

An den Gewerbewiesen 16
D-67374 Hanhofen
Tel. 06344 - 508 789
e-Mail:
IB.Theurer.SP@t-online.de

Behandlung dachnaher Quellen bei der numerischen Modellierung

gefördert durch das Umweltbundesamt, Dessau,

im Rahmen des Forschungsvorhabens FKZ 3714 43 204 0 „Weiterentwicklung ausgewählter methodischer Grundlagen der Schornsteinhöhenbestimmung und der Ausbreitungsrechnung nach TA Luft“

in Zusammenarbeit mit:

- Dr. Ulf Janicke, Ingenieurbüro Janicke, Überlingen
- Dr.-Ing. Wolfgang Bächlin, Ingenieurbüro Lohmeyer, Karlsruhe und Dresden

Wolfgang Theurer, Dr.-Ing.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
1. Dachnahe Quellen	5
2. Definition der Randbedingungen	7
2.1 Gebäude	7
2.2 Strömungsverhältnisse	8
2.3 Quellen	8
2.4 Aufpunkte	10
3. Voruntersuchungen	13
3.1 Sichtbarmachung und Messung der Konzentrationen	13
3.2 Kenngrößen für einen Vergleich der Konzentrationen	15
3.3 Mittelung der Ergebnisse der Seiten- und Dachquelle	18
3.4 Überprüfung anderer dachnaher Quellen	21
3.5 Schlüsse aus den Voruntersuchungen	22
4. Ergebnisse	24
4.1 Abhängigkeit vom Gebäudetyp	24
4.2 Abhängigkeit von der Windrichtung	29
5. Empfehlung und Hinweise für die modelltechnische Umsetzung	31
5.1 Überprüfung der Empfehlung an Beispielen	31
5.2 Modelltechnische Umsetzung	34
6. Literatur	37

Anhang	38
A1 Beschreibung des Windkanals	38
A2 Ähnlichkeitsgesetze und Anforderungen an Modellversuche	39
A3 Anströmgrenzschicht	41
A4 Gebäudemodelle	44
A5 Reproduzierbarkeiten	46
A5.1 Messdauer	46
A5.2 Konzentrationsmessungen	46
A5.3 Beurteilungsverfahren	49

Zusammenfassung

Abgase sind so abzuleiten, dass ein ungestörter Abtransport mit der freien Luftströmung möglich ist. Dies wird definitionsgemäß erfüllt, wenn die Mündung eines Schornsteines oder einer sonstigen Abgasquelle sich außerhalb der Rezirkulationszonen von Bauwerken, wie in der Richtlinie VDI 3781 Blatt 4 (2017) beschrieben, befindet.

Abgasquellen, die in der Nähe von Dachflächen in die Rezirkulationszonen von Gebäuden emittieren und somit keinen ungestörten Abtransport ermöglichen, werden als sogenannte „dachnahe Quellen“ bezeichnet. Werden in numerischen Strömungs- und Ausbreitungsmodellen Gebäude mit komplexeren Dachstrukturen, wie Satteldächern, mittels firsthoher Quader (sogenannter „Ersatzquader“) vereinfachend abgebildet¹, können die dachnahen Quellen innerhalb dieser Ersatzquader zu liegen kommen. In solchen Fällen müssen anstelle der Originalquellen Ersatzquellen verwendet werden, die die immissionsseitigen Konzentrationsfelder aufgrund der Originalquellen möglichst gut wiedergeben.

Ziel der nun vorliegenden Untersuchung war es, Vorgaben bezüglich der Gestaltung und Umsetzung dieser Ersatzquellen bei der numerischen Modellierung zu liefern.

Zur Bearbeitung dieser Fragestellung wurden Experimente in einem Grenzschichtwindkanal durchgeführt. In solchen Windkanälen wird die atmosphärische Windgrenzschicht naturgetreu maßstäblich verkleinert nachgebildet. In dieser Grenzschicht wurden für Gebäudemodelle mit geneigten Dächern und ihre Ersatzquader Vergleichsmessungen durchgeführt.

Als Ersatzquellen wurden sowohl Quellen auf der Dachfläche („Dachquellen“) als auch an der Seitenwand („Seitenquellen“) der Ersatzquader hinsichtlich des Ausbreitungsverhaltens der Emissionen untersucht. Da bei Quellen innerhalb von Rezirkulationszonen keine Überhöhung anzusetzen ist, handelt es sich bei den Ersatzquellen, wie bei den Originalen, um passive Quellen mit einem vernachlässigbaren Austrittsimpuls und ohne Auftrieb. Die Ergebnisse für die Ersatzquellen auf den Ersatzquadern wurden denen der Originalquellen auf den Originalgebäuden mit Satteldächern gegenübergestellt.

Betrachtet über alle untersuchten Gebäudeabmessungen, Windrichtungen und Quellkonfigurationen gab eine Mittelung der Ergebnisse für die Dach- und die Seitenquelle die Daten der Originalquelle im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen am besten wieder. Für die numerische Modellierung bedeutet dies, dass bei Ersatzquadern anstelle der Originalquelle jeweils eine Dachquelle und eine Seitenquelle mit je der halben Emissionsstärke an vorgegebenen Positionen anzutragen sind.

¹ siehe hierzu: Theurer, W.; Gauweiler, J. (2017): Bestimmung der äquivalenten Quaderhöhe für die numerische mikroskalige Modellierung durch Untersuchungen im Windkanal. Ingenieurbüro Theurer, Hanhofen. Unter: www.janicke.de/data/bzu/Bericht_Ersatzquader_20170327.pdf

1. Dachnahe Quellen

Nach der derzeit gültigen TA Luft (2002), wie auch nach dem Referentenentwurf der geplanten Neufassung (TA Luft – E, Stand: 09. September 2016), sind Abgase so abzuleiten, dass ein ungestörter Abtransport mit der freien Luftströmung ermöglicht wird. Ein ungestörter Abtransport von Abgasen findet nur dann statt, wenn ihre Freisetzung außerhalb der Rezirkulationszonen, die sich bei der Umströmung von Gebäuden einstellen, erfolgt. Eine Freisetzung außerhalb der Rezirkulationszonen erfordert in der Regel Schornsteine ausreichender Höhe, wie beispielsweise in der Richtlinie VDI 3781 Blatt 4 (2017) näher beschrieben wird.

Bei zu niedrigen Schornsteinen, sonstigen Quellen oder Abluftöffnungen in unmittelbarer Dachnähe gelangen Abgase in die Rezirkulationszonen der Gebäude. Dies behindert die Verdünnung der Emissionen und führt zu höheren Immissionen in Bodennähe. Solche Quellen werden als „dachnah“ bezeichnet und im Folgenden näher betrachtet.

Dachnahe Quellen verstößen gegen das Prinzip des „ungestörten Abtransports der Abgase“ und sind daher weder nach der für die Ableitung von Abgasen einschlägigen Nummer 5.5 der TA Luft noch nach der Richtlinie VDI 3781 Blatt 4 (2017) zulässig. Gleichwohl sieht Nummer 4.6.1.1 der TA Luft für Bagatellmassenströme auch die Möglichkeit von „nicht nach Nummer 5.5 abgeleiteten Emissionen (diffuse Emissionen)“ vor. Mehrere Beiträge auf den Workshops im Rahmen des Forschungsvorhabens FKZ 3714 43 204 0 „Weiterentwicklung ausgewählter methodischer Grundlagen der Schornsteinhöhenbestimmung und der Ausbreitungsrechnung nach TA Luft“ zeigten, dass es im Bestand zahlreiche derartige Anlagen gibt, so dass sie als in der Praxis relevant angesehen werden.

Wenn bei der numerischen Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen Gebäude mit geneigten Dächern vereinfacht als firsthohe Ersatzquader (Theurer und Gauweiler, 2017) abgebildet werden (siehe den Referentenentwurf zur TA Luft, Stand: 09. September 2016), führt dies zu einem modelltechnischen Problem: Alle Quellen, die sich in Dachnähe unterhalb der Firstlinie befinden, kommen innerhalb der Ersatzquader zu liegen. Zu untersuchen und festzulegen ist daher, wie in diesen Fällen die Ersatzquellen zu modellieren sind, um ähnliche immissionsseitige Konzentrationsfelder in Gebäudenähe wie bei den dachnahen Originalquellen auf den Originalgebäuden zu erhalten. Die Forderung lautet:

Die Ausbreitung von Emissionen aus der dachnahen Quelle auf einem Gebäude soll durch den Ersatzquader mit einer Ersatzquelle möglichst gut wiedergegeben werden.

Die Güte der Übereinstimmung ist durch einen Vergleich der Konzentrationen im Nahbereich der Gebäude mit den dachnahen Quellen im Original und ihrer Ersatzquader mit den Ersatzquellen zu prüfen. Für die Bearbeitung dieser Fragestellung bieten sich idealerweise Messungen in einem Grenzschichtwindkanal an.

Mit Grenzschichtwindkanälen lassen sich die Umströmung und die Ausbreitungsvorgänge im Nahbereich auch nicht-quaderförmiger Gebäude, wie zum Beispiel bei Gebäuden mit Satteldächern, maßstäblich verkleinert² naturgetreu simulieren³. Nachfolgend wird über die durchgeführten Windkanalversuche zu den dachnahen Quellen und ihre Ergebnisse berichtet.

² Alle Abmessungen von Gebäuden, Entfernungen etc. werden in dem vorliegenden Bericht, sofern nicht anders erwähnt, als Naturmaße angegeben.

³ Bei Einhaltung der in der Richtlinie VDI 3783 Blatt 12 (2000) beschriebenen Modellgesetze liefert ein Grenzschichtwindkanal bei beliebigen Gebäude- und Dachformen nicht nur naturähnliche Strömungsfelder, sondern, bei Quellen in der Strömung, auch naturähnliche Konzentrationsfelder. Kurze Beschreibungen des Windkanals und der im Windkanal einzuhaltenden Ähnlichkeitsgesetze, die die Übertragbarkeit der Modellergebnisse auf die Natur sicherstellen, finden sich in den Anhängen A1 und A2.

2. Definition der Randbedingungen

Dachnahe Quellen an Gebäuden treten in zahlreichen verschiedenen Varianten von Abluftanlagen auf. Die durchgeführten Windkanalversuche beschränken sich auf die nachfolgend näher erläuterte Auswahl. Für diese Varianten werden im Nahbereich des Originals gemessene Konzentrationen mit denen bei einer Modellierung mit Hilfe von Ersatzquadern und –quellen verglichen. Bei der Auswahl wurden berücksichtigt

- verschiedene Gebäudegeometrien,
- verschiedene Strömungsverhältnisse, insbesondere Windrichtungen,
- die Lage und Art der Quellen am Gebäude und
- die Lage der betrachteten Aufpunkte im Nahbereich.

Bereits bei dem Vergleich der Rezirkulationszonen eines Originalgebäudes und seines Ersatzquaders (Theurer und Gauweiler, 2017) zeigte sich, dass eine völlige Übereinstimmung der Konzentrationsfelder bei allen Randbedingungen nicht zu erwarten ist. Zu finden war daher das Optimum im Rahmen der betrachteten Konstellationen.

2.1 Gebäude

Drei Gebäudetypen mit unterschiedlichen Verhältnissen ihrer Länge L ($= 10$ m) zu ihrer Breite B (siehe die Definitionen in der Abbildung 2.1) wurden betrachtet: $L/B = 1:1$ (quadratische Grundfläche), 1:2 und 1:5. Die Originalgebäude wiesen, analog zu den Untersuchungen zur Bestimmung der Höhe ihrer Ersatzquader (Theurer und Gauweiler, 2017), symmetrische Satteldächer mit Neigungen von 20° , 30° und 45° und meist eine Traufhöhe von 6 m auf. Lediglich das Gebäude mit $L/B = 1:1$ und dem Satteldach mit der Neigung 45° hatte eine Traufhöhe von 10 m und Firsthöhe von 15 m, da die Abmessungen möglichst verschiedene Strömungszustände um die Gebäude und auf ihren Dächern abdecken sollten (siehe Anhang A4). Die Höhen der Ersatzquader entsprachen jeweils den Firsthöhen der Satteldächer.

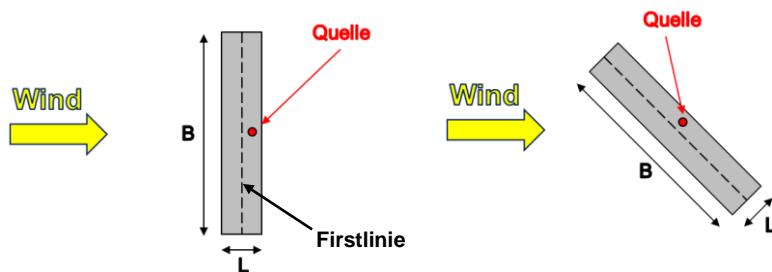


Abb. 2.1: Definition der Gebäudelänge und –breite am Beispiel des Originalgebäudes mit $L/B = 1:5$. Links dargestellt ist die Windrichtung 0 Grad (Queranströmung, Quelle auf der Leeseite), rechts 45 Grad. Bei den Windrichtungen 90 Grad etc. wird das Gebäude weiter gegen den Uhrzeigersinn gedreht.

2.2 Strömungsverhältnisse

Bei den gestreckten, quer angeströmten Gebäuden (siehe Abbildung 2.1: Windrichtung 0 Grad senkrecht zur Firstlinie, $L/B = 1:5$) bildet sich, im Gegensatz zu Gebäuden mit quadratischer Grundfläche, in der Mitte eine deutliche Zone mit einer quasi-zweidimensionalen Überströmung aus. Bei einer schrägen Anströmung unter 45 oder 135 Grad sind die Verhältnisse erheblich komplexer. Hinter der Ablösekante stellt sich dann eine schraubenförmige Strömung auf der Dachfläche ein, die von einer Komponente in Windrichtung überlagert wird.

In den Windkanalversuchen wurden daher sowohl die Queranströmung unter 0 Grad (senkrecht zur Firstlinie des Satteldaches mit auf der Leeseite liegender Quelle), als auch die beiden Windrichtungen 45 und 135 Grad betrachtet. Für einige Fälle wurden die Versuche durch eine Queranströmung unter 180 Grad (senkrecht zur Firstlinie des Satteldaches, aber mit der Quelle in Luv) ergänzt.

Werden die gestreckten Gebäude entlang der Firstlinie angeströmt (Windrichtung 90 Grad), legt die Strömung in der Regel wieder auf der Dachfläche an. Ob ein Wiederanlegen der Strömung auch bei Gebäuden mit quadratischer Grundfläche auftritt, hängt stark von der Gebäudegeometrie und den Parametern der Anströmung ab. Auch für die Windrichtung 90 Grad wurden deshalb einige ergänzende Versuche durchgeführt.

Die bodennahen Strömungs- und Turbulenzverhältnisse bestimmen wesentlich die Ausbreitungsvorgänge um die Gebäude. Eine Erhöhung der bodennahen Turbulenz durch eine Umgebungsbebauung führt tendenziell zu einer schnelleren, stärkeren Vergleichmäßigung der Konzentrationen. Dadurch schwinden die Unterschiede in den Konzentrationsfeldern bei verschiedenen Anordnungen der Quelle, was einen Vergleich erschwert.

Wie in Anhang A3 beschrieben, wurde daher eine Grenzschicht über offenem Gelände mit einem Profilexponenten $\alpha = 0.12$ bzw. einer Rauigkeitslänge von $z_0 = 0.02$ m und geringer bodennaher Turbulenz gewählt, in der die einzelnen Gebäude freistehend betrachtet wurden.

Alle Versuche wurden zur einfacheren Vergleichbarkeit mit denselben Geschwindigkeits- und Turbulenzprofilen in der Anströmung im Windkanal durchgeführt. Weitere Details zu der Windkanalmodellierung finden sich in den Anhängen A1 und A2.

Die Untersuchungen wurden bei neutraler Grenzschicht durchgeführt. Nicht berücksichtigt werden konnte der Einfluss windschwacher Situationen bzw. der Stabilität der Atmosphäre auf die Ausbreitung.

2.3 Quellen

Dachnahe Quellen können verschiedene Ausführungen mit unterschiedlichen Freisetzungshöhen aufweisen (Abbildung 2.2). Die Versuche wurden zumeist mit einer in der Dachfläche liegenden, dachbündigen Originalquelle, wie in der Abbildung 2.2 links dargestellt, durchgeführt. Die anderen Quellvarianten in der Abbildung 2.2 wurden aber ebenfalls überprüft.

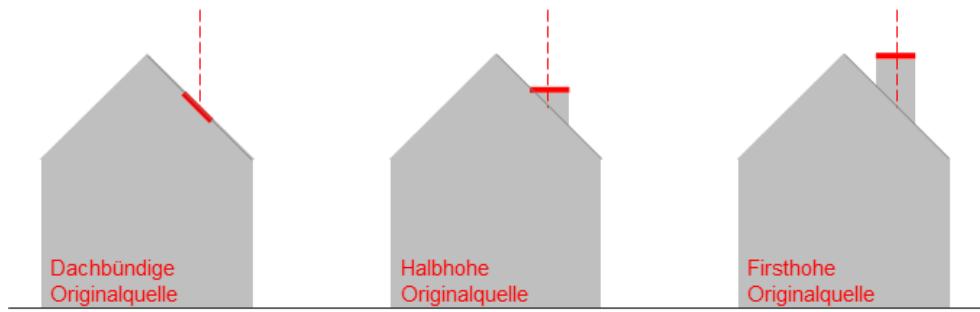


Abb. 2.2: Gebäude mit dem 45°-Satteldach und verschiedenen dachnahen Originalquellen. Die Austrittsquerschnitte (rot markiert) sind jeweils gleich.

Die Ersatzquellen im Modell waren auf der Dach— (Dachquelle DQ) und der Seitenfläche (Seitenquelle SQ) des Ersatzquaders (siehe Abbildung 2.3) angeordnet. Die Flächen der Austrittsquerschnitte der Ersatzquellen waren gleich der Fläche der Originalquelle. Bei dem in der Abbildung 2.4 gezeigten Beispiel einer dachbündigen Originalquelle samt Ersatzquellen wurden jeweils runde Austrittsquerschnitte mit einem Durchmesser von 2 m gewählt.

Die Messungen beschränkten sich auf weitgehend impulsfreie Quellen. Die versuchstechnisch bedingte Austrittsgeschwindigkeit aus der Originalquelle und den flächengleichen Ersatzquellen war mit ungefähr 0.02 m/s vernachlässigbar gering gegenüber der Anströmwindgeschwindigkeit in Quellhöhe von ca. 2.5 m/s. Während der Versuche wurde der Volumen— bzw. Emissionsstrom der Quellen konstant gehalten.

