

Ingenieurbüro Theurer

Strömungs- und Ausbreitungsuntersuchungen
Dr.-Ing. Wolfgang Theurer

An den Gewerbewiesen 16

D-67374 Hanhofen

Tel. 06344 - 508 789

Fax 06344 - 508 789

e-Mail:

IB.Theurer.SP@t-online.de

Bestimmung der äquivalenten Quaderhöhe für die numerische mikroskalige Modellierung durch Untersuchungen im Windkanal

gefördert durch:

- **Land Baden – Württemberg – Ministerium für Umwelt, Klima u. Energiewirtschaft,**
- **Freistaat Bayern – Bayerisches Landesamt für Umwelt,**
- **Land Berlin – Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt,**
- **Land Hessen – Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie,**
- **Freistaat Thüringen – Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie.**

Wolfgang Theurer, Dr.-Ing.

Jan Gauweiler, M. Sc. Geoökol.

unter Mitwirkung von:

Bernhard Bauhofer, Dipl.-Ing. (GfA, München)

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
1. Konzept des Ersatzquaders	6
2. Modellierung im Windkanal	9
2.1 Untersuchte Konfigurationen	9
2.1.1 Frei stehende Einzelgebäude	9
2.1.2 Gebäude in einer dichten Bebauung	12
2.2 Eingesetzte Untersuchungsmethoden	14
2.2.1 Strömungssichtbarmachung	14
2.2.2 Strömungsmessungen	17
2.2.3 Konzentrationsmessungen	18
3. Einzelgebäude und Ersatzquader (TP 1)	19
3.1 Rezirkulationszonen aus der Strömungssichtbarmachung	19
3.1.1 Typische Gebäude mit Satteldächern	19
3.1.2 Andere Traufhöhen	25
3.2 Ergänzende Strömungsmessungen	28
3.3 Vergleiche mit Literaturangaben und der VDI 3781 Blatt 4 (2017)	30
3.3.1 Vergleich der Längen der Rezirkulationszonen mit Literaturangaben	30
3.3.2 Vergleich der Höhen der Rezirkulationszonen mit der VDI 3781 Blatt 4	31
4. Gebäudegruppen mit Ersatzquadern (TP 2)	33
4.1 Rezirkulationszonen aus der Strömungssichtbarmachung	34
4.1.1 Einheitlich hohe Gebäude	34
4.1.2 Höhere Gebäude in der Anströmung	37
4.2 Vergleich mit der Regel für Einzelgebäude	39

5. Überprüfung des Ersatzquaderverfahrens (TP 3)	40
5.1 Konzentrationsmessungen	40
5.2 Güte des Ersatzquaderverfahrens	42
6. Einbringen der Ergebnisse in die TA Luft (TP 4)	46
7. Literatur	48
Anhang	49
A1 Beschreibung des Windkanals	49
A2 Ähnlichkeitsgesetze und Anforderungen an Modellversuche	51
A3 Anström Grenzschichten	53
A3.1 Grenzschicht über offenem Gelände	53
A3.2 Grenzschicht über einer Bebauung	56
A4 Reproduzierbarkeiten	58
A4.1 Einfluss der Messdauer	58
A4.2 Strömungssichtbarmachung	59
A4.3 Strömungsmessungen	60
A4.4 Konzentrationsmessungen	61
A5 Tabellen der Abmessungen der Rezirkulationszonen	64

Hinweise:

Die Abschnitte 3 – 6 des Berichtes nehmen auf die beauftragten Teilprojekte (TP) Bezug. Größen wie Längen, Abstände etc. werden als Naturmaße angegeben.

Der vorliegende Bericht ist eine revidierte Version der Fassung vom 27.03.2017.

Zusammenfassung

Die meisten der derzeit eingesetzten diagnostischen und prognostischen Windfeldmodelle, die bei der Ausbreitungsmodellierung verwendet werden, können Gebäude mit geneigten Dächern nur als Quader, d. h. mit einem Flachdach, in ihrem Rechengitter abbilden. Es stellt sich die Frage nach der zu wählenden Höhe der Quader, damit die Strömungsfelder um das Vorbild und seine Umsetzung im Rechenmodell als „Ersatzquader“ möglichst ähnlich sind. Die Ähnlichkeit der Strömungsfelder ist eine Voraussetzung für eine korrekte anschließende Ausbreitungsrechnung.

Die Frage nach der zu wählenden Höhe des „Ersatzquaders“ wird in der vorliegenden Untersuchung mit Hilfe eines Grenzschichtwindkanals beantwortet. Bei Einhaltung der Modellgesetze wird in einem solchen Windkanal das Strömungsfeld um beliebig geformte Baukörper, im Folgenden als Originale bezeichnet, naturgetreu wiedergegeben.

Ausgehend von der Annahme, dass der Einfluss eines Gebäudes auf die Strömung und das Ausbreitungsverhalten von Emissionen maßgeblich durch seine Rezirkulationszone beschrieben wird, ist zu fordern, dass die Rezirkulationszonen von Original und Ersatzquader weitestgehend identisch sein sollen. Besonderer Wert wurde auf die Höhe der Rezirkulationszone gelegt, da nur oberhalb der Rezirkulationszone ein ungestörter Abtransport der Abgase mit der freien Luftströmung stattfindet. Dies spielt bei der Bestimmung der Höhe von Schornsteinen eine wichtige Rolle.

In Windkanalexperimenten wurden mit Methoden der Strömungssichtbarmachung die Abmessungen der Rezirkulationszonen für Gebäude mit Satteldächern unterschiedlicher Dachneigungen (als Originale) und für Quader gleicher Grundfläche, aber verschiedener Höhen, ermittelt und durch ergänzende Strömungsmessungen und Daten aus der Literatur bestätigt.

Aus dem folgenden Vergleich der Abmessungen wurden jeweils die Quader herausgefunden, deren Höhen der Rezirkulationszonen denen der Satteldächer möglichst ähnlich waren. Berücksichtigt wurden dabei verschiedene Längen- zu Breitenverhältnisse der Gebäude und Windrichtungen der Anströmung. Auch die übrigen Abmessungen der Rezirkulationszone, wie ihre Länge und Breite, wurden in die Überlegungen mit einbezogen.

Es zeigte sich, dass, unabhängig von den Gebäudemaßen und der Anströmrichtung, ein firsthoher Ersatzquader insgesamt eine bessere Übereinstimmung der Rezirkulationszonen mit dem Original bietet, als niedrigere Quader.

Diese zunächst für frei stehende Einzelgebäude in einem offenen Gelände aufgestellte Regel wurde für Gebäude in einer dichteren Bebauung bei verschiedenen Anströmrichtungen und Vorbebauungen überprüft. Auch in diesen Fällen lieferten die firsthohen Ersatzquader ähnlich hohe Rezirkulationszonen wie die Originale.

Schließlich wurde durch einen Vergleich von Konzentrationsfeldern im Lee von Originalgebäuden mit Satteldächern und verschiedenen Quadern nachgewiesen, dass die firsthohe Quader, wie aufgrund des Strömungsfeldes angenommen, zu einer besseren Übereinstimmung der Konzentrationsfelder führen, als niedrigere Quader. Auch wenn durch die grundsätzlich unterschiedliche Umströmung eines Satteldaches und eines Quaders die Güte der Ähnlichkeit je nach Bebauungssituation verschieden hoch war, galt eine bessere Übereinstimmung zwischen Original und firsthohem Ersatzquader für alle untersuchten Fälle.

Aufgrund der Ergebnisse der Untersuchung ist vorgesehen, im Anhang 2 der künftigen TA Luft bei der numerischen Modellierung einer Bebauung einheitlich firsthohe Ersatzquader festzuschreiben.

Werden bei der numerischen Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen Gebäude mit geneigten Dächern vereinfacht als firsthohe Ersatzquader abgebildet, kann dies zu einem Problem bei der Modellierung führen: Alle Quellen, die sich in Dachnähe unterhalb der Firstlinie befinden, kommen innerhalb der Ersatzquader zu liegen. In einer Erweiterung des Forschungsvorhabens FKZ 3714 43 204 0 „Weiterentwicklung ausgewählter methodischer Grundlagen der Schornsteinhöhenbestimmung und der Ausbreitungsrechnung nach TA Luft“ des Umweltbundesamtes wurde daher untersucht und festgelegt, wie in diesen Fällen die Ersatzquellen zu modellieren sind, um ähnliche immissionsseitige Konzentrationsfelder in Gebäudenähe wie bei den dachnahen Originalquellen auf den Originalgebäuden zu erhalten¹.

¹ siehe hierzu: Theurer, W. (2018): Behandlung dachnaher Quellen bei der numerischen Modellierung. Ingenieurbüro Theurer, Hanhofen. Unter: www.janicke.de/data/bzu/Bericht_Dachnahe_Quellen_20180524.pdf

1. Konzept des Ersatzquaders

Windgeschwindigkeit und –turbulenz bestimmen die Ausbreitung einer Abgasfahne zwischen einer Emissionsquelle und einem Aufpunkt. Eine naturgetreue Wiedergabe des Strömungsfeldes einschließlich seiner turbulenten Größen bildet deshalb die wesentliche Grundlage für eine Ausbreitungsmodellierung.

Das Strömungsfeld ist allerdings bereits um einfache Baukörper, wie quaderförmige Gebäude oder Gebäude mit Satteldächern als häufig auftretender Dachform, komplex. An den Gebäudedekanten kommt es zu Ablösungen der Strömung. Es entstehen Zonen hoher Turbulenz, in denen die Strömungsrichtung zum Boden hin weist, oder sogar entgegen der Anströmung gerichtet ist (sogenannte Rezirkulationszonen). Ein schematischer Schnitt durch eine solche Rezirkulationszone hinter einem Gebäude mit einem Satteldach ist auf der linken Seite der Abbildung 1.1 dargestellt.

In bebauten Gebieten beeinflusst eine Vielzahl von Gebäuden verschiedenster Formen die Strömung. Da die meisten numerischen Modelle Gebäude nur als Quader modellieren können, vereinfachen sie die originalen Gebäudeformen, wie Gebäude mit Satteldächern, zu in das Rechengitter des Modells eingepassten „Ersatzquadern“ (Abb. 1.1 rechts). Die Grundfläche des Ersatzquaders wird durch das Original vorgegeben. Als Höhe des Ersatzquaders wird oft, zum Beispiel nach der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 10 (2010), eine mittlere Höhe zwischen der Traufe und dem First des Satteldaches gewählt.

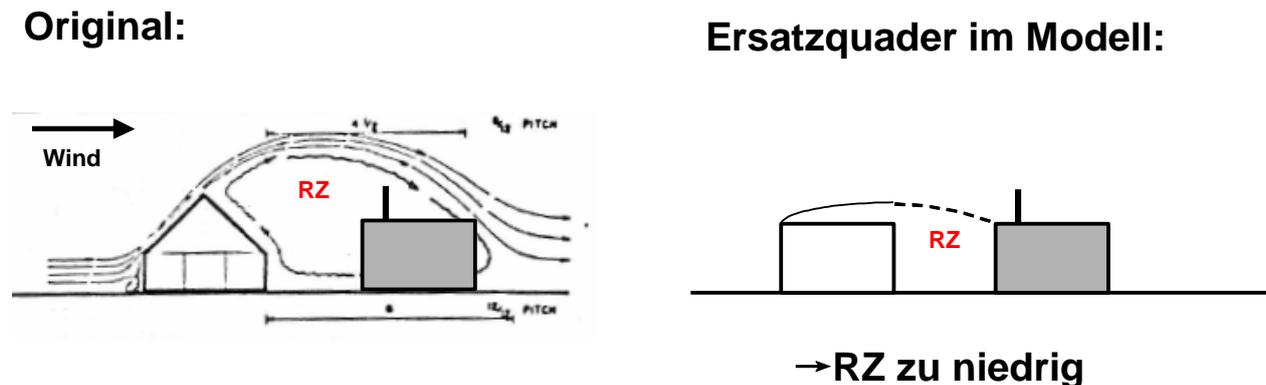


Abb. 1.1: Rezirkulationszonen (RZ) eines Originalgebäudes mit einem 45° - Satteldach und eines Ersatzquaders mit einer mittleren Höhe zwischen Traufe und First des Originals im numerischen Modell (schematische Darstellung).

Die Bedeutung der Wahl einer geeigneten Höhe des Ersatzquaders zeigt sich zum Beispiel, wenn sich im Lee ein zweites Gebäude mit einer Abgasquelle, wie einem Schornstein, befindet:

Die Mündung dieser Quelle befindet sich in der Originalsituation innerhalb der Rezirkulationszone des vorgelagerten Gebäudes mit dem Satteldach. Der Abtransport der Abgase wird massiv gestört, was zu erheblich erhöhten Konzentrationen in Gebäude- und Bodennähe führt. Der ungestörte Abtransport der Emissionen mit der freien Luftströmung, wie er in der TA Luft und in der VDI-Richtlinie 3781 Blatt 4 (2017), gefordert wird, ist nicht mehr gegeben.

In der schematischen Darstellung der Modellierung mit dem vorgelagerten Ersatzquader mittlerer Höhe ist die Höhe der Rezirkulationszone dagegen deutlich niedriger als bei dem Original. Die nun außerhalb der Rezirkulationszone liegende Quelle strömt frei ab und es ergeben sich zu niedrige Konzentrationen in Gebäude- und Bodennähe.

Daraus ergibt sich die Forderung, dass bei einer Modellierung des Strömungsfeldes die Ersatzquaderhöhe so zu wählen ist, dass die Wirkung des Ersatzquaders auf die Strömung im Rechenmodell der Umströmung des Originals möglichst nahe kommt.

Für den Vergleich der Umströmung von Original und Ersatzquader bietet sich, wie in dem gezeigten Beispiel, die Rezirkulationszone an. Sie lässt sich – vereinfachend – durch ihre Breite B_{RZ} , Länge L_{RZ} und Höhe H_{RZ} beschreiben. In der VDI-Richtlinie 3781 Blatt 4 (2017) wird die Rezirkulationszone angenähert durch eine Viertelellipse mit den beiden Halbachsen Länge L_{RZ} und Höhe H_{RZ} .

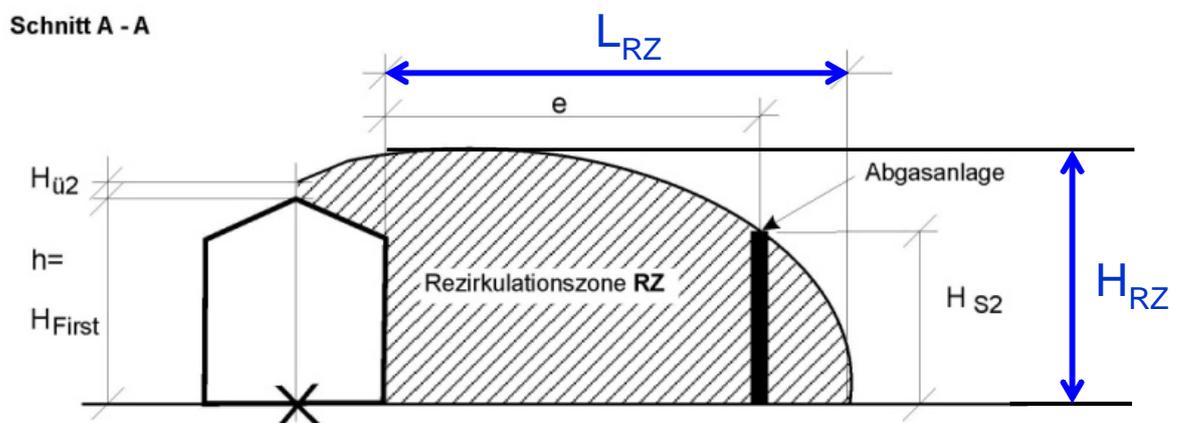


Abb. 1.2: Charakteristische Abmessungen der Rezirkulationszone (nach VDI-Richtlinie 3781 Blatt 4 (2017))

Die Forderung nach einer weitgehenden Ähnlichkeit der Rezirkulationszonen von Original und Modell ist in dem in Abb. 1.1 gezeigten Beispiel offensichtlich nicht erfüllt. Insbesondere die Höhe H_{RZ} , die maßgeblich für die freie Abströmung und die Bestimmung der Schornsteinhöhe ist, weicht von der des Originals ab.

Die Höhe des Ersatzquaders ist daher so zu wählen, dass die Abmessungen seiner Rezirkulationszone möglichst ähnlich denen des Originals sind. Die Abmessungen der Rezirkulationszonen werden sowohl für die Originalgebäude mit Satteldächern als auch für die Quader durch Experimente in einem Grenzschichtwindkanal bestimmt. Aus dem anschließenden Vergleich wird die Quaderhöhe mit der bestmöglichen Übereinstimmung als Ersatzquaderhöhe gewählt.

Voraussetzung bei dieser Vorgehensweise ist, dass im Fall eines quaderförmigen Gebäudes die im Modell simulierte Strömung mit der tatsächlichen (im Windkanal vermessenen) übereinstimmt. Dann können die Ergebnisse des Windkanals unmittelbar auch auf die numerische Modellierung übertragen werden. Diese Annahme wird als erfüllt angesehen, wenn das eingesetzte mikroskalige Windfeldmodell die in der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 9 (2005) gezeigten Strömungsfelder aus Windkanalversuchen wiedergeben kann.

Aufgrund der unterschiedlichen Formen der Gebäude ist allerdings keine vollständige Identität der Umströmung zwischen dem Gebäude mit Satteldach und dem Ersatzquader zu erwarten. Der Ersatzquader ist vielmehr als ein Hilfsmittel bei der Strömungsmodellierung mit einem kartesischen Rechengitter anzusehen.

Als Ergebnis der vorliegenden Untersuchung wird eine für die Praxis geeignete Empfehlung zur einheitlichen Wahl der Ersatzquaderhöhe für den Anhang 2 zum Thema „Ausbreitungsrechnung – Berücksichtigung von Gebäuden“ der TA Luft gegeben.

2. Modellierung im Windkanal

Zur Festlegung der Ersatzquaderhöhe ist es notwendig, die Abmessungen der Rezirkulationszonen von Originalgebäuden mit denen möglicher Ersatzquader zu vergleichen. Da geneigte Dachformen zu untersuchen waren, bot sich die physikalische Modellierung in einem Grenzschichtwindkanal an. Bei Einhaltung der in der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 12 (2000), beschriebenen Modellgesetze liefert der Windkanal bei beliebigen Gebäude- und Dachformen unmittelbar ein naturähnliches Strömungsfeld. 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.

2.1 Untersuchte Konfigurationen

2.1.1 Frei stehende Einzelgebäude

In einem ersten Teil der Untersuchungen wurden die Rezirkulationszonen frei stehender Einzelgebäude bei verschiedenen Anströmrichtungen ermittelt. Für diesen Teil wurde im Windkanal eine Grenzschicht im Maßstab 1:200 eingerichtet, wie sie sich über „mäßig rauem“ Gelände, d.h. über Grasland oder Ackerflächen, einstellt. Die Rauheitslänge z_0 betrug 0.01 m, der Profilerponent α war 0.12 (s. Anhang A3.1).

Betrachtet wurden zwei Gebäude mit unterschiedlichen Verhältnissen der Gebäudelänge L zur –breite B . Eines der beiden Gebäude besaß eine quadratische Grundfläche von 10 m x 10 m in der Natur, entsprechend einem Verhältnis der Gebäudelänge L zur –breite B von 1:1 (s. Abb. 2.1a). Die Grundfläche des zweiten, hallenartig länglichen Gebäudes betrug 10 m x 50 m, entsprechend $L/B = 1:5$ (s. Abb. 2.1b). Die Angabe von Längen, Breiten etc. als Naturgrößen wird der Einfachheit halber des Weiteren beibehalten.

Beide Einzelgebäude hatten Satteldächer, deren Dachneigungen 20° (s. a. die Festlegung zur Mindesthöhe des Dachfirstes nach TA Luft, Abschnitt 5.5.2), 30° , 45° und 60° betrug. Als Traufhöhe der Satteldächer wurde 6 m gewählt. Zusätzlich wurden für das 45° -Satteldach die beiden Traufhöhen 3 m und 9 m untersucht.

Wie bereits in Abschnitt 1 erläutert, waren zur Bestimmung der Ersatzquaderhöhe die Rezirkulationszonen der Originale, hier der Gebäude mit den Satteldächern, und der Quader mit gleichen Grundflächen, aber unterschiedlichen Höhen, zu vergleichen. Als Höhen der Quader gewählt wurden jeweils die Traufhöhe des Originals, seine Firsthöhe und eine Höhe entsprechend etwa der halben Höhe zwischen Traufe und First. Die Höhen und ihre Zuordnung zu den Satteldächern unterschiedlicher Dachneigungen sind in der Tabelle 2.1 zusammengestellt.



Abb. 2.1a: Gebäudemodelle mit Satteldächern (von links: Dachneigungswinkel 20°, 30°, 45° und 60°) und höhenverstellbarer Quader, quadratische Grundfläche (Längen- zu Breitenverhältnis $L/B = 1:1$).

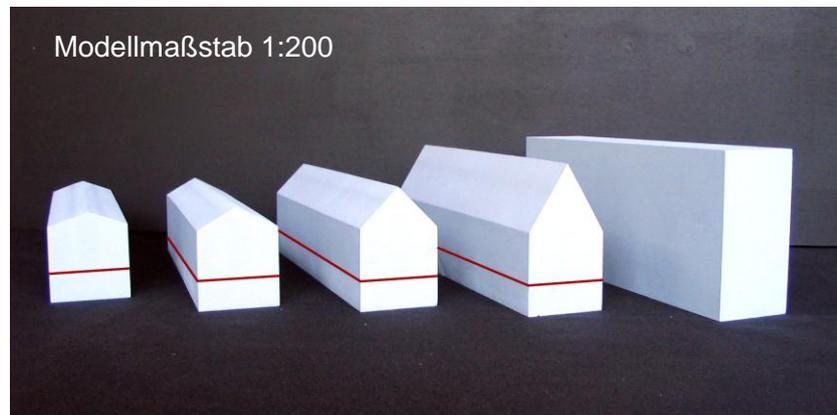


Abb. 2.1b: Gebäudemodelle mit Satteldächern (von links: Dachneigungswinkel 20°, 30°, 45° und 60°) und höhenverstellbarer Quader, Längen- zu Breitenverhältnis $L/B = 1:5$.

Tabelle 2.1: Untersuchte Höhen möglicher Ersatzquader bei den Satteldächern verschiedener Dachneigung.

Dachneigung Satteldach	Höhe des Ersatzquaders		
	Traufhöhe des Satteldaches	Firsthöhe des Satteldaches	etwa halbe Höhe des Satteldaches
20°	6.0 m	7.8 m	6.9 m
30°	6.0 m	8.9 m	7.8 m
45°	6.0 m	11.0 m	8.9 m
60°	6.0 m	14.7 m	10.0 m

Um die verschiedenen Anströmrichtungen 0 Grad (Anströmung senkrecht zur Firstlinie des Satteldaches), 30 Grad, 45 Grad, 60 und 90 Grad (firstparallel) zu simulieren, wurden beide Gebäudemodelle auf je einem Drehteller montiert. Ein Drehteller wurde mit einer Aussparung zur Aufnahme der Modellgebäude mit der quadratischen Grundfläche versehen (Abb. 2.2), der andere mit einer Aussparung für die Gebäude mit der Grundfläche im Längen- zu Breitenverhältnis von $L/B = 1:5$. Durch in die Aussparungen eingebaute Verstellvorrichtungen ließen sich die Höhen der Quader (Abb. 2.1a und b rechts außen) auf die Höhen nach der Tabelle 2.1 und die Traufhöhen der Gebäude mit den Satteldächern auf 3 m, 6 m und 9 m einstellen. Bei der Traufhöhe 6 m reichen die Gebäude mit den Satteldächern bis zu den markierten Linien in den Abbildungen 2.1a und b in die Aussparung hinein.

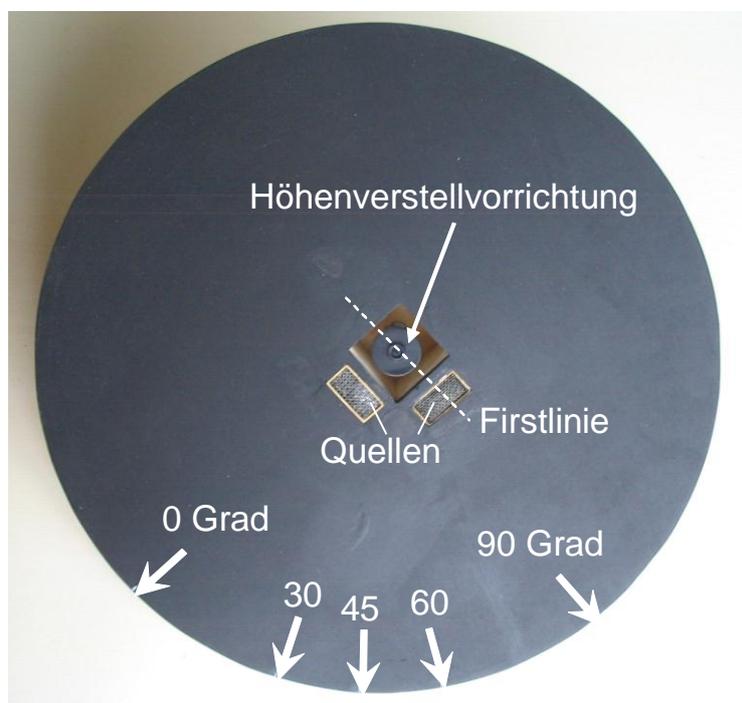


Abb. 2.2: Drehteller für Gebäude mit quadratischer Grundfläche einschließlich der Quellen und der Höhenverstellvorrichtung für die Quader.

In beiden Drehtellern befinden sich je zwei Quellen zur Ausbringung des Rauches bei der Strömungssichtbarmachung bzw. des Tracergases bei den Konzentrationsmessungen. Einbauten in die Quellen sorgen für eine Vergleichmäßigung der Emissionen über die Austrittsquerschnitte. Die Quellen wurden, je nach Anströmrichtung, jeweils im Lee der Gebäude betrieben.

Abbildung 2.3 zeigt beispielsweise ein in den Windkanal eingebautes Einzelgebäude mit einem Satteldach unter 45° und einem Verhältnis $L/B = 1:5$ und darunter den Ersatzquader mit einer Höhe gleich der Firsthöhe des Satteldaches. Im Hintergrund der Abbildung sind die Wirbelgeneratoren und die Bodenrauheiten bzw. Rauheitselemente der mäßig rauen Grenzschicht in der Anlaufstrecke des Windkanals (s. Anhang A1) zu erkennen.

