

**WINDLASTEN AN QUADERFÖRMIGEN GEBÄUDEN
IN BEBAUTEN GEBIETEN**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

vorgelegte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Harald Kiefer
aus Karlsruhe

Tag der mündl. Prüfung: 23.05.2003
Hauptreferent: Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. E. J. Plate
Koreferent: Prof. Dr.-Ing. L. Stempniewski
Prof. em. Dr.-Ing. H. J. Niemann

Karlsruhe 2003

Kurzfassung

Um den Sicherheitsaspekten sowie der Wirtschaftlichkeit im Bauwesen Rechnung zu tragen, kommt der Bestimmung realitätsnaher Windlastannahmen bei der Bemessung von Bauwerken besondere Bedeutung zu. Dies ist vor allem auch vor dem Hintergrund zu sehen, daß sich in jüngerer Zeit aufgrund fortschreitender Entwicklung von Materialien und Verfahren die anzusetzenden Windlasten für zahlreiche Bauwerke immer mehr zu einem entscheidenden Entwurfskriterium entwickelt haben.

Ein wesentlicher Einfluß auf die für ein Bauwerk zu erwartenden Windlasten wird durch den Standort und die unmittelbare Umgebung des Bauwerkes ausgeübt. Dies gilt vor allem für die Vielzahl von Gebäuden, die in bereits bebauten Gebieten errichtet werden und dann einer hochgradig komplexen Anströmung durch Wind ausgesetzt sind. Viele Windlastnormen, einschließlich der derzeit für Deutschland noch rechtsgültigen DIN 1055 Teil 4 in ihrer Fassung von 1986, behandeln Gebäude jedoch lediglich als einzeln stehende Körper und erfüllen daher nur bedingt den Anspruch einer realistischen Prognose der zu erwartenden Windlasten an einem Bauwerk. Neuere Vorschriften wie z. B. der Entwurf zum Eurocode 1 Part 2-4 (ENV 1991-2-4 (1994)) enthalten Regeln für eine differenziertere Betrachtung im Hinblick auf den Standort eines Gebäudes. Diese wurden jedoch bisher noch nicht in deutsches Recht übernommen, bzw. wurden beim Neuentwurf zur DIN 1055 Teil 4 (2001) nicht vollständig berücksichtigt. Eine der Ursachen hierfür, ist die aufgrund der enormen Vielfalt möglicher Bebauungsstrukturen schwierige Bestimmung der anzusetzenden Windlasten für Bauwerke in bebauten Gebieten sowie die unzureichende Datenlage aus gebäudeaerodynamischen Untersuchungen.

Ein wesentliches Ziel der vorliegenden Arbeit liegt daher darin, den Einfluß bebauter Umgebung auf die Windlasten an Gebäuden anhand systematischer Untersuchungen an Windkanalmodellen sowie durch Naturmessungen zu bestimmen. Grundlage hierfür bildet die Klassifizierung und Parametrisierung von existierenden Bebauungsstrukturen, welche eine Beschränkung der Untersuchungen auf drei wesentliche Typen von Bebauungsarten erlaubt. In einem ersten Schritt wurden im Windkanal jedoch zuerst die am einzeln stehenden Gebäude auftretenden Lasten bestimmt und mit Daten aus der Literatur sowie den Bemessungsvorgaben der ENV 1991-2-4 verglichen. Hierbei wurde festgestellt, daß eine gute Übereinstimmung, sowohl für die globalen Kräfte, als auch für die lokalen auf unterschiedlich große Teilflächen bezogenen Windlasten besteht.

In bebauten Gebieten wurden die winderzeugten globalen und lokalen Bauwerkslasten für Testgebäude unterschiedlicher Höhe eingebunden in drei Bebauungsarten im Windkanal bestimmt:

- reihenförmige Struktur mit konstanten Gebäudeabmessungen
- Industriebebauung mit variablen Gebäudeabmessungen und Gebäudegeometrien
- innerstädtische Blockrandbebauung

Anhand der einfach strukturierten Reihenbebauung konnten wesentliche Zusammenhänge zwischen Gebäudebelastung und Gebäudeabstand bzw. Bebauungsdichte aufgezeigt werden. In der modellierten Industriebebauung, welche aufgrund ihres eher randomisierten Anordnungsmusters für eine Vielzahl real existierender Bebauungsmuster repräsentativ ist, wurde jedoch bei veränderter Position der Testgebäude ein hohes Maß an Variabilität der Lasten festgestellt. Diese Variabilität, abhängig von der Bebauungssituation in unmittelbarer Nähe des Testgebäudes, überwiegt bei weitem den Einfluß der Gesamtstruktur. Es lag somit der Schluß nahe, den Einfluß der Umgebungsbebauung auf die Windlasten mit einem statistischen und sicherheitstheoretischen Konzept zu erfassen.

Eine Kenngröße bei der Anwendung der Zuverlässigkeitstheorie zur Bestimmung winderzeugter Bauwerkslasten ist der Modellunsicherheitsfaktor, welcher die Abweichung bisheriger Untersuchungsergebnisse zwischen Modell und Natur beschreibt. Für Gebäude eingebunden in eine komplexe Umgebungsbebauung lagen bisher keine Angaben aus Naturmessungen vor, um die Güte der Windkanaluntersuchungen zu beurteilen. Umfangreiche Meßdaten für ein Meßgebäude in Natur wurden daher über einen Zeitraum von ca. 3 Jahren aufgezeichnet. Der Vergleich der Ergebnisse aus den Naturmessungen mit den Daten der Windkanaluntersuchungen am skalierten Modell des Testgebäude zeigt eine sehr gute Übereinstimmung, wenn statistische Größen und Lasten für Einflußflächen gleicher Größe betrachtet werden. Die Streuung der Naturdaten sowie geringfügige Abweichungen im Bereich der lokalen Lasten wurden in den Modellunsicherheitsfaktor einbezogen.

Im letzten Abschnitt der Arbeit werden die zu erwartenden Windlasten in bebauten Gebieten mit der Methode der zweiten Momente (**Second Moment Reliability**), mit deren Hilfe Lastbeiwerte auf einem festgelegten Sicherheitsniveau spezifiziert werden können, bestimmt. Die Eingangsgrößen der Windlastkette gehen hierbei als Mittelwert und Variationskoeffizient in die Berechnung ein. Die Variabilität der aerodynamischen Lastbeiwerte, welche durch die umgebende Bebauung hervorgerufen wird, wurde hierzu anhand der Datenbasis der Windkanalversuche in umgebender Bebauung ermittelt. Für bebaute Gebiete können anhand der vorliegenden Meßdaten Windlastannahmen auf dem gleichen Sicherheitsniveau wie in der ENV 1991-2-4 spezifiziert werden. Durch den Vergleich der Ergebnisse in Bebauung mit den Daten der Einzelgebäude, welche wie zuvor erwähnt im wesentlichen mit der ENV 1991-2-4 übereinstimmen, kann aufgezeigt werden, daß die Abhängigkeit der anzusetzenden Windlasten von der Bebauung durch das Konzept der ENV 1991-2-4 durchaus erfaßt wird. Die Bestimmung des Bemessungsstaudrucks abhängig von der Geländekategorie, bzw. der Art des bebauten Gebietes, resultiert in den meisten Fällen in Windlasten auf dem angestrebten Sicherheitsniveau. Die wenigen festgestellten Abweichungen bzw. Ausnahmen hiervon werden deutlich gemacht.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	GRUNDLAGEN UND LITERATURÜBERBLICK	5
2.1	Atmosphärische Grenzschicht	5
2.2	Aerodynamische Bauwerksbelastung	11
2.3	Modellierung im Windkanal	15
2.4	Quasi-statische Windlasten und Windlastkonzepte	19
2.4.1	Vorbemerkungen	19
2.4.2	Quasi-stationäre Methode - Böenkonzept:	21
2.4.3	Lokale Windlasten - "Equivalent steady gust model"	23
2.4.4	Spitzenfaktor-Methode	25
2.4.5	Vereinfachte "Cook-Mayne"-Methode	26
2.4.6	Bemessungslasten nach Eurocode	30
2.4.7	Anmerkungen zur ENV 1991-2-4 (1994) und zum Entwurf der neuen DIN 1055 Teil 4:	35
2.5	Ergebnisse bisheriger Untersuchungen	36
2.5.1	Vorbemerkungen	36
2.5.2	Windfeld und Windlasten in bebauten Gebieten	37
2.5.3	Klassifizierung von Bebauungsstrukturen	40
2.6	Stochastische Sicherheitskonzepte	43
2.6.1	Methode der zweiten Momente	43
2.6.2	Anwendung auf winderzeugte Bauwerkslasten	45
3	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN IM WINDKANAL UND IN NATUR	47
3.1	Windkanal und Modellmaßstab	47
3.2	Meßeinrichtungen und Versuchsaufbau	50
3.3	Meßgebäude und Umgebungsmodelle	51
3.4	Naturmessungen und Windkanalversuche am FZU-Gebäudekomplex	55
3.4.1	Lage und Eigenschaften des Testgebäudes	55
3.4.2	Windstatistik	58
3.4.3	Meßeinrichtungen	59
3.4.4	Position und Aufbau der Druckmeßstellen	59
3.5	Datenauswertung und Zeitmaßstab	62
3.5.1	Zeitmaßstab	63
3.5.2	Anpassung der "Cook-Mayne-Methode"	63
4	ERGEBNISSE DER WINDKANALUNTERSUCHUNGEN AN DEN EINZEL- GEBÄUDEN	67
4.1	Zeitlich gemittelte Druckbeiwerte $c_{p,mean}$ und Standardabweichung $c_{p,rms}$	67
4.1.1	Wandflächen	68
4.1.2	Dachflächen	74

4.1.3	Vergleich mit Daten aus der Literatur	76
4.2	Windkräfte bezogen auf das gesamte Bauwerk	79
4.2.1	Kraft- und Momentenbeiwerte bezogen auf ein körperfestes Koordinatensystem	80
4.2.2	Kraftbeiwerte in Strömungsrichtung – Widerstandsbeiwerte	83
4.3	Lokale Windlasten	86
4.3.1	Abschätzung der räumlichen Ausdehnung extremer Winddrücke	86
4.3.2	Lokale Extremwerte für eine Einflußfläche von 1 m ²	89
4.3.3	Lokale Extremwerte für Teilflächen unterschiedlicher Größe	98
4.4	Schlußfolgerungen	101
5	ERGEBNISSE DER WINDKANALVERSUCHE IN UMGEBENDER BEBAUUNG	103
5.1	Zeitlich gemittelte Druckbeiwerte $c_{p,mean}$ und Standardabweichung $c_{p,rms}$	103
5.1.1	Wandflächen - Luv- und Leeseite	104
5.1.2	Wandflächen - parallel zum Wind	111
5.1.3	Dachflächen	115
5.1.4	Kraftbeiwerte c_f der Gebäudeteilflächen	119
5.2	Globale Windlasten	121
5.2.1	Widerstandsbeiwerte	121
5.2.2	Momentenbeiwerte	125
5.3	Lokale Extremwerte	126
5.3.1	Lokale Extremwerte für 1m ²	126
5.3.2	Extremwerte für Teilflächen unterschiedlicher Größe	134
5.4	Einfluß der Umgebungsbebauung auf das Windfeld	138
5.4.1	Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen	138
5.4.2	Vergleich der Ergebnisse aus Druck- und Geschwindigkeitsmessungen	143
5.5	Variabilität der Windlasten in bebauten Gebieten und Schlußfolgerungen	146
6	ERGEBNISSE DER NATURMESSUNGEN UND VERGLEICH MIT WINDKANALDATEN	151
6.1	Windfeld am Meßstandort	152
6.2	Zeitlich gemittelte Druckbeiwerte $c_{p,mean}$ und Standardabweichung $c_{p,rms}$	155
6.3	Vergleich der Druckspektren	162
6.4	Lokale Lasten	165
6.4.1	Lokale Extremwerte für Teilflächen unterschiedlicher Größe	165
6.4.2	Lokale Extremwerte für eine Teilfläche von 1m ²	170
6.5	Schlußfolgerungen	174
7	ANWENDUNG DER ZUVERLÄSSIGKEITSANALYSE ZUR BESTIMMUNG BEMESSUNGSRELEVANTER WINDLASTEN IN BEBAUTEN GEBIETEN	177
7.1	Eingangsgrößen	177
7.1.1	Bemessungsstaudruck q	177
7.1.2	Ausgesetztheitsgrad c_e	179

7.1.3	Modellunsicherheitsfaktor μ	180
7.1.4	Lastbeiwerte c	180
7.1.5	Zusammenstellung der Eingangsgrößen	181
7.2	Abschätzung des Sicherheitsniveaus der Windlastannahmen nach ENV 1991-2-4 (1994)	182
7.3	Globale Windlasten in bebauten Gebieten	184
7.4	Lokale Windlasten in bebauten Gebieten	187
7.5	Schlußfolgerungen im Hinblick auf die ENV 1991-2-4 (1994)	189
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	195
	LITERATURVERZEICHNIS	199
	SYMBOLVERZEICHNIS	205
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	209
	TABELLENVERZEICHNIS	213
	ANHANG	215
1.	Testgebäude	216
2.	Umgebungsmodelle	220

1 Einleitung

Die Bau- und Entwurfspraxis wurde in der jüngeren Vergangenheit nachhaltig durch die fortschreitende Entwicklung von Bemessungsverfahren und Werkstoffen verändert. Plastische Tragreserven des Querschnitts oder des gesamten Tragwerks werden weitgehend ausgenutzt und auch die Eigenschaften der Werkstoffe wurden kontinuierlich verbessert. Reduzierte Eigengewichte eröffneten zunehmend Möglichkeiten Bauwerke größer und Tragelemente schlanker zu gestalten. Bei geringem Eigengewicht gewinnt die Prognose der zu erwartenden maximalen Windlast an einem Bauwerk immer mehr an Bedeutung beim Nachweis der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit. Neben den Sicherheitsaspekten muß bei der Bestimmung der anzusetzenden Entwurfswindlasten auch der Wirtschaftlichkeit Rechnung getragen werden. Eine möglichst realitätsnahe Beschreibung der Windlasten und der durch sie verursachten Beanspruchung eines Bauwerks ist daher wesentliches Ziel jüngerer Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Bauwerksaerodynamik.

DAVENPORT (1982) gliedert den an einem Bauwerk auftretenden Windlastprozess in eine kettenförmige Struktur (). Durch diesen Ansatz kommt zum Ausdruck, daß die Bestimmung von Bemessungswindlasten im Hinblick auf Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit immer nur so präzise ist wie das schwächste Glied innerhalb dieser Kette.



Abb. 1.1 Windlastkette nach Davenport

An erster Stelle der Kette steht das Windklima, welches für die Windbedingungen in unterschiedlichen geographischen Regionen der Erde verantwortlich ist. Die Höhe der Windgeschwindigkeit und deren Variabilität wird entscheidend durch die vorherrschenden Wetterphänomene (Gewitterstürme, Orkane etc.) beeinflusst. Die aufgrund des Windklimas maßgebliche Windgeschwindigkeit wird in Bodennähe durch den Einfluß der Topographie und der Rauigkeit des Geländes am Standort modifiziert. Hierbei ist es auch von wesentlicher Bedeutung, ob ein Gebäude einzeln steht oder in ein Siedlungsgebiet eingebunden ist.

Die aerodynamische Übertragung gibt Aufschluß darüber, wie die am Bauwerk auftreffende Windströmung in Drücke und Kräfte am Bauwerk umgesetzt wird. Die Bestimmung der Lastbeiwerte, welche diesen Vorgang beschreiben, erfolgt in der Regel anhand von Windkanalexperimenten bzw. von Angaben in Bemessungsvorschriften oder in der Literatur, welche auf bereits vorhandenen Datensätzen basieren. In die Bemessungsvorschriften fanden bisher ausschließlich Ergebnisse von Windkanalversuchen an einzeln stehenden Baukörpern Eingang, obwohl sich die überwiegende Mehrheit existierender oder neu zu errichtender

Bauwerke in mehr oder weniger dicht bebautem Gebiet befindet. Zum einen liegt der Grund hierfür in der Annahme, daß dieser Fall auf der sicheren Seite liegend die zu erwartenden Lasten konservativ abschätzt, zum anderen fehlt die entsprechende Datengrundlage, um einen differenzierteren Ansatz in den Normen zu verankern (COOK (1990)). Der Eurocode (ENV 1991-2-4 (1994)), welcher die DIN in absehbarer Zeit ersetzen sollte, berücksichtigt die Wirkung der umgebenden Bebauung auf die Parameter der anströmenden Grenzschicht, die Lastbeiwerte ermittelt für Einzelgebäude werden jedoch auch für Gebäude in bebauten Gebieten verwendet.

Bisherige Untersuchungen (HUSSAIN und LEE (1980), WALKER und ROY (1985), HO (1992)) ergeben kein einheitliches Bild zu erwartender Windlasten in bebauten Gebieten. Die Ursache hierfür liegt mit Sicherheit auch darin begründet, daß in der Realität eine Vielzahl möglicher Abmessungen, Anordnungen, Abstände und Formen von Gebäuden in urbanen Gebieten bestehen.

HUSSAIN und LEE (1980) führten umfangreiche Messungen an kubischen Baukörpern eingebettet in einfache reihenförmige Bebauungsstrukturen unterschiedlicher Dichte durch. Der festgestellte Zusammenhang zwischen Gebäudeabstand und Bauwerksbelastung läßt sich jedoch nur auf die untersuchten Reihenstrukturen übertragen und beinhaltet lediglich die Wirkung auf das zeitliche Mittel der globalen Kräfte. HO (1992) führte Windkanaluntersuchungen in einem modellierten Industriegebiet durch, wobei die Standorte und die Abmessungen der Meßgebäude variiert wurden, um eine möglichst realitätsnahe Datenbasis zur Bestimmung der Variabilität der auftretenden Lasten zu erhalten. Diese Studie beschränkt sich jedoch auf den Fall eines niedrigen Gebäudes, welches nicht die Höhe der umgebenden Bebauung überragt.

Um die Vielzahl möglicher Bebauungsstrukturen und Gebäudeanordnungen auf wenige repräsentative Bebauungstypen einzugrenzen, wurde von BADDE (1994) eine detaillierte Studie zur Parametrisierung von bebauten Gebieten in deutschen Städten durchgeführt. Einbezogen wurden hierbei auch die Ergebnisse von THEURER (1993) im Hinblick auf Bebauungsstrukturen und deren geometrische Merkmale. BADDE (1994) identifizierte anhand seiner Untersuchungen drei wesentliche Typen städtischer Bebauungsstrukturen und führte erste Windkanalmessungen an reihenförmigen Bebauungsstrukturen und einem modellierten Industriegebiet durch.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, auf der Basis der von BADDE (1994) vorgenommenen Klassifizierung von Bebauungsstrukturen die globalen und lokalen Windkräfte in bebauten Gebieten an niedrigen und aus der Bebauung herausragenden Gebäuden zu bestimmen und die Ergebnisse kompatibel für einen Vergleich mit den Daten des Eurocode (ENV 1991-2-4 (1994)) zu verallgemeinern.

Hierzu wurde die bestehende Datengrundlage (BADDE (1994)) durch weitere Windkanalversuche an Einzelgebäuden (Referenzfall) und Gebäuden in umgebender Bebauung gezielt ergänzt. Ein repräsentatives Bild zu erwartender Windlasten für die Bemessung des Tragwerks oder die Bemessung einzelner Bauelemente unterschiedlicher

Größe an geometrisch einfachen Baukörpern unterschiedlicher Höhe wurde dadurch ermittelt. Außer den Untersuchungen an unterschiedlichen Windkanalmodellen wurden für die vorliegende Arbeit auch Messungen der windinduzierten Lasten an zwei Meßgebäuden in bebauter Umgebung in der Natur über einen Zeitraum von ca. 3 Jahren durchgeführt. Diese konnten die Ergebnisse der systematischen Windkanalversuche im wesentlichen bestätigen und wurden dazu herangezogen verbleibende Unsicherheiten bei der Übertragung von Modellergebnissen auf die Natur in ein stochastisches Sicherheitskonzept zu integrieren.

Im Einzelnen ergibt sich folgende Gliederung der vorliegenden Arbeit und der einzelnen Arbeitsschritte:

Kapitel 2:

Die für das Verständnis der vorliegenden Arbeit erforderlichen Grundlagen im Hinblick auf die Modellierung im Windkanal, die Prognose von Windlasten durch geeignete Windlastkonzepte, Ergebnisse früherer Studien sowie die Anwendung stochastischer Sicherheitskonzepte auf winderzeugte Bauwerkslasten werden in diesem Kapitel dargelegt und erläutert.