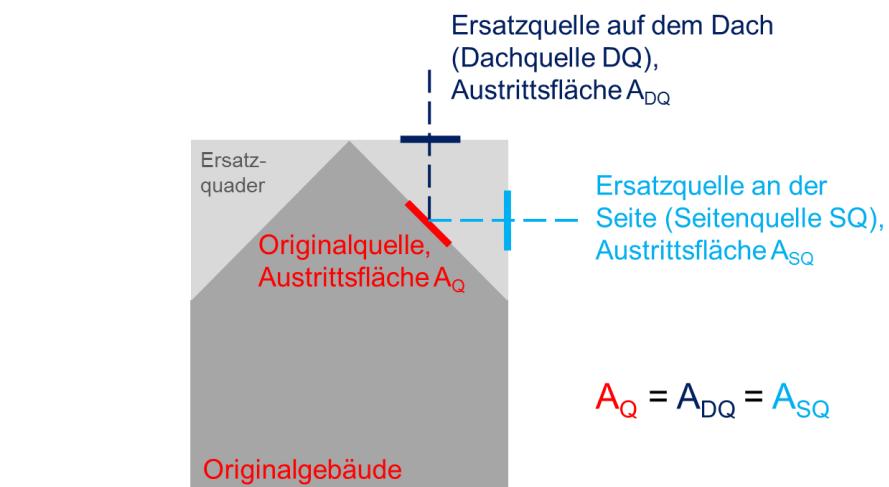


Abb. 2.3: Gebäude mit einem 45°-Satteldach und Ersatzquader: Originalquelle (dachbündig) und Ersatzquellen mit gleichen Austrittsflächen an der Seitenwand (Seitenquelle SQ) und auf der Dachfläche (Dachquelle DQ).

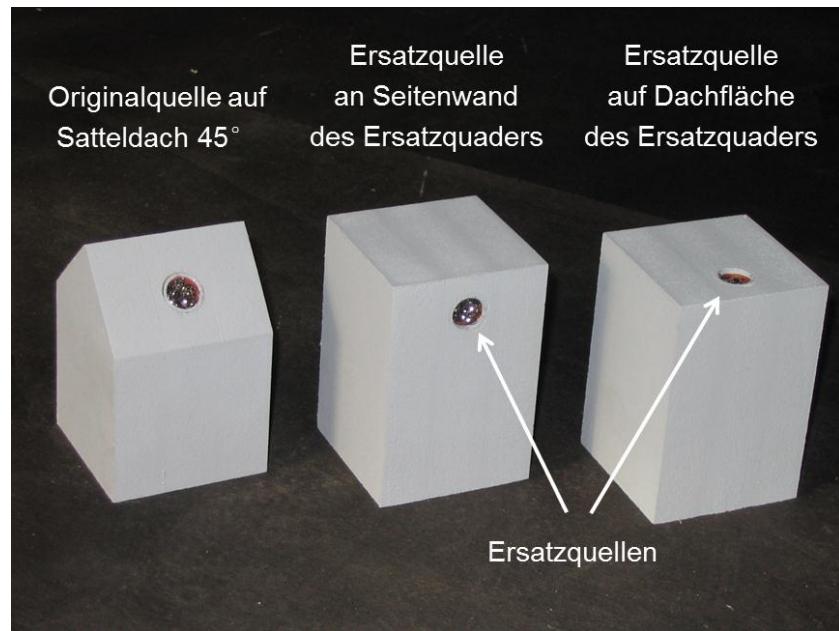


Abb. 2.4: Dachbündige Originalquelle auf dem Gebäude mit $L/B = 1:1$ und einem Satteldach der Neigung 45° und flächengleiche Ersatzquellen an der Seitenwand (Seitenquelle SQ) oder auf der Dachfläche (Dachquelle DQ) des zugehörigen Ersatzquaders.

Zusätzlich zu den beiden kreisförmigen Quellen wurden einige Fälle mit einer „verschmierten Quelle“, einer Flächenquelle, untersucht. Die Flächenquelle erstreckte sich auf dem Ersatzquader von der Dachquelle bis hin zur Seitenquelle (siehe Abschnitt 3.3), ihr Emissionsstrom entsprach dem einer kreisförmigen Einzelquelle.

2.4 Aufpunkte

Durch eine geeignete Platzierung der Aufpunkte in Vertikal-, Quer- und Längsprofilen wurde angestrebt, mit einer überschaubaren Anzahl von Messungen möglichst aussagekräftige Daten für den Vergleich der Konzentrationsfelder zwischen Original und Ersatzquader und die Bestimmung der Form der Ersatzquelle zu erhalten.

Ein Vergleich vertikaler Konzentrationsprofile in der Mitte hinter den Gebäuden mit $L/B = 1:1$ und der Höhe 15 m (siehe Abbildung 2.5 links, dargestellt sind die unteren 10 m der Profile) zeigt, unabhängig von der Windrichtung und Quelle, geringe Konzentrationsgradienten in Bodennähe, insbesondere auf den unteren 6 m der Profile. Grund ist die dreidimensionale Umströmung dieser Gebäude mit hoher Durchmischung in den Rezirkulationszonen.

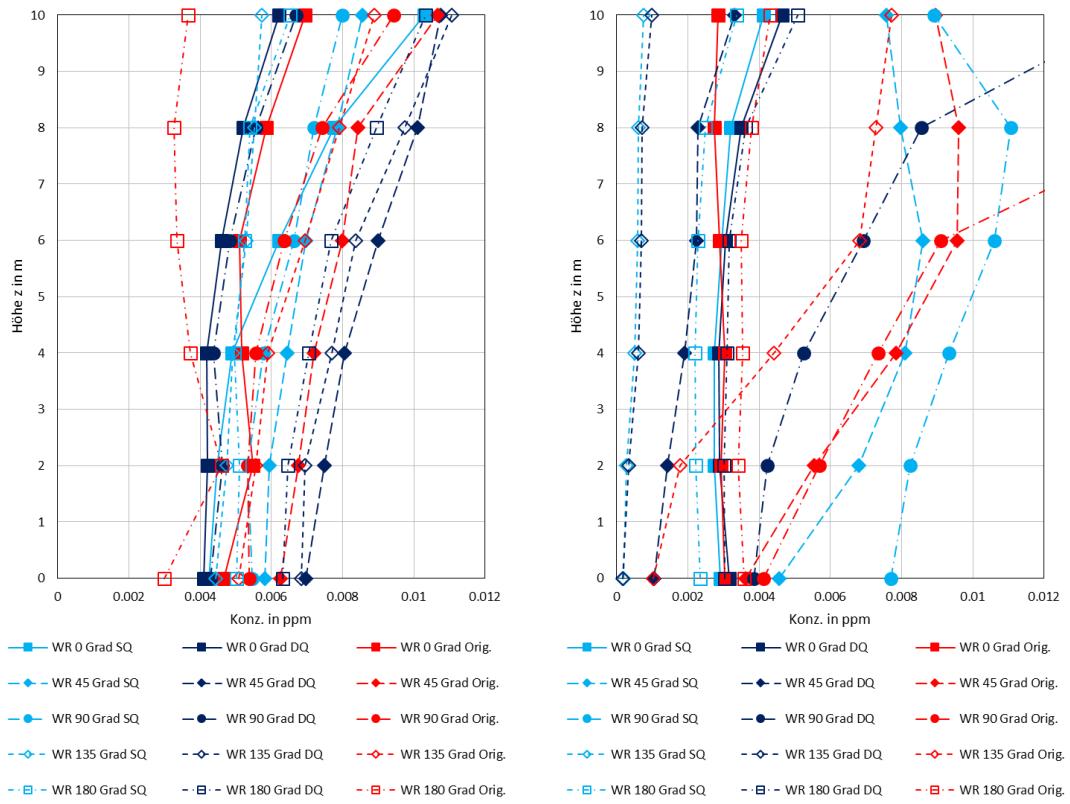


Abb. 2.5: Vertikale Konzentrationsprofile der untersten 10 m Höhe im Abstand $a = 6$ m hinter den Gebäuden bei verschiedenen Windrichtungen. Seitenquelle (SQ), Dachquelle (DQ) und Original mit 45°-Satteldach (Orig.). Links: Gebäude mit $L/B = 1:1$, rechts: $L/B = 1:5$.

Dagegen sind bei Gebäuden mit $L/B = 1:5$ für manche Windrichtungen und Quellen erhebliche Gradienten bis hin zum Boden auszumachen (Abbildung 2.5 rechts). Dies ist nicht allein auf die mit 11 m etwas niedrigere Gebäudehöhe zurückzuführen, sondern vielmehr auf die, je nach Windrichtung, erheblich komplexere Umströmung der Gebäude als im Fall der quadratischen Grundfläche.

Bei den Gebäuden mit $L/B = 1:1$ und $1:2$ wurden daher die Quer- und Längsprofile in der Höhe 6 m aufgenommen, bei $L/B = 1:5$ ergänzende Messungen in 2 m Höhe vorgenommen.

Die höchsten Konzentrationen sind in den Rezirkulationszonen zu erwarten. Die Abstände der Profile von den Gebäuden waren deshalb so zu wählen, dass die Profile die Rezirkulationszonen schneiden. In den Untersuchungen zu den Ersatzquaderhöhen ermittelten Theurer und Gauweiler (2017) für die gewählten Originalgebäude und Ersatzquader mit quadratischen Grundflächen ($L/B = 1:1$) Längen der Rezirkulationszonen von bis zu 20 m. Bei den Gebäuden mit $L/B = 1:1$ und $1:2$ beschränkten sich die Messungen, neben einem Vertikalprofil im Abstand von 6 m hinter den Gebäuden, daher auf ein Querprofil im Abstand von 12 m.

Bei den untersuchten Originalen und Ersatzquadern mit $L/B = 1:5$ reichten die Rezirkulationszonen mit bis zu etwa 45 m Länge (bei Queranströmung unter 0 Grad) erheblich weiter stromab. Die vorgenannten Messprofile wurden hier teilweise durch Querprofile im Abstand von 24 m und Längsprofile entlang der Abstandsachse a ergänzt. In der Abbildung 2.6 ist eine solche Anordnung der Messprofile bei der Windrichtung 45 Grad skizziert.

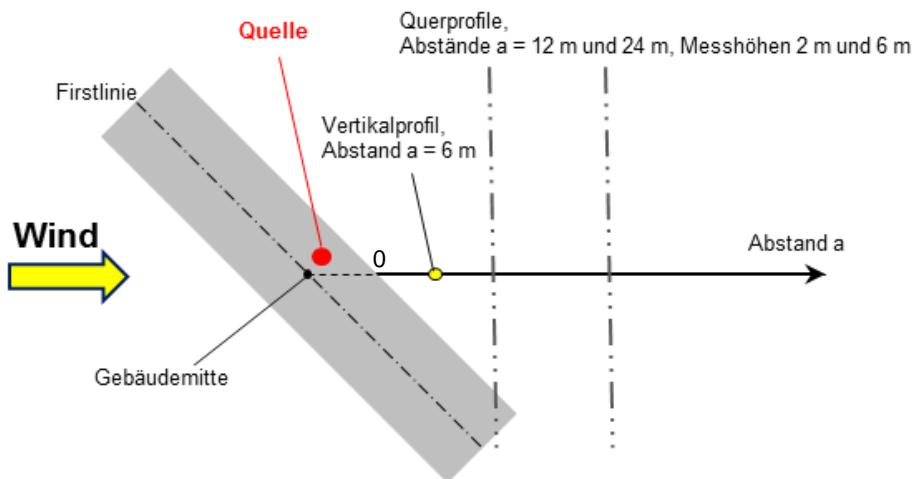


Abb. 2.6: Anordnung der Messprofile (Windrichtung 45 Grad)

3. Voruntersuchungen

3.1 Sichtbarmachung und Messung der Konzentrationen

Nach Abschnitt 1 ist das maßgebliche Kriterium für die Wahl der Ersatzquelle eine möglichst ähnliche Ausbreitung ihrer Freisetzung, verglichen mit der aus der Originalquelle. Dies ist durch einen Vergleich im Windkanal ausgemessener Konzentrationsfelder nachzuweisen.

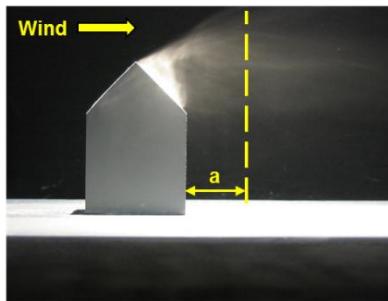
Um die strömungsmechanischen Phänomene bei der Ausbreitung aus den verschiedenen Quellen zu beobachten, wurden vor den quantifizierenden Konzentrationsmessungen mit Ethan und einem Flammionisationsdetektor einige Versuche zur Strömungssichtbarmachung mit Rauch durchgeführt.

Eine solche Sichtbarmachung zeigt die Abbildung 3.1 oben für das 15 m hohe Originalgebäude mit quadratischer Grundfläche ($L/B = 1:1$), einem Satteldach der Neigung 45° und dachbündiger Quelle. Darunter ist die Situation bei der gleichen Windrichtung 0 Grad für einen firsthohen Ersatzquader mit der Quelle an der Seitenwand (Abbildung 3.1 Mitte) und mit der Quelle auf der Dachfläche (Abbildung 3.1 unten) dargestellt. Vertikalprofile gemessener Konzentrationen im Abstand von 6 m hinter den Gebäuden auf einer Linie durch die Gebäudemitte (siehe Abbildung 2.6) ergänzen die Bilder aus der Sichtbarmachung.

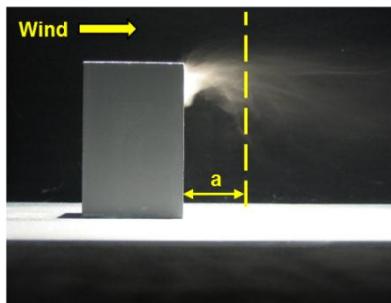
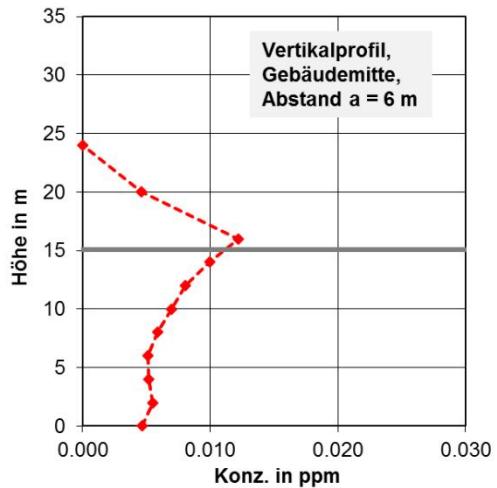
Bei dem Originalgebäude (Abbildung 3.1 oben) löst die Strömung an der Firstlinie ab. Die Emissionen werden bei der dachnahen Freisetzung in die Rezirkulationszone eingemischt, mit einer maximalen Konzentration im Vertikalprofil knapp über der Firsthöhe. Im bodennahen Bereich unterhalb etwa 6 m bleiben, wie im Abschnitt 2.4 beschrieben, die Konzentrationen etwa konstant.

Bei dem Ersatzquader mit der Quelle an der Seitenwand in Lee (Abbildung 3.1 Mitte) wird nur ein geringer Teil der freigesetzten Emission in die Rezirkulationszone auf der Dachfläche transportiert. Sichtbarmachung und Vertikalprofil stimmen hinsichtlich der Lage des Konzentrationsmaximums unterhalb der Höhe des Flachdaches überein. Der Wert des Maximums der Konzentration beträgt etwa das Zweifache des Wertes bei der Originalquelle. Die bodennahen Konzentrationen entsprechen dagegen in etwa denen des Originals, ein Hinweis auf eine sinnvolle Wahl der Höhe des Ersatzquaders.

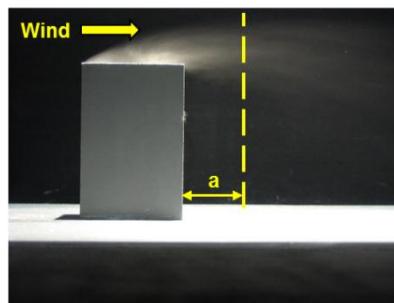
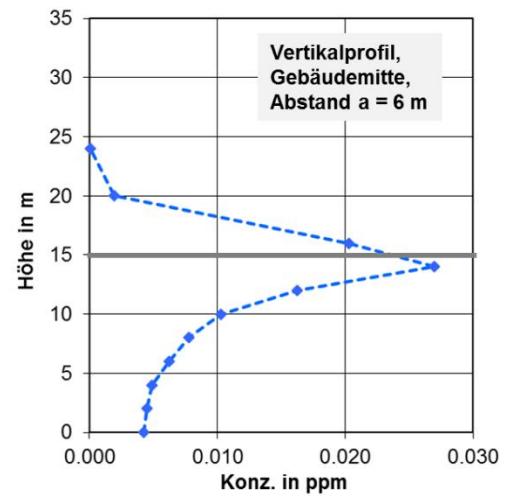
Schließlich zeigt die Abbildung 3.1 unten die Ausbreitung aus einer Ersatzquelle auf dem Flachdach des Ersatzquaders. Aus der Sichtbarmachung ergeben sich zum Original ähnliche Rauchfahnen als bei der Seitenquelle, was die gemessenen Konzentrationen bestätigen. Das Maximum der Konzentration tritt in dem Vertikalprofil, wie bei dem Original, oberhalb der Höhe von 15 m auf und beträgt nur mehr das 1.4-fache des Originalwertes. Die bodennahen Konzentrationen entsprechen wiederum in etwa denen bei der Originalquelle und der Quelle an der Seitenwand.

Sichtbarmachung:**Beispiel:**

Gebäude mit $L/B = 1:1$,
Satteldach 45° ,
Höhe 15 m,
Windrichtung 0 Grad

Konzentrationsmessung:**Beispiel:**

Ersatzquader mit $L/B = 1:1$,
Höhe 15 m,
Windrichtung 0 Grad

**Beispiel:**

Ersatzquader mit $L/B = 1:1$,
Höhe 15 m,
Windrichtung 0 Grad

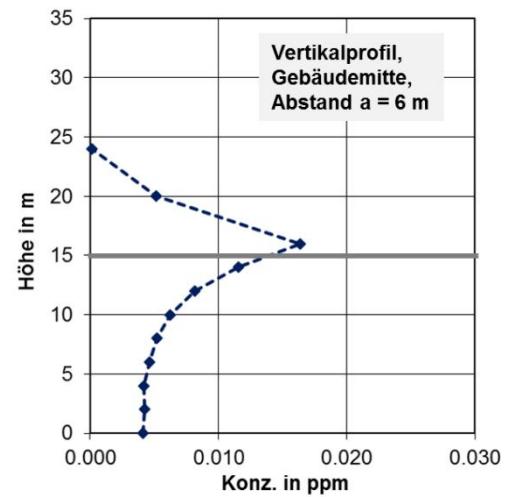


Abb. 3.1: Originalgebäude mit einem 45° -Satteldach und Quelle auf der leeseitigen Dachfläche (oben), Ersatzquader mit Quelle an der Seitenwand (Mitte) und auf der Dachfläche (unten).

Die Bilder der Strömungssichtbarmachung erlauben einen Vergleich mit den in einem Abstand von $a = 6$ m gemessenen Vertikalprofilen. In größeren Abständen wird die Intensität des Rauches zu schwach, um differenzieren zu können. Die Vertikalprofile reichen allerdings für eine abschließende Beurteilung der Ähnlichkeit der Konzentrationsfelder nicht aus, auch wenn Grund zu der Annahme besteht, dass ein gebäudenahes Konzentrationsprofil quasi Randbedingung für den weiteren Ausbreitungsvorgang ist. Wie erwähnt, werden die Vertikalprofile durch weitere Konzentrationsprofile ergänzt.

