine zu berücksichtigen sind bei der Schornsteinhöhenbestimmung? (Folie 12)</li> </ul>  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>→ Welche Bauhöhe ist bei bestehenden Schornsteinen in der Ausbreitungsrechnung zu berücksichtigen? (Folie 13)</li> <li>→ 2. Absatz auf Folie 13 in BLAG prüfen, ob diese Formulierung (10 %-Regelung) aufgenommen wird</li> <li>→ In BLAG prüfen, ob der Streichung kleinerer S-Werte für den Einzelfall zugestimmt wird (Folie 15)</li> <li>→ Prüfung, ob die Art der Zitierung möglich ist, evtl. als Blatt 3782/3.x (Folie 36)</li> <li>→ Prüfung, ob in der TA Luft auf Forschungsberichte verwiesen werden kann (Folie 48, 50), evtl. als Blatt 3783/13.x</li> <li>→ Welche Anforderungen gelten für Folgeblätter wie 3783/13.x (Verweis auf Forschungsberichte möglich? Wie konsistent muss der Inhalt zu bestehenden oder zukünftigen Richtlinien sein?)</li> </ul>  |  |

# Literatur

## Technische Regeln und Lehrbücher

VDI 2280 (2005): *Ableitbedingungen für organische Lösemittel*. Beuth Verlag, Berlin.

VDI 2289 BLATT 1 (ZURÜCKGEZOGEN) (1963): *Ausbreitung luftfremder Stoffe in der Atmosphäre; Zusammenhang zwischen Emission und Immission; Schornsteinhöhen in ebenem, unbebautem Gelände*. VDI Verlag, Düsseldorf.

VDI 2289 BLATT 2 (ZURÜCKGEZOGEN) (1969): *Ausbreitung luftfremder Stoffe in der Atmosphäre; Schornsteinhöhen unter Berücksichtigung der Bebauung und des Bewuchses*. VDI Verlag, Düsseldorf.

VDI 3781 BLATT 2 (1981): *Ausbreitung luftfremder Stoffe in der Atmosphäre; Schornsteinhöhen unter Berücksichtigung unebener Geländeformen*. Beuth Verlag, Berlin.

VDI 3781 BLATT 4 (2017): *Umweltmeteorologie; Ableitbedingungen bei Abgasanlagen; Kleine und mittlere Feuerungsanlagen sowie andere als Feuerungsanlagen*. Beuth Verlag, Berlin.

VDI 3782 BLATT 1 (2001): *Umweltmeteorologie; Gauß'sches Ausbreitungsmodell für Pläne zur Luftreinhaltung*. Beuth Verlag, Berlin.

VDI 3782 BLATT 3 (1985): *Umweltmeteorologie; Ausbreitung von Luftverunreinigungen in der Atmosphäre; Berechnung der Abgasfahnenüberhöhung*. Beuth Verlag, Berlin.

VDI 3782 BLATT 5 (2007): *Umweltmeteorologie; Atmosphärische Ausbreitungsmodelle; Depositionsparameter*. Beuth Verlag, Berlin.

VDI 3782 BLATT 6 (2017): *Umweltmeteorologie; Atmosphärische Ausbreitungsmodelle; Bestimmung der Ausbreitungsklasse nach Klug/Manier*. Beuth Verlag, Berlin.

VDI 3783 BLATT 7 (2015): *Umweltmeteorologie; Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle; Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder*. Beuth Verlag, Berlin.

VDI 3783 BLATT 8 (2017): *Umweltmeteorologie; Messwertgestützte Turbulenzparametrisierung für Ausbreitungsmodelle*. Beuth Verlag, Berlin.

VDI 3783 BLATT 9 (2005): *Umweltmeteorologie; Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle; Evaluierung für Gebäude- und Hindernisumströmung*. Beuth Verlag, Berlin.