Kapitel 3:

Die Messung der windinduzierten Drücke an Gebäuden in Modell und Natur erfordert einen komplexen Versuchsaufbau und aufwendige Meßtechnik, um die räumlich und zeitlich hochgradig variable Druckverteilung durch simultane Erfassung an einer Vielzahl von Meßstellen möglichst präzise zu beschreiben. Die angewandten Techniken werden entsprechend erläutert. Um die lokalen extremen Lastbeiwerte in einem Datenformat kompatibel zur ENV 1991-2-4 (1994) anzugeben, war es erforderlich, das Verfahren von COOK und MAYNE (1980) für die Verwendung mit den Bemessungswindgeschwindigkeiten der ENV 1991-2-4 (1994) zu überprüfen und entsprechend zu modifizieren.

Kapitel 4:

Der Fall des frei stehenden einzelnen Gebäudes, welcher auch den Bemessungsvorschriften zugrunde liegt, dient als Referenzfall, um den Einfluß umgebender Bebauung auf die globalen und lokalen Windlasten zu quantifizieren. Den Ergebnissen der Einzelgebäude der vorliegenden Studie kommt daher besondere Bedeutung zu. Diese werden in diesem Kapitel zur Verifizierung mit Daten aus der Literatur verglichen. Den Ergebnissen am Einzelgebäude werden Daten aus der Literatur und die Bemessungswerte nach der ENV 1991-2-4 (1994) gegenübergestellt. Dies kann dann im weiteren Verlauf der Studie Aufschluß darüber geben, ob festgestellte Abweichungen von den Lasten der Einzelgebäude infolge umgebender Bebauung direkt auf die Bemessungsvorschrift übertragbar sind.

Kapitel 5:

In diesem Kapitel werden die Lastbeiwerte, welche in den bebauten Gebieten ermittelt wurden, den Werten des Einzelgebäudes gegenübergestellt, um den Einfluß der unterschiedlichen Bebauungsstrukturen auf die Windlasten aufzuzeigen. Auch Ergebnisse von

Geschwindigkeitsmessungen in den untersuchten Baugebieten werden hierbei vorgestellt und diskutiert. Die umfangreiche Datenbasis der systematischen Windkanaluntersuchungen wird dazu herangezogen, die zu erwartenden Lastbeiwerte in bebauten Gebieten statistisch zu beschreiben. Diese Kenngrößen finden dann Eingang in das stochastische Konzept von Kapitel 7.

Kapitel 6:

Dieses Kapitel befaßt sich mit den Ergebnissen der durchgeführten Naturmessungen. Der Vergleich der in der Natur ermittelten Lastbeiwerte mit den Daten aus Windkanalversuchen am skalierten Modell des gleichen Meßgebäudes gibt Aufschluß über die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Modellmessungen auf die Natur.

Kapitel 7:

Mit Hilfe der Zuverlässigkeitstheorie (Verfahren der zweiten Momente) werden Lastbeiwerte auf einem bestimmten Sicherheitsniveau für Einzelgebäude und bebaute Gebiete anhand der Datenbasis der systematischen Windkanalstudie bestimmt, wobei die festgestellte Variabilität der Lasten in bebauten Gebieten berücksichtigt wird und die Ergebnisse aus Kapitel 6 in Form eines Modellunsicherheitsfaktors Eingang finden. Die ermittelten Lastbeiwerte basierend auf der Methode der zweiten Momente werden dann mit den Vorgaben der ENV 1991-2-4 (1994) verglichen und Vorschläge zur Berücksichtigung der Ergebnisse unterbreitet.

Kapitel 8:

Kapitel 8 faßt die wesentlichen Ergebnisse der Studie abschließend zusammen und gibt Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen.

2 Grundlagen und Literaturüberblick

Mit zunehmenden Anforderungen an die Prognose winderzeugter Bauwerkslasten hinsichtlich der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit wurden die Methoden zur Bestimmung der Windwirkung auf Bauwerke im Lauf der Jahre entsprechend verfeinert. Es existieren mehrere Lehrbücher, welche eine übersichtliche und umfassende Einführung in die Thematik geben, z. B. COOK (1985, 1990), SIMIU und SCANLAN (1985), RUSCHEWEYH (1982), SOCKEL (1984) und DYRBYE und HANSEN (1997). Eine einfache und präzise Methode aerodynamische Bauwerksbelastungen zu ermitteln, ist die physikalische Modellierung der Strömungsprozesse und der hervorgerufenen Kräfte unter Einhaltung der Ähnlichkeitsgesetze im Windkanal. Erst in jüngerer Zeit gewinnen numerische Methoden der Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics - CFD) an Bedeutung. Die komplexen dreidimensionalen Strömungsvorgänge, welche die für die Bemessung entscheidenden fluktuierenden Kräfte und dynamischen Wirkungen hervorrufen, können durch diese Methoden jedoch nur bei erheblichem Rechenaufwand mit einigermaßen ähnlicher Güte wie im Windkanal bestimmt werden. Eine Übersicht über existierende Methoden und deren Anwendungsmöglichkeiten wird z. B. von RODI (1997) gegeben. Zur Ermittlung winderzeugter Bauwerkslasten in komplex bebauten Gebieten kommt in erster Linie nur die physikalische Modellierung im Windkanal in Frage, da in das Rechenfeld eines numerischen Modells neben dem dreidimensionalen Bauwerk auch die gesamte Umgebung integriert werden müßte.

Das vorliegende Kapitel erläutert die strömungsmechanischen Grundlagen der Modellierung von Windwirkungen im Windkanal und die existierenden Konzepte zur Erfassung der winderzeugten Bauwerksbelastung an einfachen prismatischen Baukörpern. Die Vorgehensweise nach der ENV 1991-2-4 (1994) sowie die Ergebnisse bisheriger Untersuchungen im Hinblick auf Windlasten in bebauten Gebieten werden vorgestellt.

2.1 Atmosphärische Grenzschicht

Durch unterschiedliche Erwärmung der Erdoberfläche infolge der Sonneneinstrahlung entstehen barometrische Druckunterschiede in der Atmosphäre. Der natürliche Wind resultiert aus dem hierdurch verursachten Strömungsvorgang von Gebieten höheren Druckes in Gebiete niedrigeren Druckes. Aufgrund der Reibung der Luftströmung an der rauhen Erdoberfläche bildet sich die atmosphärische Grenzschicht aus. Der von der Schubspannung τ unbeeinflusste Bereich über der Grenzschicht wird als Gradientenwind bezeichnet. Der Druckgradient und die Corioliskraft bewirken hier eine Strömungsrichtung parallel zu den Isobaren. Die Schubspannung in der Grenzschicht, welche in Grenzschichthöhe gleich null ist und zum Boden hin zunimmt, bewirkt eine allmähliche Verdrehung der Windrichtung (sog. Ekman-Spirale) und eine Abnahme der mittleren Windgeschwindigkeit mit geringer werdendem Abstand zum Boden. Im bodennahen Bereich der Grenzschicht ist die Verdrehung der Windrichtung aufgrund des dominierenden Reibungseinflusses jedoch kaum noch spürbar. Der untere Bereich der atmosphärischen Grenzschicht zeigt somit in hohem Maße

Übereinstimmungen mit dem Verhalten einer Grenzschicht, welche bei der Überströmung einer rauhen Platte erzeugt wird. Diese Analogie ermöglicht die Simulation der bodennahen Windströmung im Windkanal und somit die Untersuchung strömungsmechanischer Fragestellungen am verkleinerten physikalischen Modell der atmosphärischen Grenzschicht.

Der Aufbau der atmosphärischen Grenzschicht ist in mehrere Schichten gegliedert. Abb. 2.1 zeigt schematisch die Grenzschicht über einem bebauten Gebiet.

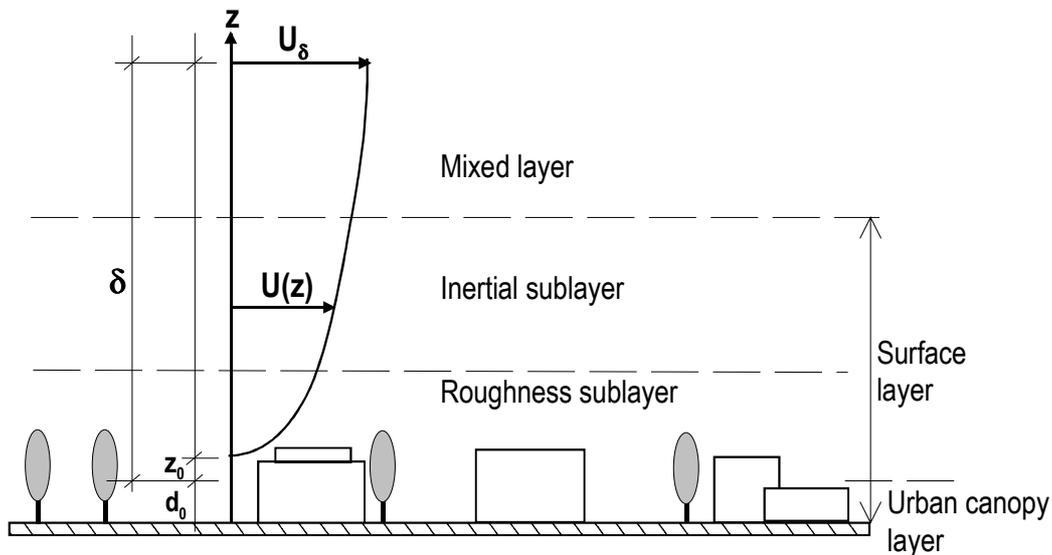


Abb. 2.1 Aufbau der atmosphärischen Grenzschicht über bebautem Gebiet

Der unterste Teil der Grenzschicht über bebautem Gebiet wird als “Urban canopy layer“ bezeichnet. Sie erstreckt sich von der Bodenoberfläche bei $z = 0$ bis ca. $z = d_0$, dem sog. Nullhöhenversatz des logarithmischen Geschwindigkeitsgesetzes (siehe Gl. 2.6). Sie wird in erster Linie durch die Umströmungsverhältnisse an den Hindernissen der Bebauungsstruktur geprägt und ist als unabhängig von der Grenzschichtströmung zu betrachten. Die “Roughness sublayer“ umfaßt einen Bereich bis zu einer Höhe z , der noch wesentlich durch den Einfluß einzelner Rauheitskörper bestimmt wird und sich daher lokal sehr unterschiedlich ausbilden kann. Die “Inertial sublayer“ ist geprägt durch einen konstanten Impulsfluß und somit auch annähernd konstanten Schubspannungen. Für diese Schicht kann der Verlauf der Geschwindigkeit anhand des logarithmischen Gesetzes (siehe Gl. 2.6) beschrieben werden.

Die Geschwindigkeit der Grenzschichtströmung setzt sich an einer beliebigen Stelle aus den Komponenten u , v , w in Richtung der 3 Koordinatenachsen x , y , z zusammen. Hierbei können die Geschwindigkeitsanteile in einen zeitlichen Mittelwert \bar{u} und eine diesem Mittelwert überlagerte turbulente Schwankungsgröße u' unterteilt werden. Definiert man die x -Achse als Hauptströmungsrichtung nehmen die zeitlichen Mittelwerte der lateralen Geschwindigkeit v und vertikalen Komponente w den Wert Null an, jedoch bleibt der Schwankungsanteil dieser Komponenten erhalten.

Der Geschwindigkeitsvektor $V(t)$ der turbulenten Windströmung setzt sich somit folgendermaßen zusammen:

Gl. 2.1

$$V(t) = \begin{pmatrix} \bar{u} + u' \\ + v' \\ + w' \end{pmatrix}$$

mit \bar{u} = zeitlicher Mittelwert der Geschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung x
 u', v', w' = Schwankungsanteile in Richtung der x -, y - und z -Achse

Der Profilverlauf der mittleren Geschwindigkeit $\bar{u}(z)$ ist von grundlegender Bedeutung zur Beschreibung der Windströmung. Da diese in hohem Maße turbulent ist, wird der Profilverlauf ausschließlich durch die Reynold'schen scheinbaren Schubspannungen bestimmt. Um diese zum Geschwindigkeitsverlauf über die Höhe in Beziehung zu setzen, kann der Prandtl'sche Mischungsweg Ansatz verwendet werden (siehe z. B. ZIEREP (1990)):

Gl. 2.2

$$\bar{\tau} = -\rho \overline{u'w'} = \rho l^2 \left(\frac{d\bar{u}}{dz} \right)^2$$

mit: $\bar{\tau}$ = zeitlicher Mittelwert der Schubspannung
 ρ = Dichte der Luft
 $\overline{u'w'}$ = Kovarianz der Geschwindigkeitskomponenten u und w
 l = Prandtl'scher Mischungsweg

Der Mischungsweg l ist ein typisches Längenmaß für die Vermischung in turbulenten Strömungen. Er kann als jene Wegstrecke interpretiert werden, die ein Turbulenzelement im Mittel zurücklegt, bevor es vollständig mit der Umgebung vermischt ist und seine individuelle Charakteristik eingebüßt hat. Da die Größe der Turbulenzelemente mit zunehmendem Abstand z vom Boden ebenfalls zunimmt, kann auch der Mischungsweg l proportional zur Höhe z angenommen werden. Die Proportionalitätskonstante κ wird als Karman-Konstante bezeichnet und ihr Wert wurde aus Experimenten mit 0.4 bestimmt.

Gl. 2.3

$$l = \kappa z$$

mit: κ = const. = Karman-Konstante = 0.4

Die Annahme $\tau = \text{const.}$, dies gilt näherungsweise für den oberflächennahen Bereich der Grenzschicht bis ca. zu einer Höhe von 15% der Grenzschicht ("Inertial sublayer" siehe Abb. 2.1) und die Definition der Schubspannungsgeschwindigkeit

Gl. 2.4

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$$

führen bei Einsetzen in Gl. 2.2 und der Verwendung von Gl. 2.3 zu:

Gl. 2.5

$$\frac{d\bar{u}}{dz} = \frac{u_*}{\kappa \cdot z}$$

Die Integration von Gl. 2.5 über die Höhe z und die Berücksichtigung der Rauheit als Randbedingung in Form der Rauigkeitshöhe z_0 als Integrationskonstante sowie die Einführung von d_0 als Nullhöhenversatz des Geschwindigkeitsprofils (siehe Abb. 2.1) ergeben das logarithmische Geschwindigkeitsgesetz:

Gl. 2.6

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z - d_0}{z_0}\right)$$

mit u_* = Schubspannungsgeschwindigkeit = $\sqrt{\tau / \rho}$
 z_0 = Rauigkeitshöhe
 d_0 = Nullhöhenversatz
 κ = Karman-Konstante = 0.4

Der Gültigkeitsbereich des logarithmischen Geschwindigkeitsgesetzes umfaßt ca. die unteren 15% der atmosphärischen Grenzschicht. Dieser Bereich wird als "Atmospheric Surface Layer - ASL" bezeichnet (siehe Abb. 2.1). Die Rauigkeitshöhe z_0 charakterisiert den Reibungseinfluß der Geländeoberfläche.

Neben dem analytisch herleitbaren logarithmischen Geschwindigkeitsgesetz findet der empirische Potenzansatz in folgender Form häufige Anwendung:

Gl. 2.7

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^\alpha$$

mit α = Profilexponent
 \bar{u}_{ref} = Geschwindigkeit in der Referenzhöhe z_{ref}

Er ist geeignet, den Verlauf der Geschwindigkeit über die gesamte Höhe der Grenzschicht zu beschreiben. Der Profilexponent α ist abhängig von der Rauheit der Oberfläche und ist proportional zu z_0 (COUNIHAN (1975)).

Neben der Kenntnis des mittleren Geschwindigkeitsprofils ist auch die Charakterisierung der Turbulenzeigenschaften der Windströmung von besonderem Interesse, da die Böigkeit des Windes bei der Bestimmung zu erwartender Windlasten auf Bauwerke maßgebend ist.

Eine einfache Größe zur Beschreibung der longitudinalen Geschwindigkeitsfluktuationen $u'(z)$ ist der Turbulenzgrad oder die Turbulenzintensität $I_u(z)$. Dieser Parameter ist als das Verhältnis der Standardabweichung σ_u der Geschwindigkeitsschwankungen $u'(t)$ zur mittleren Geschwindigkeit \bar{u} definiert:

Gl. 2.8

$$I_u = \frac{\sigma_u}{\bar{u}}$$

Entsprechend hierzu sind auch die Turbulenzintensitäten in vertikaler und lateraler Richtung definiert.

Die Annahme konstanter Schubspannung im Bereich der ASL bedeutet, daß hier auch die Standardabweichungen der Geschwindigkeitsfluktuationen konstant und proportional zur Schubspannungsgeschwindigkeit u_* sein müssen. Häufige Verwendung finden die von PANOFSKY (1984) angegebenen Werte, die aus Naturmessungen ermittelt wurden:

Gl. 2.9

$$\frac{\sigma_u}{u_*} = 2.5, \quad \frac{\sigma_v}{u_*} = 2.0, \quad \frac{\sigma_w}{u_*} = 1.25$$

Durch Einsetzen von Gl. 2.6 in Gl. 2.8 und der Verwendung der o. g. Beziehung $\sigma_u = 2.5 u_*$ ergibt sich folgende Funktion für den Verlauf der Turbulenzintensität I_u über die Höhe z :

Gl. 2.10

$$I_u = \frac{1}{\ln\left(\frac{z - d_0}{z_0}\right)}$$

Hierzu ist anzumerken, daß einerseits dieser Profilverlauf nur in der oberflächennahen Schicht, dem Gültigkeitsbereich des logarithmischen Gesetzes, anwendbar ist, andererseits ist fraglich, ob $\sigma_u = 2.5 u_*$ in Gebieten mit starker Rauigkeit Gültigkeit besitzt. COUNIHAN (1975) schlug vor im Bereich hoher z_0 -Werte einen geringeren Wert für σ_u/u_* zu verwenden (siehe auch Abschnitt 2.5.2)

Ein Längenmaß für eine charakteristische Größe der Turbulenzwirbel wird über die Autokorrelationsfunktion $R_{uu}(z)$ der Geschwindigkeitszeitreihe ermittelt. Das sogenannte Integralmaß L_{ux} beschreibt die Entfernung über die die Geschwindigkeiten, gemessen im gleichen Turbulenzelement, signifikant miteinander korreliert sind. Mit Hilfe der Taylor'schen Hypothese läßt sich die räumliche Korrelation der Geschwindigkeitsfluktuationen auch mit der zeitlichen Verschiebung Δt berechnen:

Gl. 2.11

$$L_{ux} = \int_0^{\infty} R_{uu}(\Delta x) d\Delta x = \bar{u} \cdot \int_0^{\infty} R_{uu}(\Delta t) d\Delta t$$

mit: L_{ux} = Integralmaß der Autokorrelation
 R_{uu} = Autokorrelationskoeffizient
 Δx = Abstand in Hauptströmungsrichtung
 Δt = Zeitabstand bzw. Lag

Eine weitere wichtige Größe zur Beschreibung der Turbulenz ist die spektrale Dichtefunktion $S_u(f, z)$ der Geschwindigkeitsschwankungen u' , welche sich über die Fouriertransformation oder aus der Autokorrelationsfunktion $R_{uu}(\tau)$ berechnen läßt (siehe z. B. BENDAT und PIERSOL (1980)). Die spektrale Dichte gibt an, wie sich die kinetische, turbulente Energie über die unterschiedlichen Frequenzen verteilt. Bei entsprechender Normierung der Fouriertransformierten mit der Dauer und der Samplingfrequenz der Zeitreihenmessung und Übertragung auf den Frequenzbereich von 0 bis $+\infty$ ergibt das Integral unter der Spektralkurve die Varianz der Geschwindigkeitsschwankungen σ_u^2 :

$$\sigma_u^2 = \int_0^{\infty} S_u(f, z) df$$

mit: $S_u(f, z)$ = einseitige, spektrale Dichte in der Höhe z über dem Boden

Eine typische Verteilung der spektralen Dichte über die Wellenzahl f/\bar{u} mit ihren charakteristischen Bereichen ist in Abb. 2.3 dargestellt.

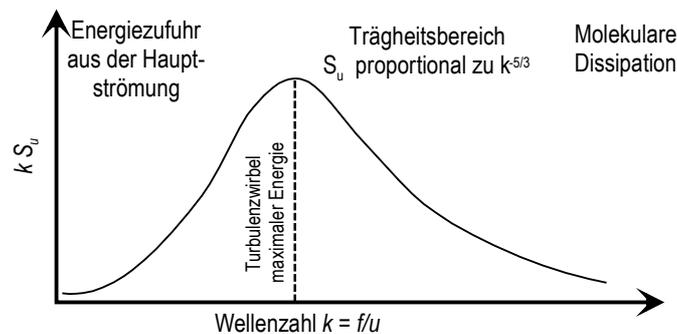


Abb. 2.2 Typisches Turbulenzspektrum

Die spektrale Analyse der longitudinalen Geschwindigkeitsfluktuationen basierend auf Langzeitmessungen in der Natur ermöglicht es, den Ursachen der Schwankungen bestimmte Frequenzbereiche zuzuordnen. In Abb. 2.3. wird ersichtlich, daß eine deutliche Lücke im Energiespektrum besteht, anhand derer der mikrometeorologische und der makrometeorologische Bereich unterschieden werden kann. Während im makrometeorologischen Bereich der Einfluß der großräumigen Wetterlagen oder des Tagesganges maßgeblich ist, wird der Verlauf im mikrometeorologischen Bereich durch die von der Oberflächenrauheit erzeugten Turbulenz bestimmt. Dieser Teil des Spektrums entspricht dem in Abb. 2.2 dargestellten Turbulenzspektrum.