3.2 Kenngrößen für einen Vergleich der Konzentrationen

Die im Windkanal bei den Originalgebäuden und –quellen gemessenen Konzentrationsprofile und –felder sind denen bei den Näherungen (Ersatzquader mit Dach– oder Seitenquelle) gegenüberzustellen. Für diese Vergleiche ist es unabdingbar, objektive Kriterien zur Beurteilung der Übereinstimmung zu finden.

Aus Vergleichen der Ergebnisse numerischer Modelle mit Messdaten (siehe Chang und Hanna, 2005) sind statistische Kenngrößen, wie die Trefferquote FAC2 und der normierte mittlere quadratische Fehler NMSE (normalized mean square error), zur Beurteilung der Übereinstimmung bekannt.

Die Trefferquote FAC2 eines Konzentrationsprofils oder –feldes ist definiert als der Bruchteil der Daten, die an den betrachteten Aufpunkten der Bedingung

$$0.5 \leq C_{Original} / C_{Quader} \leq 2.0 \quad (3.1)$$

genügen. Dabei beschreibt $C_{Original}$ die an dem jeweiligen Aufpunkt bei dem Original gemessene Konzentration und C_{Quader} die bei den Ersatzquadern mit den verschiedenen Quellen ermittelten Werte. Der Optimalwert der Trefferquote ist $FAC2 = 100\%$.

Der normierte mittlere quadratische Fehler NMSE eines Konzentrationsprofils oder –feldes berücksichtigt die Beträge der Konzentrationen stärker. Er wird beschrieben durch die mittlere quadratische Abweichung zwischen den Originalwerten eines Konzentrationsprofils oder –feldes und ihren Näherungen, geteilt durch das Produkt der mittleren Größen:

$$\overline{(C_{Original} - C_{Quader})^2} / (\overline{C}_{Original} \cdot \overline{C}_{Quader}) \quad (3.2)$$

Geringe absolute Konzentrationsunterschiede, zum Beispiel an den Rändern von Profilen, gehen dadurch weniger stark in den NMSE-Wert ein als höhere Werte. Im Idealfall nimmt der NMSE-Wert den Wert 0 an.

Eine bessere Übereinstimmung der Konzentrationsfelder ergibt sich demnach bei einer höheren Trefferquote FAC2 und einem kleineren NMSE-Wert.

In der Abbildung 3.2 werden links die Aufpunkte der Vertikalprofile aus der Abbildung 3.1 mit dem Originalprofil als Referenz über die gesamte Profilhöhe miteinander verglichen. Für die Seitenquelle ergibt sich eine Trefferquote $FAC2 = 64\%$ und der Wert $NMSE = 0.83$, für die Dachquelle $FAC2 = 91\%$ und $NMSE = 0.06$.

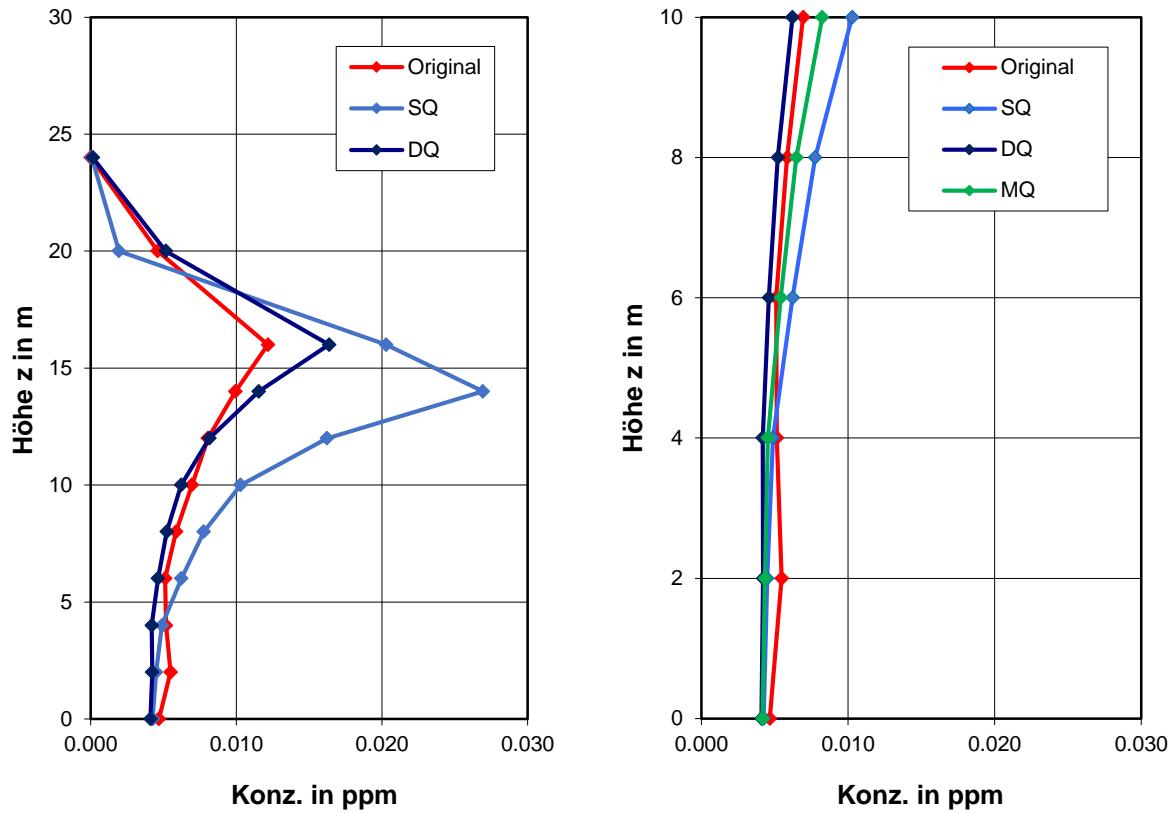


Abb. 3.2: Vertikalprofile der Konzentrationen im Abstand $a = 6$ m hinter dem Gebäude mit $L/B = 1:1$, Original mit 45°-Satteldach, Windrichtung 0 Grad. Gesamtprofil (links): Seitenquelle: FAC2 64%, NMSE 0.83; Dachquelle: FAC2 91%, NMSE 0.06. Bis in 10 m Höhe (rechts): Seitenquelle: FAC2 100%, NMSE 0.09; Dachquelle: FAC2 100%, NMSE 0.03; Mittelung der Quellen (MQ): FAC2 100%, NMSE 0.02.

Damit bestätigt sich der bereits optische Eindruck einer wesentlich besseren Übereinstimmung des Profils der Dachquelle mit dem des Originals als des Profils der Seitenquelle mit dem Original. Bei Betrachtung der Profile über die gesamte Höhe wäre bei dieser Gebäudekonstellation die Dachquelle die bessere Näherung.

In vielen Fällen gilt aber den bodennahen Konzentrationen besonderes Interesse. Werden nur die Aufpunkte bis in eine Höhe von 10 m betrachtet (siehe Abbildung 3.2, rechte Seite), ergeben sich sowohl bei der Seiten—, als auch bei der Dachquelle Trefferquoten von 100%, was eine Differenzierung unmöglich macht.

Der NMSE unterscheidet sich dagegen mit 0.09 für die Seitenquelle, was bereits eine gute Übereinstimmung der Profile bedeutet, und 0.03 für die Dachquelle, eine weitere Verbesserung. Allerdings unterschätzt die Dachquelle tendenziell die Konzentrationen, während die Seitenquelle eher überschätzt.

Die Übereinstimmung erhöht sich nochmals, wenn man den rechnerischen Mittelwert MQ aus den Konzentrationen aufgrund der Seiten- und der Dachquelle bildet. Das gemittelte Profil mit einem NMSE-Wert von 0.02 entspricht ungefähr dem Originalprofil.

Als Beispiel einer schlechten Übereinstimmung der Konzentrationsprofile des Originals (Gebäude mit $L/B = 1:5$ und Satteldach der Neigung 45°) und seiner Näherungen zeigt die Abbildung 3.3 die Vertikalprofile hinter den Gebäuden bei der Windrichtung 135 Grad. Die Quelle befindet sich auf der Luvseite der schräg angestromten Gebäude.

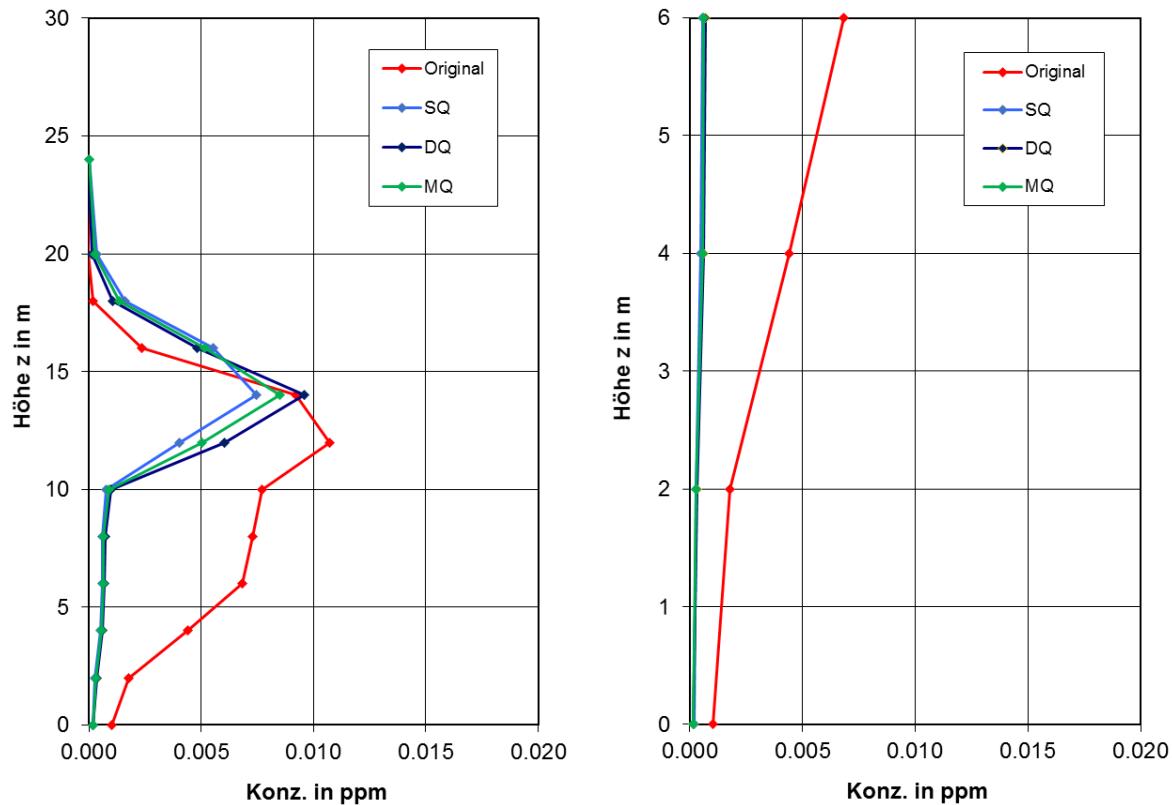


Abb. 3.3: Vertikalprofile der Konzentrationen im Abstand $a = 6$ m hinter dem Gebäude mit $L/B = 1:5$, Original mit 45° -Satteldach, Windrichtung 135 Grad. Gesamtprofil (links): Seitenquelle: FAC2 18%, NMSE 1.6; Dachquelle: FAC2 9%, NMSE 2.2; Mittelung der Quellen: FAC2 9%, NMSE 1.9. Bis in 6 m Höhe (rechts): Seitenquelle: FAC2 0%, NMSE 9.2; Dachquelle: FAC2 0%, NMSE 10.5; Mittelung der Quellen: FAC2 0%, NMSE 9.4.

Betrachtet man das Gesamtprofil in der Abbildung 3.3 links, erreichen die Trefferquoten für die Aufpunkte nur Werte von unter 20%. Die Werte gehen bei den bodennahen Konzentrationen bis in 6 m Traufhöhe (Abbildung 3.3 rechts) zurück auf 0%, da alle mit den Näherungen an den Aufpunkten ermittelten bodennahen Konzentrationen um mehr als den Faktor 2 von denen des Originals abweichen. Offensichtlich geben in diesem Fall im bodennahen Bereich unterhalb der Traufe beide Ersatzquellen die Ausbreitung aus der Originalquelle nur unzureichend wieder.

Die NMSE-Werte verhalten sich analog: Bei Betrachtung des gesamten Profils betragen sie 1.7 für die Seitenquelle, 2.2 für die Dachquelle und 1.9 für die Mittelung. Die Übereinstimmung der Konzentrationen bis in 10 m Höhe ist, wie bei den Trefferquoten, mit entsprechend hohen NMSE-Werten von 9.2 für die Seitenquelle, 10.5 für die Dachquelle, und 9.4 für die Mittelung besonders schlecht. Wegen der stark vom Original abweichenden Konzentrationswerte für beide Näherungen führt auch die Mittelung MQ in diesem Fall zu keinem besseren Ergebnis.

Anhand der beiden Beispiele lässt sich Folgendes feststellen:

- Aufgrund der Trefferquote FAC2 ist es unter Umständen nicht möglich, das Verfahren (Seitenquelle, Dachquelle oder Mittelung) zu bestimmen, welches die am besten mit dem Original übereinstimmenden Werte liefert. Der NMSE-Wert ist dafür offensichtlich geeigneter. Neben einer optischen Kontrolle wird dieser Wert für die Beurteilung der Güte der Übereinstimmung zwischen Original und Näherung herangezogen.
- Eine Mittelung der Konzentrationen aus der Seiten- und Dachquelle an den Aufpunkten führt unter Umständen zu einer besseren Übereinstimmung des Profils mit dem Original als die Profile aufgrund der beiden tatsächlich modellierten Quellen. Die Idee einer Mittelung wird daher weiterverfolgt.

3.3 Mittelung der Ergebnisse der Seiten- und Dachquelle

Die Mittelung der Ergebnisse der Seiten- und der Dachquelle kann auch bei Querprofilen zu einer besseren Übereinstimmung mit dem Original führen, als die Werte der Einzelquellen, wie die Abbildung 3.4 zeigt. Die Querprofile hinter dem Gebäude mit $L/B = 1:2$ und 45°-Satteldach und seinen Ersatzquadern wurden in einem Abstand von 12 m in der Höhe 6 m aufgenommen, die Windrichtung war 45 Grad.

Für die am schlechtesten mit dem Original übereinstimmende Seitenquelle ergibt sich der NMSE-Wert zu 0.26, für die Dachquelle, die das Maximum überschätzt, zu 0.05. Den besten Wert liefert die Mittelung mit 0.03.

Alternativ zu der rechnerischen Mittelung der Ergebnisse der zwei Einzelquellen (Seiten- und Dachquelle) wurde im Windkanal überprüft, ob eine physikalische „Verschmierung“ der beiden Quellen in Form einer Flächenquelle zu einem ähnlichen Effekt führt. Ein Ersatzquader mit $L/B = 1:5$ wurde mit einer Flächenquelle versehen (Abbildung 3.5), die auf den Flächen der Seiten- und Dachquelle und dazwischen durch feine Poren gleichmäßig emittierte. Der Gesamtvolumenstrom aus den Poren der Flächenquelle entsprach dem einer Einzelquelle.

Die Abbildung 3.6 zeigt für die Windrichtung 45 Grad die quellnächsten Querprofile in 6 m Höhe in einem Abstand von 12 m hinter den Gebäuden. Dem Referenzprofil des Originals werden die Profile bei der modellierten Flächenquelle, der Seiten- und der Dachquelle und ihrer rechnerischen Mittelung gegenübergestellt.

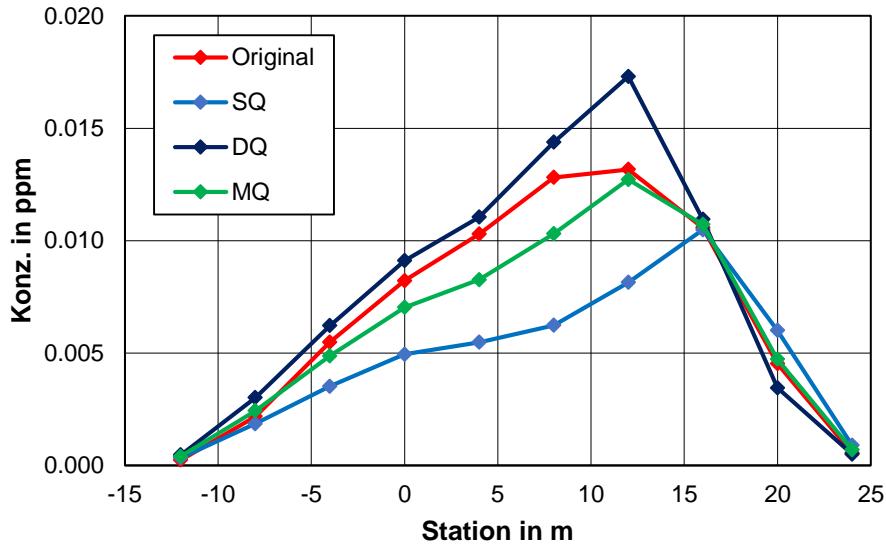


Abb. 3.4: Querprofile der Konzentrationen in der Höhe 6 m und im Abstand $a = 12$ m hinter dem Gebäude mit $L/B = 1:2$, Original mit 45°-Satteldach, Windrichtung 45 Grad. NMSE-Werte: Seitenquelle: 0.26; Dachquelle: 0.05; Mittelung: 0.03.

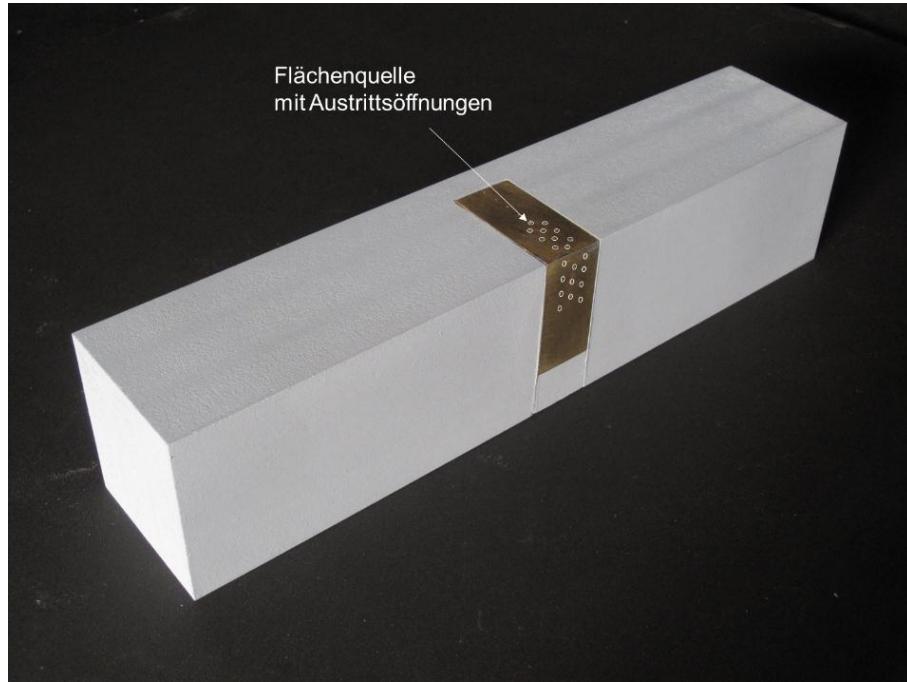


Abb. 3.5: Ersatzquader, $L/B = 1:5$, mit Flächenquelle (FQ), Austrittsöffnungen hervorgehoben.