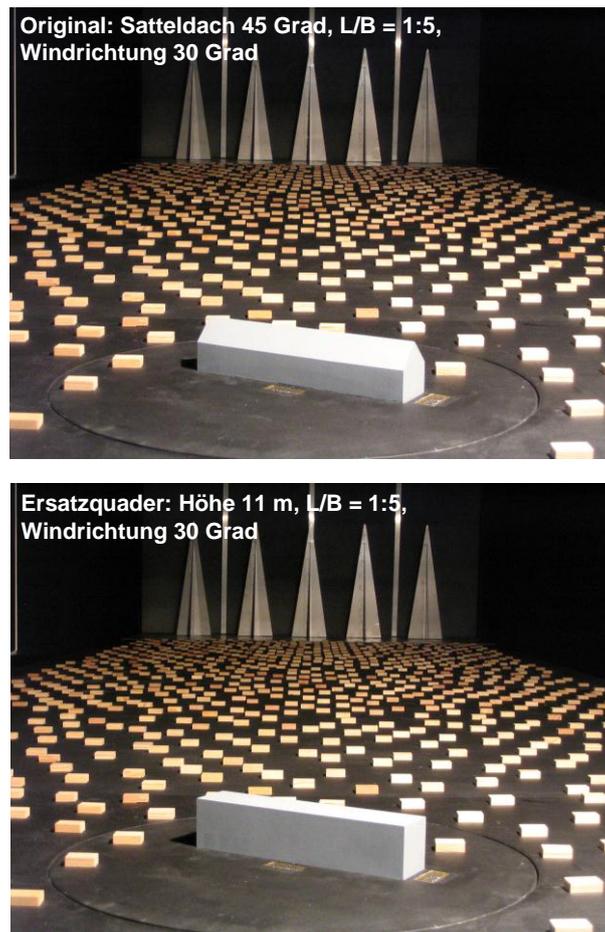


Abb. 2.3: Originalgebäude und Ersatzquader der Höhe 11 m im Windkanal, mäßig raue Grenzschicht, Blick entgegen der Anströmung.

2.1.2 Gebäude in einer dichten Bebauung

Bei dichten Bebauungen, wie in Industrieanlagen oder städtischen Gebieten, überlagern sich die Rezirkulationszonen der Gebäude gegenseitig. Es stellt sich eine sogenannte nachlaufbeeinflusste Strömung ein (s. beispielsweise Theurer, 1993). Dadurch ändern sich unter Umständen die Strömungsablösungen, vor allem an den Quadern, gegenüber frei stehenden, einzelnen Gebäuden, was wiederum die Höhen der Rezirkulationszonen beeinflusst. Nachdem die Ersatzquaderhöhen für frei stehende Gebäude ermittelt worden waren, wurde in einer zweiten Versuchsserie der Einfluss einer Umgebungsbebauung auf die Wahl der Ersatzquaderhöhe überprüft.

Bei der Versuchsserie mit Umgebungsbebauung wurde im Windkanal eine andere Grenzschicht als bei den frei stehenden Einzelgebäuden verwendet. Diese, als rau bezeichnete Grenzschicht mit einem z_0 von 0.5 m bzw. einem Profilexponenten von $\alpha = 0.22$ und einer Verdrängungshöhe d_0 von ca. 3 m (s. Anhang A3) ist typisch für mitteldichte Bebauungen, wie Vorstädte oder Industrieanlagen.

Die Überprüfung in dieser Versuchsserie beschränkte sich auf Satteldächer der Neigung 45° und firsthohe Ersatzquader. Anströmrichtungen waren 0 und 45 Grad.

Aus der Vielzahl möglicher Gebäudeanordnungen wurden zwei Fälle ausgewählt:

— eine Gebäudegruppe, bestehend aus dem Referenzgebäude mit $L/B = 1:1$ mit den Emissionsquellen und 5 weiteren gleichen Einzelgebäuden. Die Abstände a der Gebäude zueinander waren 6 m, 16 m und 26 m. In der Abbildung 2.4 ist die aus 6 Häusern bestehende Gebäudegruppe für die Anströmrichtung 45 Grad und einen Abstand $a = 6$ m, jeweils mit Satteldach und als Ersatzquader, zu sehen. Der Abstand 6 m entspricht einem zweifachen Mindestabstand von Gebäuden zu Grundstücksgrenzen von üblicherweise 3 m. Bei diesem Abstand wird eine unmittelbare Überlagerung der Rezirkulationszonen der Gebäude zu einer quasi-glatten Strömung erwartet.

— eine Vorbebauung des Referenzgebäudes mit $L/B = 1:5$ durch ein oder zwei weitere Gebäudezeilen in der Anströmung. Auch hier wurde der Abstand a der Gebäudezeilen zueinander zwischen 6 m, 16 m und 26 m variiert. Die Abbildung 2.5 zeigt eine vorgelagerte Gebäudezeile im Luv in einem Abstand von 26 m vom Referenzgebäude.

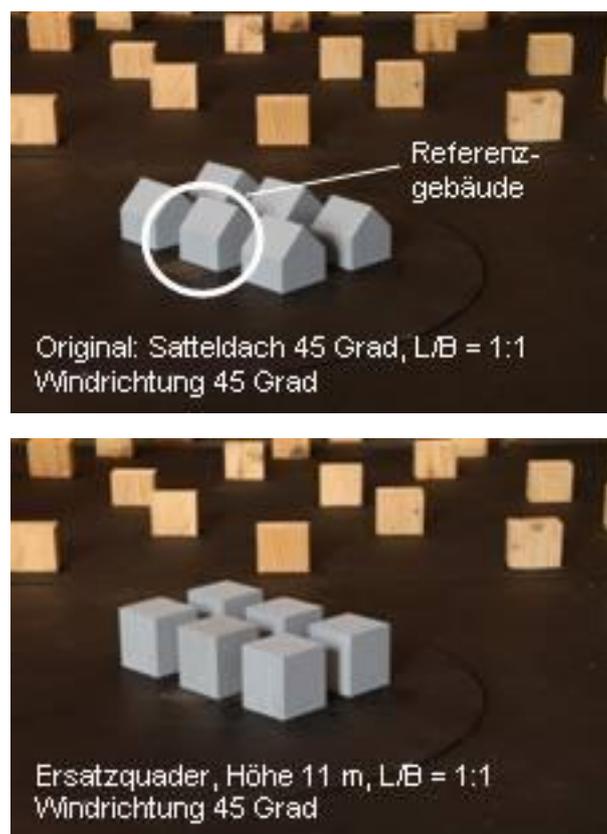


Abb. 2.4: Gebäudegruppe, bestehend aus 6 Einzelgebäuden mit quadratischer Grundfläche (Referenzgebäude mit Quellen und 5 umgebende Gebäude), Satteldächer mit 45° und Ersatzquader, Abstand a der Gebäude untereinander 6 m, Blick entgegen der Anströmung.

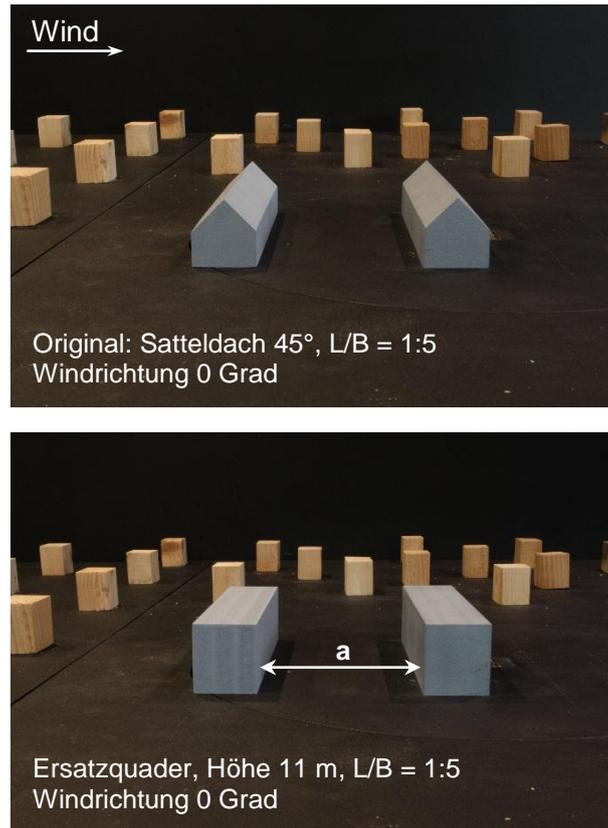


Abb. 2.5: Vorbebauung mit einer vorgelagerten Gebäudezeile im Luv, Längen- zu Breitenverhältnis der Gebäude 1:5, Abstand $a = 26$ m, Anströmung von links.

Ergänzend zu den Varianten mit gleich hoher Bebauung wurden Fälle untersucht, bei denen die durch Quader simulierte Vorbebauung etwa 30% höher war als die Referenzgebäude.

2.2 Eingesetzte Untersuchungsmethoden

2.2.1 Strömungssichtbarmachung

Bei der Bestimmung der Abmessungen der Rezirkulationszonen wurden zwei Verfahren zur Sichtbarmachung der Strömung eingesetzt, die am Beispiel des Gebäudes mit einem Satteldach der Neigung 60° und quadratischer Grundfläche mit $L/B = 1:1$ für die Anströmrichtung 60 Grad erläutert werden:

Ein Verfahren war die **Sichtbarmachung der Rezirkulationszonen durch Rauch**. Hierbei wurde auf den windabgewandten Seiten des Gebäudes aus einer (bei den Anströmrichtungen 0 und 90 Grad) oder beiden (bei den übrigen Anströmrichtungen) Bodenquellen impulsarm Rauch in die Rezirkulationszone emittiert. Die mittlere Austrittsgeschwindigkeit des Rauches war mit ca. 2 - 4 cm/s vernachlässigbar gering. Helle und scharf abgegrenzte, vertikale und, in einigen Fällen, horizontale Lichtebenen („Lichtschnitte“) machen den Rauch und die Rezirkulationszone sichtbar.

Die Abbildung 2.6 zeigt einen solchen vertikalen Lichtschnitt. Die an der Firstkante des Satteldaches abgelöste Strömung erreicht kurz danach die Höhe der Rezirkulationszone H_{RZ} . Mit zunehmender Entfernung von der Ablösekante erodiert eine Scherschicht zur Außenströmung immer stärker die Rezirkulationszone. Der Wiederanlegepunkt der abgelösten Strömung am Boden legt die Länge der Rezirkulationszone L_{RZ} fest.

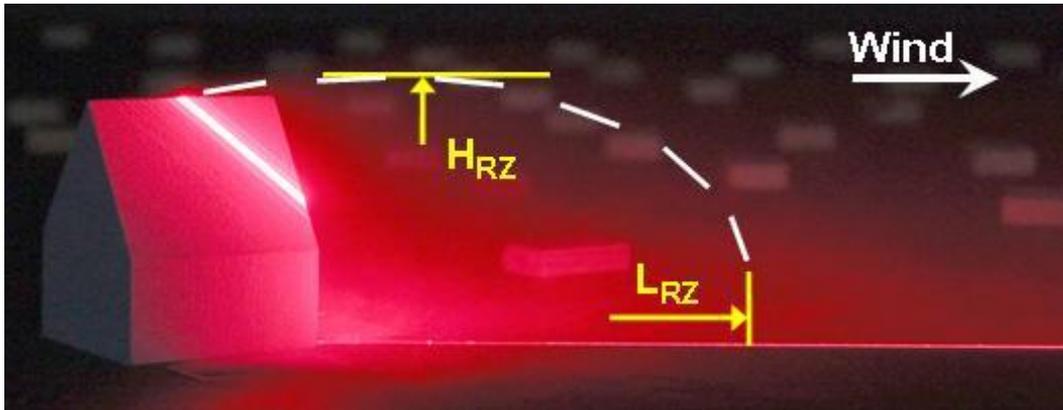


Abb. 2.6: Vertikaler Lichtschnitt hinter einem Gebäude mit quadratischer Grundfläche und einem Satteldach mit 60° Neigung, Anströmrichtung 60 Grad. Eingetragen ist die Kontur der Rezirkulationszone mit der Höhe H_{RZ} und Länge L_{RZ} .

Da der Wiederanlegepunkt wegen der turbulenten Fluktuationen zeitlich stark variiert, war er aus den Vertikalschnitten teilweise schwer auszumachen. Zur besseren Bestimmung von L_{RZ} wurden daher die vertikalen, roten Lichtschnitte durch horizontale, grün eingefärbte Lichtschnitte in Bodennähe ergänzt. Aus dem horizontalen Lichtschnitt (Abb. 2.7) bei demselben Gebäude wie in der Abb. 2.6 ist hinter dem Gebäude die Rückströmung in der Rezirkulationszone deutlich zu erkennen und L_{RZ} einfacher zu bestimmen.

Die Belichtungszeiten bei den Aufnahmen der Lichtschnitte lagen, je nach Lichtverhältnissen der Rauchsituation, zwischen 0.8 und einigen Sekunden. Je Situation wurden mindestens 5 Bilder aufgenommen.

Die zweite Methode verwendet **Miniatur-Windfähnchen** zur Identifikation der lokalen bodennahen Strömungsrichtung. Zur Bestimmung der Längen der Rezirkulationszonen wurden die leicht drehbar gelagerten Fähnchen hinter der windabgewandten Seite der Gebäude platziert. Langzeitbelichtungen über mindestens 10 Sekunden Dauer zeigten an, in welche Richtungen sich die Fähnchen während dieses Zeitraumes orientierten. Richten sie sich entgegen der Anströmung zum Gebäude hin aus, befinden sie sich in der Rezirkulationszone (s. Abb. 2.8). Die Seitenansichten wurden durch Draufsichten, wie in Abbildung 2.9, ergänzt, da diese die zeitliche Variabilität der Strömungsrichtungen deutlicher aufzeigten.

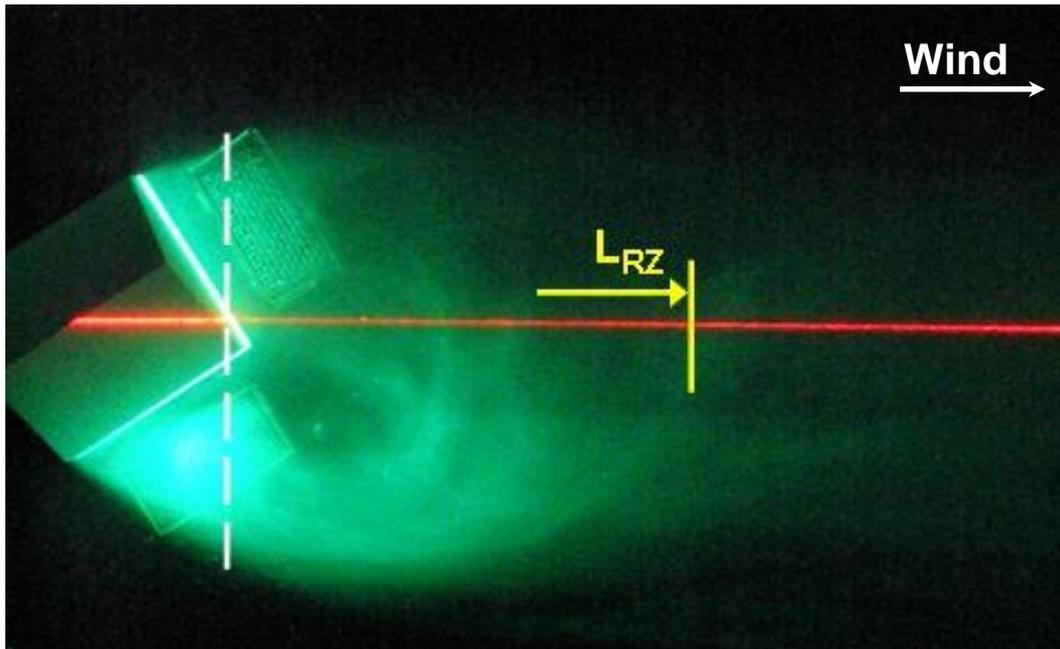


Abb. 2.7: Horizontaler Lichtschnitt hinter dem Gebäude aus der Abb. 2.6 (quadratische Grundfläche mit $L/B = 1:1$, Satteldach mit 60° Neigung, Anströmrichtung 60 Grad). Eingetragen sind die Länge L_{RZ} und die rote, vertikale Lichtschnittebene aus Abb. 2.6.

Die Aufnahmen der Fähnchenreihe in den Abbildungen 2.8 und 2.9 erfolgten hinter dem bereits zuvor betrachteten Gebäude ($L/B = 1:1$, Satteldach mit 60° Neigung, Windrichtung 60 Grad). Das zum Gebäude nächste Fähnchen befindet sich, umgerechnet auf die Natur, in einem Abstand von 6 m, hinter der Hauswand. Die nächsten Fähnchen sind jeweils 4 Meter weiter stromab entfernt.

Nach der Seitenansicht (Abb. 2.8) reicht die Länge der Rezirkulationszone bis zu dem fünften, wieder in Anströmrichtung ausgerichteten, Fähnchen.

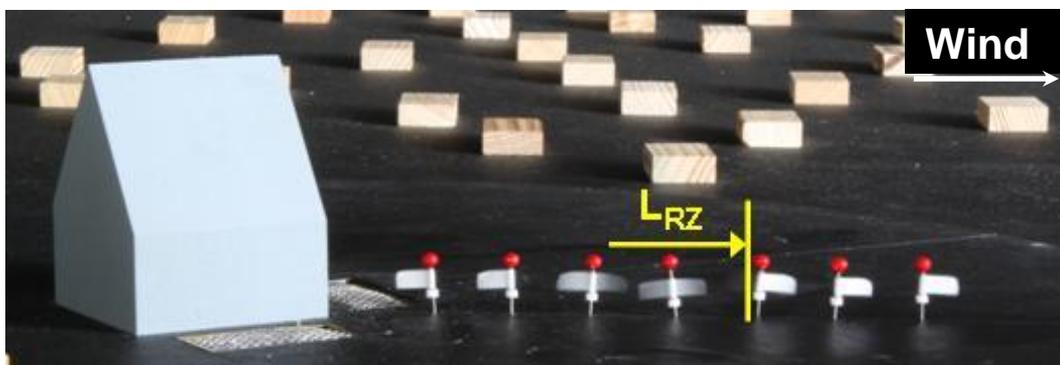


Abb. 2.8: Seitenansicht der Miniaturwindfähnchen hinter dem Gebäude mit $L/B = 1:1$ und einem Satteldach mit 60° Neigung bei der Anströmrichtung 60 Grad. Langzeitbelichtung.

In der Draufsicht (Abb. 2.9) erkennt man die zeitliche Variation der Strömungsrichtungen in den verschiedenen Abständen hinter dem Gebäude. Bei den ersten zwei Fähnchen ist eine eindeutige Rückströmung zum Gebäude hin auszumachen. Die Schwankungen in den Windrichtungen der folgenden Fähnchen 3 und 4 rühren von dem im Horizontallichtschnitt in der Abbildung 2.7 erkennbaren Wirbel in der Rezirkulationszone her. Wie in der Seitenansicht, richtet sich das fünfte Fähnchen wieder, wenn auch noch erheblich schwankend, in Richtung der Anströmung aus.

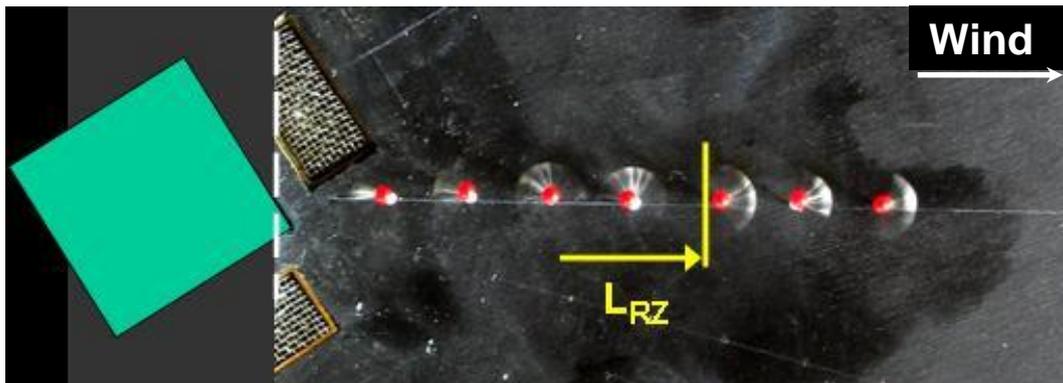


Abb. 2.9: Draufsicht auf die Miniaturwindfähnchen hinter dem Gebäude mit quadratischer Grundfläche mit $L/B = 1:1$ und einem Satteldach mit 60° Neigung bei der Anströmrichtung 60 Grad. Langzeitbelichtung.

Die Längen der Rezirkulationszonen in Bodennähe wurden aus mehreren Aufnahmen der Seitenansichten und, in einigen Fällen, der Draufsichten bestimmt.

Gegenüber der Sichtbarmachung mit Rauch erlauben die Miniaturwindfähnchen höhere Anströmgeschwindigkeiten im Windkanal und längere Belichtungszeiten. Nachteile sind die Beschränkung auf die Bodennähe und der stärkere Eingriff in das Strömungsfeld.

Anhand der Längen der Rezirkulationszonen zeigt der Vergleich in Anhang A4.2, dass die Ergebnisse nach beiden Verfahren weitgehend übereinstimmen. Als Abmessungen der Rezirkulationszonen werden im Folgenden die mittleren Größen aus den Sichtbarmachungen mit beiden Verfahren angegeben.

2.2.2 Strömungsmessungen

Im Nachlauf der Gebäude wurden zu den Sichtbarmachungen ergänzende Strömungsmessungen durchgeführt. Hinter Gebäuden mit Satteldächern und Quadern verschiedener Höhen und L/B -Verhältnisse und bei unterschiedlichen Anströmrichtungen wurden in insgesamt 10 Fällen Längs- und Vertikalprofile in einer Vertikalebene in Strömungsrichtung aufgenommen. Mit der eingesetzten Hitzdrahtsonde wurde nicht der gesamte lokale Strömungsvektor erfasst, sondern nur die Veränderungen des Strömungsvektors und der turbulenten Schwankungen gegenüber der Außenströmung. Hinweise zu den Mittelungszeiten und zur Genauigkeit bei den Strömungsmessungen finden sich in den Anhängen A4.1 und A4.3.

2.2.3 Konzentrationsmessungen

Die Wahl der Ersatzquaderhöhe wurde durch Konzentrationsprofile in den Rezirkulationszonen für ausgewählte Situationen überprüft. Anstelle des Rauches emittierten die Bodenquellen ein Tracergas. Die bei dem Original und dem Ersatzquader ermittelten Konzentrationsprofile sollten im Vergleich zu denen bei den übrigen Quadern besser zueinander passen, auch wenn aufgrund der Unterschiede zwischen der Umströmung von Sattel- und Flachdächern keine völlige Übereinstimmung zu erwarten war. Durchgeführt wurden die Konzentrationsmessungen mit einem Flammenionisationsdetektor und Ethan als Tracer. Hinweise zur Kalibrierung des FIDs und der Genauigkeit der Konzentrationsmessungen finden sich im Anhang A4.4.

3. Einzelgebäude und Ersatzquader (TP 1)

3.1 Rezirkulationszonen aus der Strömungssichtbarmachung

3.1.1 Typische Gebäude mit Satteldächern

Hinter den in Abschnitt 2.1 beschriebenen, frei stehenden Einzelgebäuden wurden mit den Methoden der Strömungssichtbarmachung (s. Abschnitt 2.2.1) die Höhen H_{RZ} , Längen L_{RZ} und Breiten B_{RZ} der Rezirkulationszonen ermittelt. Zu jedem Gebäude mit einem Satteldach wurden, bei unterschiedlichen Anströmrichtungen, drei Quader nach der Tabelle 2.1 mit der Traufhöhe, einer etwa mittleren Höhe zwischen Traufe und First, und der Firsthöhe untersucht. Aus dem Vergleich der Abmessungen der Rezirkulationszonen des Originals und der jeweiligen Quader ging dann die Ersatzquaderhöhe hervor. Besondere Beachtung bei dem Vergleich fand die Höhe der Rezirkulationszone als die im Hinblick auf die Bestimmung der Schornsteinhöhen wichtigste Abmessung.

Die Ermittlung der Ersatzquaderhöhe aus den Abmessungen der Rezirkulationszonen wird an zwei Beispielen für ein Gebäude mit $L/B = 1:1$ bei der Anströmrichtung 0 Grad (s. Tabelle 3.1), und für ein Gebäude mit $L/B = 1:5$ bei der Anströmrichtung 45 Grad (s. Tabelle 3.2) erläutert. Die Ergebnisse aller untersuchten Fälle sind in den Tabellen A5.1 – A5.5 im Anhang zusammengestellt.

Die Höhen H_{RZ} und die Längen L_{RZ} der Rezirkulationszonen aus der Tabelle 3.1 (Gebäude mit $L/B = 1:1$ bei der Windrichtung 0 Grad) sind in den Abbildungen 3.1 und 3.2 aufgetragen.

Nach der Abbildung 3.1 ist die Höhe der Rezirkulationszone H_{RZ} bei den Satteldächern aller untersuchten Dachneigungen um ca. 10 – 15% größer als sogar bei den jeweils firsthohen Quadern. Die Höhen der Rezirkulationszonen der übrigen Quader sind noch geringer.

Die Länge der Rezirkulationszone (Abb. 3.2) ist zwar bei den Satteldächern mit geringeren Dachneigungen kleiner als bei den Quadern, gleicht sich aber mit der Zunahme der Dachneigung mehr und mehr an. Bei dem 60°-Satteldach liegt L_{RZ} zwischen der des mittelhohen und der des firsthohen Quaders.

Die Breite der Rezirkulationszone entsprach bei der hier senkrechten Anströmung sowohl bei den Gebäuden mit Satteldächern als auch bei den Quadern verschiedener Höhen der Gebäudebreite.

Als weiteres Beispiel dient das Gebäude mit $L/B = 1:5$ bei der Anströmrichtung von 45 Grad (Tabelle 3.2). H_{RZ} und L_{RZ} sind in den Abbildungen 3.3 und 3.4 dargestellt.

Auch bei der schrägen Anströmung sind die Höhen der Rezirkulationszonen H_{RZ} bei den Satteldächern, mit Ausnahme des Daches mit 20° Neigung, gleich hoch wie oder höher als bei den firsthohen Quadern (Abb. 3.3).