Anhand von Abb. 2.3 kann einerseits die erforderliche Meßdauer für eine möglichst repräsentative Erfassung der mittleren Geschwindigkeit bei Sturmereignissen abgeschätzt werden (Minimum: 10 min), andererseits kann durch die deutliche Abgrenzung der beiden Bereiche eine getrennte Betrachtung des Windklimas und der Grenzschicht erfolgen.

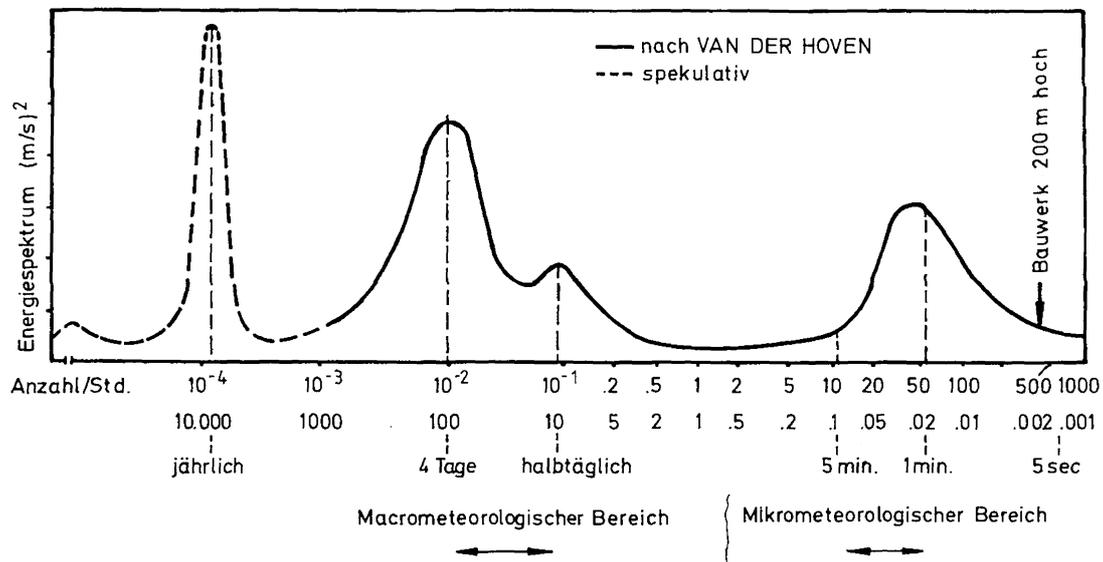


Abb. 2.3 Longitudinales Geschwindigkeitsspektrum nach van der Hoeven (aus RUSCHEWEYH (1982))

2.2 Aerodynamische Bauwerksbelastung

An einem Oberflächenelement dA eines Bauwerkes wird durch die Windströmung eine Druckkraft $p dA$ normal zur Fläche sowie eine Reibungskraft $\tau_0 dA$, resultierend aus der Schubspannung, tangential zur Fläche hervorgerufen. Die Richtung der Schubspannung τ_0 verläuft hierbei in Strömungsrichtung. Dieser Reibungswiderstand ist jedoch bei Bauwerken mit geringen Ausdehnungen in horizontaler Richtung oft vernachlässigbar. Die Berechnung der resultierenden Windkraft kann somit aus der Integration der Druckverteilung erfolgen.

Der windinduzierte Druck an Gebäudeoberflächen ist verglichen mit dem absoluten Druck der Atmosphäre relativ gering. Die Quantifizierung der Windlast W erfolgt daher in der Form, daß der Unterschied zwischen dem Gesamtdruck an der Gebäudeoberfläche p und dem statischen Druck $p_{stat.}$ der Atmosphäre bestimmt wird:

Gl. 2.12

$$W = \Delta p = p - p_{stat.}$$

Die Größe Δp verhält sich im zeitlichen Mittel proportional zum Quadrat der Windgeschwindigkeit. Sie wird daher mit dem dynamischen Druck, resultierend aus der Anströmgeschwindigkeit V_{ref} in einer bestimmten Höhe z_{ref} , ins Verhältnis gesetzt.

Hieraus ergibt sich die Definition des dimensionslosen Druckbeiwertes c_p :

Gl. 2.13

$$c_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho V_{ref}^2}$$

mit V_{ref} = Referenzgeschwindigkeit
 ρ = Dichte der Luft

Unter Beachtung der Ähnlichkeitsgesetze bei der Bestimmung von c_p (siehe Abschnitt 2.3) können im Windkanal am kleinmaßstäblichen Bauwerksmodell ermittelte Werte von c_p direkt auf die Natur übertragen werden.

Die Druckverteilung um ein Bauwerk, welches einer Windströmung ausgesetzt ist, wird durch die Umströmung des Baukörpers bestimmt. Abb. 2.4 zeigt die Komplexität der dreidimensionalen Strömungsverhältnisse, wie sie sich in der Nähe eines quaderförmigen Bauwerkes ergeben. An frontal angeströmten Flächen wird die Strömung verlangsamt und ein Anstieg des Druckes wird durch die Umwandlung kinetischer Energie hervorgerufen. Dies hat positive Druckbeiwerte an frontal angeströmten Wandflächen zur Folge. Aus der Definition des Druckbeiwertes ergibt sich, daß dieser theoretisch bei komplettem Stillstand der Strömung maximal die Größenordnung von +1.0 im zeitlichen Mittel erreichen kann.

An den Dach- und Seitenflächen löst sich die Strömung an den Gebäudekanten ab und es entsteht in diesen Bereichen ein Unterdruck (Sog). Ob sich die Strömung am Dach oder der Seitenwand wieder anlegt, hängt von der Geometrie des Bauwerkes und dem Turbulenzgehalt der Strömung ab. An der Rückseite entsteht ein Nachlaufwirbel, welcher einen relativ konstanten Unterdruck auf der Gebäuderückseite bewirkt. Im Sogbereich gibt es im Gegensatz zum Druckbereich keine theoretische Grenze für die Größe des zeitlich gemittelten Druckbeiwertes $c_{p,mean}$.

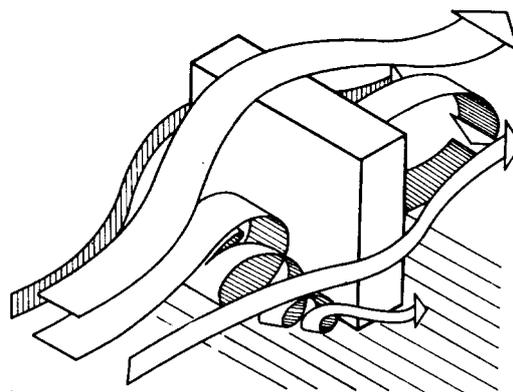


Abb. 2.4 Umströmung eines Baukörpers (aus ZURANSKI (1978))

Abb. 2.5 zeigt die unterschiedlichen Verteilungen der zeitlich gemittelten Druckbeiwerte $c_{p,mean}$ an der Frontseite und der Dachfläche eines kubischen Körpers bei gleichförmiger,

turbulenzarmer Anströmung und bei der Anströmung in einer Grenzschicht mit entsprechenden Profilen der mittleren Geschwindigkeit und der Turbulenzintensität.

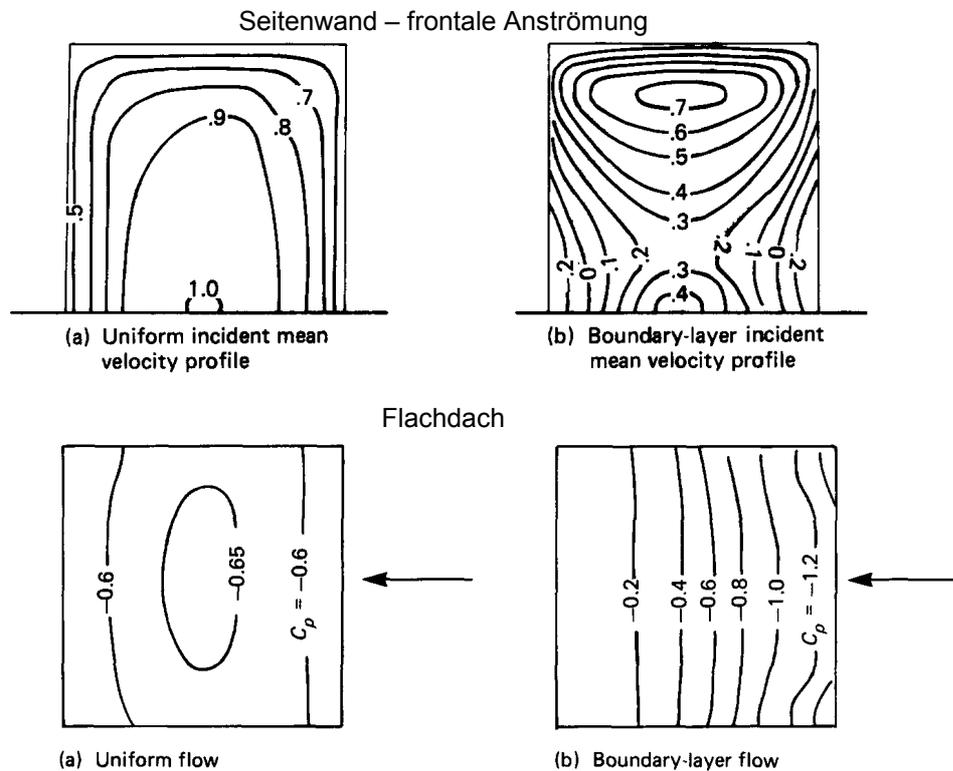


Abb. 2.5 Verteilung der $c_{p,mean}$ -Werte an der Frontseite und dem Dach eines kubischen Körpers (aus COOK(1985)), (a) gleichförmige Strömung, (b) Grenzschichtströmung

An der Frontseite liegt der wesentliche Unterschied bei der Grenzschichtströmung in der Abnahme der Druckbeiwerte zum Boden hin. Ursache hierfür ist das Geschwindigkeitsprofil, welches zum Boden hin abnimmt. Im oberen Bereich des Gebäudes trifft die Strömung mit einer höheren Geschwindigkeit auf die Gebäudewand als im unteren Bereich, somit entsteht bei der Umwandlung der kinetischen Energie ein Druckgefälle nach unten. Entsprechend der Darstellung in Abb. 2.4 bildet sich bei ca. 0.7 – 0.8facher Höhe des Gebäudes der sog. Staupunkt aus. Ein Teil der anströmenden Luft wird von hier aus über das Dach abgeführt, ein anderer Teil folgt dem Druckgefälle, strömt nach unten und formt einen Wirbel an der Vorderseite bevor er über die Seitenwand abfließt.

An der Dachfläche entsteht in der turbulenten Grenzschichtströmung aufgrund der Ablösung der Strömung an der Vorderkante und der Wiederanlegung stromabwärts ein starkes Druckgefälle, während in turbulenzarmer Strömung eine gleichförmige Druckverteilung eintritt. Der maximale Sogbeiwert an der Vorderkante und die Länge der Ablösezone hängen in hohem Maße vom Turbulenzgehalt der Strömung ab. Eine höhere Turbulenzintensität bewirkt durch den Energieeintrag eine stärkere Krümmung der Scherschicht und Verkürzung der Ablösezone, verbunden ist dies jedoch auch mit einem Anstieg des Soges an der Ablösekannte. Ein ähnlicher Vorgang, jedoch beeinflusst durch die verstärkte Abführung von Fluid infolge der erläuterten Vorgänge an der Frontseite, findet auch an den parallel zum Wind stehenden Seitenwänden statt.

Die höchsten lokalen Unterdrücke am Dach entstehen bei schräger Anströmung durch die sog. "Deltaflügel-Wirbel" (Abb. 2.6). Bei einer Anströmungsrichtung entsprechend der diagonalen Achse eines quadratischen Flachdaches treten sie genau symmetrisch auf.

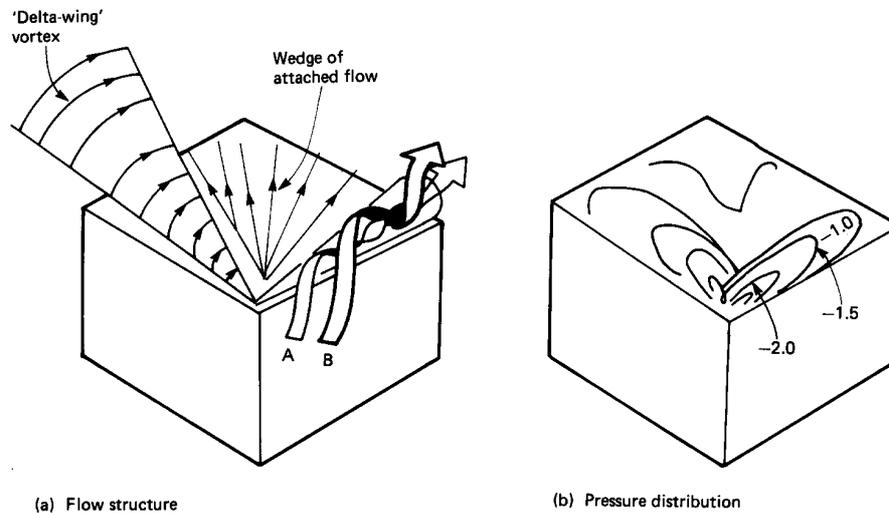


Abb. 2.6 Strömung und $c_{p,mean}$ -Werte am Dach bei Schräganströmung (COOK(1985)).

Die Druckverteilung um ein Bauwerk ist in hohem Maße instationär, auch wenn die Anströmbedingungen nahezu konstant sind. Druckschwankungen an der Gebäudeoberfläche werden nicht nur durch die turbulenten Schwankungen der Windgeschwindigkeit (Böen) hervorgerufen, sondern sie entstehen auch durch Wirbelablösung in den Bereichen abgelöster Strömung, der sog. gebäudeinduzierten Turbulenz. Um dies zu verdeutlichen, ist in Abb. 2.7 ein typischer Meßschrieb der Windgeschwindigkeit und des Drucks in Form des Druckbeiwertes c_p für einen Meßpunkt an der Dachecke enthalten. Die dargestellten Messungen wurden im Rahmen der Naturmessungen der vorliegenden Studie durchgeführt. Die Windrichtung im dargestellten Fall ist schräg zur Gebäudelängsachse. Die Windgeschwindigkeit wurde in ca. 12 m über der Dachfläche aufgezeichnet. Der Druckbeiwert c_p ist auf die mittlere Geschwindigkeit über die Gesamtdauer der dargestellten Geschwindigkeitszeitreihe bezogen. Es wird deutlich, daß beispielsweise für ein Mittelungsintervall von 10 Minuten (600 s) ein deutlicher Zusammenhang zwischen Druckbeiwert und Geschwindigkeit besteht. Die lokalen Felder des Druckes und der Geschwindigkeit sind jedoch nur bedingt aneinander gekoppelt, die kurzzeitigen Spitzen treten relativ unabhängig von einander auf. Weiterhin fällt auf, daß am Dach infolge der Druckschwankungen auch positive, d. h. nach unten gerichtete Drücke auftreten können. Dies ist besonders dann von Interesse, wenn diese Lasten bei der Bemessung noch mit den Lasten aus Schnee, Eigengewicht oder Verkehr zu überlagern sind.

Die Voraussetzungen für eine naturgetreue Simulation dieser Vorgänge im Windkanal und die Konzepte zur Umsetzung der ermittelten Ergebnisse in Bemessungswindlasten werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

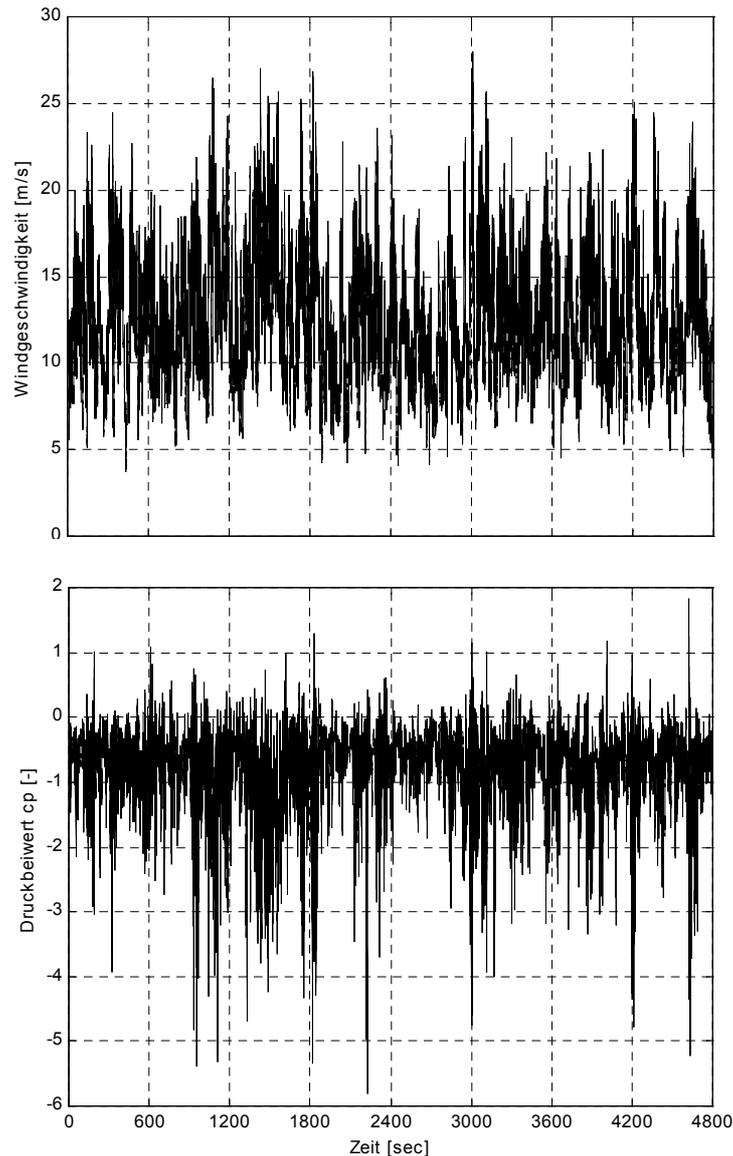


Abb. 2.7 Typischer Meßschrieb der Windgeschwindigkeit und des Drucks am Meßgebäude (Eckbereich Flachdach) in Natur.

2.3 Modellierung im Windkanal

Ein geeignetes Verfahren, um die an einem Bauwerk auftretenden Windlasten zu bestimmen, sind Untersuchungen am maßstäblich verkleinerten Modell des Bauwerks im Windkanal. Um eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse der Modellversuche auf die Natur zu gewährleisten, müssen die im Hinblick auf das Bauwerk und die Fragestellung relevanten Ähnlichkeitsgesetze beachtet werden. Ausführlich wurden die physikalischen Grundlagen der Modellierung im Windkanal und der einzuhaltenden Ähnlichkeitskriterien z. B. von PLATE (1982) und CERMAK (1982) betrachtet. Allgemeine Richtlinien wurden im Rahmen der WTG (1993) erarbeitet. Nachfolgend werden die einzuhaltenden Modellgesetze im Hinblick auf Windkräfte an nicht schwingungsanfälligen Gebäuden erläutert.

Ähnlichkeit der Geometrie

Die geometrische Ähnlichkeit zwischen Natur und Modell beschränkt sich nicht auf die maßstäbliche Verkleinerung des zu untersuchenden Bauwerks, vielmehr muß, vor allem um auch eine Ähnlichkeit der fluktuierenden Lastgrößen zu erreichen, die Turbulenzstruktur und ihre charakteristischen Wirbelgrößen im gleichen Maßstab quasi als Modell der natürlichen Windströmung im Windkanal wiedergegeben werden (siehe Abb. 2.8).

Die Einhaltung dieser Forderung kann durch die maßstäbliche Verkleinerung der Kenngrößen der turbulenten Windströmung erreicht werden. Dies wird nachfolgend als Ähnlichkeit der Anströmung beschrieben.