Die rechnerische Mittelung und die Flächenquelle stimmen gut hinsichtlich des Maximalwertes mit dem Original überein. Allerdings fallen die Konzentrationen bei der Flächenquelle zur rechten Seite des Querprofils hin stärker ab. Dies führt zu einem etwas höheren NMSE-Wert von 0.39 bei der Flächenquelle gegenüber der rechnerischen Mittelung (NMSE 0.10).

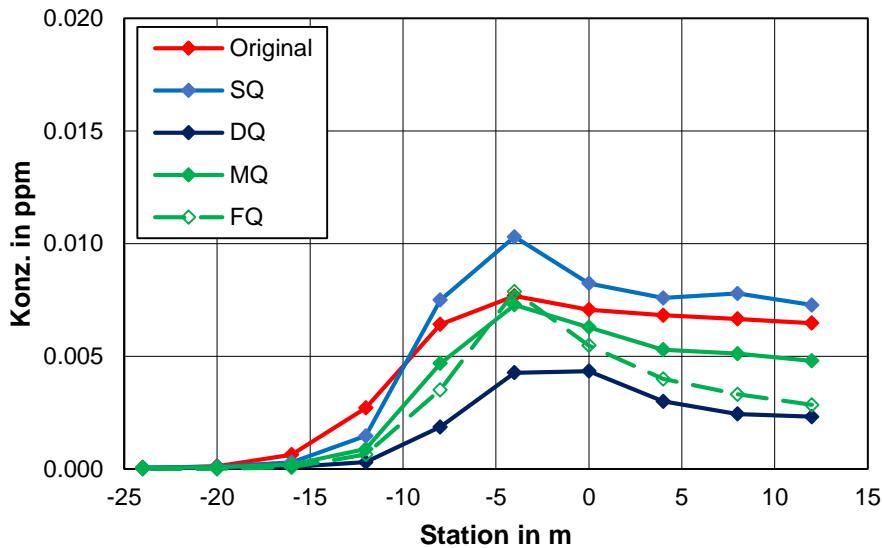


Abb. 3.6: Querprofile der Konzentrationen in der Höhe 6 m im Abstand $a = 12$ m hinter dem Gebäude mit $L/B = 1:5$, Original mit 45° -Satteldach, Windrichtung 45 Grad. NMSE-Werte: Mittelung MQ 0.10; Flächenquelle FQ: 0.39.

Die NMSE-Werte für das betrachtete Gebäude und die rechnerische Mittelung bzw. die modellierten Flächenquellen sind in der Tabelle 3.1 und der Abbildung 3.7 auch für die übrigen untersuchten Windrichtungen zusammen gestellt.

Tabelle 3.1: NMSE-Werte für das Gebäude mit $L/B = 1:5$, Original mit 45° -Satteldach, Querprofil in 6 m Höhe und 12 m Abstand hinter dem Gebäude.

Windrichtung in Grad	Rechnerische Mittelung MQ	Modellierte Flächenquelle FQ
0	0.11	0.11
45	0.10	0.39
90	0.28	0.38
135	2.5	2.7
180	0.07	0.10

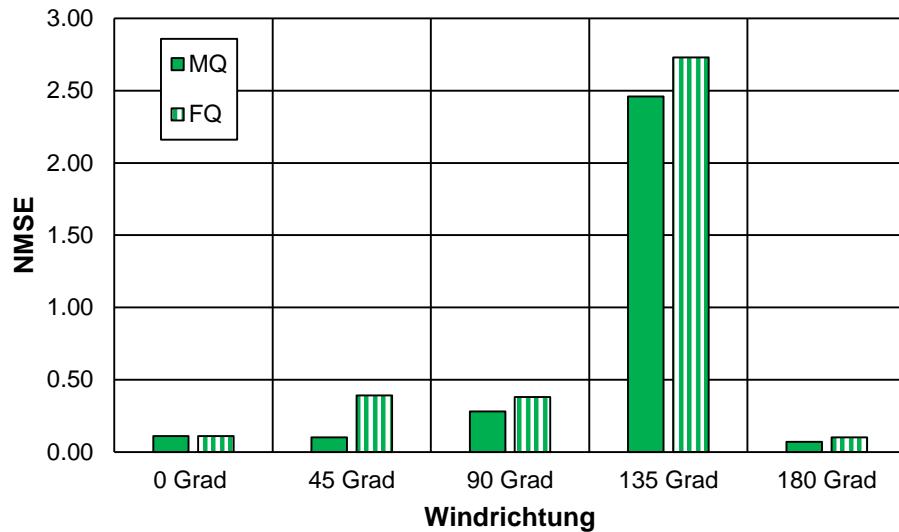


Abb. 3.7: NMSE-Werte der rechnerischen Mittelungen MQ im Vergleich zu denen der Flächenquelle FQ und verschiedenen Windrichtungen. Querprofile der Konzentrationen in der Höhe 6 m im Abstand $a = 12$ m hinter dem Gebäude mit $L/B = 1:5$, Original mit 45° -Satteldach.

Nach der Tabelle 3.1 und der Abbildung 3.7 liefern die modellierten Flächenquellen FQ etwas höhere, aber tendenziell ähnliche NMSE-Werte, verglichen mit der rechnerischen Mittelung MQ. Die größte Abweichung tritt bei dem in Abbildung 3.6 gezeigten Beispiel der Windrichtung 45 Grad auf. Bei anderen Windrichtungen sind die Unterschiede geringer und liegen innerhalb der Genauigkeit des Beurteilungsverfahrens (siehe Anhang A5.3). Im Vergleich mit den Seiten- und Dachquellen zeigte sich, dass die Unterschiede zwischen den modellierten Flächenquellen und der rechnerischen Mittelung keinen wesentlichen Einfluss darauf haben, welche Ersatzquelle als optimale Näherung für das Original zu bevorzugen ist. Daher wurde auf eine weitere Modellierung von Flächenquellen verzichtet und die Betrachtung auf die rechnerische Mittelung beschränkt.

3.4 Überprüfung anderer dachnaher Quellen

Die bisherigen Ausführungen bezogen sich auf Quellen bündig zur Dachoberfläche. Wie bereits in Abschnitt 2.3 beschrieben, umfasst die Definition der dachnahen Quelle aber auch andere Quellen oberhalb der Dachfläche, die sich innerhalb der Rezirkulationszone auf dem Dach befinden. Für das Gebäude mit $L/B = 1:5$ und dem 45° -Satteldach wurden daher neben den dachbündigten Quellen auch die in der Abbildung 2.2 dargestellten halb- und firsthohen Quellen bei den Windrichtungen 0 Grad, 45 Grad und 135 Grad betrachtet.

Tabelle 3.2 vergleicht die NMSE-Werte der Seiten- und der Dachquelle und ihrer rechnerischen Mittelung für die drei Quellen (dachbündig, halb— und firsthoch)⁴ an dem quellnächsten Querprofil in 6 m Höhe in einem Abstand von 12 m von den Gebäuden.

Tabelle 3.2: NMSE-Werte für verschiedene dachnahe Originalquellen auf dem Gebäude mit $L/B = 1:5$, Original mit 45°-Satteldach, Querprofile in 6 m Höhe in einem Abstand von 12 m hinter der dem Gebäude.

Originalquelle	Seitenquelle SQ				Dachquelle DQ				Rechnerische Mittelung MQ			
	Windrichtung in Grad	0	45	135	alle	0	45	135	alle	0	45	135
dachbündig ⁵	0.09	0.08	2.6	0.46	0.10	1.0	1.9	0.89	0.09	0.08	2.2	0.47
halbhoch	0.13	0.04	2.0	0.29	0.12	1.3	1.2	0.85	0.12	0.14	1.6	0.35
firsthoch	0.27	0.05	1.9	0.31	0.24	1.6	1.2	0.97	0.26	0.23	1.5	0.42

Fett: NMSE-Werte bei Betrachtung der Konzentrationsdaten aller drei Windrichtungen

Zunächst wurden die NMSE-Werte separat aus den bei den jeweiligen Windrichtungen gemessenen Konzentrationen ermittelt. Für die Bestimmung der NMSE-Werte in den Spalten „alle“ wurden dann die über alle drei Windrichtungen gemessenen Konzentrationswerte gemeinsam betrachtet. In der Abbildung 3.8 sind diese NMSE-Werte für die drei verschiedenen dachnahen Originalquellen dargestellt.

Bei den untersuchten Gebäuden mit $L/B = 1:5$ führt, unabhängig von der Originalquelle, die Seitenquelle zu einer besseren Übereinstimmung der Konzentrationen als die Dachquelle. Die Mittelung liefert NMSE-Werte in der Größenordnung der Seitenquelle.

3.5 Schlüsse aus den Voruntersuchungen

Die Strömungssichtbarmachungen in den Voruntersuchungen zeigten die Unterschiede bei der Ausbreitung der Fahnen aus den Original- und den Ersatzquellen auf. Allerdings war ein rein visueller Vergleich der Fahnen zur Beurteilung der besseren Übereinstimmung der Konzentrationsfelder und Wahl der Ersatzquelle nicht ausreichend. Daher wurden Konzentrationsmessungen für die Original- und die Ersatzquellen durchgeführt und verglichen. Mit den NMSE-Werten wurde ein Verfahren gefunden, das es erlaubt, die Übereinstimmung zwischen den Konzentrationsfeldern der Quellen objektiv zu bewerten.

⁴ Als halbhöhe Quelle wird hier eine Quelle bezeichnet, die weder auf der Dachfläche (dachbündig) noch auf Firsthöhe(firsthoch) freisetzt, sondern dazwischen.

⁵ Bei der Überprüfung der anderen dachnahen Quellen wurden die Querprofile für die dachbündige Quelle erneut mit vermessen (siehe auch Abschnitt A5.3 zum Einfluss der Reproduzierbarkeit der Konzentrationswerte auf das Beurteilungsverfahren), allerdings nur für die Windrichtungen 0, 45 und 135 Grad. Die NMSE-Werte dieser Quelle in der Tabelle 3.2 weichen daher von denen für das Querprofil Q3 in der Tabelle 4.5 geringfügig ab.

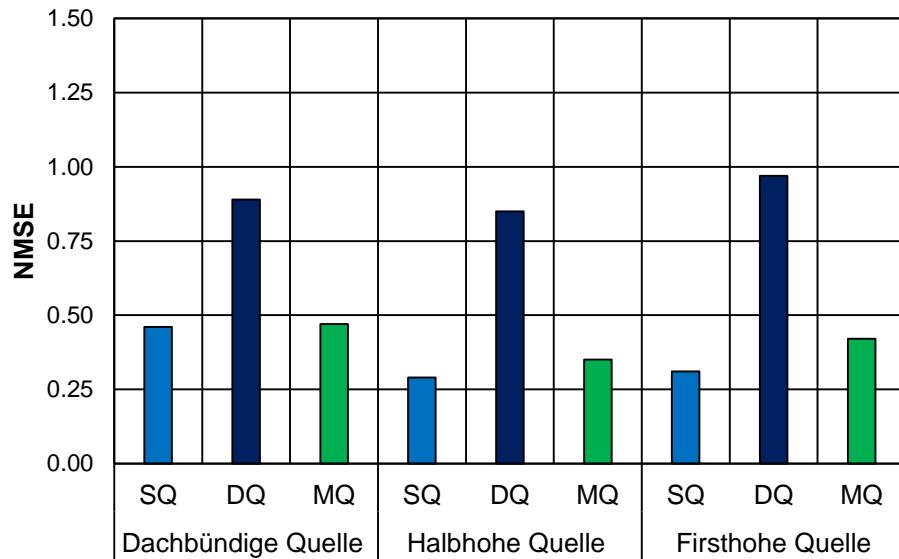


Abb. 3.8: NMSE-Werte bei Betrachtung der Konzentrationsdaten der drei Windrichtungen 0 Grad, 45 Grad und 135 Grad für die bei verschiedenen dachnahen Originalquellen gemessenen Querprofile in der Höhe 6 m im Abstand $a = 12$ m hinter dem Gebäude mit $L/B = 1:5$, Original mit 45° -Satteldach.

Bestimmt wurden jeweils die Ergebnisse für die Seiten- und die Dachquelle. Die Mittelung der Ergebnisse dieser beiden Ersatzquellen lieferte in zahlreichen Fällen eine vergleichbar gute Übereinstimmung mit der Originalquelle wie die jeweils bessere der beiden Ersatzquellen. Die Wirkung der Mittelung entspricht dabei der einer „Verschmierung“ der Ersatzquelle zwischen den Orten der Dach- und Seitenquelle, wie die physikalische Modellierung einer solchen Quelle im Windkanal aufzeigte. Ob die Mittelung auch bei anderen Gebäudetypen und Windrichtungen ein allgemein geeignetes Verfahren darstellt, zeigen die Ergebnisse der Vergleiche im nächsten Kapitel.

Ergänzend wurden im Rahmen der Voruntersuchungen mit einer halb- und einer firsthohen Quelle auch andere als dachbündige Originalquellen betrachtet. Alle Quellen emittierten innerhalb der Rezirkulationszone des Originalgebäudes.

Die Übereinstimmung der jeweiligen Konzentrationsfelder der Ersatzquellen mit dem Original war nur wenig von der Position der dachnahen Originalquelle innerhalb der Rezirkulationszone abhängig. Die rechnerische Mittelung führte auch hier zu einer ähnlich hohen Übereinstimmung wie die jeweils günstigere der beiden Ersatzquellen.

4. Ergebnisse

4.1 Abhängigkeit vom Gebäudetyp

Zur Beurteilung, welche der Quellvarianten (Seitenquelle, Dachquelle oder die rechnerische Mittelung) eine bessere Näherung an die Originale darstellt, werden zunächst für die verschiedenen Gebäudetypen die durch die NMSE-Werte beschriebenen Abweichungen zwischen den Konzentrationen bei den Originalgebäuden mit dachbündigen Originalquellen und ihrem Ersatz näher erläutert.

Gebäude mit quadratischer Grundfläche ($L/B = 1:1$)

Bei den Gebäuden mit quadratischer Grundfläche ($L/B = 1:1$) und den Dachneigungen 20° , 30° und 45° werden zunächst die NMSE-Werte der Querprofile in 6 m Höhe im Abstand $a = 12$ m hinter den Gebäuden bei den Windrichtungen 0 Grad, 45 Grad und 135 Grad betrachtet (Tabelle 4.1 bzw. Abbildung 4.1). Die Werte in der untersten Zeile der Tabelle 4.1 wurden ermittelt, indem die NMSE-Werte aus jeweils allen für eine Quelle zusammengefassten Daten, unabhängig von der Dachneigung und Windrichtung, gebildet wurden.

Tabelle 4.1: NMSE-Werte für Gebäude mit quadratischer Grundfläche ($L/B = 1:1$). Querprofile in 6 m Höhe im Abstand $a = 12$ m hinter den Gebäuden, Windrichtungen 0 Grad, 45 Grad und 135 Grad.

Dachneigung	Seitenquelle SQ	Dachquelle DQ	Rechnerische Mittelung MQ
20°	0.57	0.28	0.30
30°	0.37	0.07	0.15
45°	0.09	0.17	0.08
alle	0.60	0.25	0.30

Nach Tabelle 4.1 und der Abbildung 4.1 führen bei den Dächern der Neigung 20° oder 30° die Dachquelle oder die Mittelung der Ergebnisse der Dach- und Seitenquelle zu deutlich niedrigeren NMSE-Werten als die Seitenquelle. Bei dem Gebäude mit der Dachneigung 45° und 10 m Traufhöhe sind die NMSE-Werte aller, in 6 m Höhe aufgenommener, Profile gering. Die gute Durchmischung hinter dem Gebäude (siehe Abschnitt 2.4) führt hier zu einer Angleichung aller Ersatzquellen an das Original.

Vertikalprofile im Abstand $a = 6$ m hinter dem Gebäude mit der Dachneigung 45° bei den genannten Windrichtungen und zusätzlich bei 90 Grad und 180 Grad bestätigen dies. In der Tabelle 4.2 sind die NMSE-Werte für die Daten dieser Profile, jeweils zusammengefasst über alle 5 untersuchten Windrichtungen, aufgetragen.

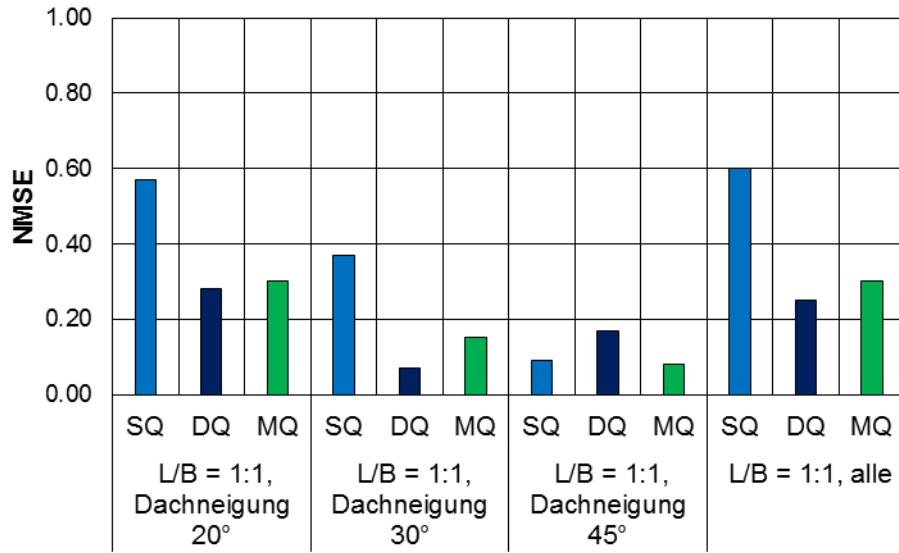


Abb. 4.1: NMSE-Werte für Gebäude mit quadratischer Grundfläche ($L/B = 1:1$) und verschiedene Dachneigungen. Querprofile in 6 m Höhe im Abstand $a = 12$ m hinter den Gebäuden, Windrichtungen 0 Grad, 45 Grad und 135 Grad.

Tabelle 4.2: NMSE-Werte für das Gebäude mit quadratischer Grundfläche ($L/B = 1:1$), Original mit einem 45°-Satteldach. Vertikalprofile im Abstand $a = 6$ m hinter dem Gebäude, Windrichtungen 0 Grad, 45 Grad, 90 Grad, 135 Grad und 180 Grad.

	Seitenquelle SQ	Dachquelle DQ	Rechnerische Mittelung MQ
Vertikalprofil, $a = 6$ m Messhöhe 0 - 10 m	0.06	0.13	0.06
Vertikalprofil, $a = 6$ m Messhöhe 0 – 24 m	0.47	0.28	0.28

Werden nur die unteren 10 m der Vertikalprofile bis zur Traufhöhe betrachtet, sind die NMSE-Werte ähnlich zu denen in Tabelle 4.1 und die Unterschiede der Ersatzquellen zum Original gering. Werden dagegen die gesamten Vertikalprofile bis zur 1,6-fachen Gebäudehöhe von 24 m verglichen, weisen, wie bei den übrigen Dachneigungen, die Ergebnisse der Dachquelle und die Mittelung geringere Unterschiede zum Original auf.