Bei den Originalgebäuden mit den Satteldächern sind die Längen der Rezirkulationszonen in der Abbildung 3.4 kleiner als bei den firsthohen Quadern. Sie nehmen auch hier mit der Dachneigung zu, so dass L_{RZ} bei dem 60°-Satteldach wieder einen Wert zwischen denen des mittelhohen und des firsthohen Quaders erreicht.

Die Breiten der Rezirkulationszonen waren bei der Schräganströmung mit ca. 47 – 52 m um bis zu 25% größer als die Projektion des Gebäudes in Strömungsrichtung bzw. seine effektive Länge von 42 m.

In beiden Beispielen, wie auch in den übrigen untersuchten Fällen, sind die Höhen der Rezirkulationszonen bei den Satteldächern am ähnlichsten denen der firsthohen Quader. Dies gilt auch in den Abbildungen 3.5 und 3.6. In ihnen werden die Höhen der Rezirkulationszonen bei Gebäuden mit 45°-Satteldächern mit denen bei den trauf-, mittel- und firsthohen Quadern verglichen. Betrachtet werden verschiedene Längen- und Breitenverhältnisse der Gebäude und Windrichtungen. Bei beiden Gebäudetypen und unabhängig von der Windrichtung kommt die H_{RZ} des firsthohen Quaders der des Originalgebäudes mit dem Satteldach am nächsten.

Aus den bisherigen Ergebnissen folgt, dass für die Rechenmodelle firsthohe Ersatzquader als einfache, von der Windrichtung unabhängige, und einheitliche Alternative zu den Satteldächern zu verwenden sind.

Zwar sind die Längen der Rezirkulationszonen bei firsthohen Ersatzquadern meist größer als bei Satteldächern gleicher Höhe. Hinsichtlich der Modellierung erfolgt durch die firsthohen Quader deshalb eine konservative Abschätzung der Längen der Rezirkulationszonen.

Tabelle 3.1: Abmessungen der Rezirkulationszonen, Windrichtung 0 Grad,*L/B*-Verhältnis 1:1

	<i>B_{RZ}</i>	<i>L_{RZ}</i>	<i>H_{RZ}</i>
Satteldach 20°	10.0	9.3	8.7
Quader 6.0 m (Traufe)	10.0	9.6	6.2
Quader 6.9 m	10.0	11.7	7.0
Quader 7.8 m (First)	10.0	12.4	7.9
Satteldach 30°	10.0	10.7	10.0
Quader 6.0 m (Traufe)	10.0	9.6	6.2
Quader 7.8 m	10.0	12.4	7.9
Quader 8.9 m (First)	10.0	13.2	9.0
Satteldach 45°	10.0	12.8	12.4
Quader 6.0 m (Traufe)	10.0	9.6	6.2
Quader 8.9 m	10.0	13.2	9.0
Quader 11.0 m (First)	10.0	14.7	11.1
Satteldach 60°	10.0	14.9	16.8
Quader 6.0 m (Traufe)	10.0	9.6	6.2
Quader 10.0 m	10.0	13.8	10.1
Quader 14.7 m (First)	10.0	17.1	14.7

Tabelle 3.2: Abmessungen der Rezirkulationszonen, Windrichtung 45 Grad,*L/B*-Verhältnis 1:5

	<i>B_{RZ}</i>	<i>L_{RZ}</i>	<i>H_{RZ}</i>
Satteldach 20°	47.0	15.6	11.0
Quader 6.0 m (Traufe)	50.0	16.3	10.0
Quader 6.9 m	50.0	19.1	11.0
Quader 7.8 m (First)	50.0	22.1	12.0
Satteldach 30°	47.0	20.5	13.0
Quader 6.0 m (Traufe)	50.0	16.3	10.0
Quader 7.8 m	50.0	22.1	12.0
Quader 8.9 m (First)	51.0	24.2	13.0
Satteldach 45°	50.0	24.2	17.0
Quader 6.0 m (Traufe)	50.0	16.3	10.0
Quader 8.9 m	51.0	24.2	13.0
Quader 11.0 m (First)	51.0	27.1	16.0
Satteldach 60°	50.0	27.1	20.0
Quader 6.0 m (Traufe)	50.0	16.3	10.0
Quader 10.0 m	51.0	25.1	14.0
Quader 14.7 m (First)	52.0	30.7	19.0

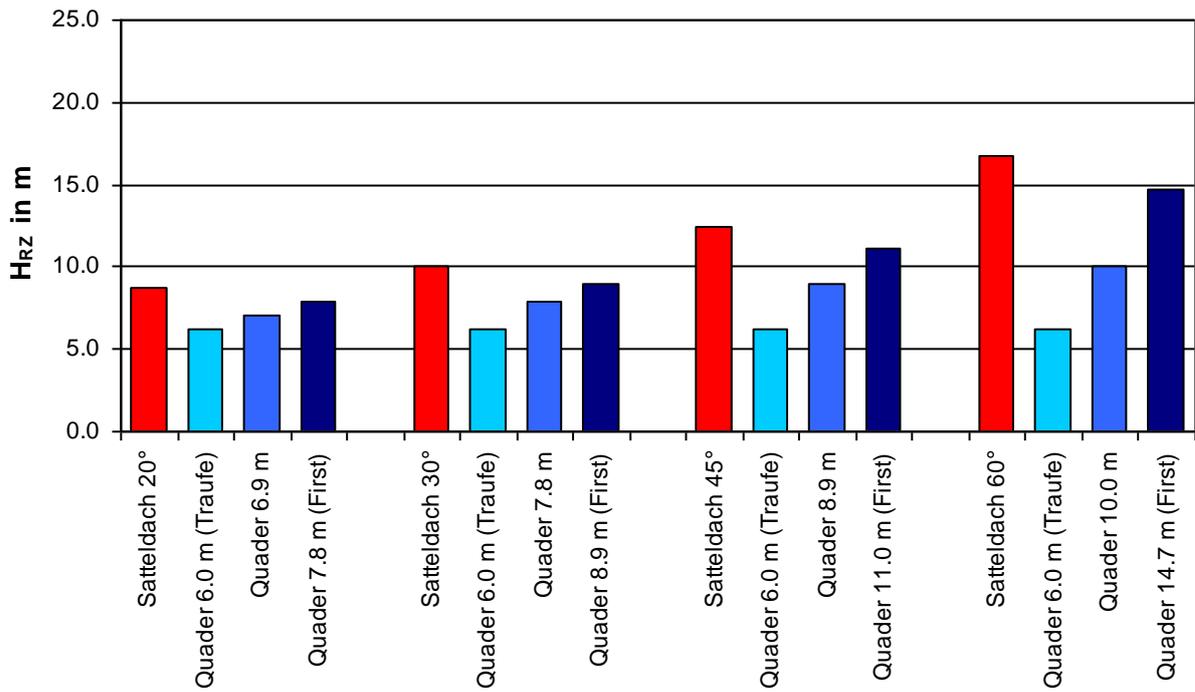


Abb. 3.1: Höhen der Rezirkulationszonen, Windrichtung 0 Grad, *L/B*-Verhältnis 1:1.

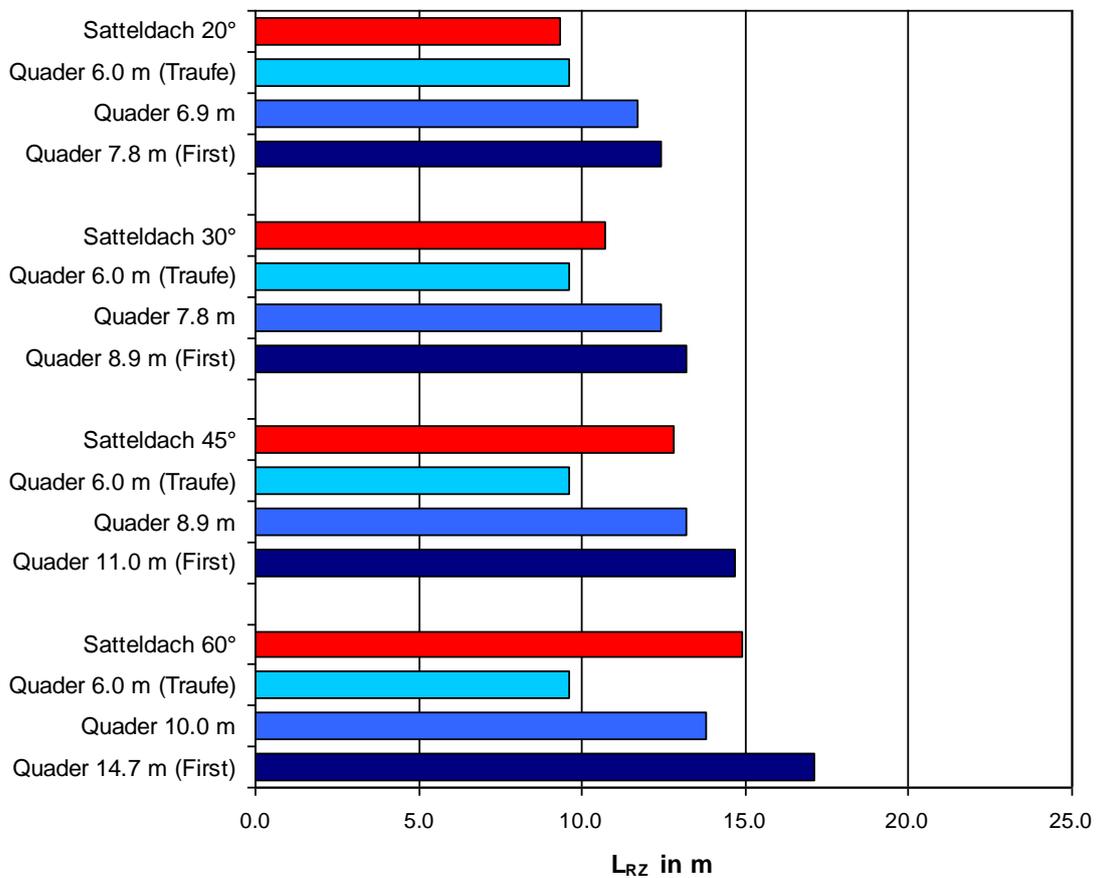


Abb. 3.2: Längen der Rezirkulationszonen, Windrichtung 0 Grad, *L/B*-Verhältnis 1:1.

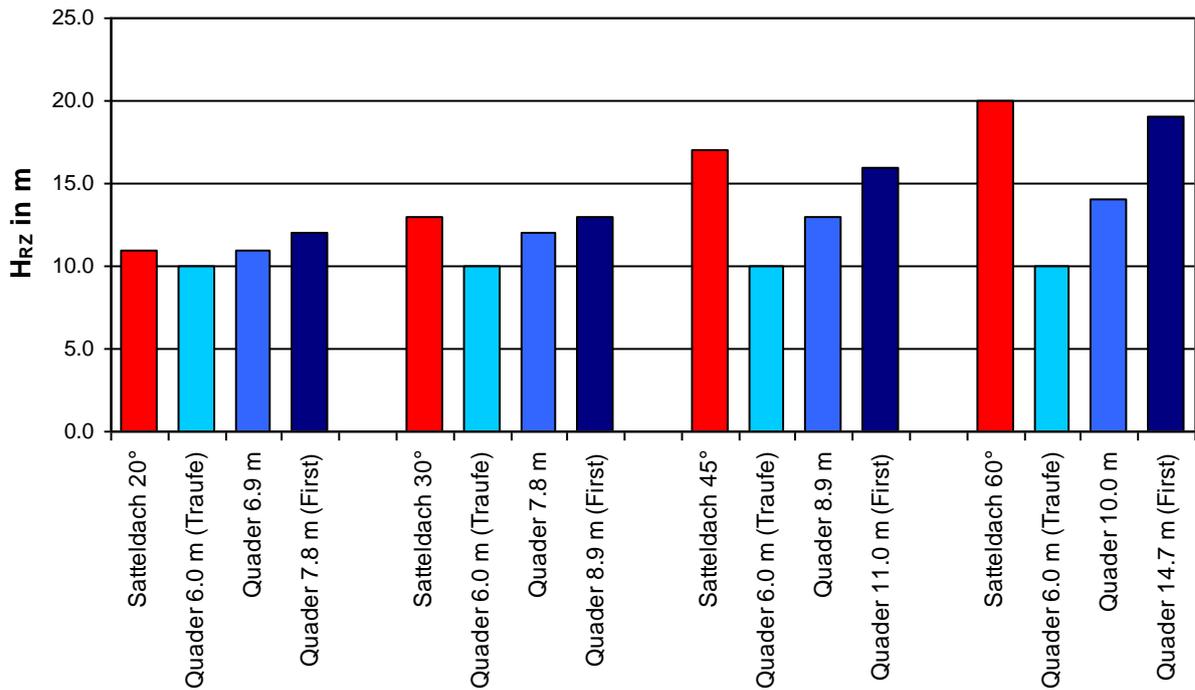


Abb. 3.3: Höhen der Rezirkulationszonen, Windrichtung 45 Grad, *L/B*-Verhältnis 1:5.

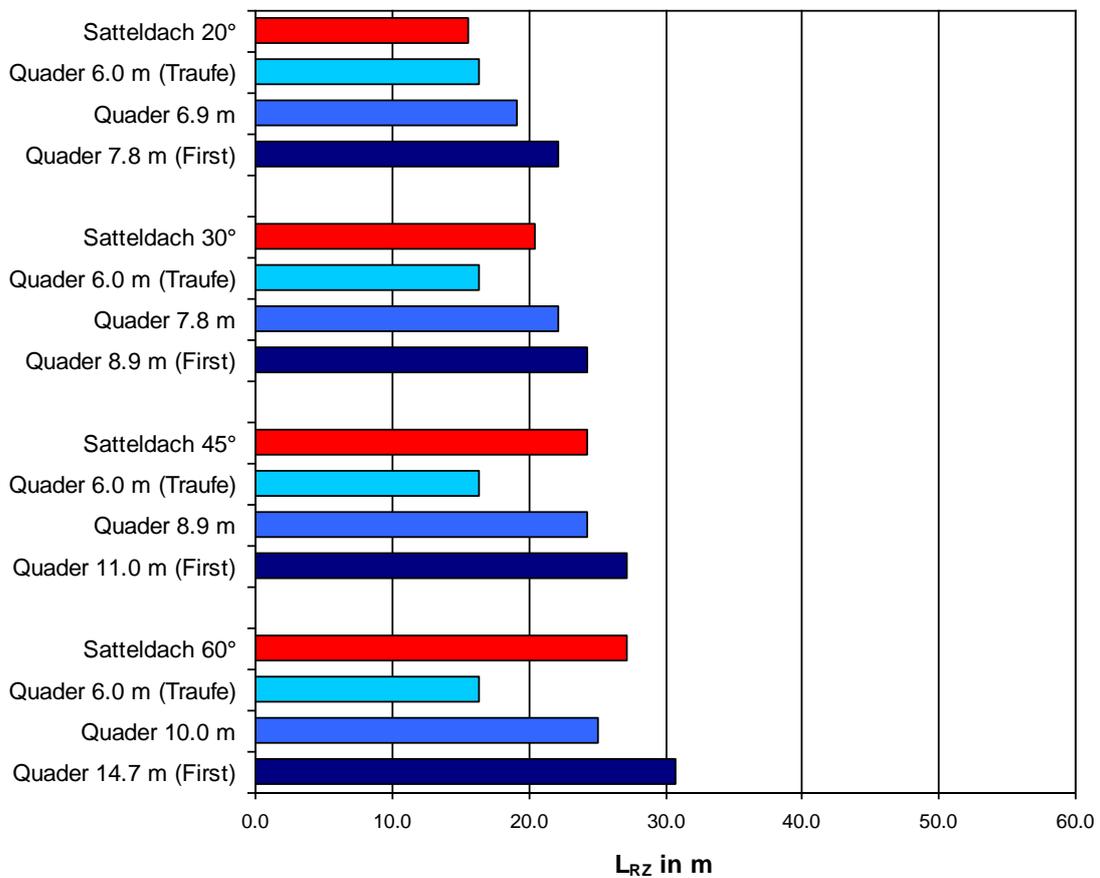


Abb. 3.4: Längen der Rezirkulationszonen, Windrichtung 45 Grad, *L/B*-Verhältnis 1:5.

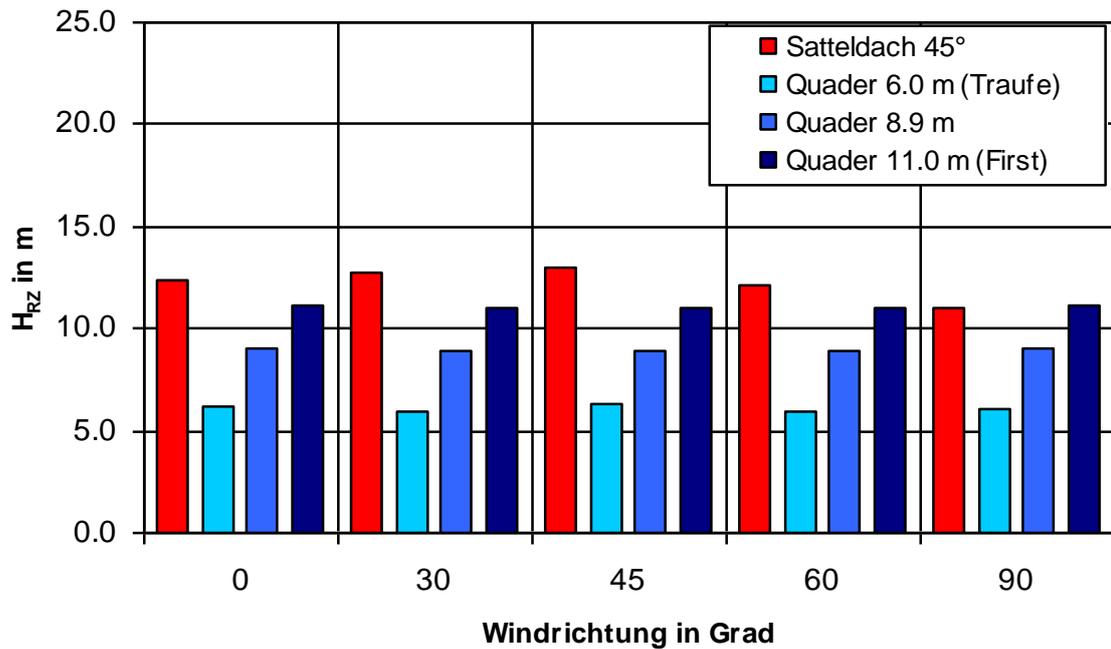


Abb. 3.5: Höhen der Rezirkulationszonen bei einem Satteldach unter 45° im Vergleich zu verschieden hohen Quadern, $L/B = 1:1$, unterschiedliche Windrichtungen.

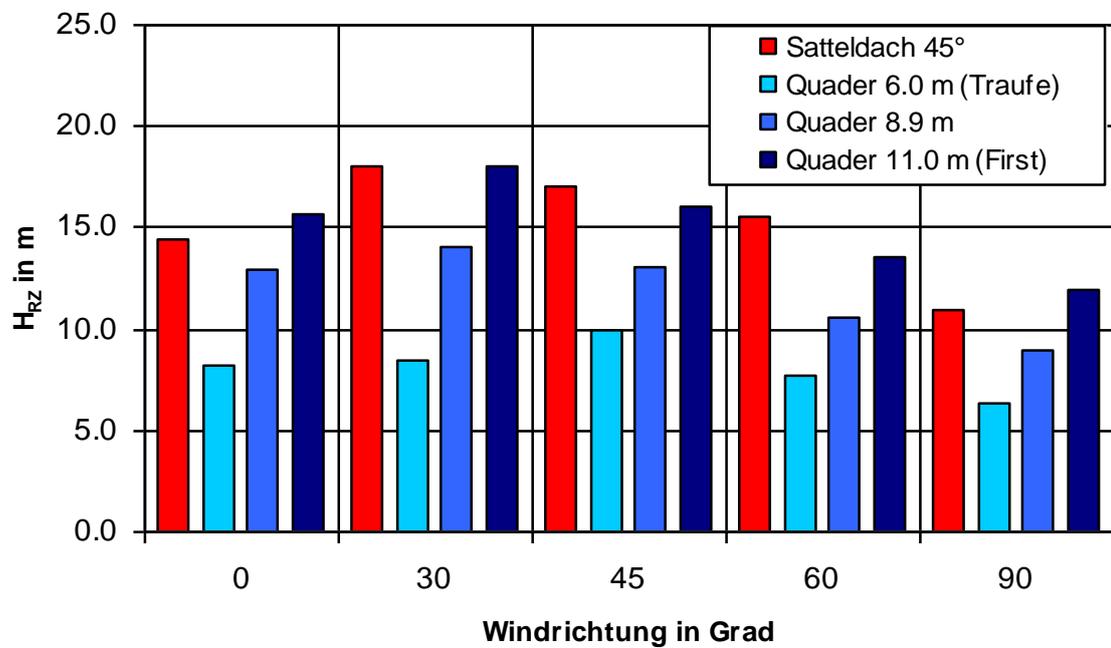


Abb. 3.6: Höhen der Rezirkulationszonen bei einem Satteldach unter 45° im Vergleich zu verschieden hohen Quadern, $L/B = 1:5$, unterschiedliche Windrichtungen.

3.1.2 Andere Traufhöhen

Im Abschnitt 3.1.1 wurden die Abmessungen der Rezirkulationszonen bei den Gebäuden mit Satteldächern für eine einheitliche Traufhöhe von 6 m diskutiert und die Ersatzquaderhöhen ermittelt. Wie eine Änderung der Trauf- bzw. Gebäudehöhe die Abmessungen der Rezirkulationszone und so die Ersatzquaderhöhe beeinflusst, wurde in zusätzlichen Versuchen mit den Traufhöhen 3 m und 9 m (s. Abb. 3.7) für die verschiedenen Dachneigungen und die beiden L/B -Verhältnisse bei einer Anströmrichtung unter 45 Grad bestimmt.

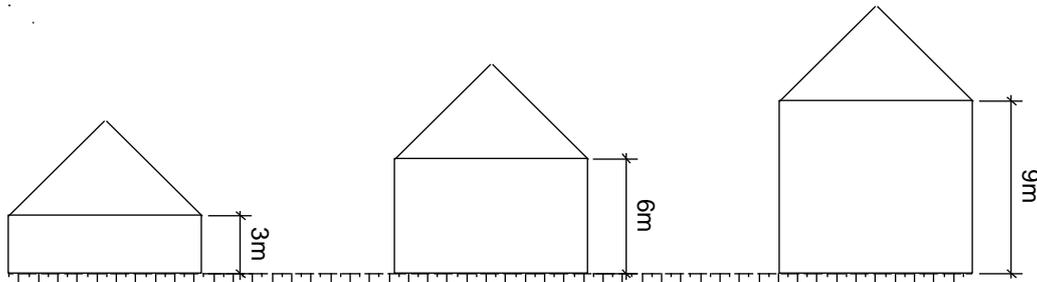


Abb. 3.7: Schematische Darstellung der Gebäude mit Satteldach und verschiedenen Traufhöhen. Betrachtet wurden unterschiedliche Dachneigungen und L/B -Verhältnisse bei der Windrichtung 45 Grad.

Die sich ergebenden Änderungen der Höhen und Längen der Rezirkulationszonen für die verschiedenen Dachneigungen zeigen die Abbildungen 3.8 und 3.9 (für das L/B -Verhältnis 1:1) und 3.10 und 3.11 (für das L/B -Verhältnis 1:5).

Die Höhen der Rezirkulationszonen in den Abbildungen 3.8 und 3.10 ändern sich vor allem bei den Gebäuden mit $L/B = 1:1$ (Abb. 3.8) näherungsweise mit den Trauf- bzw. Firsthöhen, wie die Markierungen in den Abbildungen, die die Höhenänderung der Traufe von ± 3 m gegenüber dem Referenzgebäude wiedergeben, zeigen. Danach wären die Ersatzquader entsprechend der geänderten Trauf- bzw. Firsthöhen ebenfalls um 3 m niedriger oder höher zu wählen.

Lediglich bei der niedrigen Traufe und dem Gebäude mit $L/B = 1:5$ weicht H_{RZ} von dieser Regel stärker ab (Abb. 3.10). Die beobachteten Werte von H_{RZ} reichen in diesem Fall bei allen Dachneigungswinkeln nicht bis an die Markierungen, so dass die vorgeschlagene Regel zu einer Überschätzung von H_{RZ} führt.

Mit zunehmender Gebäudehöhe werden die Rezirkulationszonen nach den Abbildungen 3.9 und 3.11 erwartungsgemäß länger, wobei die Zunahme von L_{RZ} größer ist als der Anstieg der Trauf- bzw. Firsthöhen um jeweils 3 m.

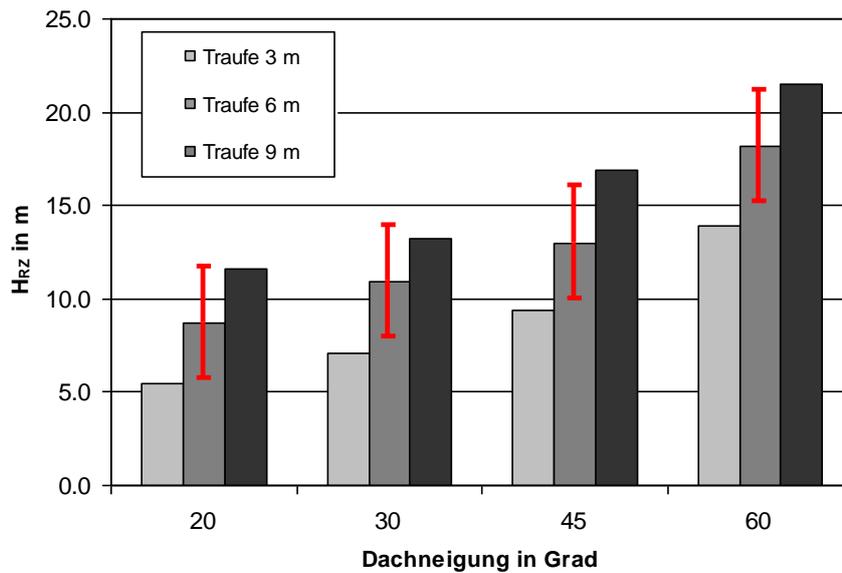


Abb. 3.8: Höhen der Rezirkulationszonen bei verschiedenen Traufhöhen und Neigungswinkeln der Satteldächer, Windrichtung 45 Grad, $L/B = 1:1$. Die Markierung von ± 3 m entspricht der Änderung der Traufhöhen gegenüber dem Referenzgebäude mit 6 m Traufhöhe.