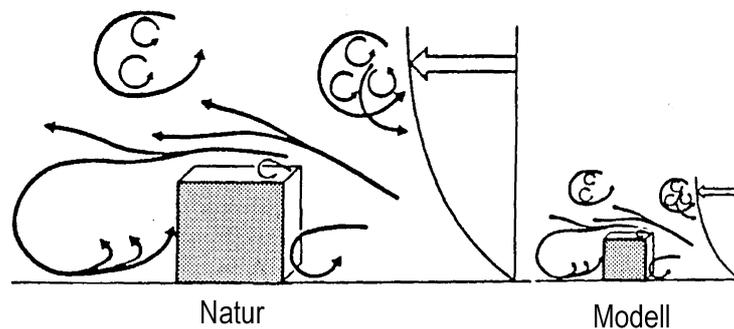


Abb. 2.8 Geometrische Ähnlichkeit in Natur und Modell

Ähnlichkeit der Anströmung

Maßgebliche Bedeutung bei der Ähnlichkeit der betrachteten Strömungsvorgänge kommt der Reynolds-Zahl Re zu. Sie beschreibt das Verhältnis der Trägheitskräfte zu den Zähigkeitskräften und wird aus geeigneten Referenzgrößen gebildet:

Gl. 2.14

$$Re = \frac{L_{ref} V_{ref}}{\nu}$$

mit:

- L_{ref} = Referenzlänge
- V_{ref} = Referenzgeschwindigkeit
- ν = kinematische Zähigkeit der Luft

Die Rauigkeits-Reynoldszahl in der Natur für bebaute Gebiete liegt aufgrund großer Oberflächenrauheit bei Starkwindereignissen immer im aerodynamisch rauhen Bereich. Ab einer bestimmten kritischen Rauigkeits-Reynoldszahl ist die Analogie zwischen der atmosphärischen Grenzschicht und der Grenzschicht über einer rauhen Platte gewährleistet. Bei der Wahl von z_0 als charakteristischer Länge und u_* als charakteristische Geschwindigkeit sollte daher die Rauigkeits-Reynoldszahl im Modell > 5 sein (PLATE, 1982).

Im unteren Bereich der Grenzschicht ist die Rauigkeitslänge z_0 die einzige Längengröße, die die turbulenten Bewegungen beeinflusst. Für eine Teil-Grenzschichtmodellierung, d. h. für

Gebäude, deren Höhe H sehr viel kleiner als die Grenzschichtdicke δ ist, muß der Maßstabsfaktor aus der folgenden Beziehung, der sog. Jensen-Zahl bestimmt werden:

Gl. 2.15

$$\left(\frac{z}{z_0} \right)_M = \left(\frac{z}{z_0} \right)_N$$

mit Index N : Natur
 Index M : Modell

Für größere Bauwerke müßte das Verhältnis

$$\frac{\delta_M}{\delta_N} = \frac{H_M}{H_N}$$

mit δ = Grenzschichtdicke
 H = Gebäudehöhe

eingehalten werden. Die Grenzschichtdicke in der Natur ist allerdings nur sehr schwer zu bestimmen. Weiterhin ist im Windkanal das Anwachsen von δ über die Kanallänge durch die Kanaldecke beschränkt.

Der Profilexponent α ist in der Natur proportional zu z_0 (siehe z. B. COUNIHAN (1975)) und somit auch ein Maß für den Rauigkeitseinfluß. Aus Gl. 2.7 kann daher die Forderung

Gl. 2.16

$$\alpha_M = \alpha_N$$

abgeleitet werden, wodurch eine korrekte Wiedergabe des Profils der mittleren Geschwindigkeit gewährleistet ist.

Neben dem Profil der mittleren Geschwindigkeit muß auch das Profil der Turbulenzintensität über die Höhe als Maß für die Böigkeit des Windes im Windkanal maßstäblich verkleinert wiedergegeben werden:

Gl. 2.17

$$\left(\frac{\sigma_u(z)}{u(z)} \right)_M = \left(\frac{\sigma_u(z)}{u(z)} \right)_N$$

Die kleinmaßstäbliche Nachbildung der Turbulenzstruktur der Strömung (siehe Abb. 2.8) erfolgt durch die Erzeugung kongruenter Abbildungen der spektralen Dichtefunktion $S_u(f,z)$ in Natur und Modell z. B. durch Auftragung über die Wellenzahl f/\bar{u} . Ein Maßstabsfaktor m ergibt sich durch die Verschiebung des Spektrums der Modellmessungen auf die Abbildung des Naturspektrums.

Nach PLATE (1982) ergibt sich hierbei der Maßstabsfaktor m aus dem Verhältnis der Wellenzahlen, an welchen das Maximum des Spektrums auftritt:

Gl. 2.18

$$m = \frac{\left(f_m / \bar{u}\right)_M}{\left(f_m / \bar{u}\right)_N}$$

mit m = Maßstabsfaktor
 f_m / \bar{u} = Wellenzahl am Peak des Spektrums

Ein Zeitmaßstab für die Vorgänge in der Natur und im Windkanal läßt sich aus der Beziehung

Gl. 2.19

$$\left(\frac{T_{ref} \cdot u_{ref}}{L_{ref}}\right)_N = \left(\frac{T_{ref} \cdot u_{ref}}{L_{ref}}\right)_M$$

ermitteln.

Durch den Einbau von Modellen im Windkanal wird der Strömungsquerschnitt teilweise versperrt. Dies führt zur Verengung der Stromlinien im Modellbereich und dadurch auch zu Änderungen in der Druckverteilung um das Modell. Um die Ähnlichkeit zwischen Natur und Modell zu gewährleisten, muß der Verbaugrad beachtet werden. Der Verbaugrad ist definiert als:

Gl. 2.20

$$\phi_B = \frac{\text{Projektionsfläche des Modells in Strömungsrichtung}}{\text{Querschnittsfläche des Kanals}}$$

Der Verbaugrad sollte nach Aussage verschiedener Autoren z. B. HUNT (1982) unter 5 % liegen. Ansonsten sind die Ergebnisse infolge des Verbauungseinflusses zu korrigieren. Hierzu lassen sich in der Literatur verschiedene Ansätze finden. Eine andere Möglichkeit solche Effekte zu verhindern, ist der Einbau einer beweglichen Decke, welche es ermöglicht, den entstehenden Druckgradienten zu kompensieren.

Dynamische Ähnlichkeit der Umströmung

Zur Ermittlung der Reynolds-Zahl der Umströmung wird eine Bauwerksabmessung als charakteristisches Längenmaß benutzt. Da jedoch die Zähigkeit ν der Luft gleich ist für Natur und Modell und die charakteristische Länge L_{Ref} um den Modellmaßstab verkleinert werden muß, müßte die Geschwindigkeit im Windkanal in der Größenordnung des Modellmaßstabes erhöht werden, um eine Einhaltung von Re zu erreichen. Bei den für Windkanaluntersuchungen üblichen Maßstäben ist dies jedoch nicht möglich.

Um geometrisch ähnliche Formen der Stromlinien zu erhalten, müssen im Modell und in der Natur die Reibungs- und Trägheitskräfte im gleichen Verhältnis zueinander stehen. Dies würde durch Übereinstimmung der Reynolds-Zahl erreicht. Die Zähigkeit der Luft ist jedoch äußerst gering, d. h., daß der Einfluß der Trägheitskräfte überwiegt. Die Ermittlung von

Widerstandsbeiwerten, z. B. an Kreiszyllindern, Kugeln oder Scheiben (siehe z. B. ZIEREP (1990)), zeigt im turbulenten Bereich bei hohen Reynolds-Zahlen eine Reynolds-Unabhängigkeit der c_D -Werte. Noch rascher erfolgt die Reynolds-Unabhängigkeit für prismatische Körper.

Nach PLATE (1982) soll für prismatische Körper eine Reynolds-Zahl der Umströmung, gebildet mit der Gebäudebreite B , von $Re = \bar{u} B/\nu > 5 \cdot 10^4$ eingehalten werden, bzw. im Einzelfall (z. B. Zylinderumströmung) die Reynolds-Unabhängigkeit nachgewiesen werden.

Eine weitere Reduzierung der Fehler durch Nichteinhaltung der Reynolds-Zahl der Umströmung erfolgt durch die Verwendung scharfkantiger Modelle. Die Ablöselinien sind dadurch vorgegeben und es entsteht eine ähnliche Umströmung wie in der Natur.

2.4 Quasi-statische Windlasten und Windlastkonzepte

2.4.1 Vorbemerkungen

Als quasi-statische Windlasten wird jener Teil der stationären und instationären Lasten durch Windeinfluß bezeichnet, welcher keine merkliche Bewegungen an einem Bauwerk hervorruft. Nach DIN 1055 Teil 4 gelten Bauwerke als nicht schwingungsanfällig, wenn die Verformung unter rein statischer Last bei zusätzlicher Berücksichtigung der dynamischen Windwirkung um nicht mehr als 10 % überschritten wird. In diesem Fall müssen die dynamischen Lastanteile beim Standsicherheitsnachweis nicht berücksichtigt werden. Ob ein Bauwerk schwingungsanfällig ist oder nicht hängt davon ab, ob im Bereich der Eigenfrequenz des Bauwerkes noch entsprechende Energieanteile im Erregerspektrum enthalten sind. Die Eigenfrequenz des Bauwerks hängt im wesentlichen ab von seiner Steifigkeit, Masse und Dämpfung. Für nicht schwingungsanfällige Bauwerke enthält die ENV 1991-2-4 (1994) ein vereinfachtes Verfahren zur Bestimmung der anzusetzenden Bemessungswindlasten.

Im Rahmen dieser Studie wurden ausschließlich quaderförmige bzw. kubische Baukörper untersucht, welche nach den Vorgaben der ENV 1991-2-4 (1994) alle einen dynamischen Koeffizienten $c_d < 1.0$ aufweisen und somit nach dem vereinfachten Verfahren berechnet werden können. Die vorliegende Arbeit befaßt sich daher in erster Linie mit der Bestimmung statisch wirkender Windlasten.

Der Windlastprozess läßt sich sowohl in seinem zeitlichen Ablauf als auch im Frequenzbereich beschreiben. In Abb. 2.9 sind die einzelnen Schritte, welche den Windlastprozess kennzeichnen, grafisch veranschaulicht.

Das Energiespektrum der Windgeschwindigkeitsfluktuationen beschreibt den Beitrag eines bestimmten Frequenzbereiches zur gesamten Varianz σ_u^2 der Geschwindigkeitschwankungen. Das Produkt des Böigkeitsspektrums mit der aerodynamischen Admittanz ergibt die spektrale Dichte des am Gebäude anliegenden Druckes bzw. der Belastung. Die aerodynamische Admittanz ergibt sich aus dem Übergang von der Energie des Windfeldes zu

den winderzeugten Drücken am Gebäude. Hierbei wird berücksichtigt, dass diese Drücke nicht vollständig über die Fläche miteinander korreliert sind. Für kleine Frequenzen d. h. großräumige Böen, welche ein Bauwerk bzw. Bauteil vollständig umhüllen, liegt der Wert der aerodynamischen Admittanz in der Größenordnung 1. Bei zunehmender Frequenz fällt die aerodynamische Admittanz ab, da kleinere Wirbel bzw. Böen nur bedingt miteinander korreliert sind.

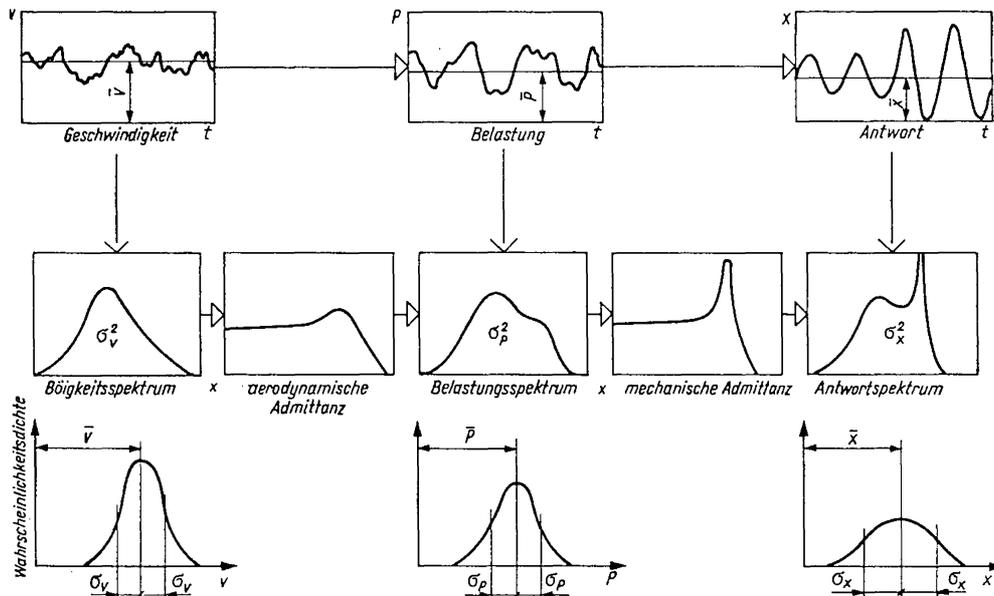


Abb. 2.9 Windlastprozess (aus ZURANSKI (1978))

Experimentell bestimmte Admittanzfunktionen liegen nur für flache Platten in gleichförmiger turbulenter Strömung ohne Grenzschichtprofil vor (siehe z. B. Abb. 2.10). Entscheidender Nachteil bei der Anwendung der aerodynamischen Admittanz ist die Abhängigkeit vom Grenzschichtprofil und die schwierige Überprüfbarkeit durch Naturmessungen. Für manche Bauwerke kann auch die räumliche Ausbildung der Druckverteilung von Interesse bei der Bemessung sein, welche aber durch die aerodynamische Admittanz nicht beschrieben wird.

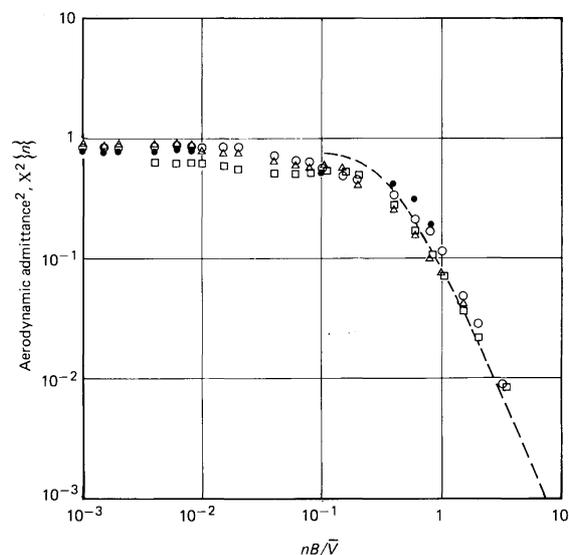


Abb. 2.10 Aerodynamische Admittanz für verschiedene Platten

Die Analyse des Windlastprozesses im Zeitbereich, basierend auf der Erfassung am Gebäude anliegender Drücke an einer Vielzahl diskreter Meßpunkte bietet den Vorteil, daß neben dem räumlichen Bild der effektiven Druckverteilung auch lokale für die Bemessung einzelner Bauteile maßgebende Lasten erfaßt werden. HOLMES (2001) gibt einen Überblick über Windlastkonzepte und Bemessungsvorschriften für nicht schwingungsanfällige Bauwerke die auf dieser Methodik basieren. Nachfolgend werden diese Methoden, soweit sie für die vorliegende Arbeit von Bedeutung sind bzw. verwendet wurden, kurz in ihren Grundzügen erläutert.

2.4.2 Quasi-stationäre Methode - Böenkonzept:

Dieser Methode liegt die vereinfachende Annahme zugrunde, daß die in der Windströmung enthaltenen Wirbel sehr groß im Verhältnis zu den Gebäudeabmessungen sind. Dies bedeutet, daß sich bei turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen für die Wirkungsdauer der Böe ein stationäres Strömungsfeld um das Bauwerk ausbildet und der anliegende Druck allein durch die Anströmgeschwindigkeit bestimmt wird. Der zeitliche Verlauf des Drucks $\Delta p(t)$ an der Gebäudeoberfläche folgt dann exakt dem zeitlichen Verlauf des Referenzstaudruckes $0.5\rho V^2(t)$:

Gl. 2.21

$$\Delta p(t) = \frac{1}{2} \rho V^2(t) \cdot c_{p,mean}$$

mit: $c_{p,mean}$ = zeitlich gemittelter Druckbeiwert

Der Betrag des Geschwindigkeitsvektors V (Gl. 2.1) ist gegeben durch:

Gl. 2.22

$$V^2 = (\bar{u} + u')^2 + v'^2 + w'^2$$

Unter der Annahme, daß die quadrierten Schwankungsanteile in Gl. 2.22 nur einen geringen Anteil zum Betrag des Geschwindigkeitsvektors leisten, können diese vernachlässigt werden. Hieraus ergibt sich:

Gl. 2.23

$$V^2(t) = \bar{u}^2 + 2\bar{u}u'(t)$$

Durch Einsetzen von Gl. 2.23 in Gl. 2.21 und Ausklammern von \bar{u}^2 erhält man:

Gl. 2.24

$$\Delta p(t) = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^2 \left(1 + \frac{2u'(t)}{\bar{u}} \right) c_{p,mean}$$

Die Fluktuation des Winddrucks $\Delta p(t)$ ist nunmehr nur noch abhängig von der longitudinalen Geschwindigkeitsschwankung $u'(t)$. Das Verhältnis der maximalen Geschwindigkeitsschwankung u'_{max} zur mittleren Geschwindigkeit \bar{u} kann durch ein Vielfaches g der Turbulenzintensität I_u (Gl. 2.8) ausgedrückt werden. Der Term in der Klammer wird dann als

Böenfaktor G bezeichnet. Der Faktor g kann in Abhängigkeit von der für das Bauwerk maßgeblichen Böendauer gewählt werden (siehe Abschnitt 2.4.3).

Berücksichtigt man die Höhenabhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit und der Turbulenzintensität ergibt sich für die Nennwindlast W :

Gl. 2.25

$$W = \frac{l}{2} \rho \bar{u}^2(z) G(z) c_{p,mean}$$

mit $G(z) = 1 + 2 \cdot g \cdot I_u(z)$ (in ENV 1991-2-4 (1994): $g = 3.5$)

Basierend auf statistischen Analysen der meteorologischen Aufzeichnungen kann eine Windgeschwindigkeit \bar{u} mit einer bestimmten Auftretenswahrscheinlichkeit der Bemessung zugrunde gelegt werden.

Die Fluktuationen des am Gebäude anliegenden Winddruckes aufgrund der Anströmturbulenz werden bei dieser Methode als Zustände betrachtet, die über einen bestimmten Zeitraum stationär verlaufen. Die Druckschwankungen folgen somit räumlich gesehen exakt dem Verlauf der zeitlich gemittelten Druckbeiwerte entlang der Bauwerksaußenfläche und der zeitliche Ablauf verhält sich analog zum zeitlichen Verlauf der Geschwindigkeitsschwankung $u'(t)$. Wie in Abb. 2.7 gezeigt wurde ist dies in der Realität nicht der Fall. Bei der Betrachtung von Kraftwirkungen auf gesamte Bauwerke oder auf sehr große Flächenbereiche sind die vereinfachenden Annahmen dieses Lastkonzeptes gerechtfertigt und führen daher zu guten Übereinstimmungen mit der Natur. Dies liegt daran, daß Turbulenzelemente, die sehr viel kleiner sind als die betrachtete Fläche, nur in Teilbereichen wirksam werden und nur bedingt miteinander korreliert sind. Bei einer Integration der Druckverteilung über die Fläche fallen diese dann nicht mehr ins Gewicht. Lokal betrachtet können auch kleinere Teilflächen im Bereich frontaler Anströmung gute Übereinstimmung mit gemessenen Werten erreichen, da in diesen Strömungsbereichen die Druckschwankungen tatsächlich in hohem Maße mit den Geschwindigkeitsfluktuationen korreliert sind.

Abweichungen zwischen Meßdaten und Lasten berechnet nach der quasi-stationären Methode treten in jenen Bereichen auf, wo sich die Strömung von der Bauwerksoberfläche abgelöst hat. Die Ursache hierfür ist, daß die Druckfluktuationen in Ablösebereichen wesentlich von der gebäudeinduzierten Turbulenz und nicht von der Turbulenz in der Anströmung bestimmt werden. Aufgrund der vereinfachenden Annahmen des Böenkonzeptes wird jedoch bei der Bestimmung der Lastspitzen nur die Turbulenz der Anströmung berücksichtigt. Weiterhin ist eine Unterschätzung der Windkräfte an jenen Stellen zu erwarten, an denen der zeitlich gemittelte Druckbeiwert $c_{p,mean}$ gegen null geht. Anhand von Gl. 2.25 wird ersichtlich, daß die nach der quasi-stationären Methode berechneten Lasten in diesem Fall ebenfalls gegen null gehen müssen. Betrachtet man die zeitlichen Lastverläufe können jedoch erhebliche Kräfte auf Bauteile infolge der fluktuierenden Lastkomponente entstehen (siehe z. B. WACKER (1989)).