Insgesamt gesehen sind damit bei den Gebäuden mit einer quadratischen Grundfläche die Dachquelle bzw. die Mittelung der Ergebnisse aus Seiten- und Dachquelle die besseren Näherungen für eine dachnahe Quelle.

Gebäude mit $L/B = 1:2$

Bei diesem Gebäude mit einer Höhe von 11 m wurde nur ein Satteldach mit einer Neigung von 45° und einer Traufhöhe von 6 m unter den Windrichtungen 0 Grad, 45 Grad, 90 Grad, 135 Grad und 180 Grad untersucht.

Nach der Tabelle 4.3 ergeben sich, zusammengefasst über die verschiedenen Windrichtungen, auch bei diesem Gebäude bei der Dachquelle und der Mittelung der Daten aus Dach- und Seitenquelle deutlich niedrigere NMSE-Werte als bei der Seitenquelle.

Dies gilt sowohl für die Querprofile in 6 m Höhe und einem Abstand $a = 12$ m hinter dem Gebäude, als auch für die Vertikalprofile im Abstand 6 m. Betrachtet man in den Vertikalprofilen nur Aufpunkte vom Boden bis zur Traufe in 6 m Höhe, gehen die NMSE-Werte gegenüber dem Gesamtprofil, analog zu den Gebäuden mit quadratischer Grundfläche, zurück. Allerdings verbleiben die Werte, vor allem bei der Seitenquelle, auf etwas höherem Niveau als bei $L/B = 1:1$, da sich der Einfluss der zunehmenden Gebäudelänge auf die Umströmung bemerkbar macht.

Tabelle 4.3: NMSE-Werte für das Gebäude mit $L/B = 1:2$ und einem 45° -Satteldach. Querprofile in 6 m Höhe und einem Abstand $a = 12$ m sowie Vertikalprofile im Abstand $a = 6$ m hinter dem Gebäude, Windrichtungen 0 Grad, 45 Grad, 90 Grad, 135 Grad und 180 Grad.

	Seitenquelle SQ	Dachquelle DQ	Rechnerische Mittelung MQ
Querprofil, $a = 12$ m, Messhöhe 6 m	0.27	0.11	0.10
Vertikalprofil, $a = 6$ m, Messhöhe 0 – 6 m	0.30	0.14	0.17
Vertikalprofil, $a = 6$ m, Messhöhe 0 – 24 m	0.82	0.29	0.41

Gebäude mit $L/B = 1:5$

Wie bei den Gebäuden mit quadratischer Grundfläche ($L/B = 1:1$) werden auch bei den Gebäuden mit $L/B = 1:5$ und den Dachneigungen 20° , 30° und 45° zunächst die NMSE-Werte der Querprofile in 6 m Höhe im Abstand $a = 12$ m hinter den Gebäuden bei den Windrichtungen 0 Grad, 45 Grad und 135 Grad betrachtet (Tabelle 4.4 bzw. Abbildung 4.2).

Tabelle 4.4: NMSE-Werte für Gebäude mit $L/B = 1:5$. Querprofile in 6 m Höhe im Abstand $a = 12$ m hinter den Gebäuden, Windrichtungen 0 Grad, 45 Grad und 135 Grad.

Dachneigung	Seitenquelle SQ	Dachquelle DQ	Rechnerische Mittelung MQ
20°	0.29	1.03	0.51
30°	0.29	0.63	0.36
45°	0.50	1.03	0.54
alle	0.34	0.92	0.48

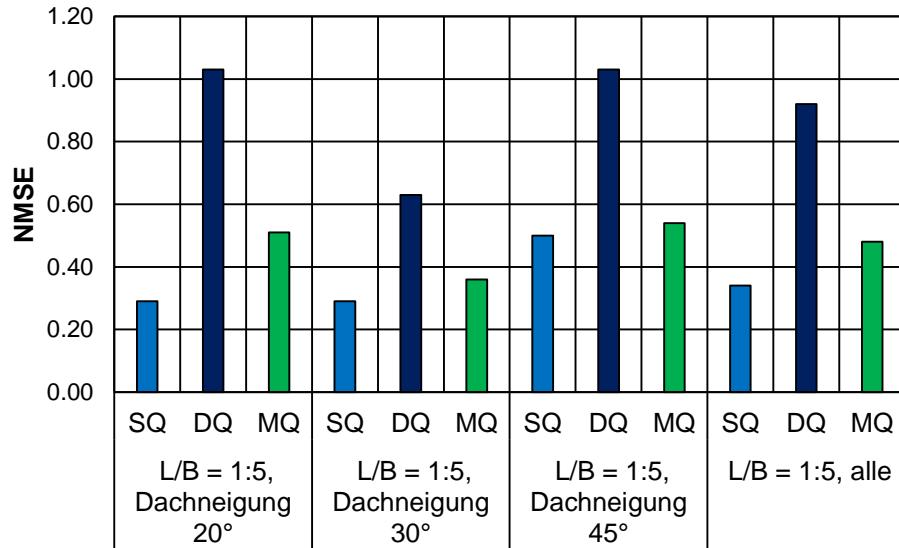


Abb. 4.2: NMSE-Werte für Gebäude mit $L/B = 1:5$ und verschiedene Dachneigungen. Querprofile in 6 m Höhe im Abstand $a = 12$ m hinter den Gebäuden, Windrichtungen 0 Grad, 45 Grad und 135 Grad.

Die in der Abbildung 4.2 rechts dargestellten Werte „alle“ der untersten Zeile der Tabelle 4.4 wurden ermittelt, indem die NMSE-Werte aus jeweils allen Konzentrationsdaten einer Quelle, unabhängig von der Dachneigung und Windrichtung, gebildet wurden.

Im Gegensatz zu den bisher betrachteten Gebäuden liefern bei dem Gebäude mit $L/B = 1:5$, bezogen auf die genannten Profile, die Seitenquelle und die Mittelung aus Seiten- und Dachquelle niedrigere NMSE-Werte bzw. eine deutlich bessere Übereinstimmung der Konzentrationsfelder mit dem Original als die Dachquelle.

Ob dies auch für Profile in anderen Messhöhen und Abständen (siehe Abbildung 2.6) zutrifft, wurde anhand des Gebäudes mit $L/B = 1:5$ und Satteldach mit 45° Neigung überprüft. Mit aufgenommen werden hierbei zusätzlich zu den Windrichtungen 0 Grad, 45 Grad und 135 Grad die beiden Richtungen 90 Grad und 180 Grad.

In der Tabelle 4.5 sind die NMSE-Werte aus den jeweils für die 5 Windrichtungen zusammengefassten Daten der Querprofile in verschiedenen Höhen und Abständen, sowie der Vertikalprofile im Abstand $a = 6$ m hinter dem Gebäude mit $L/B = 1:5$ und einem Satteldach der Neigung 45 Grad aufgetragen.

Auch über alle Querprofile zusammengefasst betrachtet (die in der Tabelle hervorgehobene Zeile „Alle Querprofile“), liefert die Seitenquelle eine gerüfügig bessere Übereinstimmung mit dem Original als die Dachquelle. Wie bereits aus Tabelle 4.4 zu sehen war, gilt dies insbesondere für das quellnächste Profil Q3 mit dem höchsten NMSE-Wert bei der Dachquelle. Die rechnerische Mittelung der Ergebnisse bei der Seiten- und der Dachquelle liefert bei allen Querprofilen die niedrigsten NMSE-Werte.

Tabelle 4.5: NMSE-Werte für das Original mit $L/B = 1:5$ und einem 45° -Satteldach. Quer-, Vertikal- und Längsprofile hinter dem Gebäude, Windrichtungen 0 Grad, 45 Grad, 90 Grad, 135 Grad und 180 Grad.

	Seitenquelle SQ	Dachquelle DQ	Rechnerische Mittelung MQ
Querprofil Q1, Höhe 2 m, $a = 12$ m	0.59	0.51	0.30
Querprofil Q2, Höhe 2 m, $a = 24$ m	0.30	0.15	0.13
Querprofil Q3, Höhe 6 m, $a = 12$ m	0.40	0.78	0.39
Querprofil Q4, Höhe 6 m, $a = 24$ m	0.20	0.16	0.15
Alle Querprofile	0.39	0.44	0.26
Vertikalprofil, $a = 6$ m, Messhöhe 0 – 6 m	0.23	0.73	0.28
Vertikalprofil, $a = 6$ m, Messhöhe 0 – 24 m	0.87	0.81	0.73
Längsprofil, $a = 6 – 42$ m Messhöhe 6 m	0.24	0.53	0.29

Auch bei den Vertikalprofilen liefern in Bodennähe die Seitenquelle und die rechnerische Mittelung niedrigere NMSE-Werte als die Dachquelle. Betrachtet über die gesamte Messhöhe, sind die Verhältnisse ausgeglichener. Tendenziell sind die NMSE-Werte der Vertikalprofile in Bodennähe aber höher als bei den Gebäuden mit $L/B = 1:1$ und $1:2$. Dies kann als Indiz für die zunehmend komplexer werdenden Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse um die Gebäude mit wachsendem L/B -Verhältnis gesehen werden, wodurch die Originale schwieriger durch die Ersatzquader und –quellen nachzubilden sind.

Aufgrund der Ausdehnung der Rezirkulationszonen hinter dem Gebäude mit $L/B = 1:5$ wurde, ergänzend zu den Quer- und Vertikalprofilen, ein Längsprofil in 6 m Höhe hinter dem Gebäude entlang der Achse in Strömungsrichtung durch die Gebäudemitte aufgenommen. Auch wenn die Messachse bei den Schräganströmungen von der Fahnenachse abweicht, so zeigen die NMSE-Werte in der untersten Zeile der Tabelle 4.5 aus dem Vergleich der Konzentrationen über alle Windrichtungen, dass auch hier die Seitenquelle und die rechnerische Mittelung besser mit dem Original übereinstimmen als die Dachquelle.

Insgesamt betrachtet gilt auch für Gebäude mit $L/B = 1:5$, dass eine Mittelung der Ergebnisse der Seiten- und der Dachquelle zu einer besseren, oder zumindest vergleichbar guten, Übereinstimmung der Konzentrationen mit denen des Originals führt als die Einzelquellen.

4.2 Abhängigkeit von der Windrichtung

Der Einfluss verschiedener Windrichtungen war bei dem Gebäude mit $L/B = 1:5$ am deutlichsten auszumachen: Bei Windrichtungen senkrecht oder parallel zum First (0 Grad, 90 Grad und 180 Grad) nahmen die Konzentrationen entlang der Achse hinter den Gebäudemitten mit zunehmendem Abstand kontinuierlich ab, während sie bei schrägen Anströmungen unter 45 und 135 Grad über einen weiten Bereich auf niedrigerem Niveau etwa konstant blieben. Dies hängt mit den unterschiedlichen Strömungs- und Turbulenzmustern in der Rezirkulationszone bei verschiedenen Anströmrichtungen zusammen.

In der Tabelle 4.6 und der Abbildung 4.3 sind die NMSE-Werte für den Gebäudetyp mit dem Satteldach der Neigung 45° bei verschiedenen Windrichtungen dargestellt. Die Konzentrationsdaten der beiden quellnächsten Profile (Querprofil in der Höhe 6 m im Abstand $a = 12$ m und Vertikalprofil im Abstand 6 m) wurden dabei für die drei betrachteten L/B -Verhältnisse zusammengefasst. Die niedrigsten NMSE-Werte bzw. besten Übereinstimmungen der Konzentrationen zwischen Original und Näherung ergeben sich bei einer Schräganströmung unter der Windrichtung 45 Grad, gefolgt von der Windrichtung 0 Grad. In beiden Fällen befindet sich die Quelle auf der Leeseite direkt in der Rezirkulationszone der Gebäude.

Tabelle 4.6: NMSE-Werte, zusammengefasst für Gebäude mit unterschiedlichen L/B -Verhältnissen und einem 45° -Satteldach. Daten aus dem Querprofil in Höhe 6 m und im Abstand $a = 12$ m hinter dem Gebäude und dem Vertikalprofil im Abstand $a = 6$ m.

Windrichtung in Grad	Seitenquelle SQ	Dachquelle DQ	Rechnerische Mittelung MQ
0	0.60	0.36	0.39
45	0.29	0.25	0.12
90	0.83	0.46	0.48
135	1.14	0.50	0.71
180	0.71	0.54	0.56

Die schlechteste Übereinstimmung der Ergebnisse findet sich für die Seitenquelle und die Mittelung bei einer Schräganströmung unter 135 Grad und der Quelle in Luv. Auch bei der Dachquelle ergeben sich bei der Quelle in Luv schlechtere Werte. Bei diesen Konfigurationen spielt der Transport der noch weitgehend unverdünnten Freisetzung um die Gebäude herum die entscheidende Rolle.

Aus der Tabelle 4.6 und der Abbildung 4.3 erkennt man aber erneut, dass die Mittelung der Ergebnisse der Seiten- und Dachquelle, mit Ausnahme bei der Windrichtung 135 Grad, eine etwa gleich gute Übereinstimmung der Konzentrationen zwischen Näherung und Original liefert, wie die jeweils bessere einzelne Ersatzquelle.

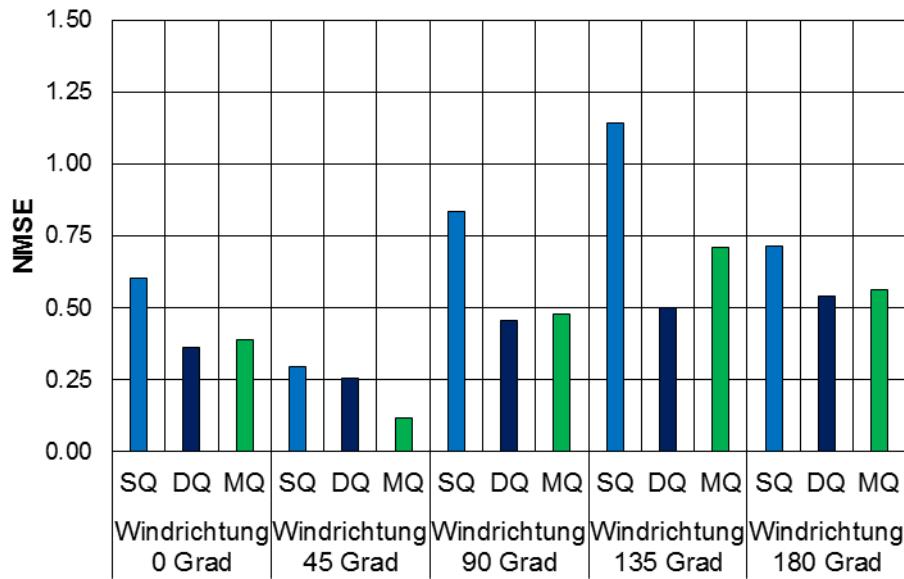


Abb. 4.3: NMSE-Werte für Gebäude mit einem 45°-Satteldach und unterschiedlichen L/B – Verhältnissen. Zusammengefasste Daten aus dem Querprofil in der Höhe 6 m und im Abstand $a = 12$ m hinter dem Gebäude und dem Vertikalprofil im Abstand $a = 6$ m.

5. Empfehlung und Hinweise für die modelltechnische Umsetzung

Aus den Untersuchungsergebnissen lassen sich bei den Gebäuden mit eher quadratischer Grundfläche Vorteile für eine Dachquelle als Ersatzquelle, und bei den eher gestreckten Gebäuden Vorteile für die Seitenquelle erkennen. In zahlreichen Fällen, unabhängig von den Gebäudetypen und Windrichtungen, liefert allerdings die rechnerische Mittelung zwischen den Ergebnissen der Seiten- und der Dachquelle eine bessere, oder nur unwesentlich schlechtere, Übereinstimmung der Konzentrationen mit dem Original, als die jeweils günstigere Einzelquelle.

Unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse für alle Gebäudetypen, Windrichtungen und Originalquellen ergab sich als beste Näherung an die Originalquellen im allgemeinen Fall die Mittelung der Ergebnisse der Seiten- und der Dachquelle.

5.1 Überprüfung der Empfehlung an Beispielen

Bei Genehmigungsverfahren, zum Beispiel nach der TA Luft, interessieren besonders die über einen Zeitraum gemittelten Immissionen (z. B. Jahresmittelwert), bei denen, neben den Konzentrationen für einzelne Windrichtungen, auch die Windstatistik eine Rolle spielt.

Für zwei Beispiele, ein Gebäude mit einer quadratischen Grundfläche und ein Gebäude mit $L/B = 1:5$, beide mit einem Satteldach der Neigung 45° , werden die bodennahen Immissionen an verschiedenen Aufpunkten aufgrund der Ergebnisse für die Originalquellen, die Seiten- und Dachquellen und der Mittelung miteinander verglichen. Dabei wird von einem konstanten Emissionsstrom der Quellen und einer für die verschiedenen Windrichtungen gleichen Windgeschwindigkeit in Quellhöhe in der Anströmung ausgegangen. Weiter wird eine Gleichverteilung der Häufigkeit der Windrichtungen über 360 Grad angenommen.

Für diese ortsunabhängige, vereinfachende Windstatistik betrachtet werden die bodennahen Konzentrationen in 2 m Messhöhe (an Stelle der Aufpunkthöhe 1.5 m nach den Vorgaben in Anhang 3 der TA Luft (2002)) in den gebäudenahen Vertikalprofilen im Abstand $a = 6$ m und die Konzentrationsmaxima in den weiter entfernten Querprofilen, unabhängig vom Ort des Auftretens im Profil.

Aus Symmetriegründen werden die Ergebnisse der Windrichtungen 45 Grad, 90 Grad und 135 Grad für die Richtungen 315 Grad, 270 Grad und 225 Grad verwendet.

Gebäude mit quadratischer Grundfläche ($L/B = 1:1$)

Für das Gebäude mit quadratischer Grundfläche sind die aus den bodennahen Konzentrationen bei der Seiten- und der Dachquelle, der Mittelung und der Originalquelle berechneten Gesamtimmissionen in den Tabellen 5.1 und 5.2 zusammen gestellt. In Tabelle 5.1 sind die Ergebnisse für die Messhöhe 2 m aus dem Vertikalprofil im Abstand $a = 6$ m aufgeführt. Da die Gradienten in Bodennähe gering sind, werden in der Tabelle 5.2 für die Konzentrationsmaxima aus den Querprofilen im Abstand 12 m die Werte der Messhöhe 6 m statt 2 m verwendet.

Während die Ersatzquelle an der Seitenwand in Tabelle 5.1 bei Berücksichtigung der Windstatistik niedrigere Immissionswerte als die Originalquelle liefert, stellen sich bei der Dachquelle höhere Werte ein. Die beste Übereinstimmung liefert die Mittelung der Quellen. Bei den Maxima in weiterer Entfernung in Tabelle 5.2 überschätzen alle Ersatzverfahren geringfügig.

Tabelle 5.1: Immissionen bei Berücksichtigung einer Windstatistik, Gebäude mit $L/B = 1:1$, Vertikalprofile im Abstand $a = 6$ m, Messhöhe 2 m.