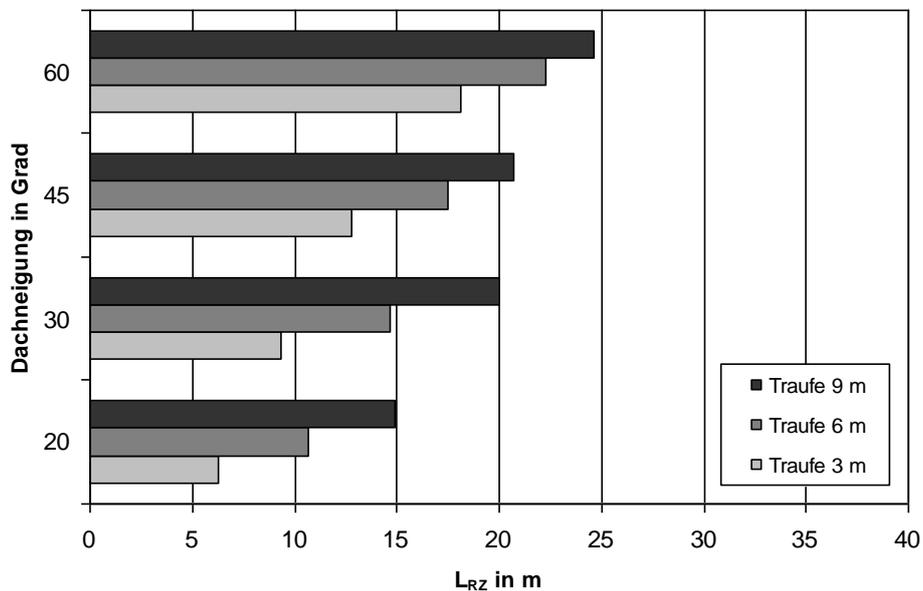


Abb. 3.9: Längen der Rezirkulationszonen bei verschiedenen Traufhöhen und Neigungswinkeln des Satteldachs, Windrichtung 45 Grad, $L/B = 1:1$.

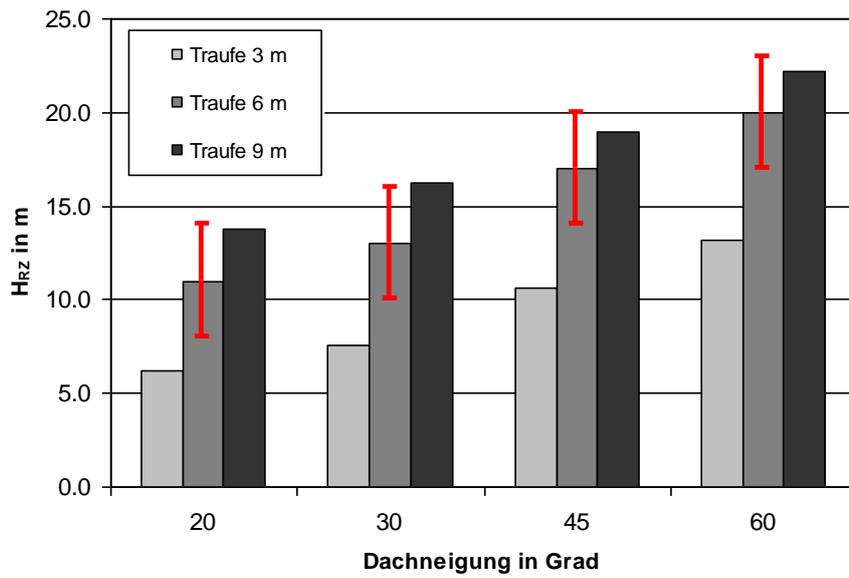


Abb. 3.10: Höhen der Rezirkulationszonen bei verschiedenen Traufhöhen und Neigungen der Satteldächer, Windrichtung 45 Grad, $L/B = 1:5$. Die Markierung von ± 3 m entspricht der Änderung der Traufhöhen gegenüber dem Referenzgebäude mit 6 m Traufhöhe.

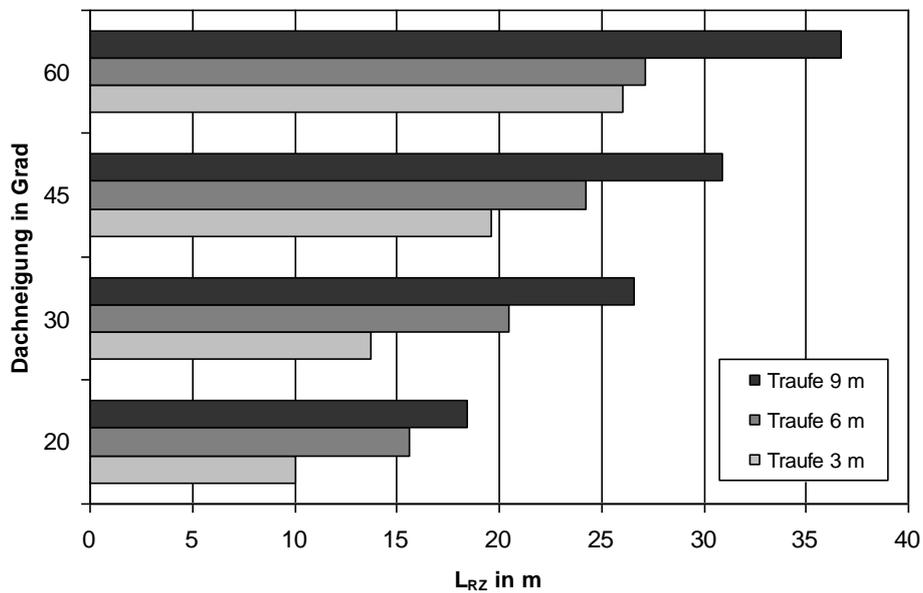


Abb. 3.11: Längen der Rezirkulationszonen bei verschiedenen Traufhöhen und Neigungen des Satteldachs, Windrichtung 45 Grad, $L/B = 1:5$.

3.2 Ergänzende Strömungsmessungen

Zur Überprüfung der Längen und Höhen der Rezirkulationszonen wurden Strömungsmessungen mit einer Hitzdrahtsonde im Lee mehrerer Gebäude durchgeführt.

Zur Ermittlung von H_{RZ} wurden Vertikalprofile der Strömungsgeschwindigkeiten und der Turbulenz hinter den Gebäuden aufgenommen. Sie reichten von der etwa zweifachen maximalen Gebäudehöhe 30 m in Richtung Boden bis zur etwa halben Gebäudehöhe. L_{RZ} wurde anhand von in 6 m Höhe über Grund aufgenommenen Längsprofilen im Lee der Gebäude überprüft.

Betrachtet wurden eine Auswahl von Gebäuden mit Satteldächern, Quadern, verschiedene Verhältnisse L/B und Anströmrichtungen. Beispiele für ein Vertikal- und ein Längsprofil hinter einem Gebäude mit einem Satteldach der Neigung 30° bei einer Anströmrichtung von 30 Grad sind in den Abbildungen 3.12 und 3.13 in normierter Form dargestellt. Referenzgeschwindigkeit u_{ref} ist die Windgeschwindigkeit in der ungestörten Anströmung in 30 m Höhe.

Der verwendete Einzelhitzdraht erlaubt in der Rezirkulationszone wegen der dort herrschenden komplexen Strömungsverhältnisse keine vollständige Erfassung des Strömungsvektors. Trotzdem lassen sich aus den Änderungen der Geschwindigkeiten und Turbulenzgrößen in den Profilen Rückschlüsse auf H_{RZ} und L_{RZ} ziehen.

Die turbulenten Schwankungen im Vertikalprofil (Abb. 3.12) liegen innerhalb der Rezirkulationszone etwa konstant auf hohem Niveau. Zur freien Strömung hin nehmen sie deutlich ab. Umgekehrt sind die Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb der Rezirkulationszonen gering und nehmen mit der Höhe zu. In der Scherschicht zwischen Rezirkulationszone und freier Außenströmung sind die Gradienten sowohl der Geschwindigkeiten als auch der Turbulenz hoch.

Die Strömung verhält sich in den Längsprofilen (Abb. 3.13) gegenläufig, aber ähnlich. In der Rezirkulationszone ist die mittlere Strömungsgeschwindigkeit zunächst niedrig und die Turbulenz hoch. Die Turbulenz erreicht ein Maximum im Bereich des zeitlich fluktuierenden Wiederanlegepunktes bzw. Endes der Rezirkulationszone. Hinter der Rezirkulationszone im so genannten fernen Nachlauf gleichen sich die mittleren Windgeschwindigkeit und die Turbulenz allmählich den Verhältnissen in der ungestörten Anströmung wieder an.

In beiden Abbildungen sind die mit der Sichtbarmachung der Strömung ermittelten Höhen und Längen der Rezirkulationszone eingetragen. Sie liegen am unteren Rand der Scherschicht bzw. im Bereich des Wiederanlegepunktes. Die Strömungsmessungen bestätigen somit die Ergebnisse der Sichtbarmachungen.

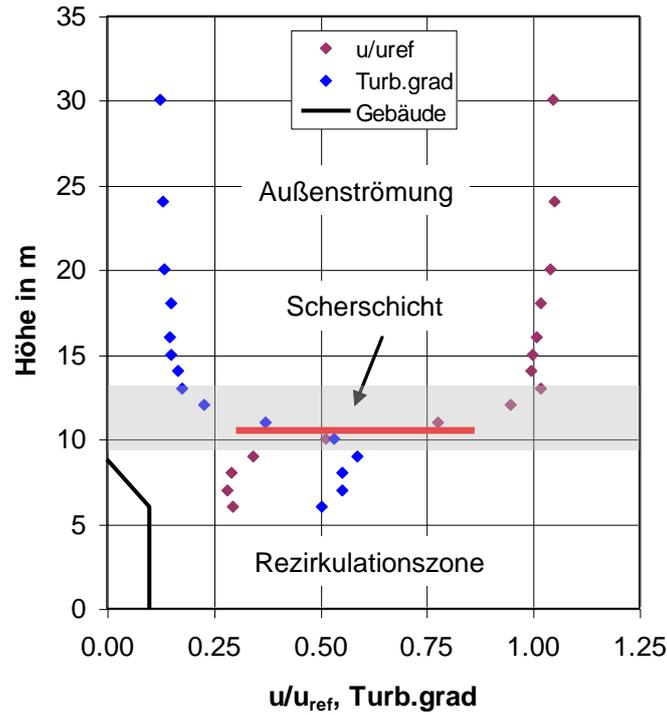


Abb. 3.12: Vertikalprofile der Strömungsgeschwindigkeiten und Turbulenz im Abstand von 6 m hinter einem Gebäude mit einem Satteldach von 30° und $L/B = 1:1$ (schematisch angedeutet), Windrichtung 30 Grad. Die rote Linie kennzeichnet H_{RZ} aus der Sichtbarmachung mit Rauch.

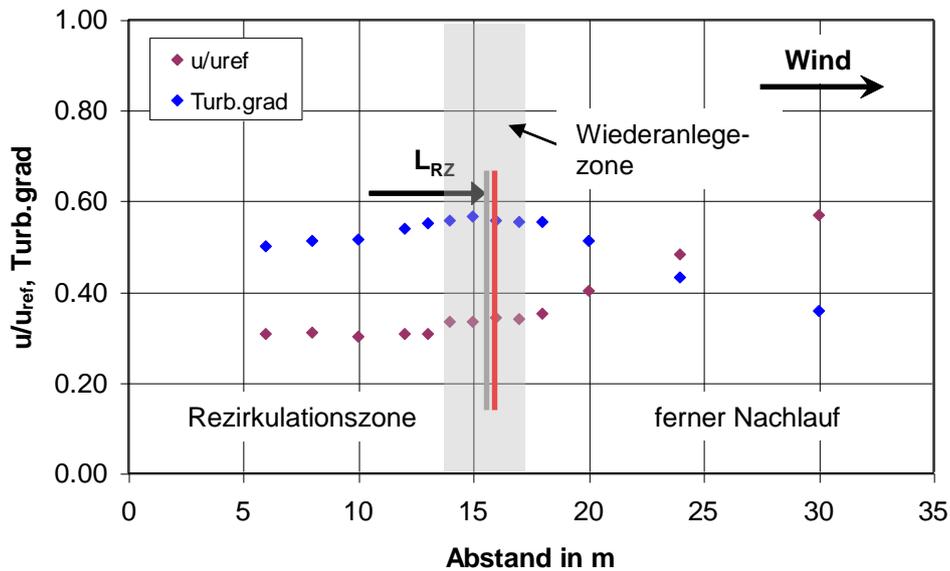


Abb. 3.13 Längsprofile der Strömungsgeschwindigkeiten und Turbulenz in 6 m Höhe hinter einem Gebäude mit einem Satteldach von 30° und $L/B = 1:1$, Windrichtung 30 Grad. Die rote Linie kennzeichnet L_{RZ} aus der Sichtbarmachung mit Rauch, die graue Linie L_{RZ} nach den Windfännchen.

3.3 Vergleiche mit Literaturangaben und der VDI 3781 Blatt 4 (2017)

3.3.1 Vergleich der Längen der Rezirkulationszonen mit Literaturangaben

Bei den Quadern ließen sich die im Windkanal ermittelten Längen der Rezirkulationszonen mit Angaben aus der Literatur vergleichen:

Fackrell (1984) untersuchte die Rezirkulationszonen von Quadern in einer Windkanalgrenzschicht mit Turbulenzgraden von 10 – 20% in Quaderhöhe, vergleichbar mit der vorliegenden Untersuchung. Nach seinen Ergebnissen lässt sich bei senkrechter Anströmung L_{RZ} als Funktion der Abmessungen der Quader in der Form

$$L_{RZ}/H = 1.8 B/H / [(L/H)^{0.3}(1.0 + 0.24 B/H)] \quad (3.1)$$

für Verhältnisse von $L/H \leq 3$ beschreiben.

Hosker (1979) gibt eine ähnliche, empirisch bestimmte Abhängigkeit

$$L_{RZ}/H = K_1 (B/H) / [1.0 + K_2 (B/H)] \quad (3.2)$$

mit den beiden Koeffizienten K_1 und K_2 an. Die Koeffizienten unterscheiden sich je nachdem, ob die an der Dachvorderkante des Quaders abgelöste Strömung sich auf der Dachfläche wieder anlegt („reattached“) oder nicht („not reattached“). Für eine wiederanliegende Strömung gilt:

$$K_1 = 1.75; K_2 = 0.25 \quad (3.3)$$

Gleichung 3.2 mit den Koeffizienten nach Gl. 3.3 wird u. a. in der VDI-Richtlinien 3783 Blatt 10 (2010), und 3781 Blatt 4 (2017), sowie im Merkblatt Schornsteinhöhenberechnung (2012) zur Bestimmung der Länge des nahen Nachlaufes bzw. der Rezirkulationszonen herangezogen. Bei einem Nichtwiederanlegen der Strömung lauten die Koeffizienten

$$K_1 = 2.0 + 3.7(L/H)^{-0.33}; K_2 = 0.15 + 0.31(L/H)^{-0.33} \quad (3.4)$$

Eine Abschätzung nach Wilson und Britter (1982)

$$L_{RZ} = K_3(B \cdot H)^{0.5} \quad (3.5)$$

bezieht die Länge L_{RZ} auf die angeströmte Gebäudefläche. Für K_3 wird ein Wert von 2.0 mit einer Schwankungsbreite von ± 0.5 angegeben.

In der Abbildung 3.14 sind die experimentell ermittelten Längen der Rezirkulationszonen für den Quader mit der Grundfläche von 10 m x 10 m ($L/B = 1:1$) bei der Windrichtung 0 Grad den Werten nach den oben angeführten Autoren gegenübergestellt. Zusätzlich mit aufgenommen wurde die Länge L_{RZ} für einen Würfel aus den Validierungsdaten der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 12 (2000).

Wie die Abbildung 3.14 zeigt, stimmen die aktuellen Werte gut mit denen nach VDI, nach Fackrell (1984, s. Gleichung 3.1), und mit Gleichung 3.5 nach Wilson et al. (1982) überein, sofern der Koeffizient K_3 zu 1.4 gesetzt wird. Die Abweichungen zu Gleichung 3.2 liegt innerhalb der von Hosker (1979) angegebenen Genauigkeit von $\pm 25\%$.

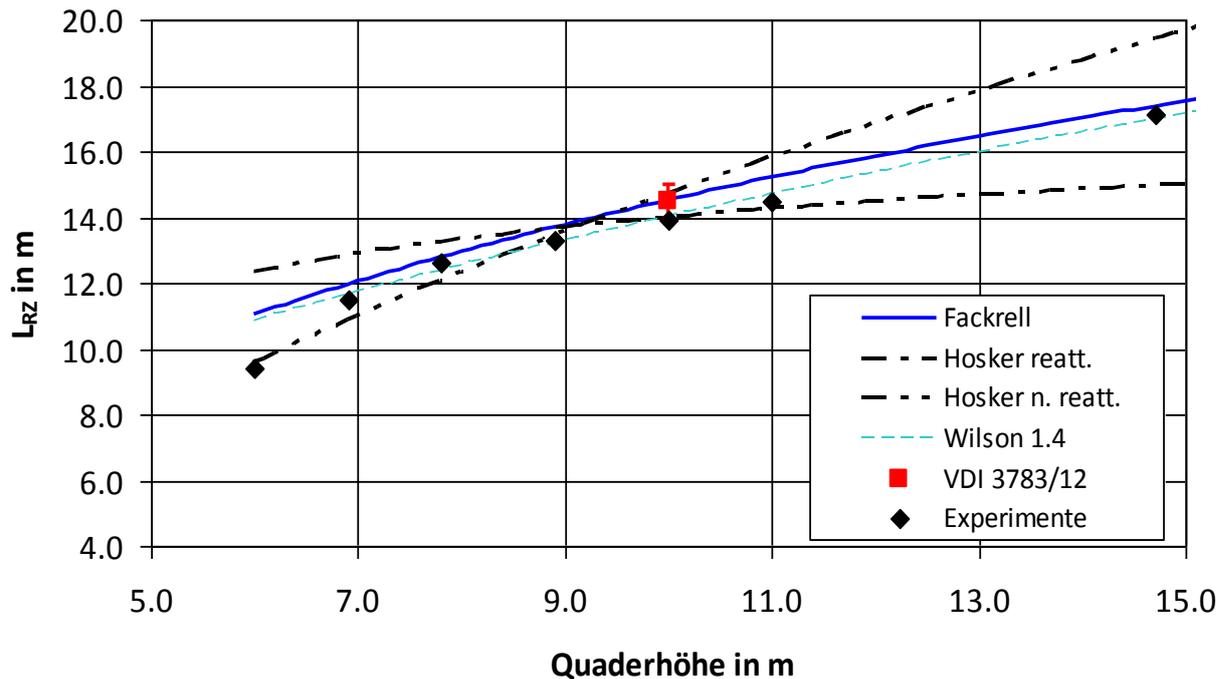


Abb. 3.14: Vergleich der Längen der Rezirkulationszonen für verschieden hohe Quader mit $L/B = 1:1$, Windrichtung 0 Grad, mit Daten aus der Literatur.

3.3.2 Vergleich der Höhen der Rezirkulationszonen mit der VDI-Richtlinie 3781, Blatt 4

In der VDI-Richtlinie 3781, Blatt 4 (2017), sind für Gebäude mit Satteldächern Angaben zu den Höhen der Rezirkulationszonen zu finden. Bei der Erstellung der Richtlinie wurde auf Daten aus Windkanalversuchen von Benndorf (1984) und Heise (2012) zurückgegriffen. Während in der Richtlinie die Werte für H_{RZ} für verschiedene Dachneigungen unabhängig von dem L/B -Verhältnis der Gebäude und der Windrichtung angegeben werden, wird in den Abbildungen 3.15 (Satteldächer mit 30° Dachneigung) und 3.16 (Satteldächer mit 60° Dachneigung) nach den L/B -Verhältnissen und Windrichtungen unterschieden.

Nach den beiden Abbildungen sind die aktuell ermittelten Höhen der Rezirkulationszonen für die frei stehenden Gebäude mit $L/B = 1:1$ bei den Windrichtungen 0 Grad, 60 Grad und 90 Grad geringfügig niedriger als nach der Richtlinie. Bei den übrigen Anströmrichtungen geben die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung die Richtlinienwerte sehr gut wieder.

Dies gilt auch für die Gebäude mit $L/B = 1:5$ bei der Anströmrichtungen 0 Grad. Bei dem breiten Gebäude tendiert die Richtlinie bei schrägen Anströmrichtungen zu einer Unterschätzung von H_{RZ} . Die Unterschätzung kann bei einem Satteldach der Neigung 45°, $L/B = 1:5$ und schräger Anströmung bis zu ca. 30% ausmachen. Zu bemerken ist, dass für derartige Gebäude mit schräg angeströmten Satteldächern bei der Erstellung der Richtlinie keine Daten vorlagen.

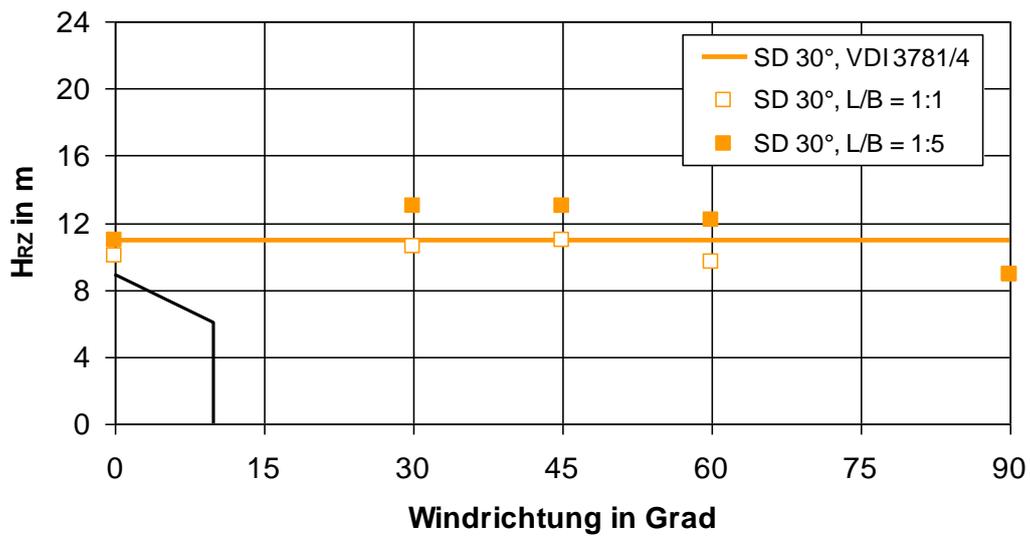


Abb. 3.15: Vergleich der aktuell bestimmten Höhen der Rezirkulationszonen bei Satteldächern der Neigung 30° (schematisch angedeutet) mit den Angaben nach der VDI-Richtlinie 3781 Blatt 4 (2017).

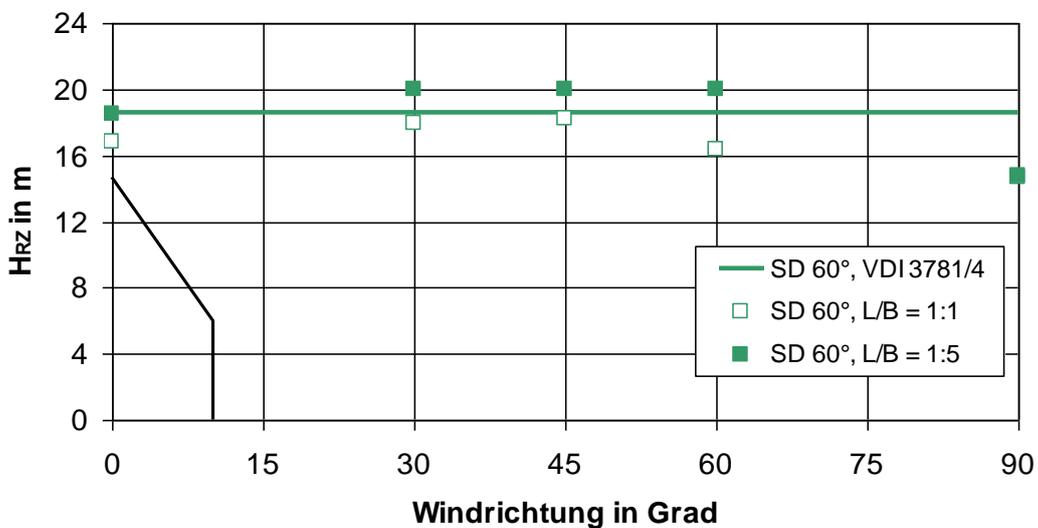


Abb. 3.16: Vergleich der aktuell bestimmten Höhen der Rezirkulationszonen bei Satteldächern der Neigung 60° (schematisch angedeutet) mit den Angaben nach der VDI-Richtlinie 3781 Blatt 4 (2017).

4. Gebäudegruppen mit Ersatzquadern (TP 2)

Die frei stehenden Einzelgebäude, für die die Abmessungen der Rezirkulationszonen und die Ersatzquaderhöhen in Abschnitt 3 bestimmt worden waren, wurden von einem ungestörten Grenzschichtprofil angeströmt. Dies ist in der Realität aber nicht immer gegeben. Daher wurde in einer zweiten Versuchsserie untersucht, wie sich eine durch eine Vorbebauung gestörte Anströmung auf die Rezirkulationszonen der Gebäude auswirkt. Zu überprüfen war, ob die Empfehlung firsthoher Ersatzquader auch in solchen Fällen gültig bleibt.

Gebäuden mit Satteldächern der Neigung 45° wurden firsthohe, d.h. 11 m hohe, Ersatzquader gegenüber gestellt. Aus der unendlichen Anzahl möglicher Gebäudeanordnungen wurden die beiden in der Abbildung 4.1 skizzierten Anordnungen, eine Gruppe von Gebäuden mit $L/B = 1:1$, und eine zeilenförmige Anordnung der Gebäude mit $L/B = 1:5$, ausgewählt.