2.4.3 Lokale Windlasten - "Equivalent steady gust model"

Bei der Anwendung der quasi-statischen Methode kommt der Größe der Windgeschwindigkeit, welche zur Berechnung des dynamischen Drucks verwendet wird, wesentliche Bedeutung zu. Der momentane Betrag der Windgeschwindigkeit wird jedoch auch sehr stark durch Turbulenzwirbel beeinflusst, die von weitaus geringerer Größe sind als das betrachtete Bauwerk oder Bauteil. Hierdurch verursachte hohe Windgeschwindigkeiten von kurzer Dauer führen nur lokal an der Bauwerksoberfläche zu hohen Windlasten, während die Gesamtkraft auf das Tragwerk des Baukörpers aufgrund der integralen Wirkung nur unwesentlich erhöht wird. Es stellt sich hierbei die Frage, wie groß sind die Flächen, die von lokalen Lastspitzen erfaßt werden können, bzw. wie stark ist eine Böe, die ein Bauteil bestimmter Größe gerade noch vollständig erfassen kann und auf der gesamten Fläche des Bauteiles zu einer Lasterhöhung führt (daher die Bezeichnung "Equivalent steady gust").

Aussagen über die räumliche Ausdehnung von Druckschwankungen an der Bauwerksoberfläche können anhand zeitgleicher Messungen an mehreren Meßpunkten durch Korrelationsrechnung im Zeitbereich bzw. durch Bestimmung der Kohärenz im Frequenzbereich erhalten werden. Letztere Methode hat den Vorteil, daß sich durch die Abhängigkeit von der Frequenz f ein direkter Bezug zu einer Böendauer durch den Kehrwert $1/f$ herstellen läßt und somit als Ergänzung zur quasi-stationären Methode verwendet werden kann.

Auf der Grundlage der Daten aus den Naturmessungen von NEWBERRY ET AL. (1973) am Royex-Haus in London wurde ein entsprechender Ansatz entwickelt, der eine Abschätzung lokaler Windlasten auf Bauteile ermöglicht. (LAWSON (1980), COOK (1990)). Die Abnahme der Kohärenz γ mit zunehmender Frequenz f wird hierbei durch eine Exponentialfunktion der folgenden Form beschrieben:

Gl. 2.26

$$\sqrt{\gamma} = e^{-\frac{Kfx}{u}}$$

mit:

γ	= Kohärenz
K	= const.
f	= Frequenz
x	= räumliche Distanz der Meßpunkte

In Abb. 2.11 sind zwei Beispiele einer solchen Anpassung enthalten. Allein durch die Abnahmekonstante K läßt sich der Verlauf der Kohärenz beschreiben. Der Bestimmung und der Kenntnis dieser Größe kommt daher besondere Bedeutung zu. Das Ergebnis der Auswertung aller Kohärenzfunktionen der Messungen am Royex-Gebäude lieferte die in Tab. 2.1 enthaltenen Werte.

Tab. 2.1 Abnahmekonstanten K der horizontalen und vertikalen Druckkohärenzen am Royex-Gebäude (NEWBERRY et al (1973))

	K vertikal	K horizontal
Westseite bei Westwind	4.4 ± 0.9	4.3 ± 1.1
Ostseite bei Ostwind	5.3 ± 1.0	5.7 ± 1.1
Südseite bei Südwind	8.4 ± 3.2	5.4 ± 3.3

Mit Ausnahme der vertikalen Kohärenz an der Südfassade weisen die Werte in Tab. 2.1 die gleiche Größenordnung auf. Die rasch abnehmende vertikale Kohärenz an der Südseite läßt sich auf die unmittelbare Nähe eines Nachbargebäudes mit einer Höhe von ca. $2/3$ der Höhe des Meßgebäudes zurückführen. Die Rauigkeit bei Anströmung aus westlicher Richtung wird als relativ glatt bezeichnet, während in östlicher Richtung auch einige höhere Gebäude vorhanden sind. Die Ergebnisse verdeutlichen die Abhängigkeit von K von der Turbulenz der Anströmung, bzw. den raschen Abfall der Kohärenz bei der Abschattung durch Nachbargebäude.

Ihre Anwendung finden die Daten aus Abb. 2.11 in der sog. "TVL-Formel" (COOK 1990), welche von LAWSON (1980) vorgeschlagen wurde. Aus Tab. 2.1 läßt sich für die Abnahme der Kohärenz der Druckschwankungen eine Abnahmekonstante von 4.5 als gute Näherung für alle gemessenen Punkte ermitteln.

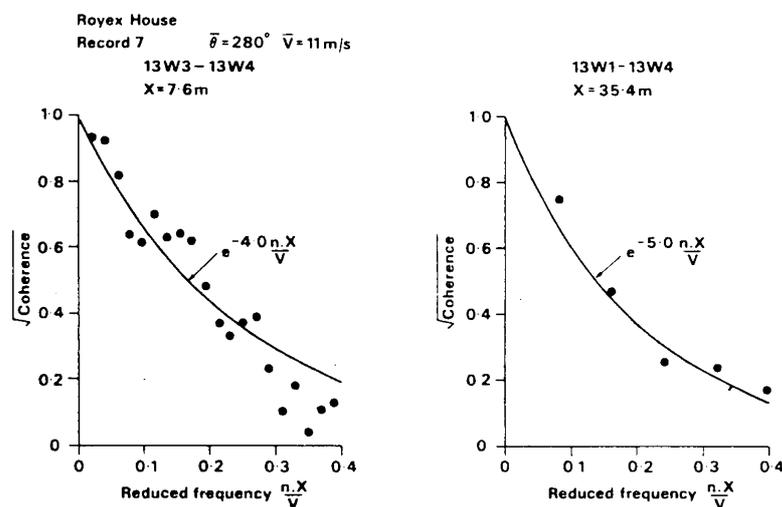


Abb. 2.11 Kohärenz der Druckschwankungen am Royex-Gebäude (NEWBERRY et al (1973))

Aus der Integration von Gl. 2.26 ergibt sich:

$$\int_0^{\infty} e^{-K \frac{f \Delta x}{u}} d \frac{f \Delta x}{u} = \frac{1}{K} e^{-\frac{f \Delta x}{u}} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{K} = 0.22$$

Gl. 2.27

Die Kohärenzfunktion aus Abb. 2.11 läßt sich ersetzen durch eine rechteckförmige Funktion mit dem gleichen Flächeninhalt:

$$\begin{aligned} \sqrt{\gamma} &= 1 && \text{für } 0 \leq \frac{f\Delta x}{\bar{u}} \leq 0.22 \\ \sqrt{\gamma} &= 0 && \text{für } \frac{f\Delta x}{\bar{u}} > 0.22 \end{aligned} \quad \text{Gl. 2.28}$$

Die Druckschwankungen können nun bei einer Frequenz $f\Delta x/\bar{u}$ kleiner 0.22 als perfekt korreliert und bei einer höheren Frequenz als unkorreliert betrachtet werden. Die Definition von Δx als größte Abmessung l eines Bauteiles (i. d. R. die Diagonale einer Fläche) sowie die Zugrundelegung der quasi-stationären Methode, mit welcher die Frequenz f aus Gl. 2.28 als Kehrwert der Böendauer t jener Böe interpretiert werden kann, die gerade noch in der Lage ist, das betrachtete Bauteil vollständig zu erfassen, führt zur "TVL-Formel":

$$t \bar{u} = 4.5 l \quad \text{Gl. 2.29}$$

Für eine Bauteilgröße l und eine mittlere Bemessungswindgeschwindigkeit \bar{u} kann mit Hilfe von Gl. 2.29 die maßgebliche Böendauer t abgeschätzt werden. Entsprechend der Böendauer kann dann ein Böenfaktor $G(z,t)$ für die Bestimmung der Bemessungswindlast nach Gl. 2.25 angesetzt werden.

2.4.4 Spitzenfaktor-Methode

Die sog. Spitzenfaktor-Methode verläßt die bisher unterstellte Analogie zwischen Geschwindigkeitsschwankungen und Druckschwankungen. Neben den zeitlich gemittelten Druckbeiwerten geht bei der Bestimmung der Windlasten nach dieser Methode auch die Standardabweichung der Druckschwankungen $c_{p,rms}$ in die Berechnung ein.:

$$W = (c_{p,mean} \pm k c_{p,rms}) \frac{l}{2} \rho \bar{u}^2(z) \quad \text{Gl. 2.30}$$

mit: k = Spitzenfaktor
 $c_{p,rms}$ = Standardabweichung des Druckbeiwertes c_p

Der Vorteil der Methode liegt darin, daß durch die Verwendung der fluktuierenden Lastbeiwerte der Einfluß der gebäudeinduzierten Turbulenz richtig erfaßt wird. Hierzu müssen jedoch einerseits die $c_{p,rms}$ -Werte im Windkanal bestimmt werden, andererseits muß der Spitzenfaktor k für unterschiedliche Teilbereiche und Teilflächengrößen des Gebäudes festgelegt werden, da die Korrelation der Drücke und Größe der Spitzenwerte entsprechend der Gebäudeumströmung unterschiedlich ist für Druck- und Sogbereiche. Weiterhin ist zu beachten, daß die $c_{p,rms}$ -Werte auch stark von der Anströmturbulenz abhängen und somit auch entsprechend der Grenzschicht unterschiedlich ausfallen können.

Generell muß zur Anwendung der o. g. Methode eine Kalibrierung der Spitzenfaktoren k anhand bekannter Extremwerte der Lastbeiwerte erfolgen, welche mit einer bestimmten

Auftretenshäufigkeit verknüpft sind (siehe z. B. COOK (1990)). Eine Methode, welche die Statistik der Windgeschwindigkeiten und der Lastbeiwerte berücksichtigt, um Lasten bestimmter Auftretenshäufigkeit zu bestimmen, wurde von COOK und MAYNE (1980) entwickelt.

2.4.5 Vereinfachte “Cook-Mayne“-Methode

Die von COOK und MAYNE (1980) entwickelte Methode zur Bestimmung von Spitzenwerten der Windbelastung betrachtet den Druckbeiwert und die Windgeschwindigkeit als statistische Variablen, die voneinander unabhängig sind. Die statistische Unabhängigkeit wird durch die Unterteilung des Windlastprozesses im Bereich der spektralen Lücke zwischen dem mikrometeorologischen und makrometeorologischen Peak des “Van der Hoven“-Spektrums (Abb. 2.3) hergestellt. Dies wird dadurch erreicht, daß die Windgeschwindigkeit über eine Dauer T ($10 \text{ min} < T < 1 \text{ h}$) gemittelt und die statistische Analyse mit diesen Mittelwerten durchgeführt wird. Die Extremwertstatistik der Geschwindigkeiten basiert somit ausschließlich auf der Variabilität hervorgerufen durch den makrometeorologischen Bereich.

Der mikrometeorologische Bereich beinhaltet die Windturbulenz, welche in der Grenzschicht durch die Rauigkeitswirkung der Geländeoberfläche erzeugt wird. Dem mikrometeorologischen Bereich ist auch der Energiegehalt der gebäudeinduzierten Turbulenz, die bei der Interaktion der Strömung mit dem Bauwerk entsteht, überlagert. Die hiermit verbundene Variabilität der Windlasten wird bei der Analyse der Lastbeiwerte c berücksichtigt. Die statistische Verteilung wird aus einer Serie ermittelt, welche aus Extremwerten der einzelnen Zeitabschnitte T gebildet wurde. Die von Cook und Mayne entwickelte Methode basiert auf einer Zeitdauer $T = 1 \text{ h}$, entsprechend der in Großbritannien üblichen stündlichen Bemessungswindgeschwindigkeiten. Die ENV 1991-2-4 (1994) benutzt jedoch Bemessungswindgeschwindigkeiten gemittelt über einen Zeitraum von 10 min. Eine Anwendung der Methode in Verbindung mit den Bemessungsgeschwindigkeiten der ENV 1991-2-4 (1994) bedarf daher einer Überprüfung bzw. Korrektur. Aus diesem Grund werden die Grundlagen und die vollständige Vorgehensweise dieser Methode nachfolgend etwas ausführlicher dargestellt. Die Modifikation und Anwendung der Methode auf die Daten der vorliegenden Arbeit wird in Abschnitt 3.5.2 erläutert.

Um Windlasten mit einer bestimmten Auftretenswahrscheinlichkeit (in der Regel mit einer mittleren Wiederkehrzeit von 50 Jahren) zu bestimmen, müssen die Statistiken der beiden Variablen verknüpft werden. In Abb. 2.12a ist beispielhaft eine zweidimensionale Häufigkeitsverteilung der extremen stündlichen Windgeschwindigkeiten und der entsprechenden extremen Lastbeiwerte (Stundenmaxima) aufgetragen. Linien konstanter Last X , berechnet durch $\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2 C$, können in die Verteilung eingetragen werden. Die Auftretenswahrscheinlichkeit einer bestimmten Spanne einer Last X ergibt sich durch das Volumen unterhalb dieser Linie.

Die bisher dargelegte Methodik geht von der Annahme aus, daß die Windlast, welche der gesuchten Wahrscheinlichkeit entspricht, in der stärksten Sturmstunde hervorgerufen wird.

Dieselbe Last kann jedoch infolge der Variabilität der Lastbeiwerte auch bei entsprechend großen Lastbeiwerten in der zweitgrößten bzw. einer noch geringeren Sturmstunde hervorgerufen werden. In Abb. 2.12 b) ist neben der Häufigkeitsverteilung für die stärkste Sturmstunde auch die entsprechende Verteilung für die zweitstärkste Stunde eingetragen. Die Wahrscheinlichkeit, daß eine gegebene Windlast X in der stärksten Sturmstunde überschritten wird, kann durch die Integration des Volumens über der Fläche A berechnet werden. Die Überschreitungswahrscheinlichkeit innerhalb der zweitstärksten Sturmstunde ergibt sich durch Integration über die Fläche B . Diese ist deutlich kleiner als die Fläche A . In ähnlicher Weise ergeben sich immer geringer werdende Überschreitungswahrscheinlichkeiten mit den nächstniedrigeren Sturmstunden.

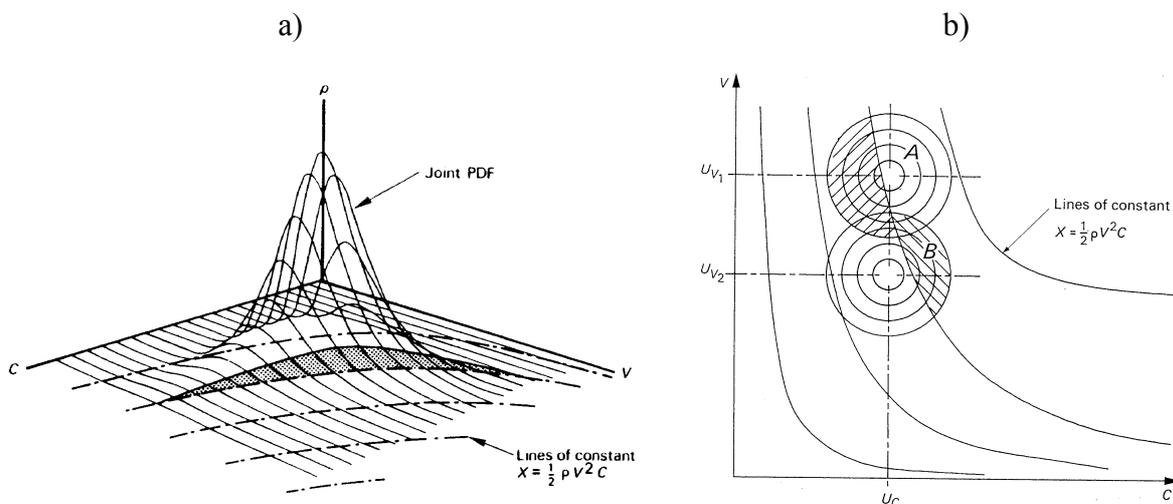


Abb. 2.12 a) Zweidimensionale Häufigkeitsverteilung der extremen Windgeschwindigkeiten und Lastbeiwerte der jährlich stärksten Sturmstunden, hier $\bar{u} = v$,
 b) Zweidimensionale Häufigkeitsverteilung der extremen Windgeschwindigkeiten und Lastbeiwerte der jährlich stärksten und zweitstärksten Sturmstunden

Zur Simulation dieser Zusammenhänge wird somit ein Prozeß benötigt, welcher dem jährlich höchsten, zweithöchsten, dritthöchsten, etc., Stundenmittel (Rang $M = 1, 2, 3, \dots$ etc.) der Geschwindigkeit jeweils einen Lastbeiwert zuordnet. Die hieraus resultierende höchste Last X eines Jahres wird für die Serie der jährlichen Höchstwerte selektiert. COOK und MAYNE (1980) führten dies mit Hilfe von "Monte-Carlo-Simulationen" durch.

Ausgegangen wird bei der Simulation von der Fisher-Tippet Verteilung (Typ I) für die Extrema der Geschwindigkeiten und der Lastbeiwerte:

Gl. 2.31

$$P = e^{-e^{-y}}$$

mit P = Summenhäufigkeit der Variable y

$y = a_v(\bar{u}_{\max} - U_v)$ = "reduced variate", hierbei sind a_v und U_v die Parameter der Fisher-Tippet Verteilung, angepaßt an die beobachteten Extremwerte der Geschwindigkeit \bar{u}_{\max}

Gl. 2.31 gilt analog auch für die Verteilung der extremen Lastbeiwerte. Für die Last X ergibt sich somit:

Gl. 2.32

$$X = \frac{1}{2} \rho \left(U_v + \frac{y_v}{a_v} \right)^2 \left(U_c + \frac{y_c}{a_c} \right)$$

Durch Ausklammern von U_v^2 und U_c erhält man:

Gl. 2.33

$$X = \frac{1}{2} \rho U_v^2 U_c x$$

$$x = \left(1 + \frac{y_v}{a U_v} \right)^2 \left(1 + \frac{y_c}{a U_c} \right)$$

Hierbei ist x dimensionslos und nur noch abhängig von den charakteristischen Produkten $a U_v$ und $a U_c$. Die Werte für y_v und y_c werden generiert mit Hilfe der Beziehung $y = -\ln(-\ln(P))$ (siehe Gl. 2.31), wobei P aus gleichverteilten Zufallszahlen mit einem Wert zwischen 0 und 1 gebildet wird.

In einem ersten Schritt wurde untersucht bis zu welchem Rang m die Windgeschwindigkeiten eines Jahres zu berücksichtigen sind. Für die Simulation der stündlichen Windgeschwindigkeiten eines Jahres wurde von einer maximalen Anzahl unkorrelierter Maxima von $n = 100$ ausgegangen.

Die Bildung einer langjährigen Reihe aus den Jahreshöchstwerten bedeutet somit eine Selektion aus einem Kollektiv von $n = 100$ Werten. Es besteht folgender Zusammenhang zwischen der Verteilung der Jahreshöchstwerte $P_{y,max}$ und der Verteilung der unkorrelierten Maxima eines Jahres P_y :

Gl. 2.34

$$P_{y,max}(y) = (P_y(y))^n$$

mit: $P_{y,max}$ = Verteilung der Jahreshöchstwerte
 P_y = Verteilung der unkorrelierten Maxima pro Jahr (hier simuliert mittels Zufallszahlen $0 \leq y \leq 1$)

Da es sich jeweils um Extremwerte handelt, kann für beide Verteilungen angenommen werden, daß die Fisher-Tippet-Verteilung (Typ I) gültig ist. Die "reduced variate" $y_{v,max}$ der Jahresmaxima zur Simulation der 1000jährigen Beobachtungsdauer wird daher folgendermaßen berechnet:

Gl. 2.35

$$y_{v,max} = y_v - \ln(n)$$

Analog hierzu wurde für die nächstniedrigeren Ränge $m = 2, 3, \text{etc.}$ vorgegangen. Die Annahme der Fisher-Tippet Verteilung ist in diesem Fall jedoch nicht ganz gerechtfertigt, da diese Werte keine Maxima sind (sie werden begrenzt durch die größeren Werte der Reihe). Der Vergleich der simulierten Verteilungen mit den "Cramer-Asymptoden" zeigte jedoch bis

$m = 5$ eine gute Übereinstimmung (Cook, Mayne 1980). Hinsichtlich des Ranges m der einzubeziehenden nächstniedrigeren Sturmstunden ergibt sich, daß eine Berücksichtigung bis zu $m = 5$ vollkommen ausreichend ist. Die Ergebnisse sind in Abb. 2.13a wiedergegeben. Für Wiederkehrintervalle größer als 10 Jahre ergibt sich für $m > 5$ keine Erhöhung mehr für die Last x .