- VDI 3783 BLATT 10 (2010): *Umweltmeteorologie; Diagnostische mikroskalige Windfeldmodelle; Gebäude- und Hindernisumströmung*. Beuth Verlag, Berlin.
- VDI 3783 BLATT 13 (2010): *Umweltmeteorologie; Qualitätssicherung in der Immissionsprognose; Anlagenbezogener Immissionsschutz, Ausbreitungsrechnungen gemäß TA Luft*. Beuth Verlag, Berlin.
- VDI 3783 BLATT 16 (2015): *Umweltmeteorologie; Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle; Verfahren zur Anwendung in Genehmigungsverfahren nach TA Luft*. Beuth Verlag, Berlin.
- VDI 3783 BLATT 18 (ENTWURF) (2015): *Umweltmeteorologie; Fotolysefrequenzen für Berechnungen von Schadstoffkonzentrationen in der Troposphäre*. Beuth Verlag, Berlin.
- VDI 3783 BLATT 19 (2015): *Umweltmeteorologie; Reaktionsmechanismus zur Bestimmung der Stickstoffdioxid-Konzentration*. Beuth Verlag, Berlin.
- VDI 3783 BLATT 21 (2015): *Umweltmeteorologie; Qualitätssicherung meteorologischer Daten für die Ausbreitungsrechnung nach TA Luft und GIRL*. Beuth Verlag, Berlin.
- VDI 3784 BLATT 2 (1990): *Umweltmeteorologie; Ausbreitungsrechnung bei Ableitung von Rauchgasen über Kühltürme*. Beuth Verlag, Berlin.
- VDI 3886 BLATT 1 (ENTWURF) (2017): *Hinweise zur Erstellung von Geruchsgutachten unter Berücksichtigung der einschlägigen Richtlinien und Regelungen*. Beuth Verlag, Berlin.
- VDI 3894 BLATT 1 (2011): *Emissionen und Immissionen aus Tierhaltungsanlagen; Haltungsverfahren und Emissionen; Schweine, Rinder, Geflügel, Pferde*. Beuth Verlag, Berlin.
- VDI 3894 BLATT 2 (2012): *Emissionen und Immissionen aus Tierhaltungsanlagen; Methode zur Abstandsbestimmung; Geruch*. Beuth Verlag, Berlin.
- VDI 3945 BLATT 3 (2000): *Umweltmeteorologie; Atmosphärische Ausbreitungsmodelle; Partikelmodell*. Beuth Verlag, Berlin.
- VDI 4251 BLATT 3 (2015): *Erfassen luftgetragener Mikroorganismen und Viren in der Außenluft; Anlagenbezogene Ausbreitungsmodellierung von Bioaerosolen*. Beuth Verlag, Berlin.
- TA LUFT (1974): *Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 28.08.1974*. GMBI. S. 426.
- TA LUFT (1986): *Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 27.02.1986*. GMBI. S. 95.
- TA LUFT (2002): *Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24.06.2002*. GMBI. S. 511.
- BIMSchV-11 (2004): *Elfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Emissionserklärungen)*. [http://www.gesetze-im-internet.de/↔bimschv\\_11\\_2004/index.html](http://www.gesetze-im-internet.de/↔bimschv_11_2004/index.html) (zuletzt abgerufen 2016-12-22).

BIMSchV-13 (2013): *Dreizehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes*. [http://www.gesetze-im-internet.de/bimschv\\_13\\_2013/index.html](http://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_13_2013/index.html) (zuletzt abgerufen 2016-12-22).

BUBE (2016): *BUBE-Online; Betriebliche Umweltdatenberichterstattung; Fachhilfe für Emissionserklärungen (11. BImSchV); Version 2.1 vom 31. Mai 2016*. <https://www.bube.bund.de/↔content/BUBE-Fachhilfe-11BIMSCHV.pdf> (zuletzt abgerufen 2016-12-22).

E-PRTR (2006): *Verordnung (EG) Nr. 166/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Januar 2006*. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX↔%3A32006R0166> (zuletzt abgerufen 2016-12-22).

LAI-MERKBLATT (2012): *Schornsteinhöhenberechnung*. Herausgeber: Fachgespräch Ausbreitungsrechnung, 6. November 2012, [http://www.hlnug.de/fileadmin/downloads/luft/↔Merkblatt\\_Schornsteinhoehenberechnung\\_V15\\_12\\_11\\_06.pdf](http://www.hlnug.de/fileadmin/downloads/luft/↔Merkblatt_Schornsteinhoehenberechnung_V15_12_11_06.pdf) (zuletzt abgerufen 2016-12-22).