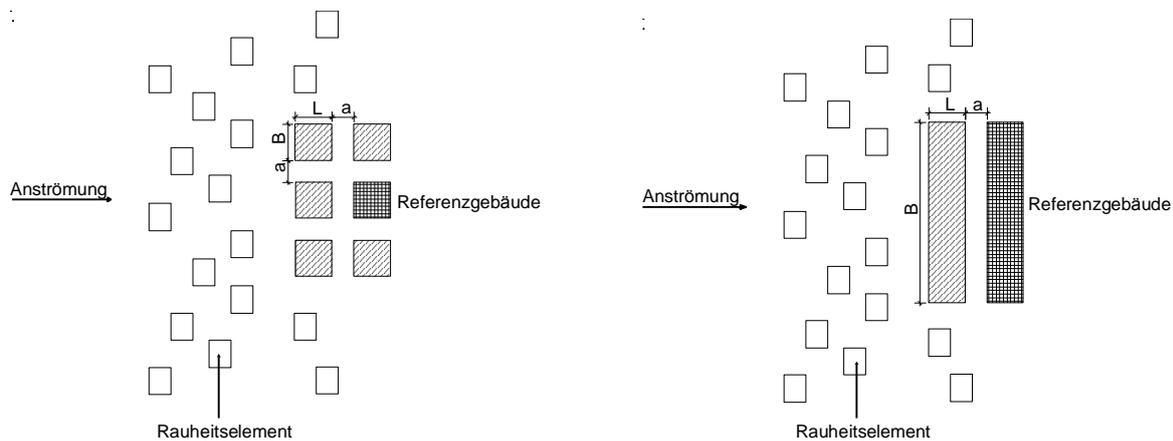


Abb. 4.1: Skizze der untersuchten Bebauungsanordnungen: links die Gebäudegruppe, bestehend aus 6 Gebäuden mit $L/B = 1:1$, rechts die Zeilenbebauung mit Gebäuden mit $L/B = 1:5$ und einer Gebäudezeile als Vorbebauung. Dargestellt ist die Windrichtung 0 Grad.

Die Abstände a zwischen den Gebäuden und, bei der Zeilenbebauung, die Anzahl der Gebäudezeilen in der Anströmung wurden variiert (s. Abschnitt 2.1). Betrachtet wurden die Windrichtung 0 Grad, wie in der Abb. 4.1, und eine schräge Anströmung der gesamten Gruppe bzw. aller Gebäudezeilen unter 45 Grad. Bei der angenommenen vorstädtischen Umgebungsbebauung wurde als Anströmungsgrenzschicht eine als „rau“ bezeichnete Grenzschicht (s. Anhang A3.2) mit einem Profilexponenten von $\alpha = 0.22$ im Windkanal eingerichtet.

4.1 Rezirkulationszonen aus der Strömungssichtbarmachung

4.1.1 Einheitlich hohe Gebäude

Für den Fall der Gebäudegruppe sind die Höhen H_{RZ} und Längen L_{RZ} der Rezirkulationszonen der Originalgebäude und der Ersatzquader bei der Anströmung unter 45 Grad in den folgenden Abbildungen 4.2 und 4.3 zusammengestellt. Die vorgelagerte Bebauung und das Referenzgebäude waren zunächst einheitlich hoch. Mit eingetragen sind die Werte für frei stehende Einzelgebäude, sowohl bei der glatteren Grenzschicht nach Abschnitt 3 ($\alpha = 0.12$) als auch bei der aktuell raueren ($\alpha = 0.22$).

Nach den Abbildungen ist der Einfluss der unterschiedlichen Grenzschichten auf die Höhen und Längen der Rezirkulationszonen bei dem Einzelgebäude gering, wobei H_{RZ} bei der raueren Grenzschicht etwas zunimmt.

Bei der Gebäudegruppe ist H_{RZ} für den Gebäudeabstand $a = 26$ m sowohl bei den Gebäuden mit Satteldach als auch bei den Ersatzquadern geringfügig höher als bei den Einzelgebäuden, die Länge der Rezirkulationszone ist nur wenig kleiner. Die Beeinflussung durch die Vorbebauung ist hier gering, was bei diesem weiten Abstand zu erwarten war. Rücken die Gebäude auf $a = 16$ m näher zusammen, nimmt die Höhe H_{RZ} bei Satteldach und Ersatzquader ab. Gleichzeitig verkürzt sich bei dem Satteldach die Länge der Rezirkulationszone stark, auch gegenüber dem Ersatzquader. Bei der Bebauung mit 6 m Abstand wächst die Länge der Rezirkulationszone bei Satteldach und Quader wieder erheblich an und erreicht, zumindest bei den Quadern, das Maximum. Grund hierfür dürfte sein, dass die Strömung die eng beieinander stehenden Gebäude als ein großes Gebäude wahrnimmt. Die Höhen der Rezirkulationszonen verringern sich weiter. Bei dem 11 m hohen Ersatzquader entspricht H_{RZ} etwa seiner Höhe, was auf ein Wiederanlegen der Strömung hinweist.

Die Abmessungen der Rezirkulationszonen bei den zeilenförmigen Bebauungen werden als weiteres Beispiel in den Abbildungen 4.4 und 4.5 miteinander verglichen. Hier wurden neben den Abständen auch die Anzahl der Gebäudezeilen vor dem Referenzgebäude variiert. Erneut werden zudem frei stehende Einzelgebäude in den beiden Grenzschichten betrachtet.

Bei den Quadern weisen die frei stehenden Einzelgebäude die höchsten Rezirkulationszonen in der raueren Grenzschicht auf (Abb. 4.4). Dies ist umgekehrt ein Indiz für die Beeinflussung des Ablösepunktes der Strömung am Dach bei Quadern durch eine Vorbebauung. Bei den Satteldächern sind die Unterschiede geringer. Bei ihnen nimmt H_{RZ} mit abnehmendem Abstand der Gebäudezeilen zu. Die höchsten Werte treten bei dem Abstand $a = 6$ m auf.

Die Längen der Rezirkulationszonen sind bei den Quadern erwartungsgemäß größer als bei den Satteldächern, außer bei dem Abstand der Gebäudezeilen von 6 m. Bei den Gebäuden mit den Satteldächern nehmen zudem die Längen der Rezirkulationszonen zu, je näher die Gebäude aneinander rücken.

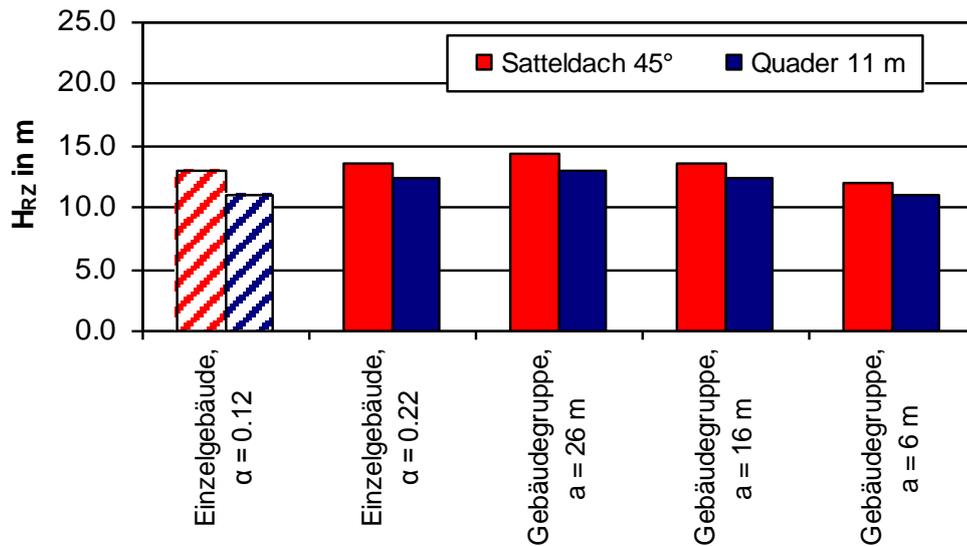


Abb. 4.2: Höhen der Rezirkulationszonen H_{RZ} hinter dem Referenzgebäude in einer Gebäudegruppe bei einem Abstand a zwischen den Gebäuden, $L/B = 1:1$, Windrichtung 45 Grad. Bei den Gebäudegruppen gilt: $\alpha = 0.22$.

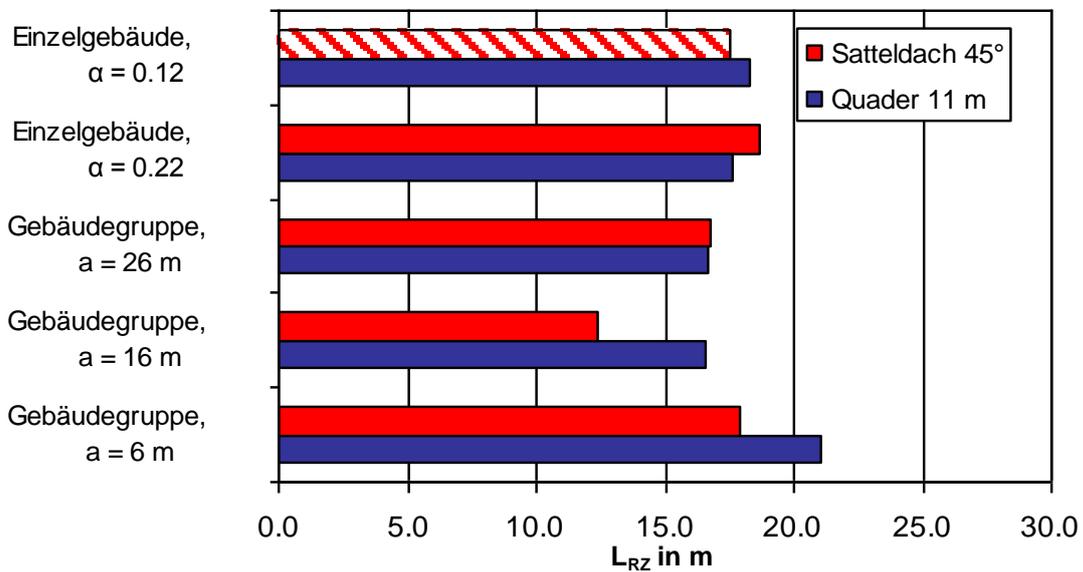


Abb. 4.3: Längen der Rezirkulationszonen L_{RZ} hinter dem Referenzgebäude in einer Gebäudegruppe bei einem Abstand a zwischen den Gebäuden, $L/B = 1:1$, Windrichtung 45 Grad. Bei den Gebäudegruppen gilt: $\alpha = 0.22$.

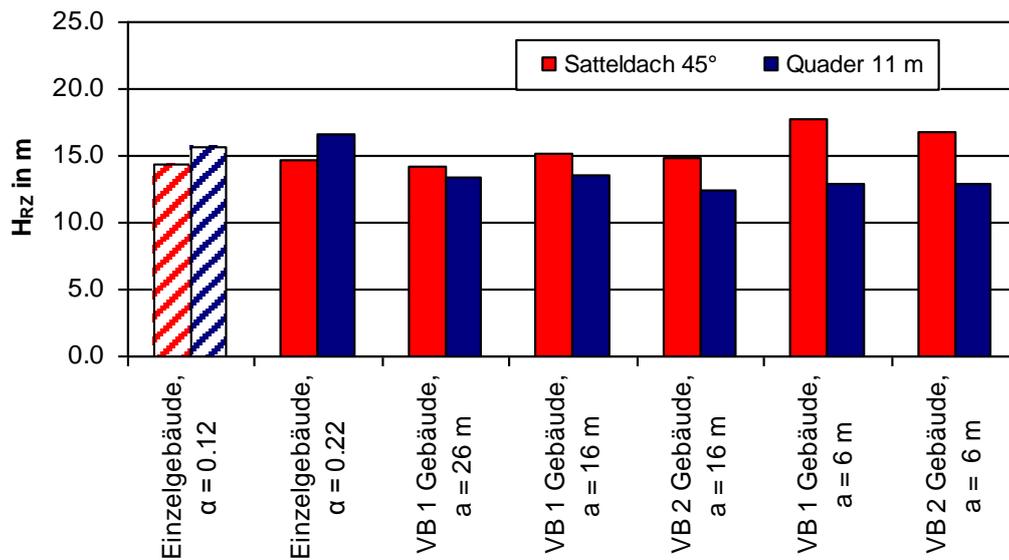


Abb. 4.4: Höhen der Rezirkulationszonen H_{RZ} hinter dem Referenzgebäude ($L/B = 1:5$) bei Vorbebauungen (VB) mit unterschiedlicher Anzahl von Gebäudezeilen und variierten Abständen a , Windrichtung 0 Grad. Bei den Vorbebauungen gilt als Profilexponent $\alpha = 0.22$.

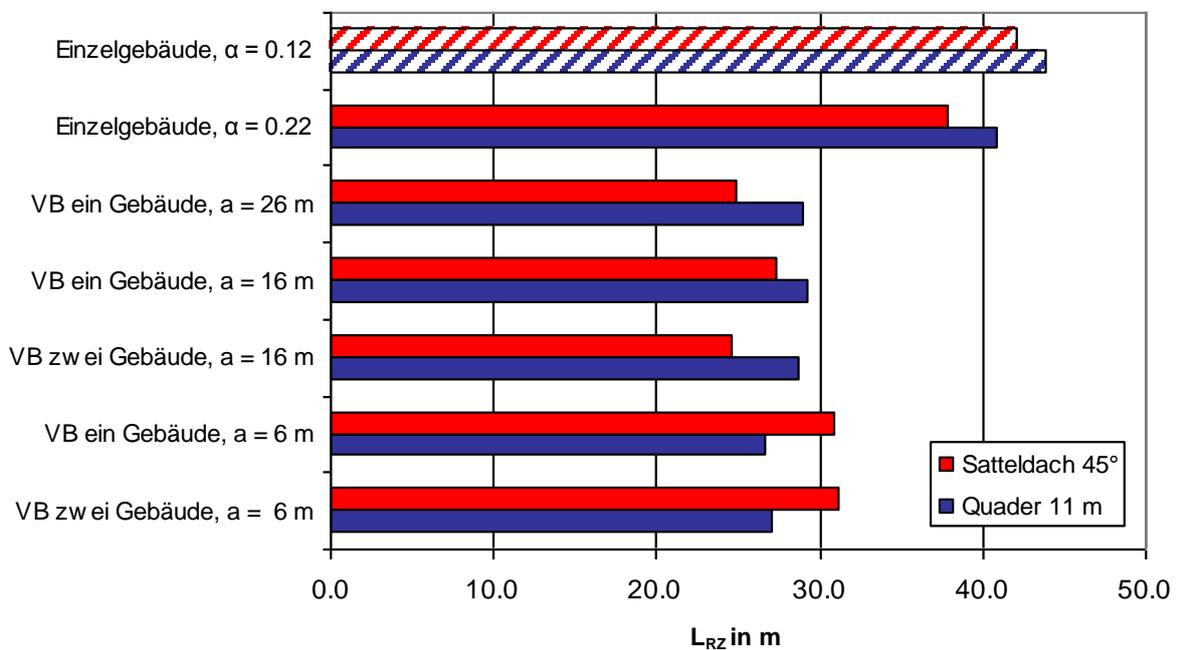


Abb. 4.5: Längen der Rezirkulationszonen L_{RZ} hinter dem Referenzgebäude ($L/B = 1:5$) bei Vorbebauungen (VB) mit unterschiedlicher Anzahl von Gebäudezeilen und variierten Abständen a , Windrichtung 0 Grad. Bei den Vorbebauungen gilt als Profilexponent $\alpha = 0.22$.

4.1.2 Höhere Gebäude in der Anströmung

Neben einheitlich hohen Gebäuden wurden auch zwei Fälle mit einer um etwa 30 % höheren quaderförmigen Vorbebauung untersucht. Bei der Gebäudegruppe waren dies die drei in der Anströmung liegenden Gebäude, bei der Zeilenbebauung (s. Abbildung 4.6) die vordere Gebäudezeile.

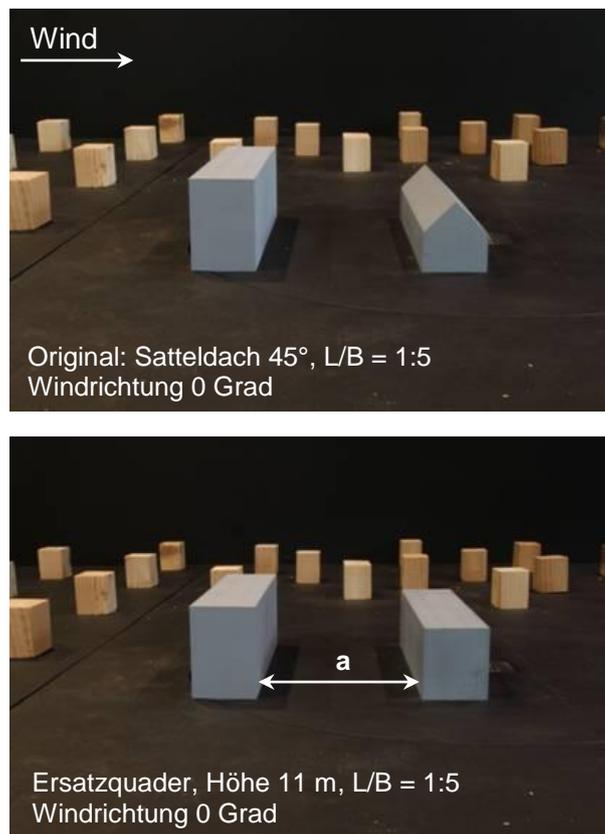


Abb. 4.6: Um 30% höhere Zeilenbebauung vor dem Originalgebäude bzw. dem Ersatzquader. Anströmrichtung 0 Grad, variiert wurde der Gebäudeabstand a (hier: 26 m).

Die Abbildungen 4.7 und 4.8 zeigen die Höhen und Längen der Rezirkulationszonen für das Gebäude mit dem Satteldach und den Ersatzquader für den Fall nach der Abbildung 4.6 und die weiteren betrachteten Abstände a .

Aufgrund der Homogenisierung der Strömung durch den Nachlauf des vorgelagerten Quaders sind die Höhen der Rezirkulationszonen in der Abbildung 4.7 bei Satteldach und firsthohem Ersatzquader bei gleichem Abstand zur Vorbebauung beinahe identisch. Bei dem Abstand von 6 m erreicht die Höhe der Rezirkulationszone hinter dem Referenzgebäude in etwa die Höhe der vorgelagerten Gebäude.

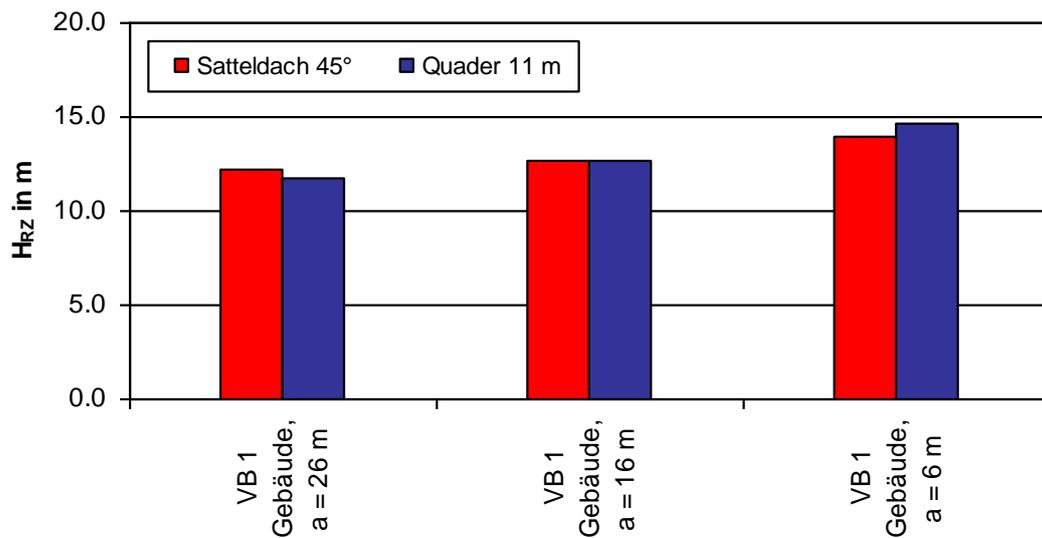


Abb. 4.7: Höhen der Rezirkulationszonen H_{RZ} hinter dem Referenzgebäude bei einer höheren Vorbebauung (VB) in unterschiedlichem Abstand, $L/B = 1:5$, Windrichtung 0 Grad.

Dagegen nimmt L_{RZ} sowohl bei dem Gebäude mit Satteldach als auch bei dem Ersatzquader mit dem Abstand zur Vorbebauung ab. Das Referenzgebäude gelangt zunehmend in die höhere turbulente Rezirkulationszone des vorderen Gebäudes, was die Ausbildung der eigenen Rezirkulationszone stört. Dies wirkt sich vor allem auf die Ablösung am First des Satteldaches aus und führt zu um ca. 30% verringerten Werten für L_{RZ} gegenüber den längeren Rezirkulationszonen des Ersatzquaders.

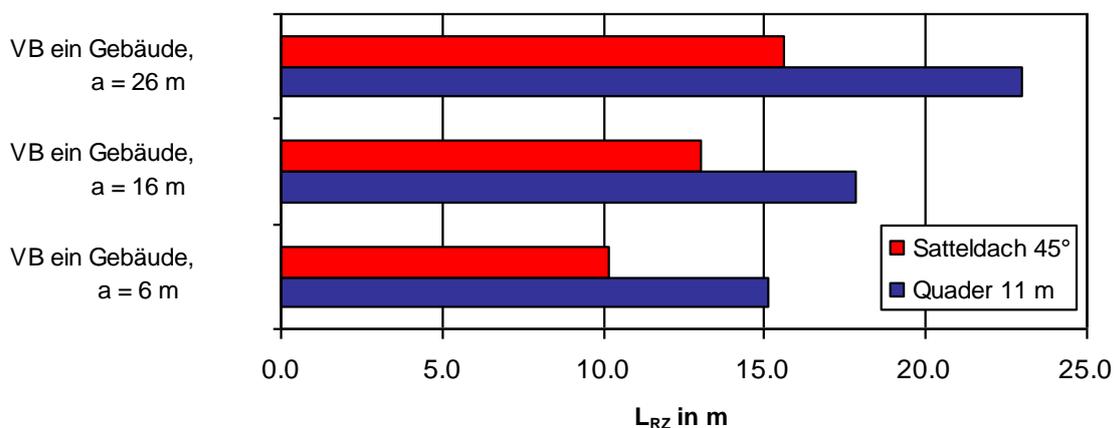


Abb. 4.8: Längen der Rezirkulationszonen L_{RZ} hinter dem Referenzgebäude bei einer höheren Vorbebauung (VB) in unterschiedlichem Abstand, $L/B = 1:5$, Windrichtung 0 Grad.

Bei der unter 45 Grad angeströmten Gebäudegruppe ergibt sich ein ähnliches Bild. Lediglich die Höhen der Rezirkulationszonen des Referenzgebäudes mit dem Satteldach sind in diesem Fall größer als die der Quader.

4.2 Vergleich mit der Regel für Einzelgebäude

Für das Einzelgebäude wurde ein Ersatzquader vorgeschlagen, dessen Höhe der Firsthöhe des Originalgebäudes entspricht. Auch bei den in einer Bebauung eingebetteten Gebäuden war das Verhalten eines solchen firsthohen Quaders meist ähnlich zu dem der Originalgebäude: Die firsthohen Ersatzquader lieferten in der Regel etwas längere Rezirkulationszonen als die Originalgebäude mit den Satteldächern. Die Höhen der Rezirkulationszonen sind bei den in unterschiedliche Bebauungen eingebetteten Ersatzquadern, wie bei den frei stehenden Einzelgebäuden, in der Regel geringer als bei den Originalen.

Nach den hier durchgeführten Vergleichen kann die für ein frei stehendes Einzelgebäude abgeleitete Regel eines firsthoch zu wählenden Ersatzquaders auch für dichtere Bebauungen übernommen werden.

5. Überprüfung des Ersatzquaderverfahrens (TP 3)

5.1 Konzentrationsmessungen

Die bisherigen Vergleiche zeigten, dass ein firsthoher Ersatzquader die Abmessungen der Rezirkulationszonen von Gebäuden mit Satteldächern besser wiedergibt, als die Alternativen eines mittelhohen oder nur traufhohen Quaders. Es war daher zu erwarten, dass dies auch für das Konzentrationsfeld in der Rezirkulationszone gilt. Überprüft wurde dies durch Konzentrationsmessungen für einige ausgewählte Fälle. Dazu wurde anstelle des Rauches Ethan als Tracer aus den Bodenquellen in die Rezirkulationszone emittiert. Die sich einstellenden Konzentrationen entlang von Längs-, Vertikal- und Querprofilen hinter dem Originalgebäude mit einem Satteldach, dem firsthohen Ersatzquader und dem mittelhohen Quader wurden bestimmt und verglichen. Wegen seiner sehr niedrigen Rezirkulationszone wurde der traufhohe Quader nicht mehr in diesen Vergleich mit einbezogen.

Betrachtet wurden

- zwei frei stehende Einzelgebäude mit Satteldächern der Neigung 60° und $L/B = 1:1$ (Fall 1) und $1:5$ (Fall 2) bei der Windrichtung 0 Grad, die beiden 14.7 m hohen Ersatzquader und zwei mittelhohe Quader mit etwa 10 m Höhe,
- zwei frei stehende Einzelgebäude mit Satteldächern der Neigung 45° und $L/B = 1:1$ (Fall 3) und $1:5$ (Fall 4) bei der Windrichtung 45 Grad, die beiden 11 m hohen Ersatzquader und zwei mittelhohe Quader mit etwa 9 m Höhe,
- ein in einer Bebauung eingebettetes Gebäude mit einem Satteldach von 45° und $L/B = 1:5$ bei der Windrichtung 0 Grad (Fall 5), samt Ersatzquader und mittelhohem Quader und
- ein in die Gruppe eingebettetes Gebäude mit einem Satteldach von 45° Neigung und einem $L/B = 1:1$ bei der Windrichtung 45 Grad (Fall 6) samt Ersatzquader und mittelhohem Quader.

In der Abb. 5.1 sind für das Gebäude mit dem Satteldach von 60° und $L/B = 1:1$ (Fall 1), den Ersatzquader $Q 14.7$, und den mittelhohen Quader $Q 10$ Längsprofile der Konzentrationen in der Höhe $z = 6$ m entlang der Achse in Strömungsrichtung ($y = 0$) aufgetragen, und in der Abb. 5.2 die zugehörigen Vertikalprofile in einem Abstand von $x = 6$ m hinter dem Gebäude. Bei der eingestellten Windrichtung 0 Grad wurde nur eine Quelle betrieben, mit konstantem Volumenstrom des Tracers bei dem Gebäude mit Satteldach und den Quadern.