Die Parameter aU_v und aU_c wurden für die endgültigen Berechnungen in einem Bereich von 5 bis 20 variiert, der als typisch angesehen wurde für die Windbelastung an Bauwerken. Es wurden für jede der gewählten Kombinationen von aU_v und aU_c 10 Reihen mit einer Dauer von 5000 Jahren erzeugt. Einige typische Ergebnisse für die Verteilung der Last x , berechnet aus der Mittelung über die 10 Versuche, sind in Abb. 2.13b dargestellt. Der Verlauf von x über y_x läßt sich durch ein Polynom zweiten Grades beschreiben, dessen Koeffizienten für die unterschiedlichen Kombinationen von aU_v und aU_c in einer Tabelle zusammengefaßt wurden (COOK, 1980). Durch die Wahl von y_x entsprechend der erwünschten Wahrscheinlichkeit der Last, läßt sich die Last X nach Gl. 2.33 berechnen. Es werden hierfür nur die Werte für U_v und U_c benötigt.

Diese Form der Darstellung weicht jedoch erheblich von bisherigen Bemessungsvorschriften ab, welche meist auf der Grundlage von Gl. 2.21 bzw. Gl. 2.25 entstanden sind. Die "vereinfachte Cook-Mayne-Methode" verwendet daher einen Lastbeiwert, welcher multipliziert mit dem Staudruck der 50-jährlichen Bemessungswindgeschwindigkeit auch genau die 50-jährliche Last ergibt, welche nach der vollständigen Cook-Mayne-Methode berechnet wurde. Dieser Lastbeiwert läßt sich aus der Last x (mit $y_x = 3.9$) ermitteln, indem Gl. 2.33 nach y_c aufgelöst wird. Aufgrund der Vorgabe der 50jährigen Bemessungsgeschwindigkeit ergibt sich y_v ebenfalls zu 3.9.

COOK (1990) gibt den Wert für y_c zur Ermittlung der 50jährigen Last mit 1.4 an. Dieser Wert beruht einerseits auf der Vorgabe $aU_v = 10$, welche in Großbritannien als Standard verwendet wird, andererseits wird der Wert von $y_c = 1.4$ aufgrund der Variationsbreite von aU_c nur in 1% der Fälle überschritten. Diese Aussage läßt sich aus einer zweidimensionalen Häufigkeitsverteilung von aU_v und aU_c , welche aus Literaturdaten ermittelt wurde, ableiten.

Die Bestimmungsgleichung für die 50jährige Windlast W_{50} nach der vereinfachten Cook-Mayne-Methode lautet somit:

Gl. 2.36

$$W_{50} = \frac{1}{2} \rho \bar{u}_{50}^2 \left(U_c + \frac{1.4}{a_c} \right)$$

mit. \bar{u}_{50} = 50jährige Bemessungswindgeschwindigkeit
 U_c = Modalwert der FT1-Verteilung des Lastbeiwertes c
 $1/a_c$ = Dispersion der FT1-Verteilung des Lastbeiwertes c

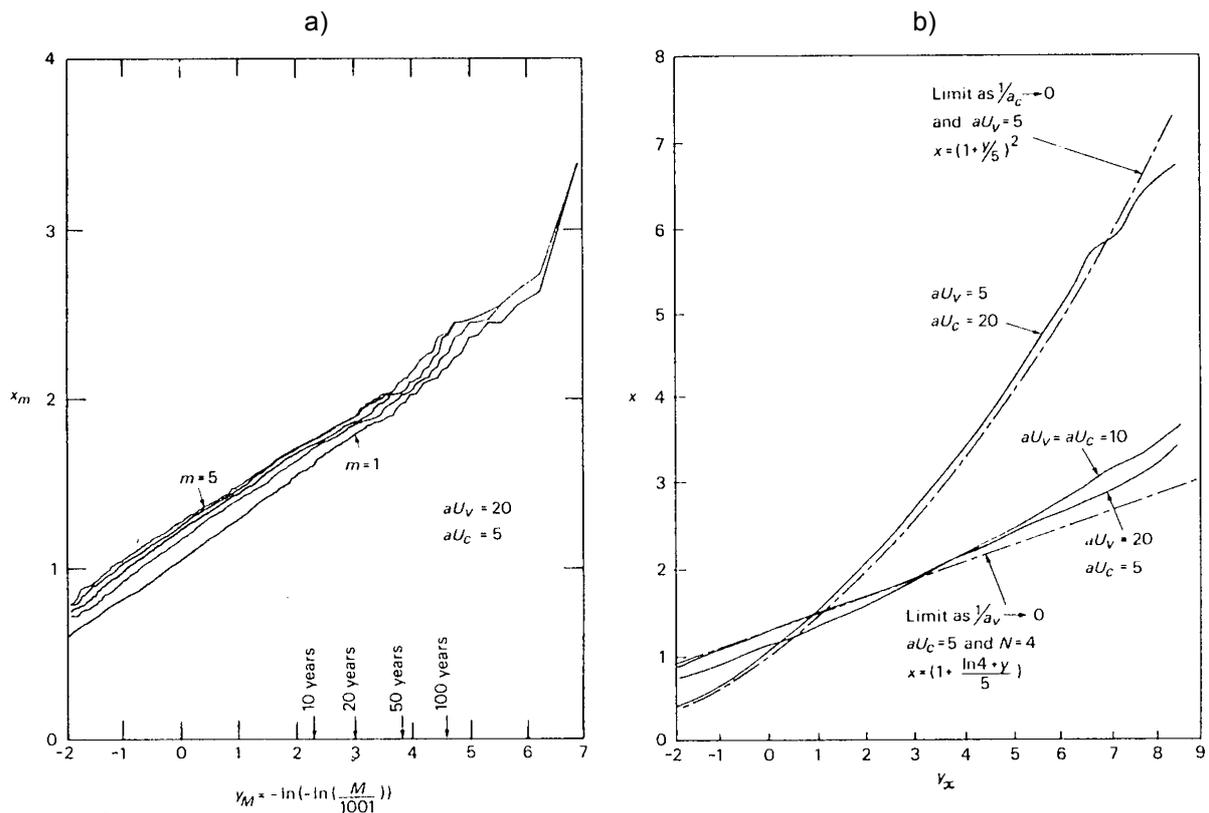


Abb. 2.13 Abhängigkeit der Last x von der Anzahl der einbezogenen stärksten Sturmstunden (a) und von den Parametern aU_c und aU_v (b).

Die Bestimmung der 50jährigen Windlast setzt neben der Bemessungswindgeschwindigkeit somit nur noch die Kenntnis der Parameter U_c und a_c voraus. Diese können anhand von Windkanalversuchen bei Beachtung des Zeitmaßstabes sehr einfach ermittelt werden. Abgesehen vom letzten verallgemeinernden Schritt ist die Methode unabhängig davon, ob $T = 1$ h oder $T = 10$ min verwendet wird. Bei der Abschätzung von y_c anhand der Vorgabe $aU_v = 10$ und der gemeinsamen Häufigkeitsverteilung mit aU_c , stellt sich die Frage, inwiefern hier Korrekturbedarf besteht, wenn eine Anwendung der Methode für $T = 10$ min entsprechend der Bemessungswindgeschwindigkeit der ENV 1991-2-4 (1994) erfolgen soll. Die Modifikation und Anwendung der Methode auf die Daten der vorliegenden Arbeit wird in Abschnitt 3.5.2 erläutert.

2.4.6 Bemessungslasten nach Eurocode

Die Regelungen nach Eurocode 1, Teil 2-4 (ENV 1991-2-4 (1994)) sollten ursprünglich in absehbarer Zeit das Regelwerk der DIN 1055 ersetzen. Mittlerweile wurde jedoch ein Neuentwurf der DIN 1055 Teil 4 vorgelegt (DIN 1055-4, 2001). Hierin wurden Teile des Konzepts der ENV 1991-2-4 (1994) übernommen, die Anpassung der Bemessungswindgeschwindigkeit an unterschiedliche Geländearten wurde jedoch in Form von Mischprofilen abgeändert. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit werden in erster Linie mit den nach ENV 1991-2-4 berechneten Lasten verglichen. Die hierfür erforderlichen Definitionen, Gleichungen und aerodynamischen Beiwerte nach ENV 1991-2-4 werden

nachfolgend zusammengestellt und erläutert. Diese Zusammenstellung erfolgt vor allem im Hinblick auf die Berechnung winderzeugter Lasten an der Außenfläche einfacher, nicht schwingungsanfälliger, prismatischer Baukörper in ebenem Gelände.

Wahl des Verfahrens

Das Verfahren nach ENV 1991-2-4 beinhaltet zwei Methoden zur Berechnung winderzeugter Lasten auf Bauwerke:

- vereinfachte Methode für nicht schwingungsanfällige Bauwerke
- detaillierte Methode für schwingungsanfällige Bauwerke, wenn gilt $c_d > 1.2$

Das vereinfachte Verfahren basiert auf der Verwendung des dynamischen Beiwertes c_d . Hierbei werden im dynamischen Beiwert c_d , welcher für Standardbauwerke < 200 m abhängig von ihrer Bauweise (Beton, Stahl, etc.) und den Abmessungen vorgegeben wird, sowohl die Reduktion der Lasten aufgrund mangelnder Korrelation der Drücke über die Fläche, als auch die Erhöhung infolge dynamischer Effekte durch Energieanteile des Turbulenzspektrums im Bereich der Eigenfrequenz des Bauwerkes berücksichtigt. Beispielhaft ist in Abb. 2.14 der in der ENV 1991-2-4 gegebene Zusammenhang zwischen dynamischem Beiwert c_d und den geometrischen Abmessungen für ein Gebäude aus Beton oder Mauerwerk dargestellt.

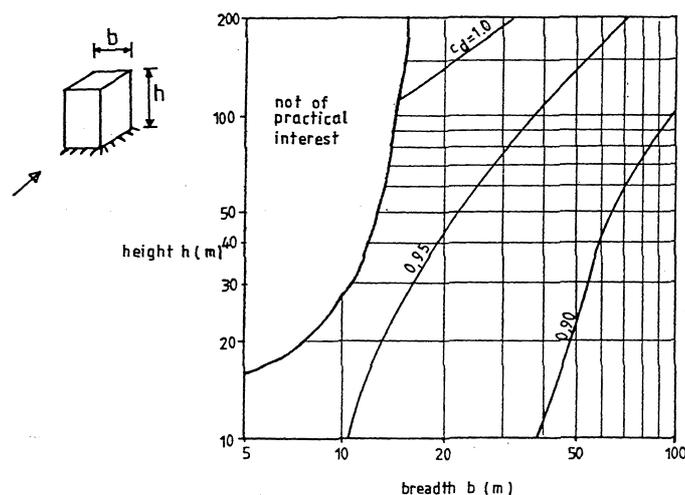


Abb. 2.14 Dynamischer Beiwert c_d für Beton- und Mauerwerksgebäude

Winddruck und Windkraft:

Der Winddruck W_e auf die äußere Oberfläche eines Bauwerkes bzw. die globale Kraft F_w auf ein gesamtes Bauwerk können mit Hilfe der folgenden Gleichungen berechnet werden:

Gl. 2.37

$$W_e = q_{ref} \cdot c_e(z_e) \cdot c_{pe}$$

bzw. $F_w = q_{ref} \cdot c_e(z_e) \cdot c_d \cdot c_f \cdot A_{ref}$

mit: Index e = extern

q_{ref} = Referenz-Staudruck (Definition s. Gl. 2.38)

c_e = "Exposure coefficient" oder Ausgesetztheitsgrad (Definition s. Gl. 2.40)

z_e = Referenzhöhe

c_{pe} = Druckbeiwert (aus Tabellen)

c_d	= dynamischer Beiwert (siehe Abb. 2.14)
c_f	= Kraftbeiwert (aus Tabellen)
A_{ref}	= Referenzfläche (in der Regel projizierte Fläche normal zum Wind)

Die Beziehungen und Angaben zur Bestimmung der in Gl. 2.37 enthaltenen Größen werden nachfolgend zusammengestellt und kurz erläutert.

Referenzstaudruck und Referenzgeschwindigkeit

Der Referenzstaudruck q_{ref} errechnet sich aus der Referenzgeschwindigkeit \bar{u}_{ref} :

Gl. 2.38

$$q_{ref} = \frac{1}{2} \rho \bar{u}_{ref}^2$$

mit:	\bar{u}_{ref}	= Referenzgeschwindigkeit
	ρ	= Dichte der Luft (abhängig von der Höhe, Temperatur und Luftdruck, ca. 1.25 kg/m ³)

Die Referenzgeschwindigkeit wird definiert als 10-Minuten Mittelwert in einer Höhe $z = 10$ m über Grund in einem Gelände der Kategorie II (siehe Tab. 2.2) mit einer jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit von 0.02. Dies entspricht einer Jährlichkeit von 50 Jahren.

Gl. 2.39

$$\bar{u}_{ref} = c_{Dir} \cdot c_{tem} \cdot c_{alt} \cdot \bar{u}_{ref,0}$$

mit:	$\bar{u}_{ref,0}$	= Grundwert der Referenzgeschwindigkeit abhängig von der Windlastzone
	c_{Dir}	= Richtungsfaktor, i. d. R = 1
	c_{tem}	= Zeitfaktor, i. d. R = 1 (berücksichtigt Bauzustände, kurze Standzeiten)
	c_{alt}	= Höhenfaktor, i. d. R = 1 (berücksichtigt Gebirgsregionen)

Zur Bestimmung von Referenzgeschwindigkeiten mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit abweichend vom Standardwert 0.02 kann folgende Beziehung verwendet werden:

Gl. 2.40

$$\bar{u}_{ref}(p) = \bar{u}_{ref} \left(\frac{1 - K_1 \ln(-\ln(1-p))}{1 - K_1 \ln(-\ln 0.98)} \right)^n$$

mit:	p	= jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit abweichend von 0.02
	K_1	= Formfaktor = 0.2
	n	= Exponent = 0.5

Ausgesetztheitsgrad ("Exposure coefficient")

Der "Exposure coefficient" $c_e(z)$ berücksichtigt die Wirkung der Rauigkeit des Geländes, der Topographie und der Höhe über Grund auf die mittlere Geschwindigkeit und die Turbulenz. Für ebenes Gelände $c_t(z) = 1$ gilt:

Gl. 2.41

$$c_e(z) = c_r^2(z) \left(1 + \frac{7}{\ln(z/z_0)} \right)$$

mit:	$c_r(z)$	= Rauigkeitskoeffizient (siehe Gl. 2.42)
------	----------	--

Der letzte Term in Gl. 2.41 entspricht dem Böenfaktor G aus Gl. 2.25. Man erhält ihn durch Ersetzen der Turbulenzintensität durch Gl. 2.10 und Ansetzen eines Peakfaktor $g = 3.5$. Der Rauigkeitskoeffizient $c_r(z)$ beinhaltet die Variabilität der mittleren Geschwindigkeit aufgrund der Rauigkeit des Geländes und der Höhe über dem Boden:

$$c_r(z) = k_T \ln(z/z_0) \quad \text{für } z_{min} \leq z \leq 200\text{m}$$

Gl. 2.42

$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \quad \text{für } z < z_{min}$$

mit k_T = Geländefaktor (siehe Tab. 2.2)
 z_{min} = Mindesthöhe (siehe Tab. 2.2)

Die Zahlenwerte für k_T , z_0 und z_{min} für die Bestimmung von $c_e(z)$ sind in Tab. 2.2 wiedergegeben. Die Werte des "Exposure coefficient" $c_e(z)$ für die vier unterschiedlichen Geländekategorien sind in Abb. 2.15 als Funktion der Höhe dargestellt.

Tab. 2.2: Geländekategorien mit entsprechenden Rauigkeitsparametern

Geländekategorie	k_T [-]	z_0 [m]	z_{min} [m]
I Offene See, Seen und flaches, ebenes Gelände ohne Hindernisse	0.17	0.01	2
II Landwirtschaftliche Fläche mit Hecken, einzelnen Gebäuden und Bäumen	0.19	0.05	4
III Vorstadtgebiete, Industriegebiete und Wälder	0.22	0.3	8
IV Stadtgebiete mit einer überbauten Fläche von mind. 15% und einer mittleren Gebäudehöhe > 15 m	0.24	1	16

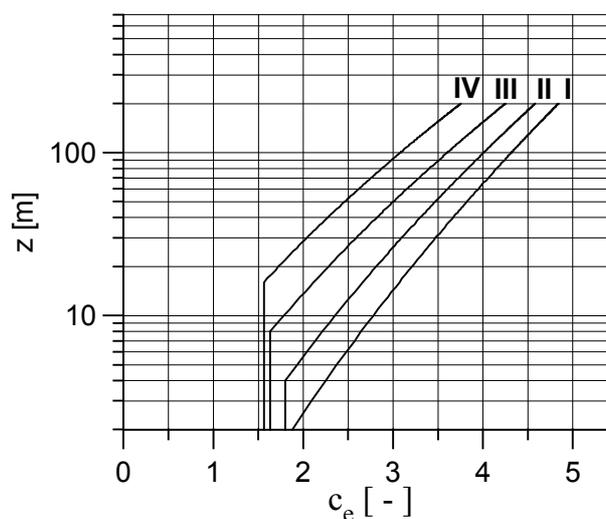


Abb. 2.15 "Exposure coefficient" c_e als Funktion der Höhe und der Geländekategorie

Äußere Druckbeiwerte

Die äußeren Druckbeiwerte $c_{p,e}$ eines Bauwerkes oder Teile eines Bauwerks sind in Abhängigkeit von der Größe der betrachteten Fläche A anzusetzen. Sie sind für die Flächengrößen 1 m^2 und 10 m^2 in Form von Tabellen angeben. Für Zwischengrößen gilt folgende Beziehung:

Gl. 2.43

$$\begin{aligned}
 c_{pe} &= c_{pe,1} && \text{für } A \leq 1 \text{ m}^2 \\
 c_{pe} &= c_{pe,1} + (c_{pe,10} - c_{pe,1}) \log_{10}(A) && \text{für } 1 \text{ m}^2 < A < 10 \text{ m}^2 \\
 c_{pe} &= c_{pe,10} && \text{für } A > 10 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Wände und Flachdächer:

Für Wandflächen variiert die Bezugshöhe z für die Bestimmung von $c_e(z)$ in Abhängigkeit von der Gebäudegeometrie. In Abb. 2.16 wird in drei Fälle unterschieden. Die Druckbeiwerte $c_{pe,1}$ und $c_{pe,10}$ werden für unterschiedliche Lastzonen an der Wandfläche definiert. Die Einteilung der Lastzonen und die Druckbeiwerte für Wandflächen sind in Abb. 2.17 und Tab. 2.3 enthalten. Für Flachdächer gelten Abb. 2.18 und Tab. 2.4.