BAEHR, H.D., KABELAC, S.: *Thermodynamik*. Springer, Berlin, 2012.

## Fachartikel

BOEING (2005): *Bericht D6-58325-6: 737, Airplane Characteristics for Airport Planning*. Boeing Commercial Airplanes.

BRIGGS, G.A. (1971): *Some recent analyses of plume rise observation*. Proc. 2nd International Clean Air Congress, Washington, 1029-1032.

BRIGGS, G.A. (1975): *Plume Rise Predictions*. In: Lectures on air pollution and environmental impact analyses. *Am. Met. Soc.*, 59-111.

BRIGGS, G.A. (1984): *Plume rise and buoyancy effects*. In: Atmospheric Science and Power Production (ed. D. Randerson) DOE/TIC-27601, US Dept. Energy, available from NTIS, Springfield, VA, USA.

CARHART, R.A., POLICASTRO, A.J. (1991): *A second-generation model for cooling tower plume rise and dispersion-I. Single sources*. *Atmospheric Environment* **25A**, 1559-1576.

DAVIDSON, G.A. (1989): *Simultaneous trajectory and dilution predictions from a simple integral plume model*. *Atmospheric Environment* **23**, 341-349.

ERBRINK, H. (1994): *Plume rise in different atmospheres: a practical scheme and some comparisons with Lidar measurements*. *Atmospheric Environment* **28**, 3625-3636.

ERNST, G., SCHNABEL, G. (EDS.) (1984): *Naturzug-Nasskühlturm des Kernkraftwerkes Philippsburg (Block I): Ergebnisse der Schwadenausbreitungsrechnungen (Natural draft cooling tower at power plant Philippsburg (block I): results of the calculations on the plume evolution)*. Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften, Serie 15, Nr. 30.

ERNST, G., WURZ, D. (EDS.) (1983): *Naturzug-Nasskühlturm des Kernkraftwerkes Philippsburg (Block I): Untersuchungen des Betriebsverhaltens, der Emission und der Schwadenausbreitung*

(*Natural draft cooling tower at power plant Philippsburg (block I): investigation of the operational behaviour, emission and plume evolution*). Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften, Serie 15, Nr. 25.

EVANS (1957): *Natural Air Flow Around Buildings*. Research Report No 59 - March 1957, The Texas A. & M. College System (M. T. Harrington, Chancellor), Texas Engineering Experiment Station (John C. Calhoun, Jr., Director, Fred J. Benson, Vice-Director, Louis J. Horn, Supervisor of Publications), College Station Texas.

FACKRELL, J.E. (1984): *Parameters characterizing dispersion in the near wake of buildings*. Journ. Of Wind Eng. And Ind. Aerodyn. **16**, 97-118.

FAN, L.-N. (1967): *Turbulent buoyant jets into stratified or flowing ambient fluids*. Ph.D. thesis, California Institute of Technology.

FETT, W. (1978): *Kriterien und Empfehlungen zur Anlage von Gebäudeabzügen*. In: Bestimmung der Schornsteinmindestbauhöhen für Feuerungsanlagen kleiner Leistung; Fortschrittsberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe Umwelttechnik, Nr. 11; VDI-Verlag, Düsseldorf; ISSN 0341-1699.

FOKEN, TH. (2012): *Application of footprint models for the fine-tuning of wind power locations on inland areas*. DEWI Magazin **40**, 51-54.

FOKEN, TH. (2006): *50 years of the Monin-Obukhov similarity theory*. Boundary-Layer Meteorology **119**, 431-447.

GANGOITI, G., SANCHO, J., IBARRA, G., ALONSO, L., GARCÍA, J.A., NAVAZO, M., DURANA, N., ILARDIA, J.L. (1997): *Rise of moist plumes from tall stacks in turbulent and stratified atmospheres*. Atmospheric Environment **31A**, 253-272.