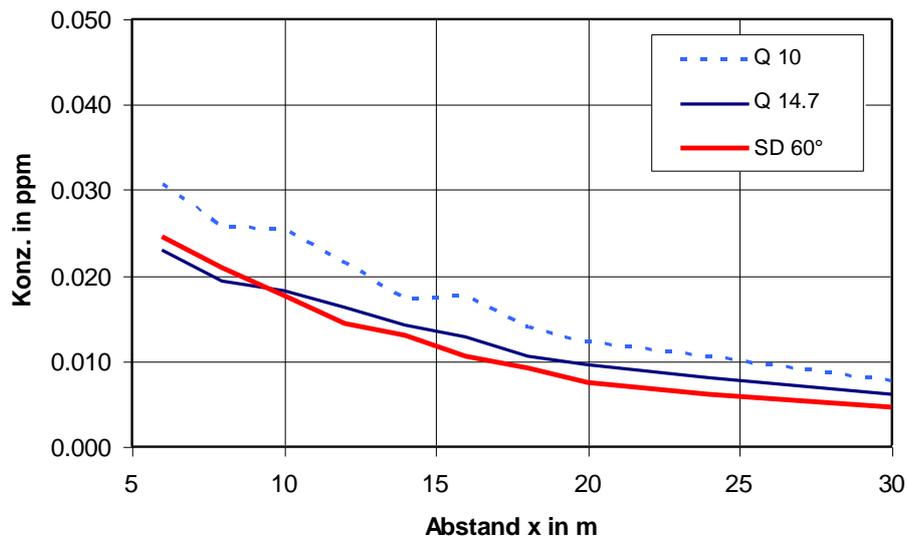


Abb. 5.1: Längsprofile der Konzentrationen hinter dem Gebäude mit $L/B = 1:1$ und dem Satteldach der Neigung 60° , und hinter halb- (Q 10) und firsthohen (Q 14.7) Quadern, Messhöhe $z = 6\text{ m}$, $y = 0$, Windrichtung 0 Grad (Fall 1).

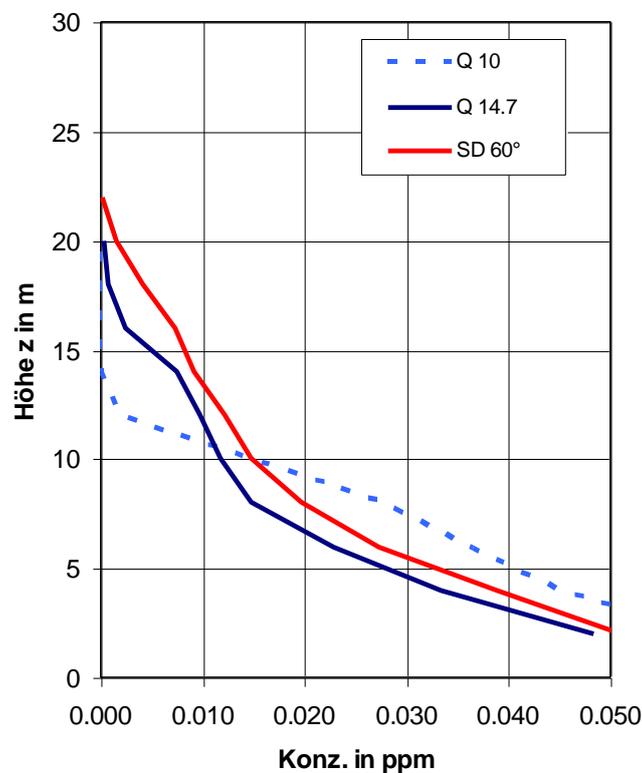


Abb. 5.2: Vertikalprofile der Konzentrationen hinter dem Gebäude mit $L/B = 1:1$ und dem Satteldach der Neigung 60° , und hinter halb- (Q 10) und firsthohen Quadern (Q 14.7), Abstand vom Gebäude $x = 6\text{ m}$, $y = 0$, Windrichtung 0 Grad (Fall 1).

Nach beiden Abbildungen für Fall 1 stimmen die Konzentrationsprofile zwischen dem Original mit Satteldach und dem firsthohen Ersatzquader augenscheinlich besser überein als zwischen dem Original und dem halbhohen Quader. Der halbhohe Quader liefert in beiden Fällen wegen seiner kleineren Rezirkulationszone höhere Konzentrationen in Bodennähe. Das Vertikalprofil zeigt dagegen geringere Werte in größeren Höhen, da die Rezirkulationszone des halbhohen Quaders nicht so weit nach oben reicht wie die des firsthohen Ersatzquaders.

In dem zweiten dargestellten Beispiel (Fall 4) mit dem Gebäude mit dem Satteldach von 45° Neigung und $L/B = 1:5$ unterschieden sich die auf der Achse in Strömungsrichtung ($y = 0$) gemessenen Vertikalprofile (Abb. 5.3) zwischen den Quadern kaum, gegenüber dem Satteldach aber deutlich. Erst im Querprofil (Abb. 5.4) erkennt man die unterschiedliche Wirkung der schräg angeströmten Quader auf das Konzentrationsfeld. Der firsthohe Ersatzquader Q 11 Höhe liefert hier, wenn auch keine gute, so doch eine bessere Übereinstimmung mit der Konzentrationsverteilung hinter dem Originalgebäude mit Satteldach als der halbhohe.

5.2 Güte des Ersatzquaderverfahrens

Die augenscheinlich bessere Übereinstimmung der Konzentrationsdaten zwischen den Originalen mit Satteldach und dem firsthohen Ersatzquader lässt sich auch zahlenmäßig durch gängige statistische Kenngrößen, wie die Trefferquote und den normierten mittleren quadratischen Fehler (normalized mean square error, NMSE), belegen.

Die Trefferquote ist definiert als der Bruchteil der Daten, der an den Aufpunkten der Bedingung

$$0.5 \leq C_{\text{Satteldach}} / C_{\text{Quader}} \leq 2.0 \quad (5.1)$$

genügt. Die optimale Trefferquote ist 100 %. Der normierte mittlere quadratische Fehler NMSE wird beschrieben durch

$$\frac{(\overline{C_{\text{Satteldach}}} - \overline{C_{\text{Quader}}})^2}{(\overline{C_{\text{Satteldach}}} \cdot \overline{C_{\text{Quader}}})} \quad (5.2)$$

und nimmt im Idealfall einen Wert von 0 an.

Wertet man die Konzentrationsdaten der untersuchten Fälle mit diesen beiden Kenngrößen aus, erhält man die Werte der Tabelle 5.1.

Je nach Fall unterscheiden sich die Trefferquoten. Die schlechtesten Trefferquoten ergaben sich für das Gebäude mit $L/B = 1:5$ bei der schrägen Anströmung im Fall 4, die besten für dasselbe Gebäude bei der Anströmung unter 0 Grad senkrecht zum First (Fall 2).

Der normierte mittlere quadratische Fehler NMSE weist ein ähnliches Bild wie die Trefferquote auf. Er ist am größten bei dem Gebäude mit $L/B = 1:5$ unter schräger Anströmung im Fall 4 und am geringsten für dasselbe Gebäude bei der Anströmung unter 0 Grad (Fall 2).

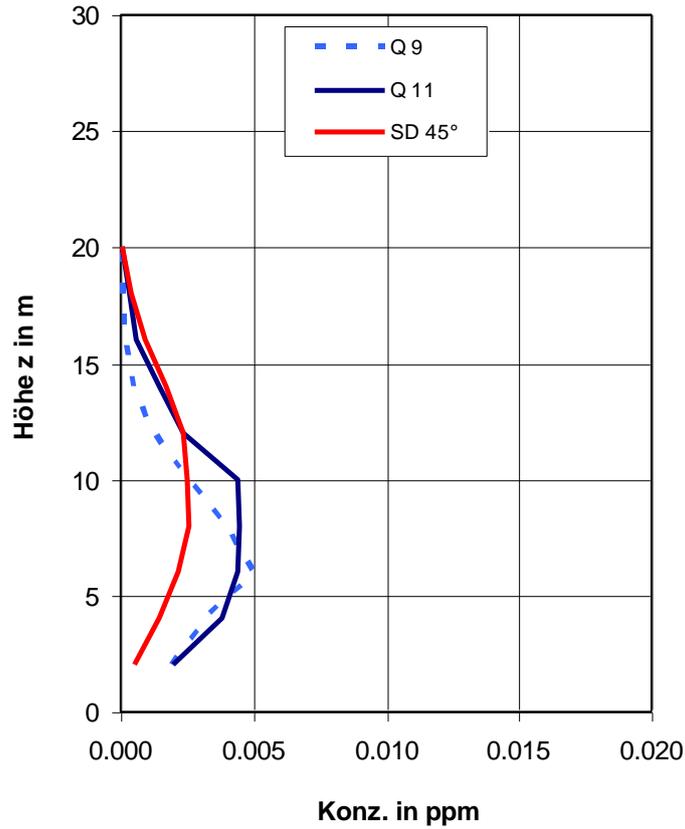


Abb. 5.3: Abstand vom Gebäude $x = 24$ m, $y = 0$, Windrichtung 45 Grad (Fall 4).

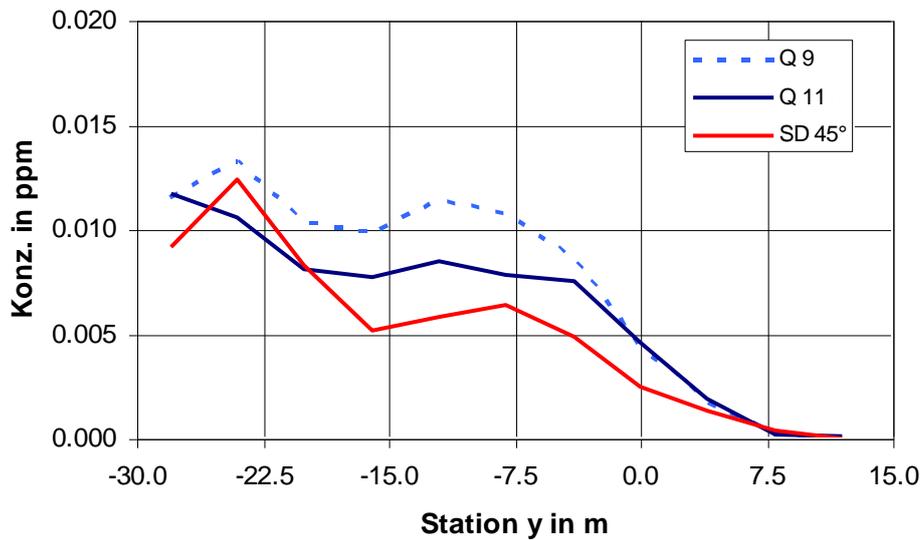


Abb. 5.4: Querprofile der Konzentrationen hinter dem Gebäude mit $L/B = 1:5$ und einem Satteldach der Neigung 45° , und halb- (Q 9) und firsthohen (Q 11) Quadern, Abstand vom Gebäude $x = 24$ m, Messhöhe $z = 6$ m, Windrichtung 45 Grad (Fall 4).

Was dies für die Übereinstimmung der Konzentrationen zwischen den Gebäuden mit den Satteldächern und den Quadern bedeutet, zeigen die Abb. 5.5 für den Fall 2 und die Abb. 5.6 für den Fall 4. Lägen die bei den Quadern gemessenen Konzentrationen auf den Diagonalen in den Abbildungen, entspräche dies einer Identität der Konzentrationen zwischen Original mit Satteldach und Ersatzquader. Man erkennt, dass dies im Fall 2 besser erfüllt ist als im Fall 4, und zwar sowohl für den firsthohen Ersatzquader als auch für den halbhohen Quader. In beiden Fällen liegen die Ergebnisse mit den firsthohen Ersatzquadern näher an der Diagonalen als die der halbhohen Quader.

Tabelle 5.1: Trefferquoten und normierte mittlere quadratische Fehler (NMSE) der Konzentrationen bei Satteldach (SD) und Quadern (Q) verschiedener Höhen.

		Trefferquote		NMSE	
		%		-	
L/B	SD 60°	Q 10	Ersatzquader Q 14.7	Q 10	Ersatzquader Q 14.7
1:1	WR 0 Grad (Fall 1)	70	83	0.18	0.04
1:5	WR 0 Grad (Fall 2)	84	95	0.07	0.03
L/B	SD 45°	Q 9	Ersatzquader Q 11	Q 9	Ersatzquader Q 11
1:1	WR 45 Grad (Fall 3)	63	88	0.28	0.17
1:5	WR 45 Grad (Fall 4)	42	64	1.68	1.26
L/B	SD 45°	Q 9	Ersatzquader Q 11	Q 9	Ersatzquader Q 11
1:5_V	WR 0 Grad (Fall 5)	78	80	0.41	0.29
1:1_V	WR 45 Grad (Fall 6)	60	76	0.84	0.57

Q 9 und Q 10: halbhohle Quader der Höhen 9 m und 10 m;

Q 11 und Q 14.7: firsthohe Ersatzquader der Höhen 11 m und 14.7 m

Nach Tabelle 5.1 liefern die firsthohen Ersatzquader Q 14.7 und Q 11 in allen Fällen bessere Trefferquoten und NMSE als die mittelhohen Quader Q 10 und Q 9, wie die Abb. 5.5 und 5.6 bestätigen. Das bedeutet, dass der firsthohe Ersatzquader im Rahmen dieser Untersuchung das Gebäude mit dem Satteldach immer besser wiedergibt, als die halbhohle Alternative. Allerdings geben die Ersatzquader die Umströmung bzw. das Konzentrationsfeld hinter den Gebäuden mit Satteldach, je nach Situation, in unterschiedlicher Güte wieder. Dies ist darin begründet, dass Gebäude mit geneigten Dachflächen, wie Satteldächer, überhaupt durch Quader approximiert werden.

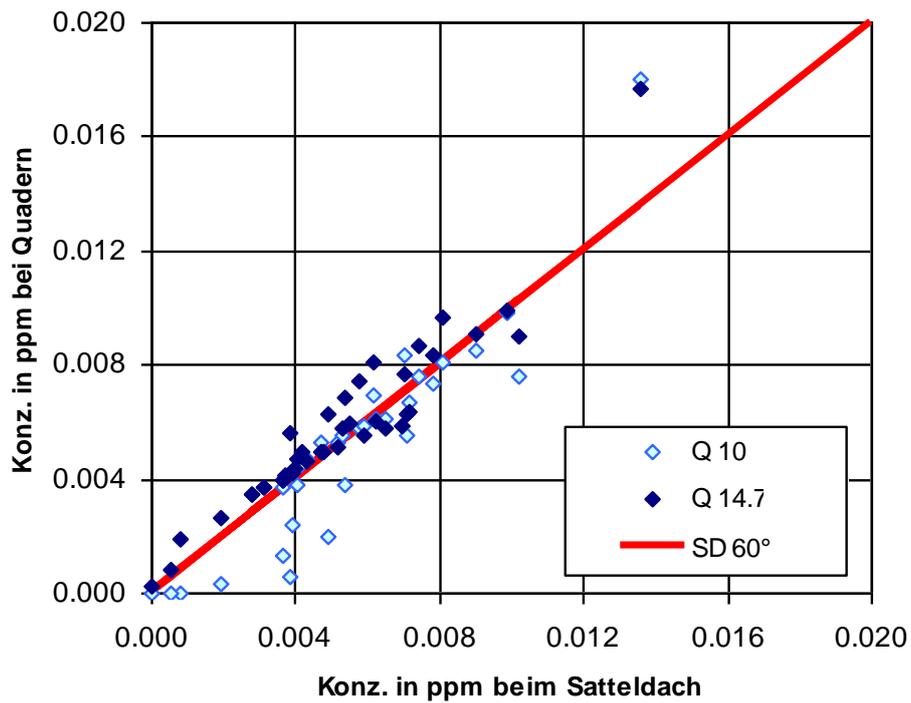


Abb. 5.5: Vergleich der bei dem Satteldach im Fall 2 gemessenen Konzentrationen mit denen bei den halb- und firsthohen Quadern (Q 14.7 ist der firsthohe Ersatzquader).

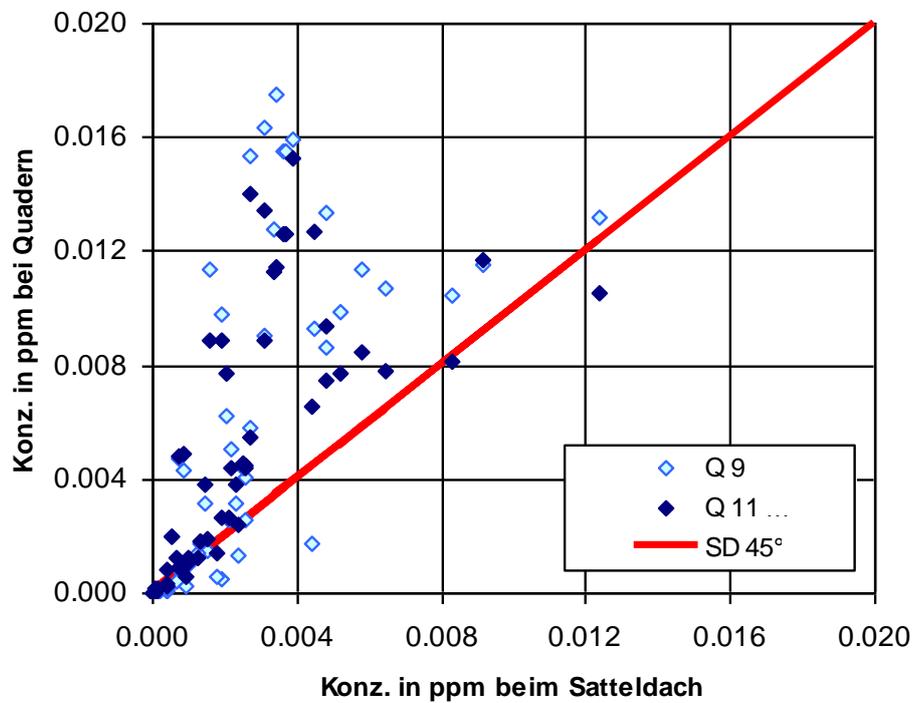


Abb. 5.6: Vergleich der bei dem Satteldach im Fall 4 gemessenen Konzentrationen mit denen bei den halb- und firsthohen Quadern (Q 11 ist der firsthohe Ersatzquader).

6. Einbringen der Ergebnisse in die TA Luft (TP 4)

Die beschriebenen Untersuchungen zur Ersatzquaderhöhe sind von den Bundesländern Baden – Württemberg, Bayern, Berlin, Hessen und Thüringen finanziert worden und unmittelbar mit Arbeiten im UBA - Forschungsvorhaben FKZ 3714 43 204 0 – Weiterentwicklung methodischer Grundlagen zur TA Luft – verknüpft. Sie betreffen dort insbesondere die Arbeitspakete 1 (Ungestörter Abtransport mit der freien Luftströmung, TA Luft 5.5.1) und 3 (Fortschreibung der Ausbreitungsrechnung, TA Luft, Anhang 2).

Das Vorhaben zur Ermittlung der Ersatzquaderhöhe und erste Ergebnisse der Untersuchungen wurden auf dem 1. Workshop zur Neufassung der TA Luft am 6./7. Juli 2015 am Umweltbundesamt in Dessau vorgestellt und diskutiert. Folgende Forderungen wurden dort erhoben:

– *Es wird die Ermittlung der Unsicherheiten der Windkanalergebnisse gefordert.*

Angaben zu den Unsicherheiten der Untersuchungen im Windkanal als solche finden sich im Anhang A4 dieses Berichtes (Bestimmung der Abmessungen der Rezirkulationszonen mit verschiedenen Verfahren, Geschwindigkeits- und Konzentrationsmessungen). Die konzeptionellen Abweichungen zwischen Original und Ersatzquader sind in dem Abschnitt 5.2 dieses Berichtes beschrieben.

– *Es wird eine Empfehlung für Quellen unmittelbar am Dach gefordert.*

Solche Quellen emittieren nicht in die freie Strömung, sondern in die Rezirkulationszone und sind daher bereits nach der bisherigen TA Luft zu vermeiden. Da sie dennoch auftreten können, sollen sie in einer ergänzenden Untersuchung betrachtet werden². Die Ergebnisse dieser Ergänzung können in das „Merkblatt Schornsteinhöhenberechnung“ des Arbeitskreises Ausbreitungsrechnung des LAI aufgenommen werden.

Seitens des Fachbereiches II der KRdL bestand eine weitere Forderung, die ebenfalls berücksichtigt wurde:

– *Es soll **eine** Ersatzquaderhöhe festgelegt werden, die sich aus dem Mittel über die Windrichtungen ergibt.*

Bei der Festlegung der Ersatzquaderhöhe wurden, wie in Abschnitt 3.1.1 erläutert, verschiedene Windrichtungen betrachtet. Auf dieser Basis wurde ein firsthoher Ersatzquader vorgeschlagen und anschließend hinsichtlich seiner Wirkung überprüft.

Als Arbeitstext während der laufenden Arbeiten diente zunächst unter Punkt 11 – Berücksichtigung von Bebauung – in den neuen Anhang 2 – Ausbreitungsrechnung – des Entwurfes der TA Luft (Stand 14.07.2015) die vorläufige Formulierung:

² siehe hierzu: Theurer, W. (2018): Behandlung dachnaher Quellen bei der numerischen Modellierung. Ingenieurbüro Theurer, Hanhofen. Unter: www.janicke.de/data/bzu/Bericht_Dachnahe_Quellen_20180524.pdf

„Sofern Gebäudegeometrien in einem diagnostischen Modell (...) oder einem prognostischen Modell (...) auf Quaderform reduziert werden, muss die Höhe der Quader so gewählt werden, dass die Rezirkulationszonen der Modellgebäude in ihren Abmessungen den Rezirkulationszonen der wirklichen Gebäude entsprechen. Angaben zur Wahl der Höhe der Ersatzquader finden sich im Abschlussbericht einer ergänzenden Untersuchung zu dem UFOPLAN-Vorhaben FKZ 3714 43 204...“

Nachdem der erste Teil der Arbeiten abgeschlossen war, wurde am 29. September 2015 im Arbeitskreis Fachgespräch Ausbreitungsrechnung der Länder in Fulda über den Stand des Vorhabens berichtet. Die vollständigen, hier beschriebenen, Ergebnisse wurden bei dem 2. Workshop zur TA Luft am 16./17. November 2015 im Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit in Bonn vorgestellt.

Aufgrund der Ergebnisse wurde beschlossen, dem Vorschlag zu folgen, firsthohe Ersatzquader in den Modellen zu verwenden. In den Entwurf zu Anhang 2 der TA Luft wird unter Punkt 11 der Satz aufgenommen:

„Sofern die Gebäudegeometrie... auf Quaderform reduziert wird, ist als Höhe des Quaders die Firsthöhe des abzubildenden Gebäudes zu wählen“.

7. Literatur

Benndorf, D. (1984): "Schornsteinmindesthöhen an Gebäuden". Technische Universität Dresden.

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 Characterising Dispersion in the Near Wake of Buildings". Journal 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.

Heise, S. (2012): "Untersuchungen zur Nahfeldausbreitung von Emissionen aus Kleinfeuerungsanlagen". Masterarbeit, Universität Hamburg.

Hosker, R.P. (1981): "Methods for Estimating Wake Flow and Effluent Dispersion near Simple Block-Like Buildings". NOAA Technical Memorandum ERL ARL – 108. NOAA ERL, Silver Spring, Maryland.

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.

Merkblatt Schornsteinhöhenberechnung (2012). Hrsg. Fachgespräch Ausbreitungsrechnung.

Plate, E.J. (1982): "Wind tunnel modelling of wind effects in engineering". In: "Engineering meteorology". Ed. E.J. Plate. Amsterdam: Elsevier.

Smolyakov, A.V.; Tkachenko, V.M. (1983): "The measurement of turbulent fluctuations". Springer - Verlag.

Theurer, W. (1993): "Ausbreitung bodennaher Emissionen in komplexen Bebauungen". Universität Karlsruhe.

VDI 3781 Blatt 4 (Juli 2017): „Umweltmeteorologie – Ableitbedingungen bei Abgasanlagen – Kleine und mittlere Feuerungsanlagen sowie andere als Feuerungsanlagen“.

VDI 3783 Blatt 9 (Nov. 2005): „Umweltmeteorologie – Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle – Evaluierung für Gebäude- und Hindernisumströmung“. Berlin: Beuth-Verlag.

VDI 3783 Blatt 10 (März 2010): „Umweltmeteorologie – Diagnostische mikroskalige Windfeldmodelle – Gebäude– und Hindernisumströmung“. Berlin: Beuth-Verlag.

VDI 3783 Blatt 12 (Dez. 2000): „Umweltmeteorologie – Physikalische Modellierung von Strömungs– und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht – Windkanalanwendungen“. Berlin: Beuth-Verlag.

Wilson, D.J.; Britter, R.E. (1982): "Estimates of Building Surface Concentrations from nearby Point Sources". Atmos. Env. , Vol. 16, No. 11, S. 2631 – 2646.

Anhang

A1 Beschreibung des Windkanals

Der Windkanal des Ingenieurbüros Theurer, Hanhofen, in dem die Versuche zur Bestimmung der Ersatzquaderhöhe 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 Vergleichmäßigung 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.