Windrichtung in Grad	Seitenquelle SQ	Dachquelle DQ	Mittelung MQ	Original
0	0.0045	0.0042	0.0043	0.0055
45	0.0059	0.0075	0.0067	0.0068
90	0.0053	0.0046	0.0050	0.0053
135	0.0047	0.0069	0.0058	0.0056
180	0.0051	0.0065	0.0058	0.0046
225	0.0047	0.0069	0.0058	0.0056
270	0.0053	0.0046	0.0050	0.0053
315	0.0059	0.0075	0.0067	0.0068
Gesamtimmission	0.0052	0.0061	0.0057	0.0057

Tabelle 5.2: Immissionen bei Berücksichtigung einer Windstatistik, Gebäude mit $L/B = 1:1$, Maxima der Querprofile im Abstand $a = 12$ m, Messhöhe 6 m.

Windrichtung in Grad	Seitenquelle SQ	Dachquelle DQ	Mittelung MQ	Original
0	0.0050	0.0039	0.0045	0.0037
45	0.0068	0.0095	0.0081	0.0078
90	0.0068	0.0036	0.0052	0.0065
135	0.0067	0.0097	0.0082	0.0061
180	0.0046	0.0042	0.0044	0.0021
225	0.0067	0.0097	0.0082	0.0061
270	0.0068	0.0036	0.0052	0.0065
315	0.0068	0.0095	0.0081	0.0078
Gesamtimmission	0.0063	0.0067	0.0065	0.0058

Gebäude mit $L/B = 1:5$

Für das gestreckte Gebäude mit $L/B = 1:5$ wurden, unter Berücksichtigung der Windstatistik, die Gesamtimmissionen in 2 m Höhe aus dem gebäudenahen Vertikalprofil (Tabelle 5.3), und, auf der Basis der jeweiligen Maxima, in den Querprofilen in den Abständen 12 m und 24 m (Tabellen 5.4 und 5.5) ermittelt.

Bei dem gebäudenahen Vertikalprofil (Tabelle 5.3) liefert die Seitenquelle einen höheren Immissionswert als das Original, die Mittelung einen etwas niedrigeren. Allerdings werden an diesem Aufpunkt nicht die höchsten Immissionswerte beobachtet, sondern erst in dem Querprofil im Abstand $a = 12$ m (Tabelle 5.4).

Hier überschätzt die Seitenquelle erheblich, die Dachquelle unterschätzt. Die beste Übereinstimmung mit dem Original liefert der Wert der Mittelung. Gleches gilt für das Querprofil im Abstand $a = 24$ m in der Tabelle 5.5.

Tabelle 5.3: Immissionen bei Berücksichtigung einer Windstatistik, Gebäude mit $L/B = 1:5$, Vertikalprofile im Abstand $a = 6$ m, Messhöhe 2 m.

Windrichtung in Grad	Seitenquelle SQ	Dachquelle DQ	Mittelung MQ	Original
0	0.0027	0.0029	0.0028	0.0029
45	0.0068	0.0014	0.0041	0.0055
90	0.0082	0.0042	0.0062	0.0057
135	0.0003	0.0003	0.0003	0.0018
180	0.0022	0.0030	0.0026	0.0034
225	0.0003	0.0003	0.0003	0.0018
270	0.0082	0.0042	0.0062	0.0057
315	0.0068	0.0014	0.0041	0.0055
Gesamtimmission	0.0044	0.0022	0.0033	0.0040

Tabelle 5.4: Immissionen bei Berücksichtigung einer Windstatistik, Gebäude mit $L/B = 1:5$, Maxima der Querprofile im Abstand $a = 12$ m, Messhöhe 2 m.

Windrichtung in Grad	Seitenquelle SQ	Dachquelle DQ	Mittelung MQ	Original
0	0.0026	0.0026	0.0026	0.0040
45	0.0071	0.0023	0.0046	0.0060
90	0.0110	0.0037	0.0073	0.0042
135	0.0029	0.0023	0.0024	0.0047
180	0.0023	0.0028	0.0024	0.0037
225	0.0029	0.0023	0.0024	0.0047
270	0.0110	0.0037	0.0073	0.0042
315	0.0071	0.0023	0.0046	0.0060
Gesamtimmission	0.0059	0.0028	0.0043	0.0047

Tabelle 5.5: Immissionen bei Berücksichtigung einer Windstatistik, Gebäude mit $L/B = 1:5$, Maxima der Querprofile im Abstand $a = 24$ m, Messhöhe 2 m.

Windrichtung in Grad	Seitenquelle SQ	Dachquelle DQ	Mittelung MQ	Original
0	0.0022	0.0023	0.0022	0.0029
45	0.0052	0.0032	0.0041	0.0040
90	0.0079	0.0032	0.0055	0.0046
135	0.0017	0.0021	0.0019	0.0035
180	0.0019	0.0027	0.0023	0.0028
225	0.0017	0.0021	0.0019	0.0035
270	0.0079	0.0032	0.0055	0.0046
315	0.0052	0.0032	0.0041	0.0040
Gesamtimmission	0.0042	0.0028	0.0035	0.0037

5.2 Modelltechnische Umsetzung

Durch den Einsatz firsthoher Ersatzquader in numerischen Modellen anstelle der genauen Abbilder der Originalgebäude ergeben sich bei der Modellierung dachnaher Emissionsquellen Probleme, da die Quellen innerhalb der Ersatzquader liegen können. Aus den Untersuchungen im Windkanal war für solche Situationen eine Vorgabe für die numerische Modellierung abzuleiten, bei der die Ausbreitung der Emissionen aus dachnahen Quellen durch das vereinfachende Rechenmodell möglichst ähnlich zu der tatsächlichen Situation wiedergegeben wird.

Die Vorgabe beruht auf den Voraussetzungen, dass

- die Austrittsquerschnitte der dachnahen Originalquellen innerhalb oder am Rand der firsthohen Ersatzquader um die Originalgebäude liegen,
- Austrittsimpuls und thermischer Auftrieb der dachnahen Originalquellen vernachlässigt werden, d. h. es sich um passive Quellen handelt. Diese Voraussetzung ist in der Regel erfüllt, da dachnahe Quellen in die Rezirkulationszonen der Originalgebäude emittieren und kein ungeörter Abtransport mit der freien Luftströmung gegeben ist. In solchen Fällen ist auf den Ansatz einer Überhöhung zu verzichten.

Für die numerische Modellierung werden dachnahe Originalquellen nur durch ihren Emissionsstrom Q und ihre Austrittsfläche A_Q definiert.

Anstelle der Originalquelle sind an dem firsthohen Ersatzquader des numerischen Modells eine Dachquelle DQ und eine Seitenquelle SQ anzugeben. Beide Ersatzquellen haben jeweils dieselbe Austrittsfläche $A_Q = A_{DQ} = A_{SQ}$ wie die Originalquelle, setzen aber je nur den halben Emissionsstrom $Q/2$ frei.

Die Abbildung 5.1 zeigt Beispiele der Anordnung der Ersatzquellen für verschiedene Gebäude- und Quellkonfigurationen.

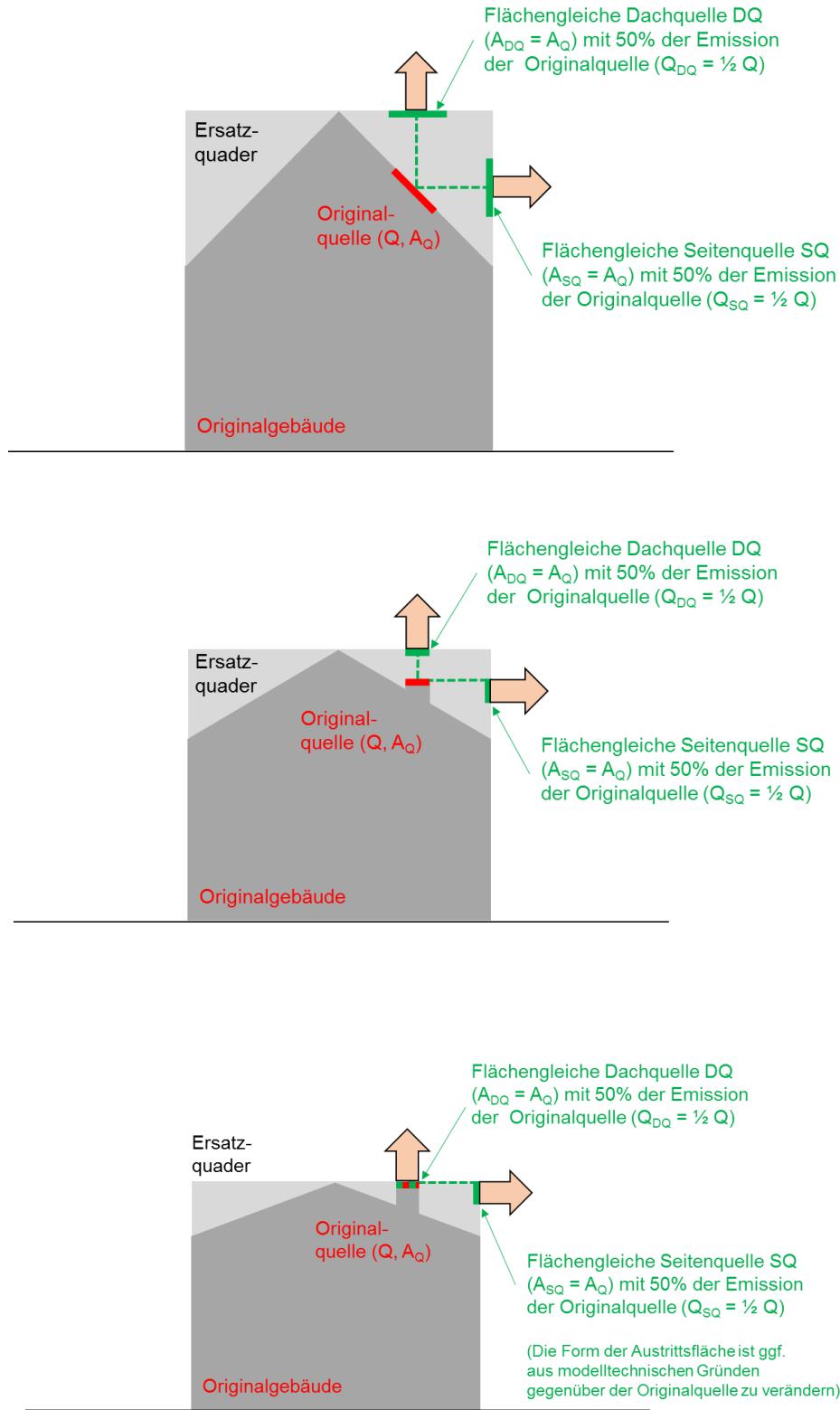


Abb. 5.1: Anordnung der Ersatzquellen am Ersatzquader bei dachbündiger Originalquelle auf einem Satteldach der Neigung 45° (oben), halbhoher Originalquelle auf einem Satteldach der Neigung 30° (Mitte) und firsthoher Originalquelle über einem Satteldach der Neigung 20° (unten).

In der Abbildung 5.1 oben sind die Ersatzquellen für eine dachbündige Quelle auf einem Satteldach der Neigung 45° dargestellt. Die Positionen der Dach- und der Seitenquelle auf der Oberfläche des Ersatzquaders ergeben sich aus den Verlängerungen von vertikalen und horizontalen Geraden durch die Mitte der Originalquelle.

Eine halbhöhe Quelle mit einer horizontalen Austrittsfläche auf einem Satteldach der Neigung 30° zeigt das mittlere Bild in der Abbildung 5.1. Die Position der Dachquelle ergibt sich wiederum aus einer Verlängerung einer vertikalen Geraden durch die Mitte der Originalquelle, während die Seitenquelle unterhalb der Verlängerung der Horizontalen durch die Austrittsfläche angeordnet ist.

Wie bei der halbhohen Quelle wird auch bei der firsthohen Quelle, hier über einem Satteldach der Neigung 20° , verfahren (siehe Abbildung 5.1 unten). Bei firsthohen Quellen befindet sich die Seitenquelle auf der Seitenwand in Lee unmittelbar unter der oberen Kante des Ersatzquaders.

Werden die beiden Ersatzquellen mit halber Quellstärke betrieben, entsprechen die Konzentrationen an den Aufpunkten denen einer rechnerischen Mittelung der Ergebnisse für die Seiten- und die Dachquelle aus dem physikalischen Windkanalmodell. Wie gezeigt werden konnte, stellt die Mittelung der Konzentrationen aufgrund der Seiten- und der Dachquelle im allgemeinen Fall eine gute Näherung der Situation eines Originalgebäudes mit dachnaher Quelle dar.

6. Literatur

- Chang, J.C.; Hanna, S.R. (2005): Technical Descriptions and User's Guide for the BOOT Statistical Model Evaluation Software Package, Version 2.0. Unter: www.harmo.org/kit/
- ESDU (1985): Characteristics of atmospheric turbulence near the ground. Part II: Single point data for strong winds (neutral atmosphere). In: ESDU International 85020.
- Fackrell, J.E. (1984): Parameters characterizing dispersion in the near wake of buildings. Journ. Of Wind Eng. and Ind. Aerodynamics, 16, S. 97 – 118.
- Harris, R. (1971): The nature of wind. In: The modern design of wind-sensitive structures. London: Construction Industries Research and Information Association.
- Kaimal, J.C.; Wyngaard, J.C.; Izumi, Y.; Cote, O.R. (1972): Spectral characteristics of surface layer turbulence". Quart. J. Royal Meteorol. Soc. 98, No. 417, S. 563 – 589.
- Plate, E.J. (1982): Engineering Meteorology: Fundamentals of meteorology and their applications to problems in environmental and civil engineering. Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier.
- TA Luft (2002): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft). GMBI. 2002, Ausgabe Nr. 25-29, S. 511 – 605.
- TA Luft – E (2016): Referentenentwurf zur Anpassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft). Stand: 09. September 2016. Unter: <https://www.bmu.de/GE233>
- Theurer, W.; Gauweiler, J. (2017): Bestimmung der äquivalenten Quaderhöhe für die numerische mikroskalige Modellierung durch Untersuchungen im Windkanal. Ingenieurbüro Theurer, Hanhofen. Unter: www.janicke.de/data/bzu/Bericht_Ersatzquader_20170327.pdf
- VDI 3781 Blatt 4 (2017): „Umweltmeteorologie – Ableitbedingungen bei Abgasanlagen – Kleine und mittlere Feuerungsanlagen sowie andere als Feuerungsanlagen“. Berlin: Beuth-Verlag.
- VDI 3783 Blatt 12 (2000): „Umweltmeteorologie – Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht – Windkanalanwendungen“. Berlin: Beuth-Verlag.
- Wilson, D.J. (1979): Flow patterns over flat-roofed buildings and application to exhaust stack design. ASHRAE-Transactions, No. 85, Part II.

Anhang

A1 Beschreibung des Windkanals

Der Windkanal des Ingenieurbüros Theurer, Hanhofen, in dem bereits die Versuche zur Bestimmung der Ersatzquaderhöhe (Theurer und Gauweiler, 2017) durchgeführt wurden, ist ein Grenzschichtwindkanal mit offenem Rücklauf und einer Länge von insgesamt ca. 8.5 m. Der Kanal wird im Druckbetrieb gefahren. Hinter dem Gebläse befinden sich zur Vergleichsmäßigung der Strömung Siebe, ein feinmaschiges Vlies und wabenförmige Gleichrichter.

Die Grenzschicht wird durch dreiecksförmige Wirbelgeneratoren vorgeformt. Es folgen eine ca. 5 m lange Anlaufstrecke mit den Bodenrauigkeiten bzw. Rauheitselementen und eine ca. 2.5 m lange Messstrecke für die Modelle. Die Abbildung A1.1 zeigt einen Blick in den Windkanal entgegen der Strömungsrichtung.

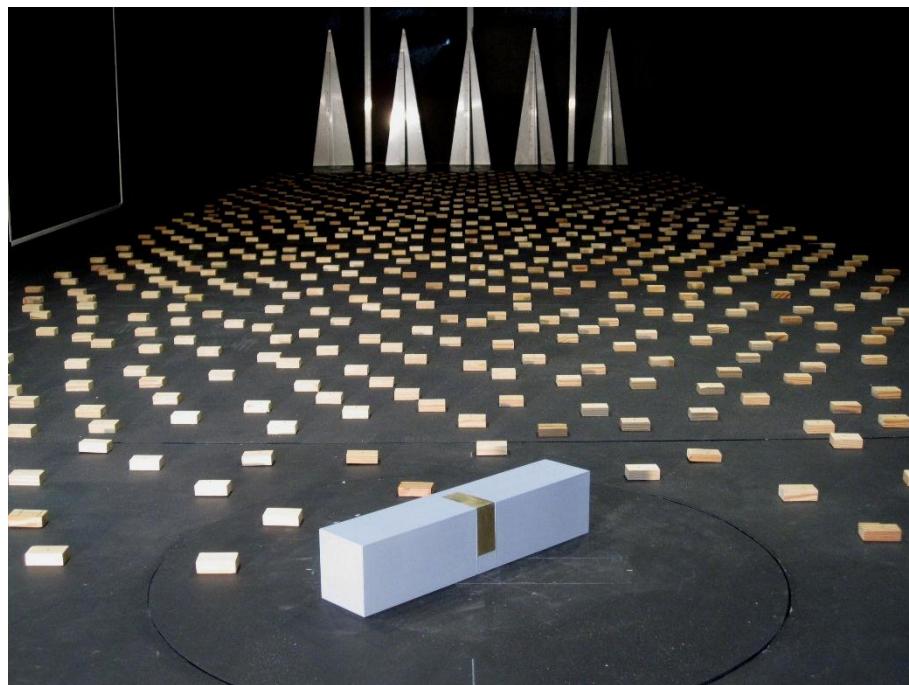


Abb. A1.1: Blick in den Windkanal entgegen der Strömungsrichtung. Im Hintergrund die dreiecksförmigen Wirbelgeneratoren, davor die Rauheitselemente. Im Vordergrund das Modell des Ersatzquaders mit $L/B = 1:5$ und der Flächenquelle bei der Windrichtung 45 Grad.

Die Anlauf- und die Messstrecke des Windkanals haben eine Breite von ca. 2 m und eine Höhe von ca. 1.4 m. Der Windkanal ist mit einer verstellbaren Decke ausgestattet, um etwaige Druckgradienten am oberen Rand der modellierten Grenzschicht ausgleichen zu können. Die maximal erreichbare Strömungsgeschwindigkeit im Kanal liegt bei ca. 7 m/s.

Zum Nachweis der Eignung des Grenzschichtwindkanals für Untersuchungen wie in der vorliegenden Studie wurde die Einhaltung der Ähnlichkeitsgesetze für Windkanalversuche zur Ausbreitung nach der Richtlinie VDI 3783 Blatt 12 (2000), wie im Folgenden beschrieben, überprüft. Neben der Grundströmung im Windkanal wurde die Ausbreitung aus zwei Punktquellen mit Referenzdatensätzen aus der Richtlinie verglichen. Während eine der Quellen frei in der Strömung stand, befand sich die andere auf der Oberseite eines Würfels.