GOFF, J.A. (1957): *Saturation pressure of water on the new Kelvin temperature scale*. Transactions of the American society of heating and ventilating engineers, pp 347-354, presented at the semi-annual meeting of the American society of heating and ventilating engineers, Murray Bay, Quebec, Canada.

GOFF, J.A., GRATCH, S. (1946): *Low-pressure properties of water from -160 to 212 F*. Transactions of the American society of heating and ventilating engineers, pp 95-122, presented at the 52nd annual meeting of the American society of heating and ventilating engineers, New York.

HABERLANDT, U., BERNDT, C. (2017): *Regionalisierung stündlicher Niederschläge zur Modellierung der nassen Deposition*. Forschungskennzahl 3710 42 218 2, im Auftrag des Umweltbundesamtes.

HANNA, S.R. (1975): *Predicted and observed cooling tower plume rise and visible plume length at the John E. Amos power plant*. Atmospheric Environment **10**, 1043-1052.

HANNA, S.R. (1982): *Turbulent diffusion: chimneys and cooling towers*. In: Engineering Meteorology, Ed. E.J. Plate, Elsevier, Amsterdam **Vol. 1**, 429-480.



HOLLAND, J.Z. (1953): *A meteorological survey of the Oak Ridge area*. AEC, Report ORO – 99; <http://web.ornl.gov/~das/web/ORO99.pdf> (zuletzt abgerufen 2016-12-22).

HOSKER, R.P. (1981): *Methods for estimating wake flow and effluent dispersion near simple block-like buildings*. NOAA Technical Memorandum ERL ARL - 108; National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories, Silver Spring, Maryland.

JANICKE, U., JANICKE, L. (2001): *A three-dimensional plume rise model for dry and wet plumes*. Atmospheric Environment **35**, 877-890.

JANICKE, L., JANICKE, U. (2003): *Entwicklung eines modellgestützten Beurteilungssystems für den anlagenbezogenen Immissionsschutz*. Forschungskennzahl 200 43 256, im Auftrag des Umweltbundesamtes.

JANICKE, U., JANICKE, L. (2004): *Weiterentwicklung eines diagnostischen Windfeldmodells für den anlagenbezogenen Immissionsschutz (TA Luft)*. Forschungskennzahl 200 43 256, im Auftrag des Umweltbundesamtes.

JANICKE, L., JANICKE, U. (2007): *Die Entwicklung des Ausbreitungsmodells AUSTAL2000G*. Berichte zur Umweltphysik Nummer 5, Auflage 2, Ingenieurbüro Janicke, ISSN 1439-8222. <http://www.janicke.de>.

MANIER, G. (1971): *Die Bestimmung von Schornsteinhöhen im Hinblick auf die Luftreinhaltung; Theoretische Grundlagen einer neuen VDI-Richtlinie*. Fortschrittberichte VDI Zeitschriften **15/4**, 9-76.

MANIER, G. (1975): *Vergleich zwischen Ausbreitungsklassen und Temperaturgradienten*. Meteorol. Rdsch. **28**, 6-14.

MERONEY, R.N. (1982): *Turbulent diffusion near buildings*. In: Engineering Meteorology, Ed. E.J. Plate, Elsevier, Amsterdam **Vol. 1**, 481-525.

MORETTI, P.M. (1993): *Flow-induced vibrations in arrays of cylinders*. Annu. Rev. of Fluid Mech. **25**, 99-114.

ÖTTL, D. (2006): *Evaluierung der Ausbreitungsmodelle AIR.LAG, LASAT und AUSTAL2000 für die Schadstoffausbreitung von Punktquellen mit thermischer Überhöhung*. Im Auftrag der VOESTALPINE Stahl GmbH, Bericht Nr. FVT-28/06/Öt V&U 05/05/6300.

OLESEN, H.R. (1994): *Model validation kit for the workshop on operational short-range atmospheric dispersion models for environmental impact assessments in Europe*. Mol, Nov 21-24 1994, National Environmental Research Institute, Denmark.

OVERCAMP, T.J., HOULT, D.P. (1971): *Precipitation in the wake of cooling towers*. Atmospheric Environment **5**, 751-765.