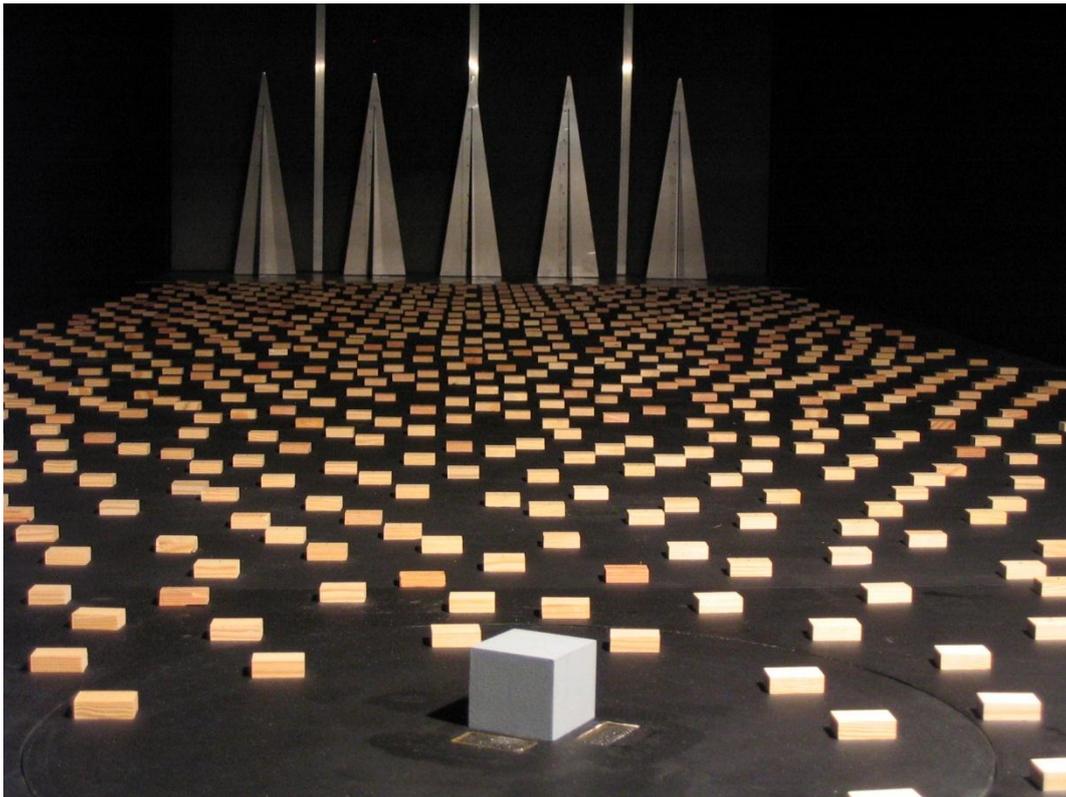


Abb. A1.1: Blick in den Windkanal entgegen der Strömungsrichtung. Im Hintergrund die dreiecksförmigen Wirbelgeneratoren, davor die Rauheitselemente. Im Vordergrund das Modell eines würfelförmigen Gebäudes mit den beiden Quellen.

Die Anlauf- und 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 Grundströmung im Windkanal nach der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 12 (2000), überprüft.

Weiter 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. In beiden Fällen war die Austrittsgeschwindigkeit dieselbe wie die der umgebenden Luftströmung.

A2 Ähnlichkeitsgesetze und Anforderungen an Modellversuche

Im Windkanal gewonnene Ergebnisse 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 VDI-Richtlinie 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 Spektraldichtevertelung 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 Strömung um Hindernisse, wie beispielsweise ihre Rezirkulationszone, naturähnlich und nicht mehr von einer weiteren Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit abhängig.

Nach der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 12 (2000), beträgt die kritische Reynoldszahl, gebildet mit der Bauwerkshöhe H als für den Strömungsvorgang charakteristischen 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 und 12 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 mit den jeweils unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten in 30 m Höhe normierte Geschwindigkeitsprofile bei den jeweiligen Reynoldszahlen aufgetragen.

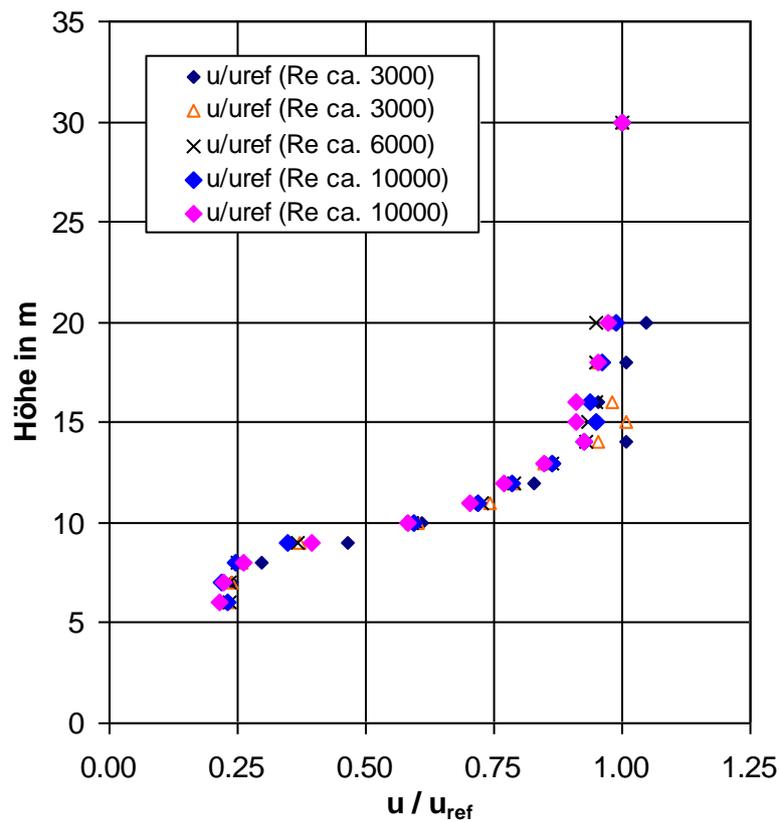


Abb. A2.1 Windgeschwindigkeitsprofile hinter einem Würfel der Höhe 10 m im Abstand von 6 m bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten bzw. Reynoldszahlen.

Die niedrigste getestete Reynoldszahl war 3000 und wurde z. B. bei den Rauchversuchen erreicht. Hier darf die Windgeschwindigkeit nicht zu hoch sein, um eine ausreichende Intensität des Rauches sicherzustellen. Trotzdem unterscheidet sich das Geschwindigkeitsprofil nur wenig von denen bei Reynoldszahlen von 6000 (die Aufnahmen mit den Windfännchen und die quantitativen Geschwindigkeits- und Konzentrationsmessungen wurden hierbei durchgeführt) oder 10000. Bei beiden höheren Reynoldszahlen waren die Profile im Rahmen der Reproduzierbarkeit identisch.

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

Die Versperrung des Windkanals durch die Modelle betrug weniger als 5% der Querschnittsfläche der Messstrecke. Auch diese Forderung der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 12 (2000) war somit eingehalten.

A3 Anströmungsgrenzschichten

Um die Auswirkungen verschiedener Bodenrauheiten bzw. Geschwindigkeits- und Turbulenzverhältnisse auf die Rezirkulationszonen zu erfassen, wurden in der vorliegenden Untersuchung zwei verschiedene Grenzschichten modelliert. Dabei wurde unterschieden in ein frei stehendes Einzelgebäude in einem offenem, glatten Gelände und Gebäude in einer bebauten Umgebung mit höherer Rauheit.

A3.1 Grenzschicht über offenem Gelände

Für die Anströmung der frei stehenden Einzelgebäude im TP 1 wurde im Windkanal eine um den Maßstab 1:200 verkleinerte Grenzschicht eingerichtet, wie sie sich über einem glatten, offenen Gelände mit Grasland und abgeernteten Ackerflächen einstellt. Ein solches, nach der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 12 (2000), „mäßig raues“ Gelände, entspricht den seinerzeitigen CO-RINE-Klassen 333 (Flächen mit spärlicher Vegetation) bzw. 231 (Wiesen und Weiden) 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 Dichteverteilung der Turbulenz S_{uu} in 30 m Höhe (Abb. A3.3).

Nach der Abbildung A3.1a ergibt sich, unter Berücksichtigung der Messunsicherheit bei diesen Geschwindigkeitsmessungen von ca. 3% nach Abschnitt A4.1, 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). Die Referenzhöhe z_{ref} war jeweils 30 m.

Das Turbulenzintensitätsprofil $I_u = \sigma_u(z)/u(z)$ in Abbildung A3.2 liegt, wie bei $z_0 = 0.02$ m zu fordern ist, zwischen den Kurven nach ESDU (1985) für $z_0 = 0.005$ m und 0.1 m. Das Spektrum der longitudinalen Turbulenz (Abb. A3.3) zeigt Ähnlichkeit mit den in der VDI-Richtlinie zitierten Spektren von Kaimal et al. (1972) und Harris (1971).

Somit gibt die Anströmungsgrenzschicht im Windkanal eine neutrale natürliche Grenzschicht über offenem Gelände hinreichend genau wieder.

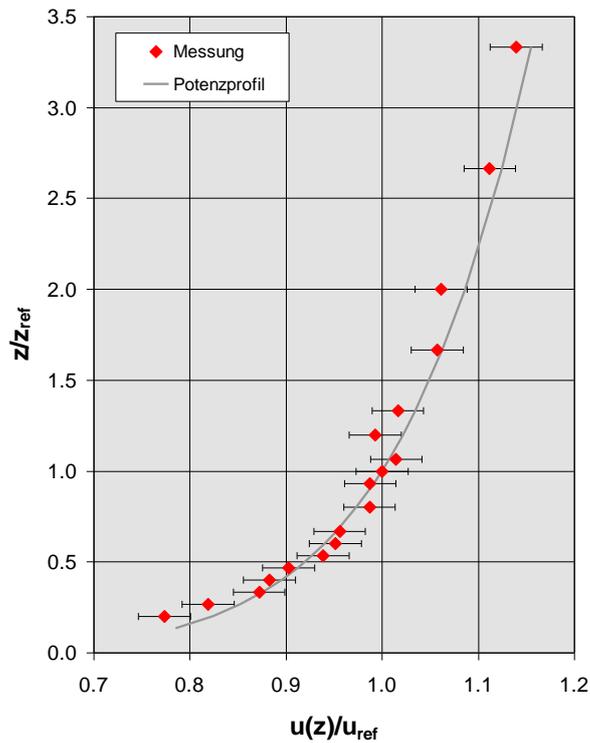


Abb. A3.1a: Mit der Referenzgeschwindigkeit u_{ref} in $z_{ref} = 30$ m Höhe normierte mittlere Windgeschwindigkeiten $u(z)$, verglichen mit einem Windprofil nach dem Potenzansatz mit dem Profilexponenten $\alpha = 0.12$ und der Verdrängungshöhe $d_0 = 0$.

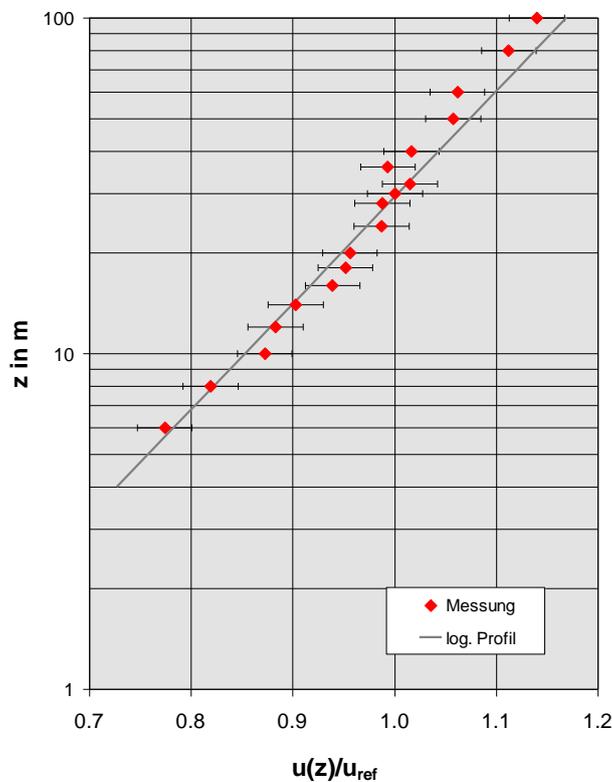


Abb. A3.1b: Mit einer Referenzgeschwindigkeit u_{ref} in 30 m Höhe normierte mittlere Windgeschwindigkeiten $u(z)$, verglichen mit einem Windprofil nach dem logarithmischen Ansatz und einer Rauigkeitslänge von $z_0 = 0.02$ m.

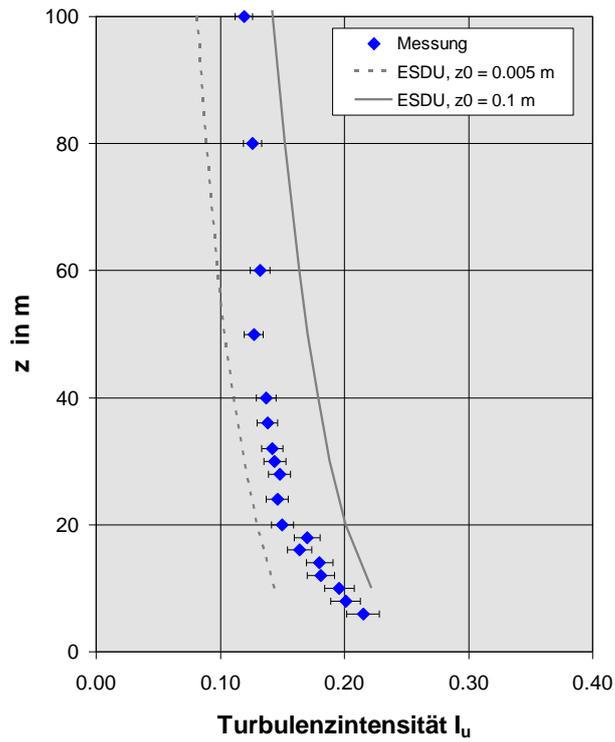


Abb. A3.2: Höhenverteilung der Turbulenzintensitäten in longitudinaler Richtung $I_u = \sigma_u(z)/u(z)$ für das Windgeschwindigkeitsprofil mit $z_0 = 0.02$ m, verglichen mit Profilen nach ESDU (1985) für $z_0 = 0.005$ m und $z_0 = 0.1$ m.

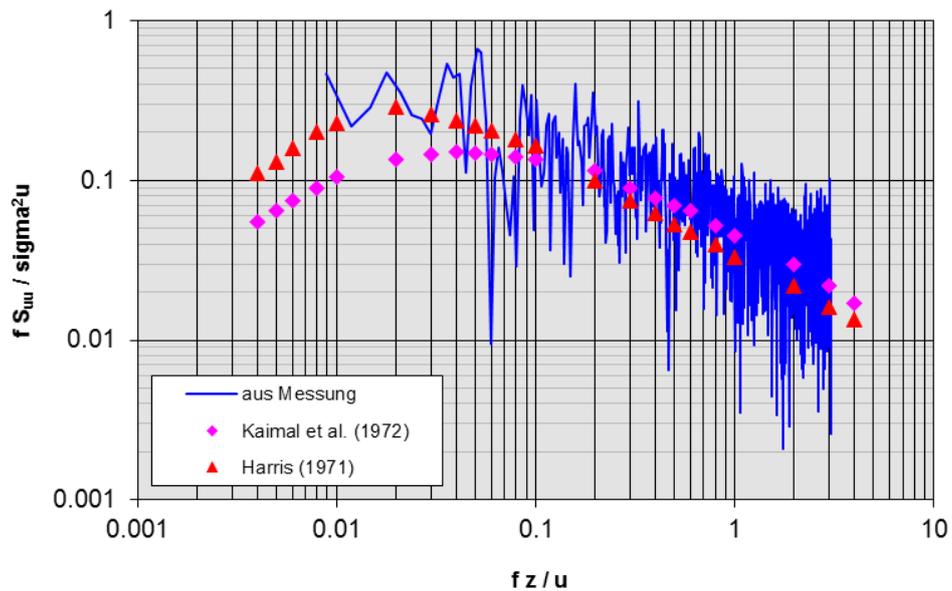


Abb. A3.3: Normierte spektrale Dichteverteilung der kinetischen Energie der Turbulenz („Turbulenzspektrum“) in der Höhe $z = 30$ m, verglichen mit Ansätzen nach Kaimal et al. (1972) und Harris (1971).

A3.2 Grenzschicht über einer Bebauung

Für die Anströmung der Gebäude mit einer Vorbebauung wurde eine Anströmungsgrenzschicht verwendet, die typisch ist für eine mitteldichte vorstädtische Bebauung oder auch für Industrieanlagen, und die in der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 12 (2000), als „rau“ bezeichnet wird. Der Modellmaßstab dieser Grenzschicht beträgt ebenfalls 1:200.

Wie bereits bei der mäßig rauen Grenzschicht in Abschnitt A3.1 werden auch für die raue Grenzschicht folgende Kenngrößen in der Mitte der leeren Messstrecke mit den Vorgaben nach der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 12 (2000), abgeglichen:

- die zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten $u(z)$ (Abb. A3.4a und b), und
- die Turbulenzintensitäten $I_u(z)$ (Abb. A3.5),

Für die Grenzschicht bei vorstädtischer Bebauung wurde nach dem Potenzansatz ein Profil-exponent $\alpha = 0.22$ gewählt (Abbildung. A3.4a), der im Windkanal bei einer Verdrängungshöhe von $d_0 = 3$ m abgebildet wurde. Der logarithmische Ansatz ergibt, dazu passend, eine Rauigkeitslänge von $z_0 = 0.5$ m (Abb. A3.4b). Die Referenzhöhe z_{ref} war jeweils 30 m.

Das Profil der Turbulenzintensitäten über die Höhe $I_u(z)$ (Abb. A3.5) liegt zwischen den nach ESDU vorgegebenen Kurven (1985) für $z_0 = 0.1$ m und 0.5 m. Die Werte befinden sich auch zwischen der unteren (u. S.) und oberen Schranke (o. S.), die die VDI-Richtlinie für vergleichbare Grenzschichten angibt.

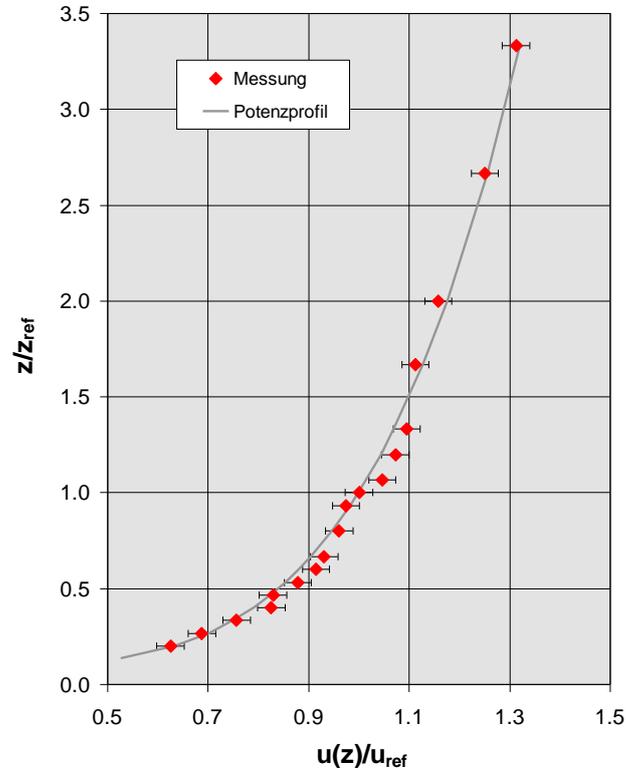


Abb. A3.4a: Mit einer Referenzgeschwindigkeit u_{ref} in $z_{ref} = 30$ m Höhe normierte mittlere Windgeschwindigkeiten $u(z)$, verglichen mit einem Windprofil nach dem Potenzansatz mit einem Exponenten von $\alpha = 0.22$ und einem d_0 von 3 m.

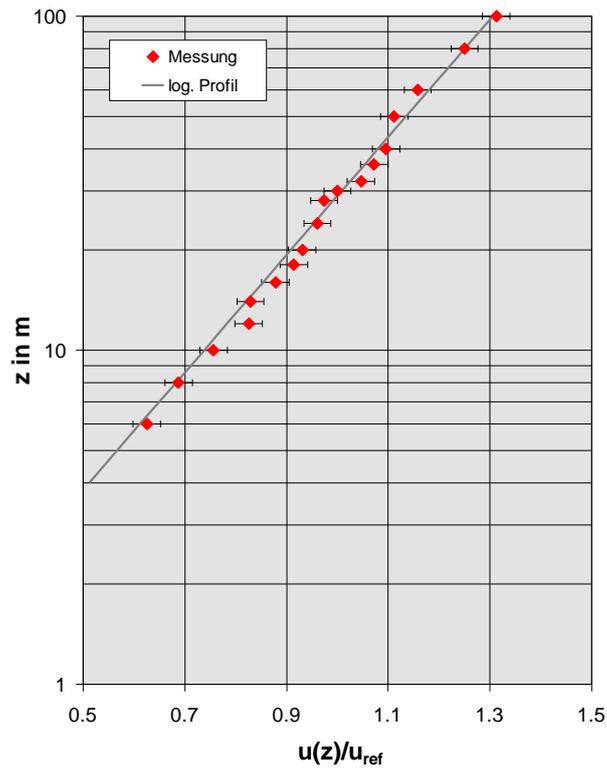


Abb. A3.4b: Mit einer Referenzgeschwindigkeit u_{ref} in 30 m Höhe normierte mittlere Windgeschwindigkeiten $u(z)$, verglichen mit einem Windprofil nach dem logarithmischen Ansatz und einer Rauigkeitslänge von $z_0 = 0.5$ m.

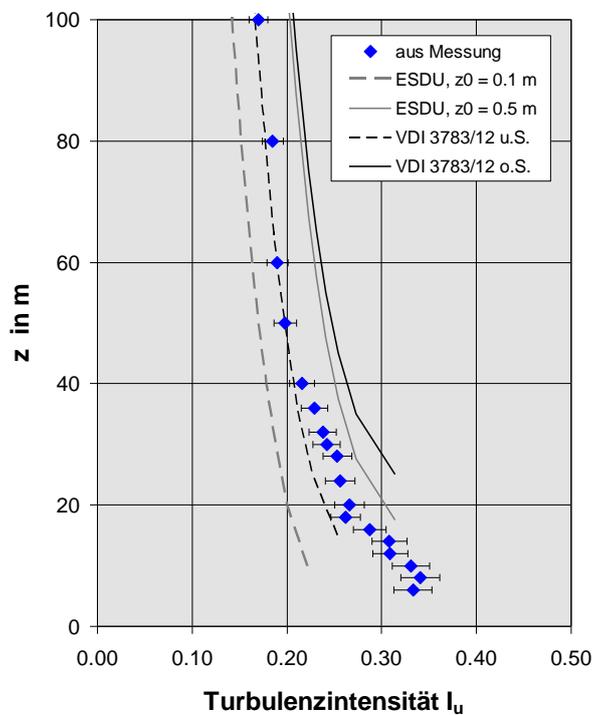


Abb. A3.5: Turbulenzintensitäten in longitudinaler Richtung $I_u = \sigma_u(z)/u(z)$ für das Windgeschwindigkeitsprofil mit $z_0 = 0.5$ m, verglichen mit Profilen nach ESDU (1985) für $z_0 = 0.1$ m und 0.5 m, und Schranken nach VDI 3783 Blatt 12 (2000).

A4 Reproduzierbarkeiten

A4.1 Einfluss der 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. Für eine Abschätzung der Unsicherheit sollte daher als Messort ein Ort mit hohen zeitlichen Fluktuationen der Messgröße gewählt werden.

Im Folgenden wird die Unsicherheit aufgrund der endlichen Messdauer am Beispiel der mittleren Geschwindigkeit für die Vertikalprofile der Anströmung in Abhängigkeit von der Messdauer abgeschätzt. Für den untersten Profilpunkt in 30 mm Höhe wurden mit einem Hitzdraht je 10 Zeitreihen und Messdauern von 5, 10, 30 und 60 Sekunden im Modell aufgenommen. Übertragen auf die Natur bedeutet dies bei dem Maßstab von 1:200 eine Messhöhe von 6 m und, gleiche Windgeschwindigkeiten in Modell und Natur vorausgesetzt, Messzeiten von 1.000, 2.000, 6.000 und 12.000 Sekunden.

Die Schwankung um das Gesamtmittel in Abhängigkeit von der Messdauer zeigt Abb. A.4.1. Die beiden blauen Linien umschließen den nach einem Ansatz von Smolyakov et al. (1983) theoretisch zu erwartenden Bereich der Unsicherheiten.

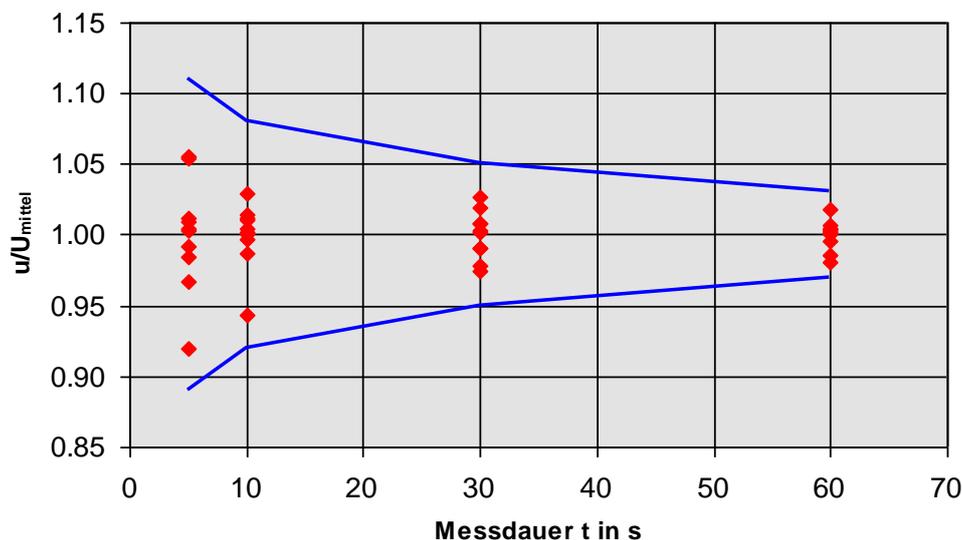


Abb. A4.1: Streuung der gemessenen mittleren Windgeschwindigkeiten u um das Gesamtmittel U_{mittel} . Betrachtet werden jeweils 10 Mittelwerte bei verschiedenen Messdauern. Messpunkt in 30 mm Höhe in der Anströmung, bei einem Maßstab von 1:200 entsprechend 6 m in der Natur. Blaue Linien: Grenzen des Bereichs der Unsicherheiten nach Smolyakov et al. (1983).

Nach der Abbildung A4.1 streuen die einzelnen Mittelwerte ab einer Messdauer von 30 Sekunden weniger als $\pm 3\%$ um das Gesamtmittel. Eine Absenkung der Unsicherheit auf einen Wert von ca. $\pm 2\%$ um das Gesamtmittel erfordert etwa eine Verdoppelung der Messdauer auf 60 Sekunden. Eine Unsicherheit von 3% ist als Fehlerbalken in die Abb. A3.1a und b, sowie A3.4a und b, eingetragen. Ähnliche Betrachtungen wurden bei der Bestimmung der Turbulenzintensitäten angestellt (Abb. A3.2 und A3.5).