A2 Ähnlichkeitsgesetze und Anforderungen an Modellversuche

Ergebnisse aus dem Windkanal können bei Einhaltung so genannter Ähnlichkeitsgesetze unmittelbar auf die Natur übertragen werden. Die Ähnlichkeitsgesetze und die daraus resultierenden Anforderungen an den Modellversuch sind in der Richtlinie VDI 3783 Blatt 12 (2000), zusammengestellt. Die Ähnlichkeitsgesetze umfassen

- die Ähnlichkeit der Anströmung bzw. der anströmenden Grenzschicht, beschrieben durch ähnliche vertikale Geschwindigkeitsprofile und ähnliche Turbulenzverhältnisse (Turbulenzintensitätsprofile und –spektren),
- die Ähnlichkeit der Umströmung der modellierten Gebäude, ausgedrückt durch die Reynoldszahl $Re = u \cdot L_{ref} / \nu$ mit u als der Strömungsgeschwindigkeit in Bauwerkshöhe, L_{ref} als einer Referenzlänge und ν als der kinematischen Zähigkeit der Luft,
- und die geometrische Ähnlichkeit der Modelle.

Hinsichtlich der Ähnlichkeit der Anströmung sind nach der VDI-Richtlinie die mittleren Geschwindigkeitsprofile in der leeren Messstrecke, die Turbulenzintensitätsprofile und die Spektral dichte Verteilung der Turbulenz bis in eine Höhe nachzuweisen, die mindestens der dreifachen mittleren Bebauungshöhe entspricht. Diese Forderung ist hier erfüllt (s. Abschnitt A3).

Ähnliche Reynoldszahlen in Natur und Modell können bei den üblichen Modellmaßstäben im Windkanal nicht eingehalten werden. Bei Baukörpern mit klar definierten Ablösekanten wie Gebäuden mit Satteldächern oder Quadern reicht es nach Plate (1982) und zahlreichen anderen Autoren aus, wenn die Reynoldszahl im Modell oberhalb einer kritischen Reynoldszahl liegt. Wird diese kritische Reynoldszahl überschritten, ist die Umströmung von Hindernissen, wie beispielsweise ihre Rezirkulationszone, naturähnlich und nicht mehr von einer weiteren Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit abhängig.

Nach VDI 3783 Blatt 12 (2000), beträgt die kritische Reynoldszahl, gebildet mit der Bauwerks Höhe H als für den Strömungsvorgang charakteristische Referenzlänge L_{ref} und u als Anströmgeschwindigkeit in der Höhe H , ohne weiteren Nachweis 10000. Nach verschiedenen Autoren ist aber bereits bei deutlich niedrigeren Reynoldszahlen eine naturähnliche Umströmung möglich. So gibt Fackrell (1984) als kritische Reynoldszahl für die von ihm untersuchten Quader einen Wert von 5000 an.

Anhand vertikaler Geschwindigkeitsprofile in einem Abstand von 6 m hinter einem senkrecht angeströmten, würfelförmigen Quader der Höhe 10 m wurde bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten im Windkanal überprüft, ab wann die Forderung nach einer von der Geschwindigkeit unabhängigen Umströmung erfüllt ist. In der Abb. A2.1 sind die mit den jeweils unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten in 30 m Höhe normierten Geschwindigkeitsprofile und die jeweiligen Reynoldszahlen aufgetragen.

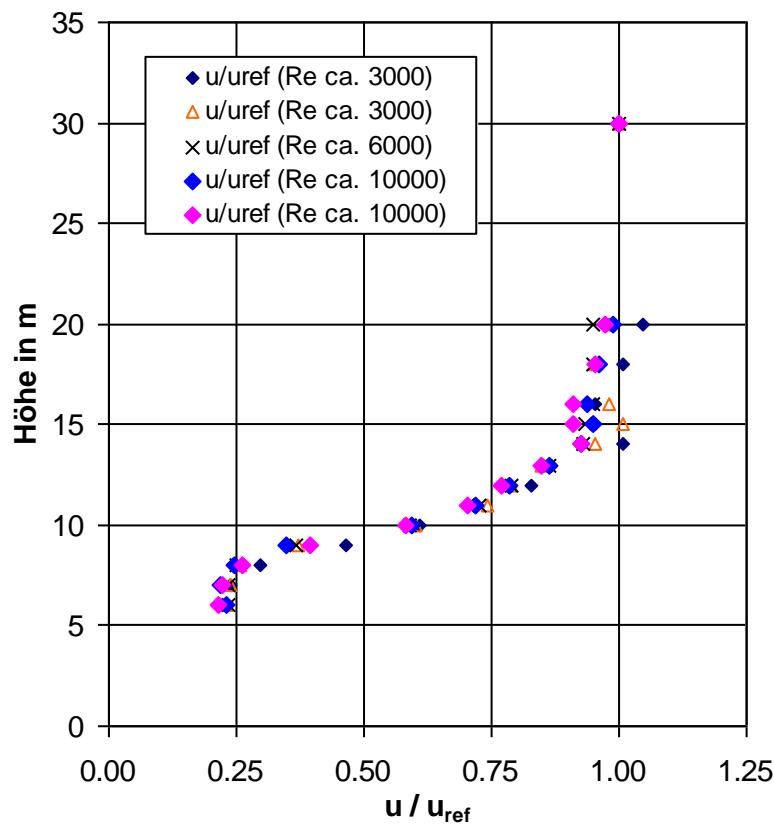


Abb. A2.1 Windgeschwindigkeitsprofile hinter einem Würfel der Höhe 10 m im Abstand von 6 m bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten bzw. Reynoldszahlen.

Die niedrigste getestete Reynoldszahl war 3000. Sie wurde z. B. bei den Versuchen zur Strömungssichtbarmachung erreicht, da hier die Windgeschwindigkeit nicht zu hoch sein darf, um eine ausreichende Intensität des Rauches sicherzustellen. Trotzdem unterscheidet sich das Geschwindigkeitsprofil nur wenig von denen bei Reynoldszahlen von 6000 (die Konzentrationsmessungen wurden hierbei durchgeführt) oder 10000. Bei beiden höheren Reynoldszahlen waren die Profile im Rahmen der Reproduzierbarkeit identisch.

Die geometrische Ähnlichkeit der Gebäudemodelle im Maßstab 1:200 zu typischen Gebäudeabmessungen war gegeben. Dieser Maßstab entsprach auch dem der Grenzschicht in der Anströmung (s. Abschnitt A3).

Die Versperrung des Windkanals durch die Modelle betrug, wie die Abbildung A1.1 zeigt, weit weniger als die nach VDI 3783 Blatt 12 (2000) zulässigen 5% der Querschnittsfläche der Messstrecke.

A3 Anströmgrenzschicht

Als Anströmung wurde im Windkanal eine Grenzschicht passend zu dem Maßstab der Gebäude von 1:200 eingerichtet, wie sie sich über einem glatten, offenen Gelände mit Grasland oder abgeernteten Ackerflächen einstellen würde. Ein solches, nach VDI 3783 Blatt 12 (2000), als „mäßig rau“ bezeichnetes Gelände entspricht zum Beispiel der bisherigen CORINE-Klasse 333 (Flächen mit spärlicher Vegetation) mit einer Rauigkeitslänge von $z_0 = 0.02$ m.

Mit den Vorgaben der VDI-Richtlinie werden folgende, in der Mitte der leeren Messstrecke bestimmte, Kenndaten der Grenzschicht abgeglichen:

- die zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten $u(z)$ (Abb. A3.1a und b),
- die Turbulenzintensitäten $I_u(z)$ (Abb. A3.2),
- die spektrale Dichtevertteilung der Turbulenz S_{uu} (Abb. A3.3).

Nach der Abbildung A3.1a ergibt sich, unter Berücksichtigung der Messunsicherheit bei den Geschwindigkeitsmessungen von ca. 3%, eine Übereinstimmung der gemessenen Daten mit einem Geschwindigkeitsprofil nach dem so genannten Potenzansatz mit einem Profilexponenten von $\alpha = 0.12$ und einer Verdrängungshöhe $d_0 = 0$. Der logarithmische Ansatz ergibt eine Rauigkeitslänge $z_0 = 0.02$ m (Abb. A3.1b). Referenzhöhe z_{ref} war jeweils 30 m.

Das Turbulenzintensitätsprofil $I_u = \sigma_u(z)/u(z)$ (Abb. A3.2) liegt, wie bei einem z_0 von 0.02 m zu fordern ist, zwischen den Kurven nach ESDU (1985) für $z_0 = 0.005$ m und 0.1 m.

Das mit der Frequenz f und der Varianz $\sigma^2_u(z)$ normierte Spektrum der longitudinalen Turbulenz (Abb. A3.3) in $z = 30$ m Höhe zeigt Ähnlichkeit mit den in der VDI-Richtlinie zitierten Spektren von Kaimal et al. (1972) und Harris (1971).

Somit gibt die Anströmgrenzschicht im Windkanal eine neutrale Grenzschicht über offenem Gelände naturähnlich wieder.

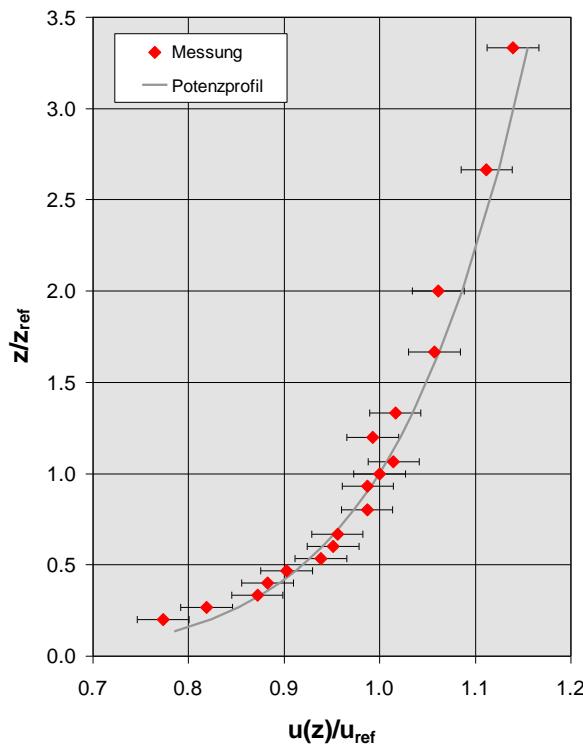


Abb. A3.1a: Mit einer Referenzgeschwindigkeit u_{ref} in $z_{ref} = 30 m Höhe normierte mittlere Windgeschwindigkeiten $u(z)$, verglichen mit einem Windprofil nach dem Potenzansatz mit dem Profilexponenten $\alpha = 0.12$ und der Verdrängungshöhe $d_0 = 0$.$

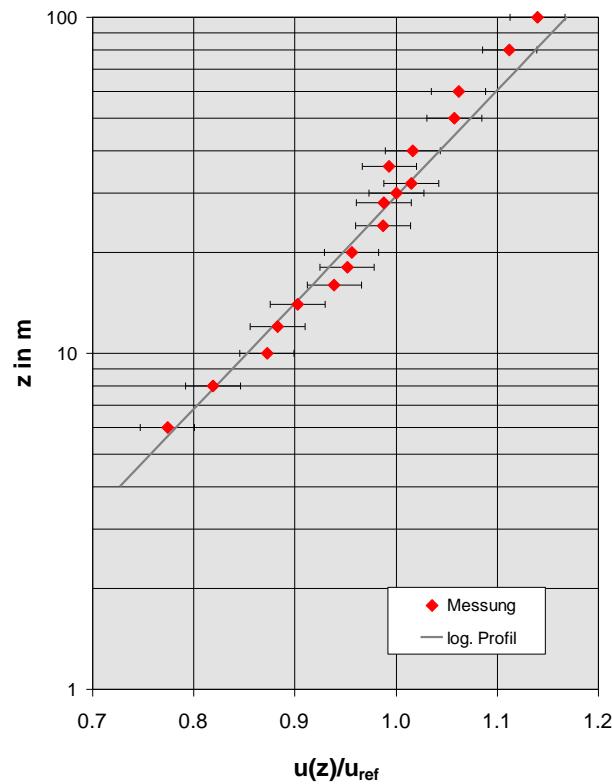


Abb. A3.1b: Mit einer Referenzgeschwindigkeit u_{ref} in 30 m Höhe normierte mittlere Windgeschwindigkeiten $u(z)$, verglichen mit einem Windprofil nach dem logarithmischen Ansatz und einer Rauigkeitslänge von $z_0 = 0.02$ m.

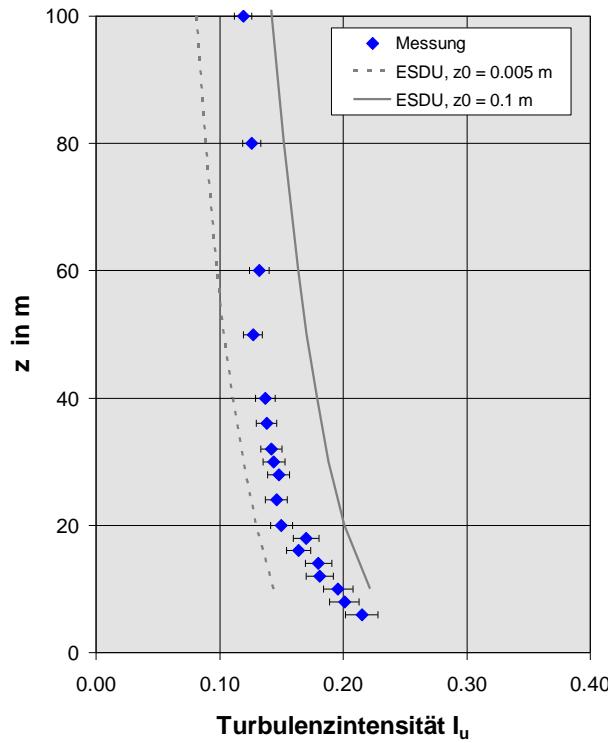


Abb. A3.2: Höhenverteilung der Turbulenzintensitäten in longitudinaler Richtung $I_u = \sigma_u(z)/u(z)$ für das Windgeschwindigkeitsprofil mit $z_0 = 0.02$ m, verglichen mit Profilen nach ESDU (1985) für $z_0 = 0.005$ m und $z_0 = 0.1$ m.

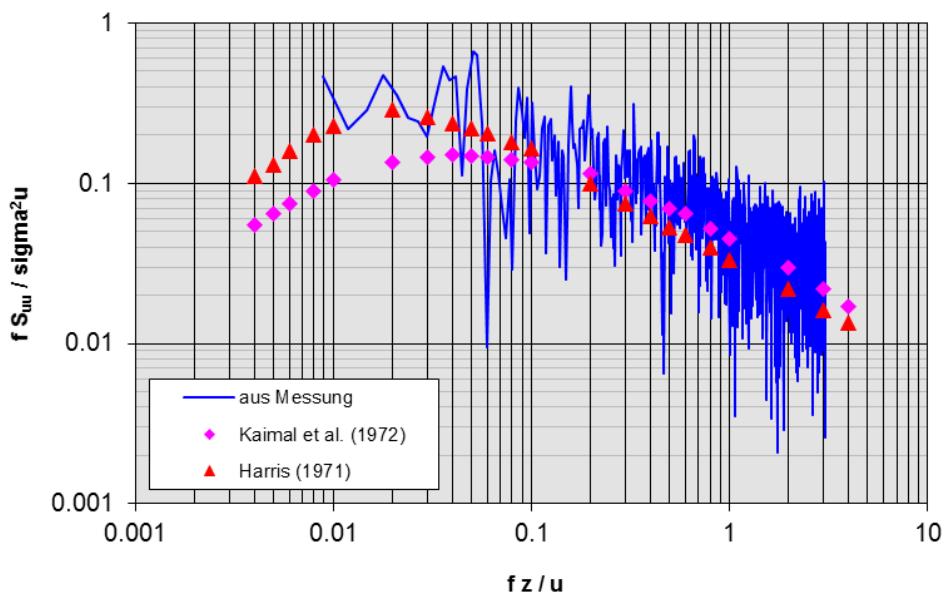


Abb. A3.3: Normierte spektrale Dichteverteilung der kinetischen Energie der Turbulenz („Turbulenzspektrum“) in der Höhe $z = 30$ m, verglichen mit Ansätzen nach Kaimal et al. (1972) und Harris (1971).

A4 Gebäudemodelle

Für die Versuche im Windkanal wurden unterschiedliche Gebäudemodelle im Maßstab 1:200 verwendet. Die Länge der Gebäude, umgerechnet auf das Naturmaß, betrug einheitlich 10 m, ihre Breite variierte zwischen 10 m bei dem Gebäude mit quadratischer Grundfläche und $L/B = 1:1$ und 50 m bei dem gestreckten Gebäude mit $L/B = 1:5$. Die Originalgebäude mit den Originalquellen wiesen Satteldächer mit Neigungen von 20° , 30° und 45° auf, wobei die Traufhöhe zumeist 6 m betrug. Lediglich das Gebäude mit $L/B = 1:1$ und einem Satteldach der Neigung 45° hatte eine Traufhöhe von 10 m. Die Ersatzquader mit den Seiten- und Dachquellen waren entsprechend der Untersuchungen von Theurer und Gauweiler (2017) jeweils firsthoch.

Werden Gebäude mit geneigten Dächern, wie die Originalgebäude, senkrecht zu ihrer Firstlinie angeströmt, löst bei Dachneigungswinkeln größer als etwa $15 - 20^\circ$ die Strömung am First und an den Seiten der Dachfläche ab.

Bei senkrecht angeströmten quaderförmigen Bauwerken mit flachen Dächern löst die Strömung dagegen zunächst an der dem Wind zugewandten Vorderkante des Daches ab. Je nach Breite bzw. Länge des Gebäudes, der Windrichtung und weiterer Parameter, wie der Anström-turbulenz, kann es zu einem Wiederanlegen der abgelösten Strömung auf der Dachfläche kommen.

Ob und wo bei quaderförmigen Gebäuden ein Wiederanlegen der abgelösten Strömung auf der Dachfläche stattfindet, kann näherungsweise nach Wilson (1979) über den Faktor R bestimmt werden.

$$R = (D_{small}^{0.67} \cdot D_{large}^{0.33}) \quad (A4.1)$$

Dabei ist D_{small} die kleinere Abmessung der angeströmten Fläche des Gebäudes und D_{large} die größere. Für die Länge L_c der Ablösezone (Cavity) auf einem Flachdach gilt näherungsweise

$$L_c = 0.9 R, \quad (A4.2)$$

und für die Höhe H_c

$$H_c = 0.22 R. \quad (A4.3)$$

Bei einem hinreichend langen Ersatzquader und Längsanströmung legt die Strömung nach der Strecke L_c wieder auf dem Dach an, wie in dem Lichtschnitt aus dem Windkanal in Abbildung A4.1 für das Beispiel einer dachbündigen Quelle auf der Dachfläche eines Hallengebäudes. In einem solchen Fall erfolgt eine weitere Ablösung der Strömung an der hinteren Dachkante, was zu einer zweiten, erheblich größeren Rezirkulationszone hinter dem Gebäude führt. Nähere Angaben zu den Abmessungen der Rezirkulationszonen hinter quaderförmigen Gebäuden bei verschiedenen Anströmrichtungen und Abmessungen finden sich in den Untersuchungen zur Bestimmung der Ersatzquaderhöhe von Theurer und Gauweiler (2017).



Abb. A4.1: Darstellung der Ablösezone (Höhe H_c , Länge L_c) an der Vorderkante eines Flachdachs. Lichtschnitt im Windkanal entlang der Mitte eines längs angestromten, quaderförmigen Gebäudes.