PERNPEINTNER, A., BAUHOFFER, B., BAETKE, F. (1988): *Experimentelle und numerische Bestimmung der Immissionskonzentration im Nahbereich von einfachen Baukörpern infolge von Schadstoffaustritt durch die Seitenwand*. Forschungsbericht 8272-622-33394, Lehrstuhl für





Strömungsmechanik, Technische Universität München.

PLATTEN, J.L., KEFFER, J.F. (1971): *Deflected turbulent jet flows*. J. Appl. Mech., Transactions of the ASME **12**, 756-758.

PRATTE, B.D., BAINES, W.D. (1967): *Profiles of the round turbulent jet in a cross flow*. J. Hydraulics Division, ASCE **93**, 53-64.

PRESOTTO, L., BELLASIO, R., BIANCONI, R. (2005): *Assessment of the visibility impact of a plume emitted by a desulphuration plant*. Atmospheric Environment **39**, 719-738.

SCHATZMANN, M., POLICASTRO, A.J. (1984): *An advanced integral model for cooling tower plume dispersion*. Atmospheric Environment **18**, 663-674.

SPIVACK, H.M. (1946): *Vortex frequency and flow pattern in the wake of two parallel cylinders at varied spacing normal to an air stream*. Journ. of the Aeronaut. Sci. **13**, 289-301.

STÜMKE, H. (1961): *Zur Berechnung der Aufstiegshöhe von Rauchfahnen*. VDI-Forschh. 483, Ausg. B **27**, 38-48.

THEURER, W. (1993): *Ausbreitung bodennaher Emissionen in komplexen Bebauungen*. Dissertation, Universität Karlsruhe.

TRAVNIKOV, O., ILYIN, I. (2005): *Regional Model MSCE-HM of Heavy Metal Transboundary Air Pollution in Europe*. EMEP/MSC-E Technical Report 6/2005, Meteorological Synthesizing Centre - East, Russia.

TRUKENMÜLLER, A. (2008): *Evaluierung von Modellen zur Ausbreitungsrechnung nach Anhang 3 der TA Luft*. Anlage zum Schreiben II 4.1-50-131-1/19 vom 13.06.2008.

THEURER, W., GAUWEILER, J. (2016): *Bestimmung der äquivalenten Quaderhöhe für die numerische mikroskalige Modellierung durch Untersuchungen im Windkanal*. gefördert durch: Land Baden-Württemberg, Freistaat Bayern, Land Berlin, Land Hessen, Freistaat Thüringen.

WEIL, J.C. (1988): *Plume rise*. Lectures on Air Pollution Modeling. Venkatram, A. and Wyngaard, J. C., American Meteorological Society.

WILSON, D.J. (1979): *Flow patterns over flat-roofed buildings and application to exhaust stack design*. University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada.

WIPPERMANN, F. (1963): *Diagramme zur Beurteilung der Eignung von Schornsteinhöhen für die Luftreinhaltung*. Staub **23**, 335-343.

WIPPERMANN, F., KLUG, W. (1962): *Ein Verfahren zur Bestimmung von Schornsteinmindesthöhen*. Int. J. Air Water Pollution **6**, 27-48.

WOLFSEHER, U., GERTIS, K. (1978a): *Bodennahe Aerodynamik; Darstellung der lokalen Windverhältnisse über unbebauten und bebauten Flächen auf Grund vorhandener Literatur; Teil 1*. Gesundheits-Ingenieur **99**, 259-274.



WOLFSEHER, U., GERTIS, K. (1978b): *Bodennahe Aerodynamik; Darstellung der lokalen Windverhältnisse über unbebauten und bebauten Flächen auf Grund vorhandener Literatur; Teil 2.* Gesundheits-Ingenieur **99**, 321-352.

Woo, H.G.C., PETERKA, J.A., CERMAK, J.E. (1976): *Wind tunnel measurements in the wakes of structures.* Colorado State University, Ft. Collins, Col. CER75-76HGCW-JAP-JEC40.

ZDRAVKOVICH, M.M. (1985): *Flow induced oscillations of two interfering circular cylinders.* Journal of Sound and Vibration **101**, 511-521.