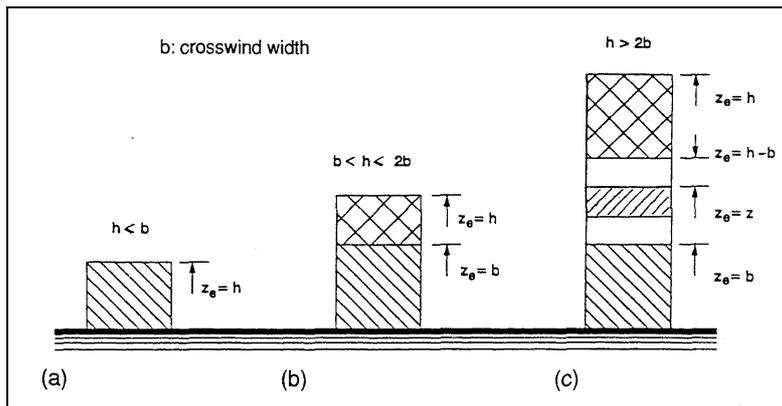


Abb. 2.16 Definition der Bezugshöhe z

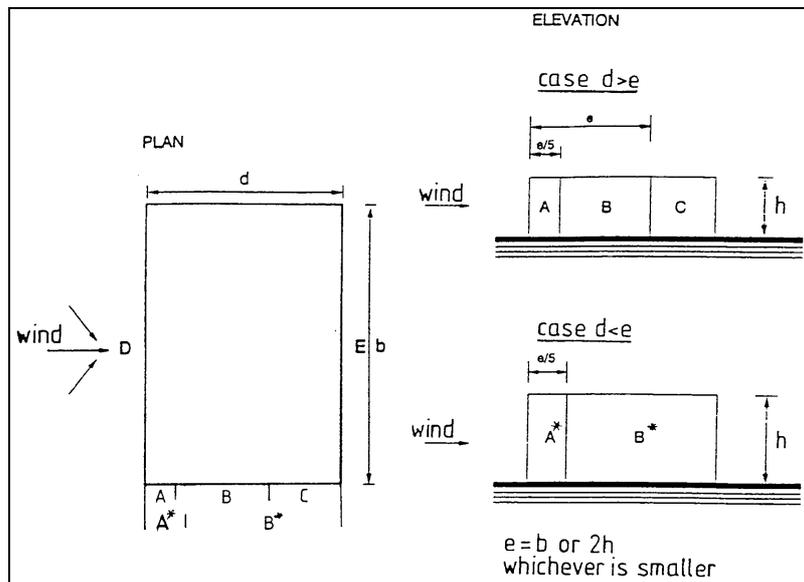
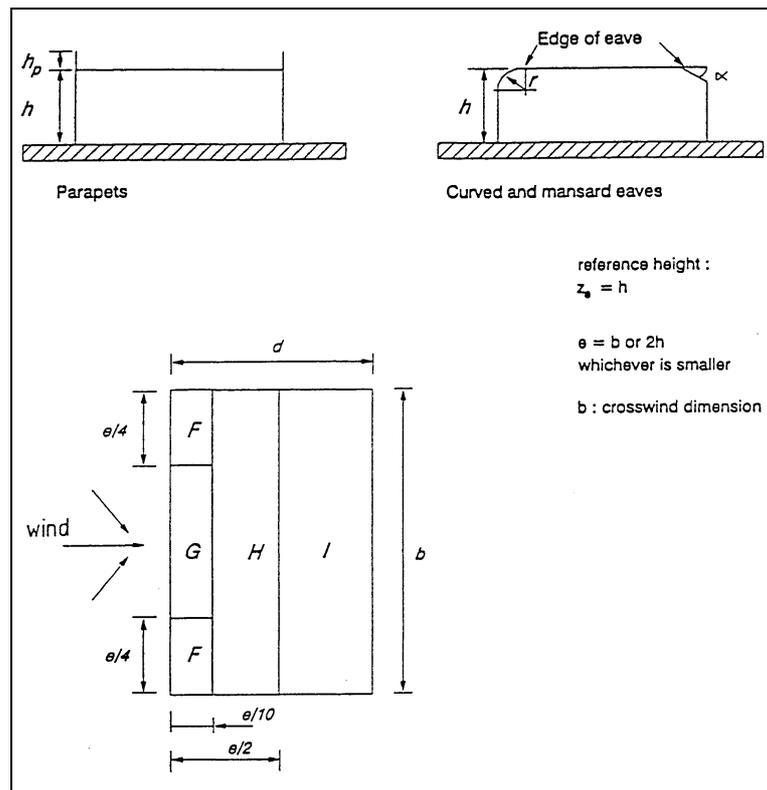


Abb. 2.17 Definition der Lastzonen an vertikalen Seitenwänden

Tab. 2.3 Externe Druckbeiwerte für vertikale Wände von Gebäuden mit rechteckigem Grundriß (nach EC1 (1994))

d/h	A, A*		B, B*		C		D		E	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
≤ 1	-1.0	-1.3	-0.8	-1.0	-0.5		+0.8	+1.0	-0.3	
≥ 4	-1.0	-1.3	-0.8	-1.0	-0.5		+0.6	+1.0	-0.3	

**Abb. 2.18** Definition der Lastzonen an Flachdächern**Tab. 2.4** Externe Druckbeiwerte für Flachdächer (nach EC1 (1994))

	Zone							
	F		G		H		I	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
Traufe scharfkantig	-1.8	-2.5	-1.2	-2.0	-0.7	-1.2	±0.2	

2.4.7 Anmerkungen zur ENV 1991-2-4 (1994) und zum Entwurf der neuen DIN 1055 Teil 4:

Der ENV 1991-2-4 (1994) wird das in Abschnitt 2.4.2 erläuterte Böenkonzept zugrunde gelegt. GEURTS ET AL (2001) haben die unterschiedlichen Quellen der aerodynamischen Beiwerte zusammengestellt. Die aerodynamischen Beiwerte für Wände und Dächer quaderförmiger Baukörper entstammen der Datensammlung von COOK (1990) und den Arbeiten von STATHOPOULOS (1980). Letzterer ermittelte auch den Zusammenhang zwischen

der Höhe des Lastbeiwertes und der Größe der betrachteten Teilfläche. Ein ähnlicher funktionaler Zusammenhang zwischen Flächengröße und Lastbeiwert ist auch in der kanadischen Norm NBCC (1990) verankert.

In der Datensammlung von COOK (1990) sind Werte aus unterschiedlichen Windkanalstudien enthalten. Ein Teil dieser Daten wurde mit Hilfe der vereinfachten Cook-Mayne-Methode bestimmt und mit Hilfe des sog. "Pseudo steady format" (Division des Lastbeiwertes nach dem Cook-Mayne-Verfahren durch den Böigkeitsfaktor G) auf eine "Mittelwertähnliche" Form für die Anwendung im Böenkonzept gebracht. Die angewendeten Böigkeitsfaktoren G beruhen hierbei auf der TVL-Formel. In die ENV 1991-2-4 (1994) sind somit unterschiedliche Datenquellen eingeflossen und beinhalten auch Beiwerte, welche unter der Berücksichtigung gebäudeinduzierter Turbulenz ermittelt wurden.

Eine wesentliche Neuerung der ENV 1991-2-4 im Vergleich zur früheren DIN 1055 Teil 4 (1986) besteht im Windprofil, welches das Stufenprofil der DIN ablöst und nicht mehr ein einziges Profil für ganz Deutschland vorsieht. Deutschland ist nach ENV 1991-2-4 (1994) in 4 Windlastzonen unterteilt, und ein Grundwert der Windgeschwindigkeit $\bar{u}_{ref,0}$, in einer Höhe $z = 10$ m (Gl. 2.39) für ein Gelände der Kategorie II wird vorgegeben. Die 4 Geländekategorien modifizieren den anzusetzenden Bemessungsstaudruck im Vergleich zur DIN erheblich und tragen den in bebauten Gebieten zu erwartenden Lastminderungen Rechnung. Die Überprüfung inwiefern durch diesen Ansatz die Bemessungswindlasten für Gebäude wirtschaftlich und sicher bestimmt werden können, ist eines der Ziele dieser Arbeit.

Der Neuentwurf der DIN 1055-4 (2001) geht vereinfachend von einem einheitlichen Windprofil der Kategorie II für das Binnenland aus. Für bebaute Gebiete können Mischprofile, die sich beim Übergang vom unbebauten zum bebauten Gebiet auszubilden beginnen, angesetzt werden. Weitere Abweichungen im Vergleich zur ENV 1991-2-4 sind auch zum Teil bei den aerodynamischen Beiwerten vorzufinden. An entsprechender Stelle wird auf die Konsequenzen dieser Abweichungen näher eingegangen.

2.5 Ergebnisse bisheriger Untersuchungen

2.5.1 Vorbemerkungen

Grundsätzlich muß beim Übergang vom unbebauten zum bebauten Gebiet die Entwicklung der internen Grenzschicht beachtet werden, die bei einem plötzlichen Rauheitswechsel eintritt. Es findet eine allmähliche Anpassung der Grenzschicht an die neuen Rauigkeitsverhältnisse statt. Dieser Prozeß schreitet mit zunehmender Entfernung vom Rauigkeitswechsel über die Höhe fort, wobei der bereits vollständig an die neue Rauigkeit angepaßte, untere Bereich der Grenzschicht als interne Grenzschicht bezeichnet wird. Der darüber liegende Bereich wird nach einem Übergangsbereich weiterhin von den vorherigen Rauigkeitsverhältnissen geprägt. Ein Modell zur Beschreibung der internen Grenzschicht wurde von FRIEDRICH, PLATE und EMEIS (1989) vorgestellt. Für die Windlasten auf Bauwerke ist es vor allem für hohe, aus der Bebauung herausragende Gebäude von Interesse, ob sie komplett in der internen

Grenzschicht liegen oder ob Teile des Gebäude einer Anströmung entsprechend des unbebauten Gebietes ausgesetzt sind. Die vorliegende Studie beschränkt sich auf den Fall von Gebäuden die sich komplett innerhalb der internen Grenzschicht des bebauten Gebietes befinden.

2.5.2 Windfeld und Windlasten in bebauten Gebieten

Die derzeit gültigen Bemessungsvorschriften basieren ausschließlich auf Windkanalversuchen an Einzelgebäuden. Die Einbeziehung der umgebenden Rauigkeit des Bauwerkes anhand des Bemessungsstaudruckes durch die Variation des "Exposure factors" c_e wurde im vorangegangenen Abschnitt erläutert. Hierdurch wird zwar die Wirkung umgebender Bebauung auf das globale Windfeld bei der Bemessung berücksichtigt, es wird jedoch die unmittelbare Wirkung direkt benachbarter Gebäude auf die Druckverteilung am zu bemessenden Gebäude vernachlässigt. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, da einerseits innerhalb der "Lebensdauer" eines Gebäudes mit Veränderungen in der direkten Umgebung durch Neubau, Umbau oder Abriß von Gebäuden gerechnet werden muß, andererseits es jedoch sehr unwahrscheinlich ist, daß ein Gebäude durch die komplette Veränderung des umliegenden Geländes einer Anströmung ausgesetzt wird, welche nicht mehr einer bebauten Umgebung entsprechen würde.

Eine wesentliche Kenngröße zur Quantifizierung des Rauigkeitseinflusses auf die Grenzschicht in Bodennähe ist die Rauigkeitslänge z_0 , die mit zunehmender Rauigkeit größere Werte annimmt. In der Literatur existieren von unterschiedlichen Autoren Klassifizierungen von Geländekategorien und Empfehlungen für z_0 -Werte. Im Hinblick auf bebaute Gebiete sind diese Angaben jedoch oft sehr pauschal und unterscheiden sich deutlich voneinander. In Tab. 2.5 sind daher nur zwei Quellen aufgeführt, um einen Vergleich zu den Werten der ENV 1991-2-4 (1994) in Tab. 2.2 zu geben. Es wird deutlich, daß die Werte der ENV 1991-2-4 auf der sicheren Seite liegend eher etwas niedrig angesetzt wurden.

Tab. 2.5 Rauigkeitslänge z_0 in bebauten Gebieten, Angaben in [m]

	WIERINGA (1991)	COOK (1985)
Vorstadt	0.4 – 0.7	0.3
Stadt (regelmäßig bebaut)	0.7 – 1.5	0.8

Für unterschiedliche bebaute Gebiete wurden von BADDE (1994) ebenfalls z_0 -Werte angegeben (siehe Tab. 2.7).

In Abschnitt 2.1 wurde bereits erwähnt, daß die Annahme $\sigma_w/u_* = 2.5$ für bebauten Gebiet nicht zutrifft. THEURER (1993) weist darauf hin, daß das Verhältnis σ_w/u_* im Gegensatz zu Gl. 2.9 nicht konstant ist, sondern bei ansteigenden z_0 -Werten abnimmt. Diese Tendenz zeigen auch von ihm zusammengestellte Daten aus der Literatur. ROTACH (1995) ermittelte aus Messungen in einem Stadtgebiet einen Wert für σ_w/u_* von 1.7. Dies bedeutet, daß die Anwendung von Gl. 2.10 streng genommen nur für Gebiete mit geringer Rauigkeit erfolgen sollte, dort wo die Annahme $\sigma_w/u_* = 2.5$ näherungsweise gilt.

Eine der ersten systematischen Untersuchungen von Windlasten in bebauten Gebieten wurde von HUSSAIN und LEE (1980) durchgeführt. Ihre wesentlichen Resultate wurden auch von COOK (1990) kurz und übersichtlich zusammengefaßt. Eines ihrer wichtigsten Ergebnisse ist, die Definition von drei Strömungszuständen entsprechend einem Ansatz nach MORRIS (1955). Diese sind in Abb. 2.19 skizziert.

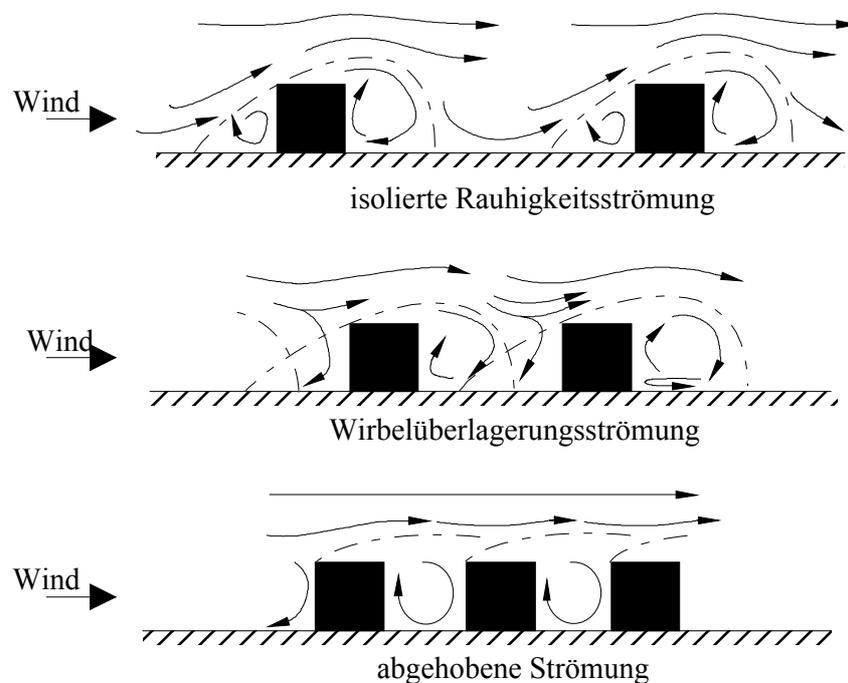


Abb. 2.19 Strömungszustände in bebauten Gebieten

Bei der “Isolierten Rauigkeitsströmung“ stehen die Gebäude weit auseinander, so daß sich die Umströmung eines Baukörpers analog zum Einzelgebäude ausbilden kann. Die Wirbelsysteme, welche sich bei der Umströmung ausbilden (siehe Abb. 2.4), werden nicht durch Nachbargebäude und deren Einfluß auf die Strömung behindert. Stehen im Gegensatz hierzu die Gebäude sehr dicht zusammen, bildet sich der Zustand der “Abgehobenen Strömung“ (oder auch “Quasi-glatte Strömung“) aus. In diesem Fall hebt die Strömung am Übergang zum bebauten Gebiet sozusagen ab und der obere Teil der dicht stehenden Gebäude wirkt als quasi-glatte Oberfläche. In den engen Gebäudezwischenräumen bilden sich stationäre Wirbelsysteme relativ unabhängig von der darüberliegenden Hauptströmung aus. Strömungssituationen, die zwischen diesen beiden beschriebenen Zuständen liegen, werden

als ‘‘Wirbelüberlagerungsströmung‘‘ (oder ‘‘Nachlaufinterferenz-Strömung‘‘) bezeichnet. Hier findet eine gegenseitige Beeinflussung der Wirbelsysteme der Gebäudeumströmung statt.

In der Literatur sind sehr unterschiedliche Definitionen auf der Basis geometrischer Kenngrößen des Rauheitsfeldes und seiner Elemente zu finden. Tab. 2.6 gibt die von BADDE (1994) zusammengestellten Literaturdaten wieder.

Tab. 2.6 Definitionen der Stömungsregime (aus BADDE (1994))

Autor	isolierte Rauhigkeitsströmung	Wirbelüberlagerungs- strömung	Abgehobene Strömung
Counihan (1971)	$0 < \lambda_{üb} < 0.25$	$0.25 < \lambda_{üb} < 1$	
Lee (1989)	$s > 2.5H_{Beb}$	$1.4 < s < 2.5H_{Beb}$	$s < 1.4H_{Beb}$
Röckle (1990)	(hier $H = H_{Beb}$) für $0.5 \leq \frac{B}{H} \leq 4$: $s \geq H + 1.4H \left(\frac{B}{H} \right)^{0.25}$	(hier $H = H_{Beb}$) für $\frac{B}{H} \leq 2$: $s \geq 1.25H + 0.15H \left(\frac{B}{H} \right)^{0.25}$ für $\frac{B}{H} > 2$: $s \geq 1.55H$	(hier $H = H_{Beb}$) für $\frac{B}{H} \leq 2$: $s < 1.25H + 0.15H \left(\frac{B}{H} \right)^{0.25}$ für $\frac{B}{H} > 2$: $s < 1.55H$
Wieringa (1991)	$s > 5 \text{ bis } 15H_{Beb}$	$s < 5 \text{ bis } 15H_{Beb}$	$s < 3H_{Beb}$
Theurer (1993)	$\lambda_{ff} < 0.1$	$0.1 < \lambda_{ff} < 0.25$	$\lambda_{ff} > 0.25$

mit: H_{Beb} = mittlere Bebauungshöhe
 s = Abstand zwischen den Gebäuden in Strömungsrichtung
 $\lambda_{üb}$ = Bebauungsgrad (Verhältnis der überbauten Fläche zur Gesamtfläche) [-]
 λ_{ff} = Frontflächenzahl (Verhältnis der zur Anströmung senkrechten Fläche zur gesamten betrachteten Fläche) [-]

Unterscheidungskriterien für die drei Strömungszustände sollen anhand der Untersuchungen von HUSSAIN und LEE (1980) erläutert werden. Die Bestimmung der mittleren Druckbeiwerte $c_{p,mean}$ in bebauter Umgebung wurden anhand einfacher Reihenstrukturen durchgeführt. Die Definition der drei Strömungszustände basiert auf der Änderung der Druckverteilung an den Vorder- und Rückseiten der verwendeten Gebäudemodelle. Diese wurden eingebettet in Bebauungsstrukturen bestehend aus Gebäuden, deren Abmessungen mit dem Meßgebäude identisch waren, wobei sowohl die Bebauungsdichte, als auch das Anordnungsmuster variiert wurde. Als Anordnungsmuster wurden zwei Varianten gewählt:

- normales Gitter – Gebäude stehen reihenförmig direkt hintereinander
- versetztes Gitter – Reihen sind versetzt, d. h. bei senkrechter Anströmung befindet sich erst ein Gebäude der übernächsten vorgelagerten Reihe direkt vor dem betrachteten Gebäude

In Abb. 2.20 sind die Ergebnisse für die beiden Anordnungsmuster dargestellt. Neben den über die Fläche gemittelten Druckbeiwerten der Vorder- und Rückseite sind die

Widerstandsbeiwerte C_D über dem Gebäudeabstand s/H_{Beb} sowie dem Bebauungsgrad λ_{ib} aufgetragen. Die Lastbeiwerte wurden in diesem Fall auf den Staudruck in Grenzschichthöhe bezogen.

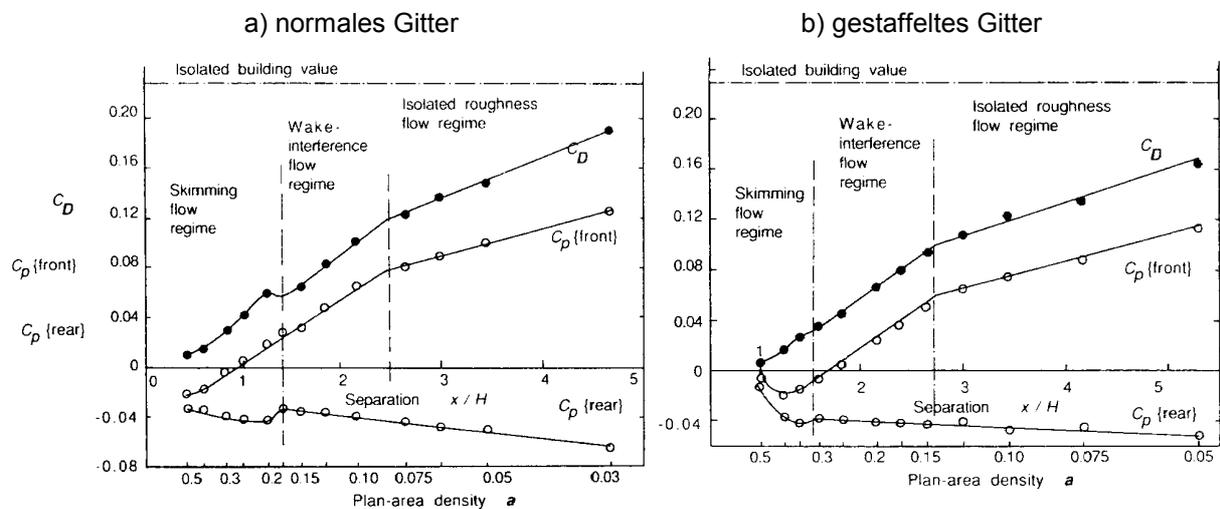


Abb. 2.20 Abhängigkeit der $c_{p,mean}$ - und C_D -Werte vom Gebäudeabstand (hier: x/H) und der überbauten Fläche λ_{ib} (hier: plan area density a) und Abgrenzung der Strömungsregime nach Hussain und Lee (aus COOK (1990))

Die Strömungszustände lassen sich anhand des Verlaufs des Widerstandsbeiwerte C_D definieren bzw. erkennen. Der Übergang von der Isolierten Rauheitsströmung (IRF) zur Wirbelüberlagerungsströmung (WIF) ist gekennzeichnet durch einen Knick im Verlauf der Druckbeiwerte an der Front. Dieser ist darauf zurückzuführen, daß der Druckverlauf an der Frontseite ab diesem Gebäudeabstand durch den Nachlauf des vorgelagerten Gebäudes beeinflusst wird. Der Übergang von der WIF zur Abgehobenen Strömung (SF) wird an einem Knick im Verlauf der Druckbeiwerte an der Rückseite deutlich. Dieser wird durch das Einsetzen des stationären Wirbels zwischen den Gebäuden hervorgerufen. Mit weiter enger werdendem Abstand gleichen sich die Drücke an Vorder- und Rückseite an, und der Widerstandsbeiwert geht gegen Null.