Beobachtungen zur Länge L_c und Höhe H_c der Ablösezonen auf den Dächern einiger im Windkanal modellierter, quaderförmiger, großflächiger Hallengebäude zeigen eine Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Formeln A4.1 – A4.3 (siehe Abbildung A4.2).

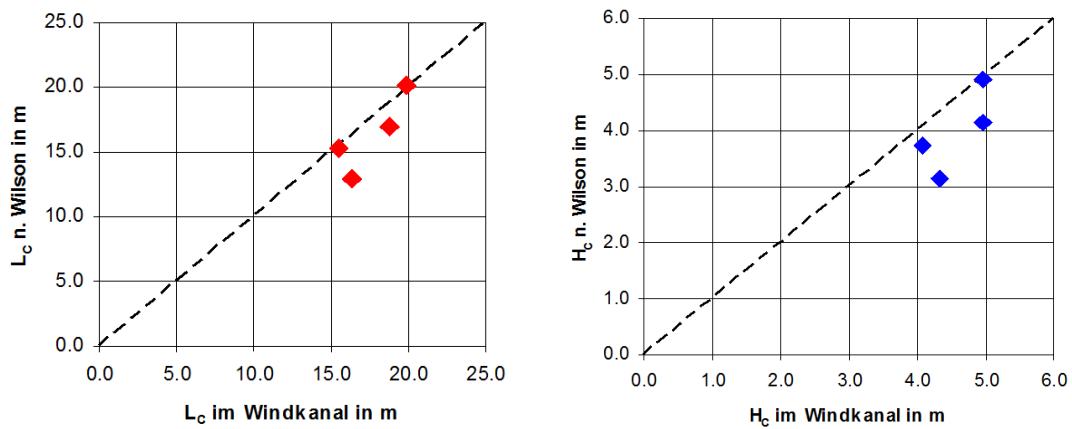


Abb. A4.2: Im Windkanal beobachtete Längen L_c (links) und Höhen H_c (rechts) der Ablösezonen auf Dächern quaderförmiger, großflächiger Hallengebäude im Vergleich zu den nach den Formeln von Wilson (1979) berechneten Werten.

Während die Traufhöhe der Satteldächer der Originale in der Regel 6 m betrug, wurde hiervon bei dem Gebäude mit $L/B = 1:1$ und dem Satteldach der Neigung 45° mit einer Traufhöhe von 10 m und einer Firsthöhe von 15 m abgewichen (s. Abbildung 2.4). Bei diesen Abmessungen stellt sich nach den Formeln A4.1 und A4.2 mit $L_c = 10.3$ m gerade kein Wiederanlegen auf der Dachfläche des Ersatzquaders ein, was auch im Windkanal über die meiste Zeit des instationären Vorgangs hinweg beobachtet wurde.

A5 Reproduzierbarkeiten

A5.1 Messdauer

Messungen in turbulenten Strömungen sind grundsätzlich mit einer Unsicherheit aufgrund der endlichen Messdauer behaftet. Diese, an die Autokorrelation der Messgröße am jeweiligen Messort gekoppelte Unsicherheit ist umso höher, je kürzer die Messdauer ist und je größer die zeitlichen Fluktuationen der Messgröße am Messort sind. Im vorliegenden Fall wurde, aufbauend auf den Erkenntnissen der Untersuchungen zur Ermittlung der Ersatzquaderhöhe, die Messdauer bzw. Mittelungszeit der Konzentrationen zu 3 Minuten gewählt.

A5.2 Konzentrationsmessungen

Kalibrierung des Flammionisationsdetektors (FID)

Bestimmt wurden die mittleren Konzentrationen an den Aufpunkten mit einem Flammionisationsdetektor (FID) HFR 400 der Fa. Cambustion. Ethan mit einer Dichte ähnlich der von Luft wurde als Tracer aus den Quellen emittiert. Der FID wurde an jedem Messtag kalibriert. Verwendet wurden zwei Prüfgase der Fa. Air Liquide mit bekannten Konzentrationen von Ethan in synthetischer Luft. Die Abbildung A5.1 zeigt eine so erhaltene, lineare Kalibrierfunktion, die anschließend verwendet wurde, um aus den durch das FID ausgegebenen Spannungswerten die Ethankonzentrationen zu berechnen.

Reproduzierbarkeit der Konzentrationsmesswerte

Die zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit der Konzentrationsmessungen herangezogenen Profile stammen aus Messungen und ihrer Wiederholung hinter dem Originalgebäude mit $L/B = 1:5$ und einem Satteldach mit 45° Neigung bei den Windrichtungen 0 Grad (Vertikal- und Querprofil), 45 Grad und 135 Grad (Querprofile). Da die Messungen in einem zeitlichen Abstand von mehreren Tagen bzw. Wochen erfolgten, beinhalten sie alle versuchstechnischen Unsicherheiten wie die Kalibrierung des FID, den Einbau der Modelle, die Genauigkeit der Regelung der Tracerfreisetzung aus den Quellen mittels eines Schwebekörperdurchflussmessers und die Anfahrgenauigkeit der Messpunkte.

Als Beispiele gezeigt werden das Vertikalprofil bei der Windrichtung 0 Grad (Abbildung A5.2) und das Querprofil bei der Windrichtung 45 Grad in der Abbildung A5.3. Bei letzterem überlappen die Aufpunkte beider Messungen, erfassen aber jeweils das Maximum. In der Abbildung A5.4 sind die Ergebnisse aller Messpunkte, für die Wiederholungsmessungen stattfanden, eingetragen. Verglichen mit den beiden unterbrochenen Linien in der Abbildung beträgt die Streuung der gemessenen Konzentrationen in der Regel weniger als $\pm 15\%$. Größere Abweichungen können insbesondere bei geringen absoluten Konzentrationen auftreten. Die Unterschiede bei geringen absoluten Konzentrationen, zum Beispiel an den Rändern von Profilen, gehen aber in die NMSE-Werte weniger stark ein als größere absolute Unterschiede bei höheren Werten im Profil.

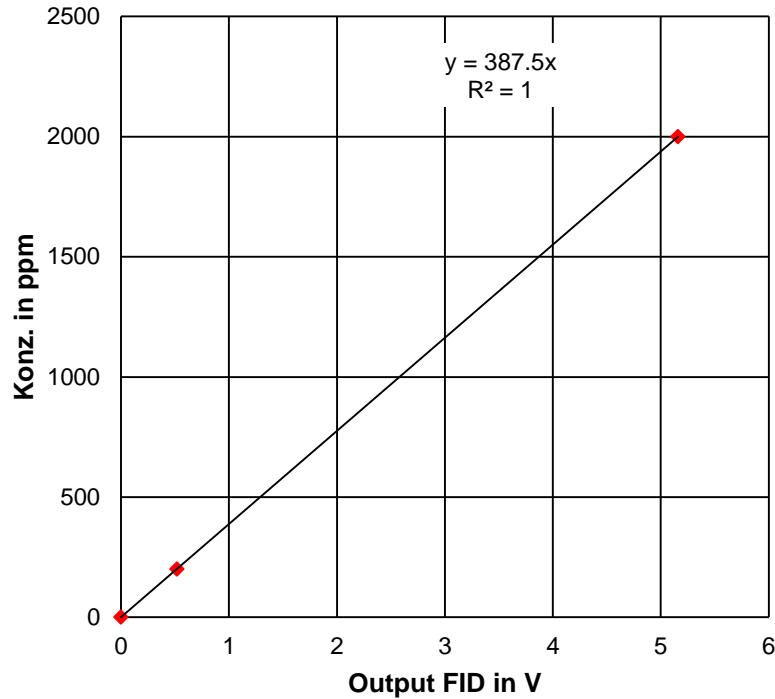


Abb. A5.1: Kalibrierung des FID anhand des Nullpunkts und zweier verschiedener Prüfgase und Bestimmung der linearen Kalibrierfunktion.

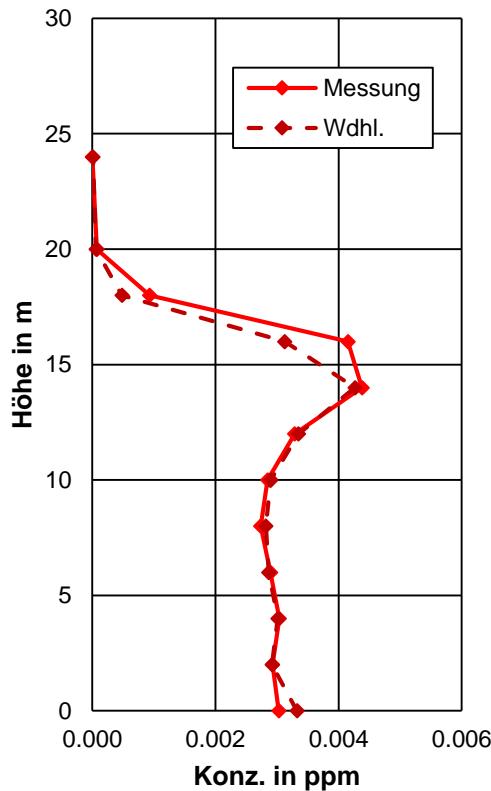


Abb. A5.2: Vertikalprofile hinter dem Gebäude mit $L/B = 1:5$; 45° -Satteldach, Windrichtung 0 Grad.

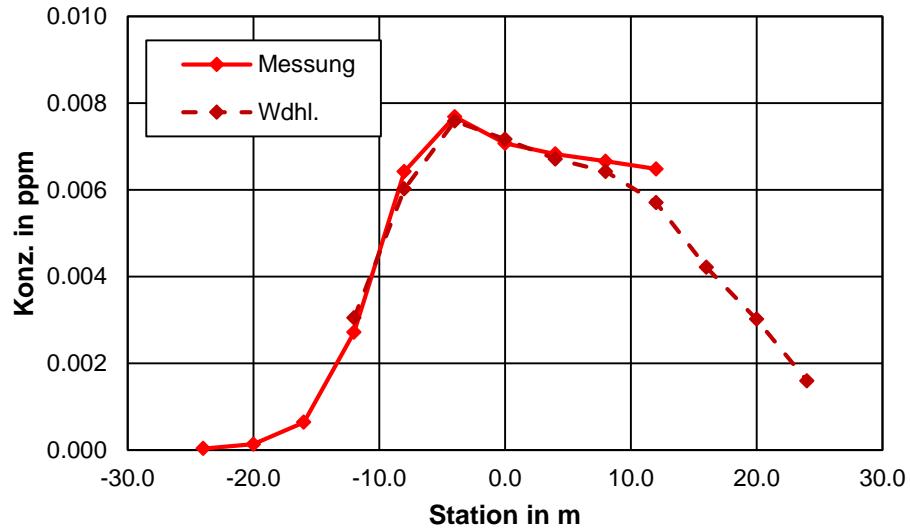


Abb. A5.3: Querprofile in der Höhe 6 m und im Abstand $a = 12$ m hinter dem Gebäude mit $L/B = 1:5$, 45°-Satteldach, Windrichtung 45 Grad.

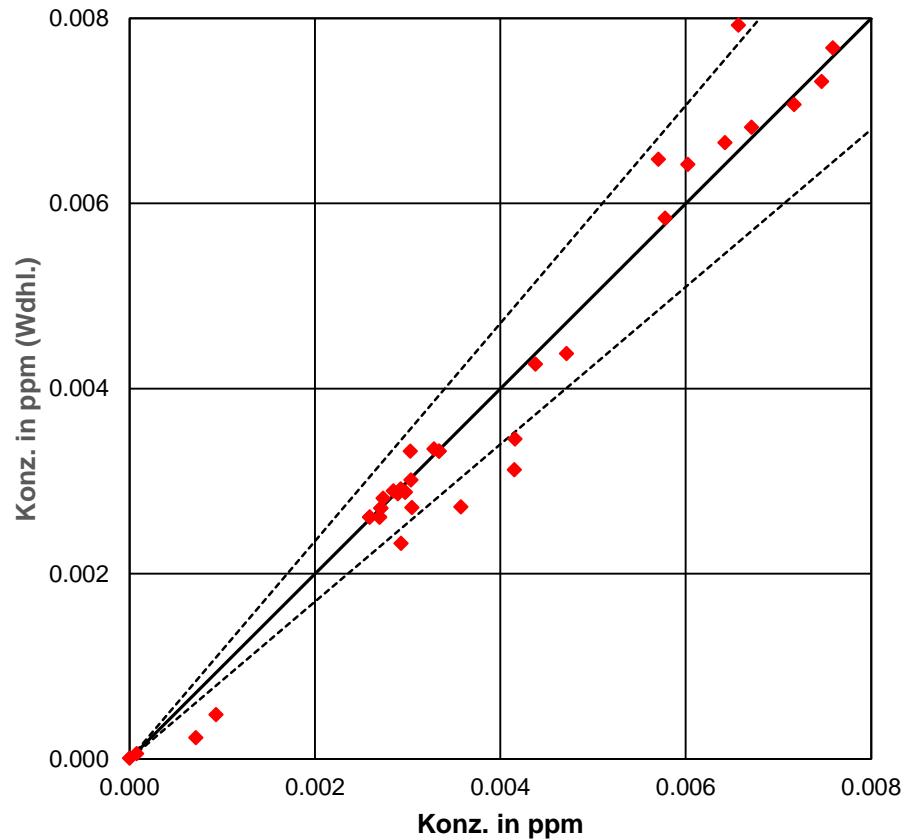


Abb. A5.4: Reproduzierbarkeit der Konzentrationen für identische Messpunkte in den Vertikal- und Querprofilen. Die unterbrochenen Linien kennzeichnen Abweichungen von $\pm 15\%$.

A5.3 Beurteilungsverfahren

Die Beurteilung der Übereinstimmung der Konzentrationen zwischen dem Original und der Quellvarianten geschieht auf der Basis der NMSE-Werte, die wiederum aus einem Vergleich gemessener Daten von Original und Näherung ermittelt werden. Es liegt daher nahe, zu betrachten, wie die Reproduzierbarkeit der Konzentrationsmessungen die NMSE-Werte und damit die Wahl der geeigneten Ersatzquelle beeinflusst.

Für diese Betrachtung herangezogen werden die beiden Konzentrationsmessungen hinter einem Originalgebäude mit $L/B = 1:5$ aus dem vorigen Abschnitt A5.2, die die dort beschriebenen versuchstechnischen Unsicherheiten enthalten. Zur Ermittlung der NMSE-Werte werden den Messdaten des Originals (erste Messung und Wiederholung) jeweils die Ergebnisse der Seiten- und Dachquelle und der Mittelung gegenübergestellt.

Die Abbildung A5.5 zeigt den Vergleich der NMSE-Werte für das Vertikalprofil bei der Windrichtung 0 Grad, unterschieden in das Gesamtprofil und in den Bereich bis 6 m, die Abbildung A5.6 den Vergleich für die Querprofile im Abstand 12 m und Messhöhe 6 m bei der Windrichtung 45 Grad.

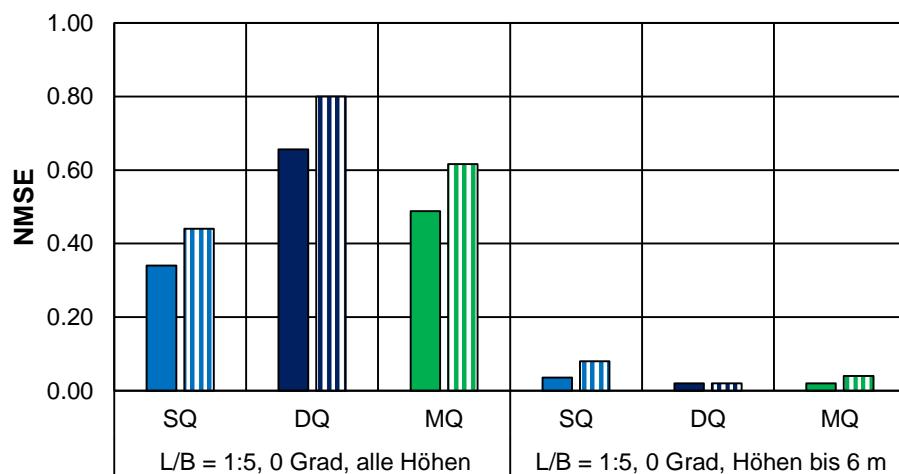


Abb. A5.5: NMSE-Werte, ermittelt aus einer Konzentrationsmessung (linke Säulen) und ihrer Wiederholung (rechte Säulen, schraffiert), Vertikalprofile (Gesamtprofil und untere 6 m) im Abstand $a = 6$ m hinter der Mitte des Gebäudes mit $L/B = 1:5$, 45°-Satteldach, Windrichtung 0 Grad.

Die aus der ersten Messung und ihrer Wiederholung ermittelten NMSE-Werte erreichen in der Abbildung A5.5 jeweils ähnliche Größenordnungen, was zu denselben Entscheidungen hinsichtlich der besten Ersatzquelle führt. Auch in der Abbildung A5.6 liefern die erste Messung und ihre Wiederholung vergleichbare Ergebnisse bei den NMSE-Werten als Grundlage für die Wahl der Ersatzquelle.

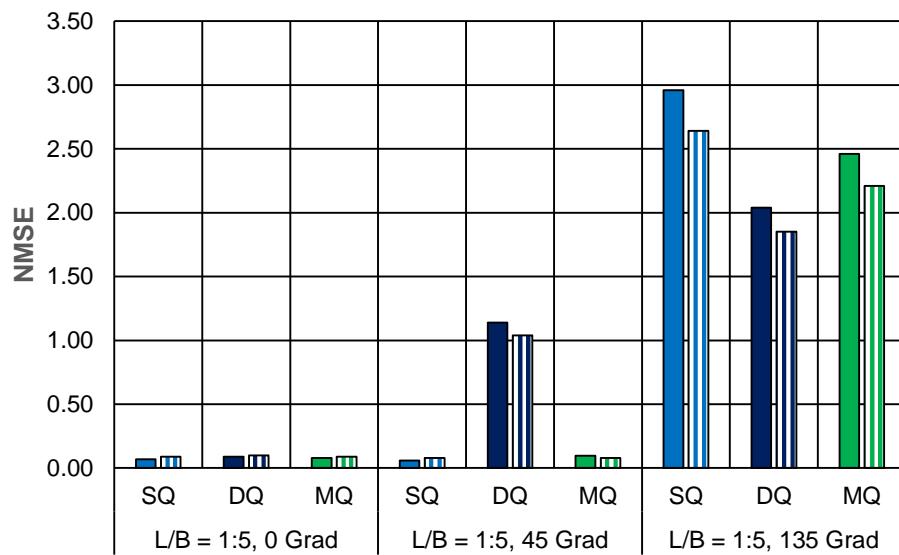


Abb. A5.6: NMSE-Werte, ermittelt aus Konzentrationsmessungen (linke Säulen) und Wiederholungen (rechte Säulen, schraffiert). Querprofile in der Höhe 6 m im Abstand $a = 12$ m hinter der Mitte des Gebäudes mit $L/B = 1:5$, Satteldach mit 45° Neigung, verschiedene Windrichtungen.

Somit ist auch unter Berücksichtigung der Unsicherheiten der Konzentrationsmessungen das Verfahren mit den NMSE-Werten in der Lage, die optimale Ersatzquelle zum Original reproduzierbar zu ermitteln.