A4.2 Strömungssichtbarmachung

Die mittleren Längen der Rezirkulationszonen L_{RZ} wurden mit den beiden Verfahren „Strömungssichtbarmachung mittels Rauch“ und „Sichtbarmachung mittels Windfähnchen“ bestimmt. Die Ergebnisse beider Verfahren sind in der Abbildung A4.2 miteinander verglichen. Sowohl für die frei stehenden Einzelgebäude in offenem Gelände, als auch für die Gebäude in bebautem Gelände ergab sich eine weitgehende Übereinstimmung. In den meisten Fällen betrug die Abweichung zwischen den mit Rauch und den mit Fähnchen ermittelten Längen weniger als ± 2 m (der Bereich zwischen den beiden unterbrochenen Linien in der Abbildung A4.2). Die Länge 2 Meter entsprach etwa dem halben Abstand zwischen zwei Windfähnchen und somit der Auflösung des Verfahrens. Lediglich bei großen Längen gab es stärkere Abweichungen zwischen beiden Verfahren.

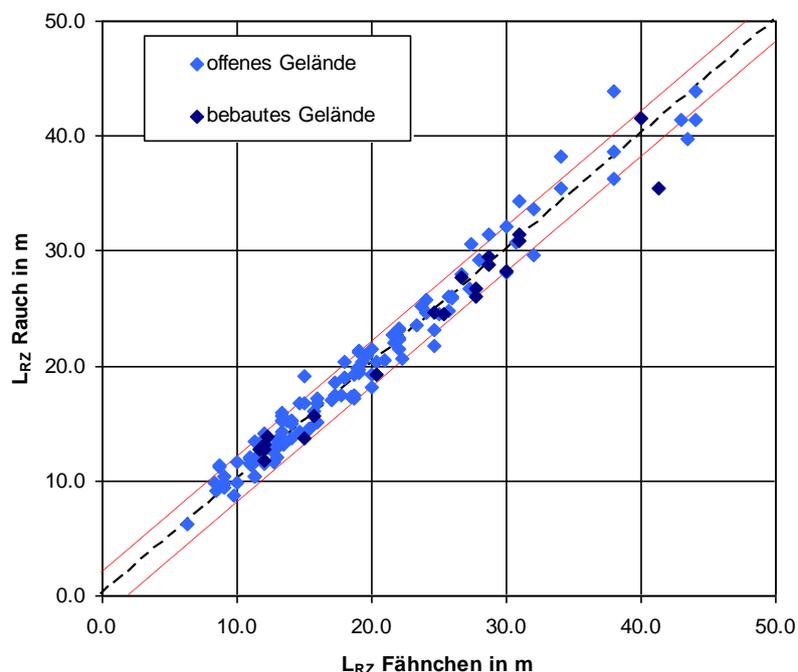


Abb. A4.2: Vergleich der Längen der Rezirkulationszonen aus der Sichtbarmachung mit Hilfe von Miniatur-Windfähnchen und von Rauch für offenes und für bebautes Gelände.

A4.3 Strömungsmessungen

Die Strömungsmessungen erfolgten mit einer Hitzdrahtsonde. Derartige Sonden sind in der Lage, auch turbulente Schwankungen in der Strömung zeitlich hinreichend hoch aufzulösen.

- Kalibrierung des Hitzdrahtes

Vor dem Einsatz bei den Strömungsmessungen wurde die Hitzdrahtsonde kalibriert. Hierzu wurde die Sonde in einem Kalibrierkanal der Fa. Airflow einer turbulenzarmen Luftströmung ausgesetzt. Die Strömungsgeschwindigkeit im Kalibrierkanal wurde über eine Messung des Druckabfalls an Blenden und den entsprechenden Datenblättern bestimmt. Mit Hilfe einer an die Messpunkte aus der Kalibrierung angepassten Kalibrierfunktion können die an der Hitzdrahteinheit gemessenen Spannungen in Geschwindigkeiten umgerechnet werden. In der Abb. A4.3 sind die Messpunkte und die angepasste Kalibrierfunktion dargestellt.

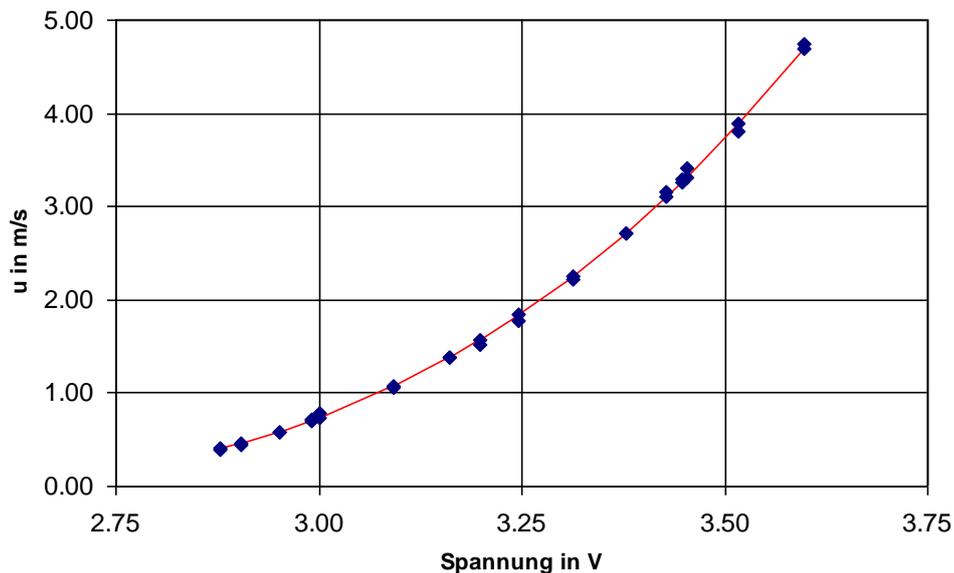


Abb. A4.3: Bei der Kalibrierung des Hitzdrahtes aufgenommene Datenpunkte einschließlich der angepassten Kalibrierfunktion.

- Reproduzierbarkeit der Strömungsmesswerte

Die Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Strömungsmessungen erfolgte mit Hilfe von Messungen bei verschiedenen Längs- und Vertikalprofilen in den Rezirkulationszonen (s. Abschnitt 3.2). An den Schnittpunkten der Profile lagen je zwei Messungen vor, die sowohl die Unsicherheiten aufgrund der endlichen Messdauer von 30 s beinhalteten, als auch die Unsicherheiten durch die erneute Positionierung der Sonde und, bei Messungen an unterschiedlichen Tagen, durch verschiedene Kalibrierkurven.

Nach der Abbildung A4.4 beträgt der Unterschied der in den beiden Profilen am selben Ort gemessenen Geschwindigkeiten in den meisten Fällen deutlich weniger als $\pm 10\%$, wie die Lage der Punkte zwischen den beiden unterbrochenen roten Linien in der Abbildung zeigt.

Zu berücksichtigen ist dabei, dass die Reproduzierbarkeit der Windgeschwindigkeiten aufgrund der endlichen Messdauer selbst bei den weniger turbulenten Verhältnissen in der Anströmung bereits bei $\pm 3\%$ liegt.

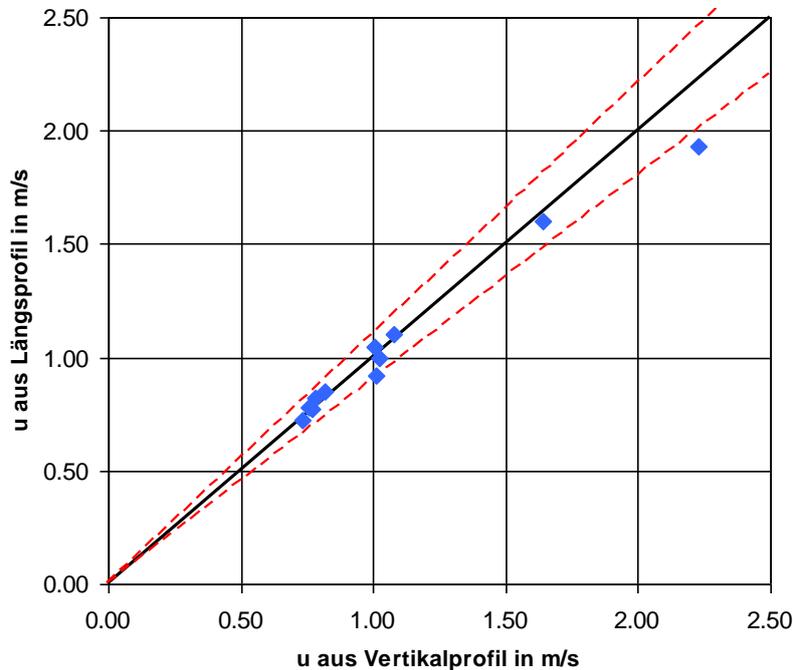


Abb. A4.4: Reproduzierbarkeit der Strömungsmessungen für identische Messpunkte in den Längs- und Vertikalprofilen. Die unterbrochenen Linien kennzeichnen Abweichungen von $\pm 10\%$.

A4.4 Konzentrationsmessungen

- Kalibrierung des Flammionisationsdetektors (FID)

Der verwendete Flammionisationsdetektor HFR 400 der Fa. Cambustion wurde an jedem Messtag mit Ethan – Luft – Gemischen mehrerer bekannter Konzentrationen kalibriert. Die Abbildung A4.5 zeigt eine solche Kalibrierung des FID. Die lineare Kalibrierfunktion wurde im Anschluss verwendet, um aus den vom FID ausgegebenen Spannungen die Ethankonzentrationen zu berechnen.

- Reproduzierbarkeit der Konzentrationsmesswerte

Wie bei den Strömungsmessungen erfolgte die Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Konzentrationsmessungen durch Vergleiche von Messungen, die bei den verschiedenen Längs-, Vertikal- und Querprofilen in den Rezirkulationszonen an identischen Punkten in den Profilen bestimmt wurden (s. Abbildung A4.6). Diese Messungen beinhalten, analog zu den Strömungsmessungen, die Unsicherheiten aufgrund der endlichen Messdauer, durch die erneute Positionierung der Sonde und, bei Messungen an unterschiedlichen Tagen, durch verschiedene Kalibrierungen.

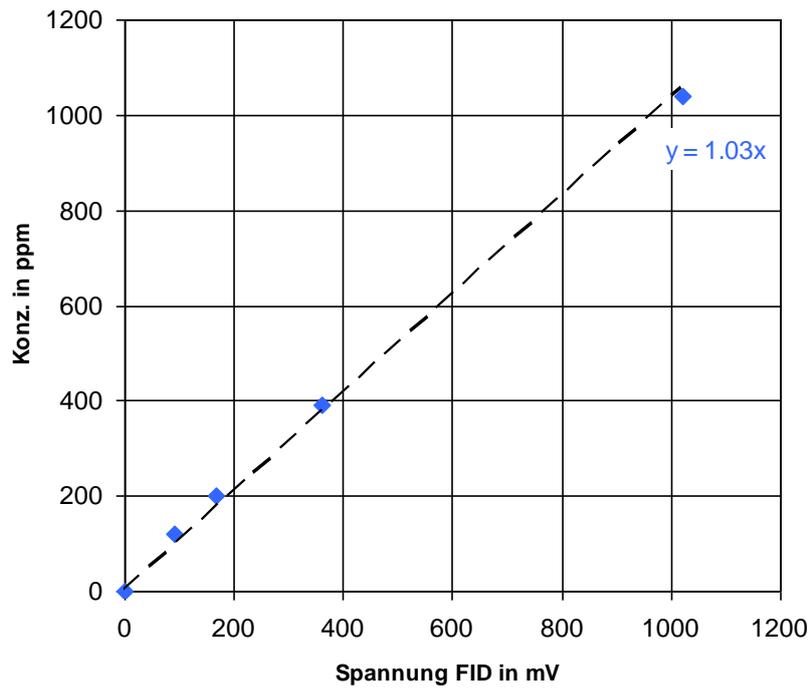


Abb. A4.5: Kalibrierung des FID mit verschiedenen Ethan – Luft – Gemischen und Bestimmung der linearen Kalibrierfunktion.

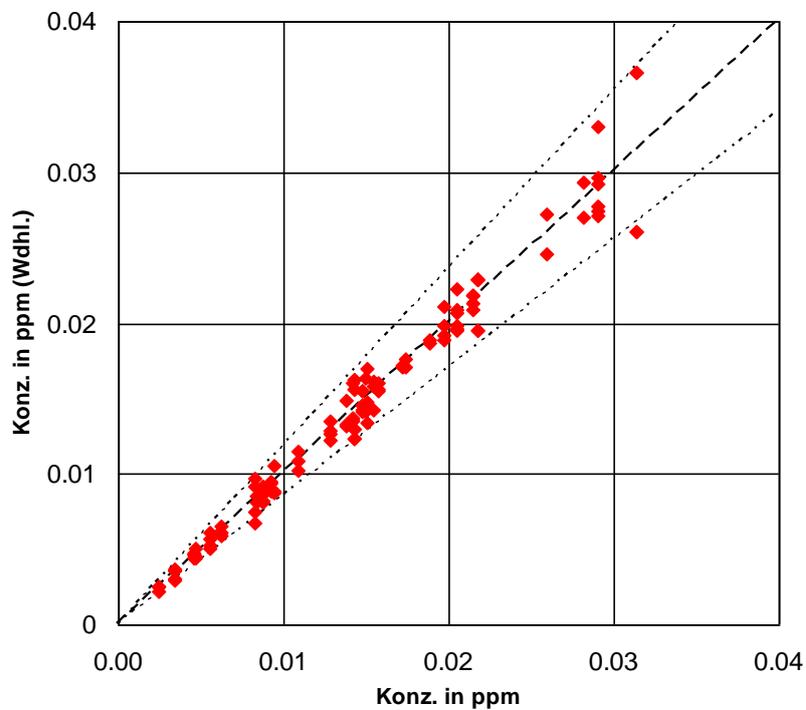


Abb. A4.6: Reproduzierbarkeit der Konzentrationen für identische Messpunkte in den Längs-, Vertikal- und Querprofilen. Die unterbrochenen Linien kennzeichnen Unterschiede von $\pm 15\%$.

Nach den in der Abbildung A4.6 eingetragenen Messpunkten betragen die Unterschiede der gemessenen Konzentrationen in der Regel weniger als $\pm 15\%$ und befinden sich so zwischen den beiden unterbrochenen Linien in der Abbildung.

A5 Tabellen der Abmessungen der Rezirkulationszonen

Tabelle A5.1a: Abmessungen der Rezirkulationszonen, Windrichtung 0 Grad,
frei stehendes Einzelgebäude, L/B -Verhältnis 1:1

	<i>B_{RZ}</i>	<i>L_{RZ}</i>	<i>H_{RZ}</i>
Satteldach 20°	10.0	9.3	8.7
Quader 6.0 m (Traufe)	10.0	9.6	6.2
Quader 6.9 m	10.0	11.7	7.0
Quader 7.8 m (First)	10.0	12.4	7.9
Satteldach 30°	10.0	10.7	10.0
Quader 6.0 m (Traufe)	10.0	9.6	6.2
Quader 7.8 m	10.0	12.4	7.9
Quader 8.9 m (First)	10.0	13.2	9.0
Satteldach 45°	10.0	12.8	12.4
Quader 6.0 m (Traufe)	10.0	9.6	6.2
Quader 8.9 m	10.0	13.2	9.0
Quader 11.0 m (First)	10.0	14.7	11.1
Satteldach 60°	10.0	14.9	16.8
Quader 6.0 m (Traufe)	10.0	9.6	6.2
Quader 10.0 m	10.0	13.8	10.1
Quader 14.7 m (First)	10.0	17.1	14.7

Tabelle A5.1b: Abmessungen der Rezirkulationszonen, Windrichtung 0 Grad,
frei stehendes Einzelgebäude, L/B -Verhältnis 1:5

	<i>B_{RZ}</i>	<i>L_{RZ}</i>	<i>H_{RZ}</i>
Satteldach 20°	50.0	28.6	9.9
Quader 6.0 m (Traufe)	50.0	21.6	8.2
Quader 6.9 m	50.0	28.9	9.3
Quader 7.8 m (First)	50.0	33.1	11.0
Satteldach 30°	50.0	36.8	10.9
Quader 6.0 m (Traufe)	50.0	21.6	8.2
Quader 7.8 m	50.0	33.1	11.0
Quader 8.9 m (First)	50.0	38.2	12.9
Satteldach 45°	50.0	42.1	14.4
Quader 6.0 m (Traufe)	50.0	21.6	8.2
Quader 8.9 m	50.0	38.2	12.9
Quader 11.0 m (First)	50.0	43.9	15.7
Satteldach 60°	50.0	49.1	18.5
Quader 6.0 m (Traufe)	50.0	21.6	8.2
Quader 10.0 m	50.0	41.8	14.4
Quader 14.7 m (First)	50.0	50.4	20.0

Tabelle A5.2a: Abmessungen der Rezirkulationszonen, Windrichtung 30 Grad,
frei stehendes Einzelgebäude, L/B -Verhältnis 1:1

	<i>B_{RZ}</i>	<i>L_{RZ}</i>	<i>H_{RZ}</i>
Satteldach 20°	15.0	12.1	8.7
Quader 6.0 m (Traufe)	13.8	12.6	6.0
Quader 6.9 m	13.9	14.9	6.9
Quader 7.8 m (First)	14.0	17.7	7.8
Satteldach 30°	15.2	15.9	10.6
Quader 6.0 m (Traufe)	13.8	12.6	6.0
Quader 7.8 m	14.0	17.7	7.8
Quader 8.9 m (First)	14.2	19.5	8.9
Satteldach 45°	15.0	17.4	12.8
Quader 6.0 m (Traufe)	13.8	12.6	6.0
Quader 8.9 m	14.2	19.5	8.9
Quader 11.0 m (First)	14.5	20.5	11.0
Satteldach 60°	15.0	19.5	17.9
Quader 6.0 m (Traufe)	13.8	12.6	6.0
Quader 10.0 m	14.4	20.5	10.0
Quader 14.7 m (First)	15.0	22.4	14.7

Tabelle A5.2b: Abmessungen der Rezirkulationszonen, Windrichtung 30 Grad,
frei stehendes Einzelgebäude, L/B -Verhältnis 1:5

	<i>B_{RZ}</i>	<i>L_{RZ}</i>	<i>H_{RZ}</i>
Satteldach 20°	55.0	18.3	12.0
Quader 6.0 m (Traufe)	56.0	22.4	8.4
Quader 6.9 m	56.0	24.6	10.0
Quader 7.8 m (First)	56.0	28.4	12.0
Satteldach 30°	56.0	24.2	13.0
Quader 6.0 m (Traufe)	56.0	22.4	8.4
Quader 7.8 m	56.0	28.4	12.0
Quader 8.9 m (First)	57.0	32.1	14.0
Satteldach 45°	55.0	31.2	18.0
Quader 6.0 m (Traufe)	56.0	22.4	8.4
Quader 8.9 m	57.0	32.1	14.0
Quader 11.0 m (First)	57.0	35.4	18.0
Satteldach 60°	54.0	42.2	20.0
Quader 6.0 m (Traufe)	56.0	22.4	8.4
Quader 10.0 m	57.0	34.5	16.0
Quader 14.7 m (First)	58.0	40.5	24.0

Tabelle A5.3a: Abmessungen der Rezirkulationszonen, Windrichtung 45 Grad,
frei stehendes Einzelgebäude, L/B -Verhältnis 1:1

	<i>BRZ</i>	<i>LRZ</i>	<i>HRZ</i>
Satteldach 20°	17.0	10.7	8.7
Quader 6.0 m (Traufe)	16.7	9.5	6.3
Quader 6.9 m	16.8	11.2	6.9
Quader 7.8 m (First)	16.9	13.2	7.9
Satteldach 30°	16.6	14.7	10.9
Quader 6.0 m (Traufe)	16.7	9.5	6.3
Quader 7.8 m	17.0	13.2	7.9
Quader 8.9 m (First)	17.2	15.0	8.9
Satteldach 45°	16.6	17.5	13.0
Quader 6.0 m (Traufe)	16.7	9.5	6.3
Quader 8.9 m	17.2	15.0	8.9
Quader 11.0 m (First)	17.5	18.3	11.0
Satteldach 60°	16.7	22.3	18.2
Quader 6.0 m (Traufe)	16.7	9.5	6.3
Quader 10.0 m	17.3	16.3	10.0
Quader 14.7 m (First)	18.1	21.9	14.7

Tabelle A5.3b: Abmessungen der Rezirkulationszonen, Windrichtung 45 Grad,
frei stehendes Einzelgebäude, L/B -Verhältnis 1:5

	<i>BRZ</i>	<i>LRZ</i>	<i>HRZ</i>
Satteldach 20°	47.0	15.6	11.0
Quader 6.0 m (Traufe)	50.0	16.3	10.0
Quader 6.9 m	50.0	19.1	11.0
Quader 7.8 m (First)	50.0	22.1	12.0
Satteldach 30°	47.0	20.5	13.0
Quader 6.0 m (Traufe)	50.0	16.3	10.0
Quader 7.8 m	50.0	22.1	12.0
Quader 8.9 m (First)	51.0	24.2	13.0
Satteldach 45°	50.0	24.2	17.0
Quader 6.0 m (Traufe)	50.0	16.3	10.0
Quader 8.9 m	51.0	24.2	13.0
Quader 11.0 m (First)	51.0	27.1	16.0
Satteldach 60°	50.0	27.1	20.0
Quader 6.0 m (Traufe)	50.0	16.3	10.0
Quader 10.0 m	51.0	25.1	14.0
Quader 14.7 m (First)	52.0	30.7	19.0

Tabelle A5.4a: Abmessungen der Rezirkulationszonen, Windrichtung 60 Grad, frei stehendes Einzelgebäude, L/B -Verhältnis 1:1

	<i>B_{RZ}</i>	<i>L_{RZ}</i>	<i>H_{RZ}</i>
Satteldach 20°	15.0	10.8	8.8
Quader 6.0 m (Traufe)	15.7	11.8	6.0
Quader 6.9 m	15.9	14.4	6.9
Quader 7.8 m (First)	16.1	16.9	7.9
Satteldach 30°	15.1	14.9	9.6
Quader 6.0 m (Traufe)	15.7	11.8	6.0
Quader 7.8 m	15.8	16.9	7.8
Quader 8.9 m (First)	15.9	17.7	8.9
Satteldach 45°	15.6	17.7	12.1
Quader 6.0 m (Traufe)	15.7	11.8	6.0
Quader 8.9 m	16.3	17.7	8.9
Quader 11.0 m (First)	16.8	19.9	11.0
Satteldach 60°	17.0	21.3	16.3
Quader 6.0 m (Traufe)	15.7	11.8	6.0
Quader 10.0 m	16.6	19.4	10.0
Quader 14.7 m (First)	17.6	22.2	14.7

Tabelle A5.4b: Abmessungen der Rezirkulationszonen, Windrichtung 60 Grad, frei stehendes Einzelgebäude, L/B -Verhältnis 1:5

	<i>B_{RZ}</i>	<i>L_{RZ}</i>	<i>H_{RZ}</i>
Satteldach 20°	44.0	16.6	10.3
Quader 6.0 m (Traufe)	41.0	14.5	7.7
Quader 6.9 m	41.0	15.6	8.8
Quader 7.8 m (First)	41.0	17.5	9.5
Satteldach 30°	42.0	18.9	12.1
Quader 6.0 m (Traufe)	41.0	14.5	7.7
Quader 7.8 m	41.0	17.5	9.5
Quader 8.9 m (First)	41.0	19.0	10.6
Satteldach 45°	45.0	25.8	15.5
Quader 6.0 m (Traufe)	41.0	14.5	7.7
Quader 8.9 m	41.0	19.0	10.6
Quader 11.0 m (First)	42.0	23.5	13.5
Satteldach 60°	42.0	30.1	20.2
Quader 6.0 m (Traufe)	41.0	14.5	7.7
Quader 10.0 m	42.0	20.3	11.9
Quader 14.7 m (First)	42.0	25.2	18.0

Tabelle A5.5a: Abmessungen der Rezirkulationszonen, Windrichtung 90 Grad, frei stehendes Einzelgebäude, L/B -Verhältnis 1:1

	B_{RZ}	L_{RZ}	H_{RZ}
Satteldach 20°	10.0	11.6	7.8
Quader 6.0 m (Traufe)	10.0	9.8	6.1
Quader 6.9 m	10.0	11.7	7.0
Quader 7.8 m (First)	10.0	12.4	7.9
Satteldach 30°	10.0	12.1	8.9
Quader 6.0 m (Traufe)	10.0	9.8	6.1
Quader 7.8 m	10.0	12.4	7.9
Quader 8.9 m (First)	10.0	13.2	9.0
Satteldach 45°	10.0	13.6	11.0
Quader 6.0 m (Traufe)	10.0	9.8	6.1
Quader 8.9 m	10.0	13.2	9.0
Quader 11.0 m (First)	10.0	14.7	11.1
Satteldach 60°	10.0	14.6	14.7
Quader 6.0 m (Traufe)	10.0	9.8	6.1
Quader 10.0 m	10.0	13.3	10.0
Quader 14.7 m (First)	10.0	16.6	14.7

Tabelle A5.5b: Abmessungen der Rezirkulationszonen, Windrichtung 90 Grad, frei stehendes Einzelgebäude, L/B -Verhältnis 1:5

	B_{RZ}	L_{RZ}	H_{RZ}
Satteldach 20°	10.0	11.4	7.9
Quader 6.0 m (Traufe)	10.0	8.8	6.3
Quader 6.9 m	10.0	11.2	7.2
Quader 7.8 m (First)	10.0	11.7	7.8
Satteldach 30°	10.0	11.3	8.9
Quader 6.0 m (Traufe)	10.0	8.8	6.3
Quader 7.8 m	10.0	11.7	7.8
Quader 8.9 m (First)	10.0	13.0	9.0
Satteldach 45°	10.0	12.7	11.0
Quader 6.0 m (Traufe)	10.0	8.8	6.3
Quader 8.9 m	10.0	13.0	9.0
Quader 11.0 m (First)	10.0	13.7	12.0
Satteldach 60°	10.0	12.7	14.8
Quader 6.0 m (Traufe)	10.0	8.8	6.3
Quader 10.0 m	10.0	13.3	10.3
Quader 14.7 m (First)	10.0	14.5	14.8