Eine wichtige Schlußfolgerung kann anhand des Vergleichs zwischen normalem Gitter und gestaffeltem Gitter gezogen werden. Die Gebäudeabstände, bei welchen der Übergang vom einen zum anderen Strömungszustand eintritt, bleiben nahezu gleich, während der Bebauungsgrad sich entsprechend ändert. Dies bedeutet, daß der Abstand zum nächstgelegenen Gebäude ein entscheidender Faktor für Windlasten in bebauten Gebieten ist.

2.5.3 Klassifizierung von Bebauungsstrukturen

Die Ergebnisse der Untersuchungen von BADDE (1994) im Hinblick auf die Parametrisierung von Bebauungsstrukturen werden in Tab. 2.7 wiedergegeben. Es werden 10 unterschiedliche Typen städtischer Bebauungsstrukturen unterschieden. Auffallend sind die Unterschiede in den z_0 -Werten zwischen den angegebenen Werten und jenen in Klammern. Es lassen sich in der Literatur sehr unterschiedliche Angaben für z_0 für bebauten Gebiete finden bzw. ableiten

(siehe z. B. auch THEURER (1993)), die in Tab. 2.7 enthaltenen Werte geben eine Auswahl dieser Angaben wieder.

Basierend auf der von BADDE (1994) durchgeführten Klassifizierung von Bebauungsstrukturen in deutschen Städten können drei grundlegende Typen von bebauten Gebieten unterschieden werden, welche wiederum für mehrere der Strukturen in Tab. 2.7 repräsentativ sind:

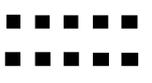
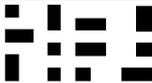
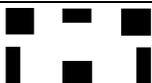
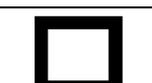
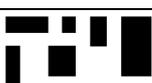
Typ I: Regelmäßige reihenförmige Anordnung mit gleichbleibenden Gebäudedimensionen und Gebäudeabständen

Typ II: Unregelmäßige Anordnung mit variierenden Gebäudeabmessungen und Gebäudeabständen

Typ III: Regelmäßige Anordnung der Gebäude in einer innerstädtischen Blockrandbebauung

Die Auswahl der Windkanalmodelle für die vorliegende Studie erfolgte anhand dieser Unterscheidung.

Tab. 2.7 Charakteristische Stadtstrukturen und ihre zugehörigen geometrischen Kenngrößen (nach BADDE (1994))

Struktur	Nutzung	Dachform	z_0	Δa	H_{Beb}	σ_H / H_{Beb}	\bar{L} / \bar{B}	\bar{L} / H_{Beb}	$\lambda_{üb}$	λ_{ff}
1 	Neubaugebiet mit Einfamilienhäusern 1 - 2 geschossig	vorwiegend Satteldach, selten Flachdach	0.1 - 0.3 (1.3)	4 - 10	8 - 10	~ 0	~ 1	~ 1.5	0.1 - 0.2	~ 0.1
2 	Mischgebiet mit Wohnhäusern 1 - 3 geschossig	vorwiegend Satteldach, selten Flachdach	0.1 - 0.3 (1.4)	1 - 2.5	8 - 12	< 0.2	~ 1	$\sim 1.5 - 2.5$	0.15 - 0.25	~ 0.1
3 	Wohnblocksiedlung, Reihen- od. versetzte Anordnung 3 - 5 geschossig	vorwiegend Satteldach, selten Flachdach	~ 0.3 (1.5)	3 - 5	12 - 20	< 0.2	< 0.5	$\sim 1 - 2$	0.1 - 0.25	0.1 - 0.25
4 	Wohnsiedlung, Hochhäuser und Wohnblöcke 4 - 15 geschossig	Satteldach Flachdach	> 0.5	1 - 2	> 15	0 - 0.5	< 0.5	$\sim 0.7 - 1.5$	0.1 - 0.2	0.15 - 0.3
5 	Kulturelle Anlagen Kirchen, Schulen usw. in Wohnsiedlungen	Satteldach Flachdach	0.3 - 1.5 (2.4)	zufällig	> 8	> 0.5	0.5 - 2.0	$\sim 2 - 5$	0.1 - 0.3	0.05 - 0.15
6 	Gebäudeblock mit Randbebauung in Stadtzentren 3 - 6 geschossig	vorwiegend Satteldach, selten Flachdach	~ 0.7 (2.1)	$\sim 1 - 3$	15 - 25	< 0.3	~ 1	$\sim 0.7 - 0.9$	0.3 - 0.7	-
7 	Innenstadtbereich, gem. Gebiete m. Parks, Hochhäusern, öffentl. Einrichtungen.	Satteldach Flachdach	0.3 - 0.7 (> 2)	-	> 15	< 0.4	~ 1	$\sim 1.5 - 2$	< 0.5	0.1 - 0.2
8 	Gewerbe- und Industriegebiete, vorwiegend Reihenbebauung 2 - 5 geschossig	vorwiegend Flachdach, Satteldach m. geringer Neigung	~ 0.3 (0.6)	-	5 - 15	< 0.5	< 1	$\sim 2 - 5$	0.3 - 0.4	0.05 - 0.2
9 	Industriegebiete mit Tanks	vorwiegend Flachdach	~ 0.5 (1.6)	1 - 2	10 - 25	< 0.5	~ 1	$\sim 0.5 - 1.5$	0.1 - 0.4	0.1 - 0.2
10 	Industriepark gestreute Bebauung 1 - 4 geschossig	vorwiegend Flachdach, selten Satteldach	0.3 - 0.5 (1.6)	~ 1	5 - 15	0.3 - 0.5	~ 1	$\sim 2 - 7$	0.2 - 0.4	0.05 - 0.2

mit

 H = Gebäudehöhe [m] B = Gebäudebreite [m] L = Gebäudelänge [m] H_{Beb} = mittlere Höhe der Bebauung \bar{x} = Mittelwert der Größe x σ_x^2 = Varianz der Größe x (σ = Standardabweichung) Δa = Verhältnis von größerem zu kleinerem Abstand zwischen den Gebäuden [-] $\lambda_{üb}$ = Bebauungsgrad (Verhältnis der überbauten Fläche zur Gesamtfläche) λ_{ff} = Frontflächenzahl (Verhältnis der zur Anströmung senkrechten Fläche zur gesamten betrachteten Grundfläche)

2.6 Stochastische Sicherheitskonzepte

Zuverlässigkeitstheoretische Ansätze ermöglichen es, den Zusammenhang zwischen der Bemessungswindlast, welche in den Bemessungsvorschriften spezifiziert wird, und der tatsächlichen zu erwartenden Windlast rechnerisch herzustellen. Grundlage hierfür ist die Annahme, daß sowohl die einwirkenden Lasten L , als auch die vorhandenen Belastbarkeiten R zufallsverteilte Größen sind. Stochastische Bemessungskonzepte werden z. B. von PLATE (1993) ausführlich aufgezeigt und beschrieben. Grundlagen und Anwendungsbeispiele werden auch von SCHUELLER umfassend dargelegt (1981) Ein sehr effektives Verfahren stellt die "Methode der zweiten Momente" dar. Die Anwendung dieses Verfahrens zur Bestimmung des Sicherheitsniveaus spezifizierter Bemessungswindlasten wurde beispielhaft von DAVENPORT (1983) erläutert. Nachfolgend werden die Grundlagen dieser Methode kurz dargestellt.

2.6.1 Methode der zweiten Momente

Ausgehend von den normalverteilten bzw. log-normalverteilten, unkorrelierten Zufallsvariablen Last L und Belastbarkeit R , wird der Sicherheitsabstand S definiert:

Gl. 2.44

$$S = R - L \text{ oder } S = \ln R - \ln L = \ln \frac{R}{L}$$

mit: S = Sicherheitsabstand
 L = Belastung
 R = Belastbarkeit

Für ein Bauwerk oder Bauteil bedeutet dies, daß Versagen eintritt für $S < 0$. Da die Summe normalverteilter Variablen ebenfalls wieder normalverteilt ist, kann die Wahrscheinlichkeit des Versagens über die Normalverteilung berechnet werden.

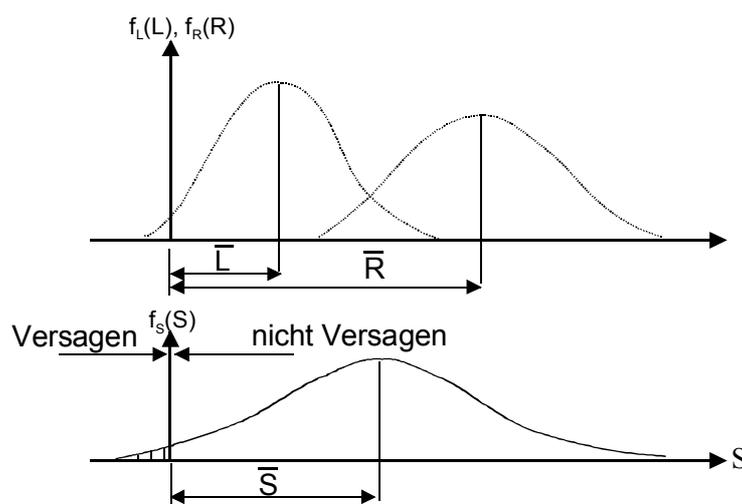


Abb. 2.21 Zur Definition des Sicherheitsabstandes und seiner Verteilung

Ausgehend von einer Log-Normalverteilung ist der Sicherheitsindex β definiert als Verhältnis des Mittelwertes des Sicherheitsabstandes $\overline{\ln R/L}$ zu seiner Standardabweichung $\sigma_{\ln R/L}$.

Gl. 2.45

$$\beta = \frac{\overline{\ln R/L}}{\sigma_{\ln R/L}}$$

mit $\beta =$ Sicherheitsindex

Folgende Beziehungen gelten für die Berechnung des Mittelwertes und der Standardabweichung einer Log-Normalverteilung aus den Parametern der Normalverteilung:

$$\overline{\ln x} = \ln \frac{\bar{x}}{\sqrt{1+V_x^2}}$$

$$\sigma_{\ln x}^2 = \ln(1+V_x^2)$$

mit $V_x =$ Variationskoeffizient von x , $V_x = \frac{\sigma_x}{x}$

Setzt man diese Beziehungen in Gl. 2.45 ein, erhält man:

Gl. 2.46

$$\beta = \frac{\ln \left(\frac{\overline{R} \sqrt{1+V_L^2}}{\overline{L} \sqrt{1+V_R^2}} \right)}{\sqrt{\ln(1+V_L^2) + \ln(1+V_R^2)}}$$

Mit den Vereinfachungen $V_x^2 \approx \ln(1+V_x^2)$ für kleine Werte von V_x^2 und $V_R \approx V_L$ ergibt sich somit:

$$\frac{\sqrt{1+V_L^2}}{\sqrt{1+V_R^2}} \approx 1$$

Gl. 2.46 vereinfacht sich somit:

Gl. 2.47

$$\beta = \frac{\ln(\overline{R}/\overline{L})}{\sqrt{V_L^2 + V_R^2}}$$

Für $1/3 < V_R/V_L < 3$ kann $\sqrt{V_R^2 + V_L^2}$ durch $0.75(V_R + V_L)$ angenähert werden. Hierdurch können die Variablen für die Belastung L und die Belastbarkeit R voneinander getrennt werden:

Gl. 2.48

$$\bar{R} e^{-0.75 \beta V_R} = \bar{L} e^{0.75 \beta V_L}$$

Dies hat den Vorteil, daß die zu erwartenden Lasten unabhängig von den Unsicherheiten der Belastbarkeit auf einem bestimmten Sicherheitsniveau spezifiziert werden können.

2.6.2 Anwendung auf winderzeugte Bauwerkslasten

Analog zur "Windlastkette" in werden Bemessungswindlasten nicht nur in der ENV 1991-2-4 (1994) (Gl. 2.37) sondern auch in zahlreichen anderen nationalen Bemessungsvorschriften als Produkt verschiedener Einflußfaktoren spezifiziert. Diese können als statistisch unabhängige Variablen aufgefaßt werden. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 2.22 für die einzelnen Glieder der Bestimmungsgleichung für Windlasten nach der kanadischen Bemessungsvorschrift (NBCC) dargestellt (DAVENPORT (1983)). Die Windlast w und ihre statistische Verteilung ergibt sich somit aus den statistischen Verteilungen der verschiedenen Einflußgrößen. Der zentrale Grenzwertsatz der Statistik besagt, daß die aus der Summe oder dem Produkt unabhängiger Faktoren berechnete Windlast gegen eine Normal- bzw. Log-Normalverteilung tendiert. Die ersten beide Momente der Verteilungen reichen in diesem Falle aus, um die statistischen Verteilungen zu beschreiben (DAVENPORT (1983)).

DAVENPORT (1983) fügte bei seiner Betrachtung den Modellunsicherheitsfaktor μ ein, um eventuelle Unsicherheiten oder Fehler bei der Übertragung von aerodynamischen Beiwerten vom Modell in die Natur oder bei der Verwendung gemessener Größen (z. B. q) zu berücksichtigen.

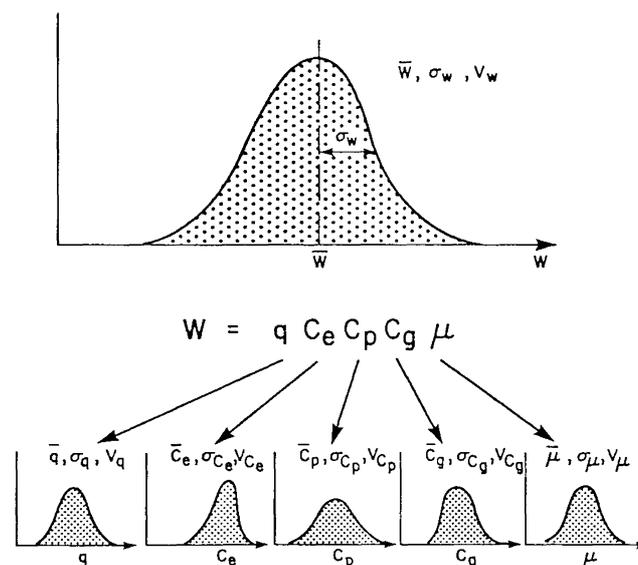


Abb. 2.22 Statistische Größen der Windlastbestimmung

Für den Mittelwert der Windlast \bar{w} und den Variationskoeffizient der Windlast V_w^2 gelten folgende Beziehungen:

$$\bar{W} = \bar{q} \bar{c}_e \bar{c}_p \bar{\mu} \quad \text{Gl. 2.49}$$

und

$$(1+V_w^2) = (1+V_q^2) (1+V_{ce}^2) (1+V_{cp}^2) (1+V_\mu^2)$$

Setzt man nun die mit der Methode der zweiten Momente berechneten Lasten mit den nach der ENV 1991-2-4 berechneten Lasten gleich, so ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$W_s = q_s c_{e,s} c_{p,s} \tau_p = \bar{q} \bar{c}_e \bar{c}_p \bar{\mu} e^{0.75\beta\sqrt{(1+V_q^2)(1+V_{ce}^2)(1+V_{cp}^2)(1+V_\mu^2)-1}} \quad \text{Gl. 2.50}$$

mit: τ_p = partieller Sicherheitsbeiwert
Index s = in Bemessungsvorschrift spezifizierte Werte

Hierbei ergibt sich der linke Teil von Gl. 2.50 aus der Berechnungsformel nach ENV 1991-2-4 (Gl. 2.37) multipliziert mit dem partiellen Sicherheitsfaktor τ_p . Der Index s wird hier verwendet, um die nach ENV 1991-2-4 "spezifizierten" Werte zu kennzeichnen. Den rechten Teil der Gleichung erhält man aus Gl. 2.49 eingesetzt in den rechten Teil von Gl. 2.48.

Löst man Gl. 2.50 nach in einer Bemessungsvorschrift zu spezifizierenden Druckbeiwerten $c_{p,s}$ auf, so erhält man eine Beziehung für den Druckbeiwert c_p , basierend auf den Prinzipien der Methode der zweiten Momente, dieser wird daher mit dem Index smr (= Second Moment Reliability) versehen:

$$c_{p,smr} = \frac{1}{\tau_p} \frac{\bar{q}}{q_s} \frac{\bar{c}_e}{c_{e,s}} \bar{\mu} \bar{c}_p e^{0.75\beta\sqrt{(1+V_q^2)(1+V_{ce}^2)(1+V_{cp}^2)(1+V_\mu^2)-1}} \quad \text{Gl. 2.51}$$

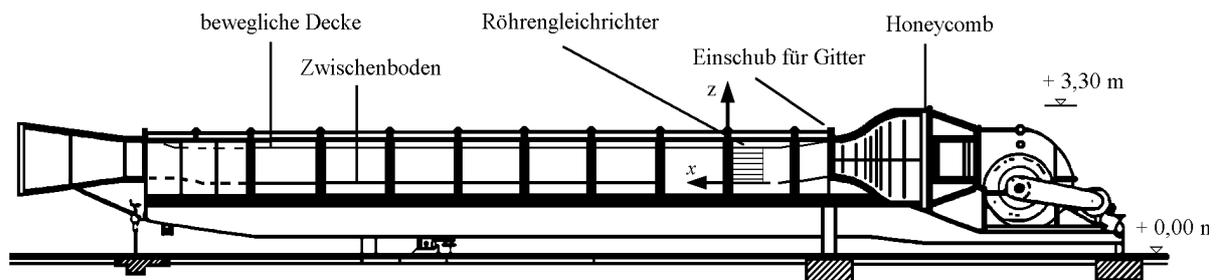
3 Experimentelle Untersuchungen im Windkanal und in Natur

Nachfolgend werden der Versuchsaufbau, die Meßeinrichtungen und die Datenauswertung beschrieben. Es wurde bereits erwähnt, daß ein Teil der umfangreichen Windkanaluntersuchungen im Rahmen des SFB 210 durchgeführt wurde. Die übernommenen Meßdaten wurden nach der gleichen Vorgehensweise wie die Meßergebnisse der vorliegenden Studie ausgewertet.

Die Längenangaben erfolgen in der vorliegenden Arbeit generell im Naturmaßstab. Die Modellabmessungen wurden entsprechend des festgelegten Maßstabes umgerechnet.

3.1 Windkanal und Modellmaßstab

Die Modellmessungen wurden am zum Grenzschichtwindkanal umgebauten Windwellengerät des ehemaligen IHW vorgenommen. Dieser Windkanal ist mit seinen Abmessungen und den Positionen der verschiedenen Einbauten in Abb. 3.1 dargestellt.



Höhe am Gleichrichter:	0.82 m	Höhe über Meßstrecke:	bis 0.92 m
Länge der Meßstrecke:	10.50 m	Kanalbreite:	1.80 m
Position der Vortexgeneratoren:	$x = 0.50$ m	Position der Sägezahnschwelle:	$x = 1.30$ m
Modellebene:	$x = 8.30$ m		

Abb. 3.1 Grenzschichtwindkanal (Windwellengerät des ehemaligen IHW)

Zur Kompensation der Verbauung des Kanalquerschnittes bei Modellen mit einer Querschnittsfläche $> 5\%$ ist der Windkanal mit einer beweglichen Decke ausgestattet. Diese wird nach jeder Veränderung am Modell so einreguliert, daß kein Druckgradient in Längsrichtung vorhanden ist.

Durch den Einbau von Vortexgeneratoren, Sägezahnschwelle und Legosteinen als Bodenrauigkeit können unterschiedliche Strömungsprofile erzeugt werden, welche den Strömungsfeldern über verschiedenen Geländetypen (offen bis stark bebaut) entsprechen. Für die vorliegenden Experimente wurden mit diesen Techniken die nachfolgend aufgeführten Eigenschaften der Grenzschicht eingestellt.

In Abb. 3.2 sind die Profile der mittleren Geschwindigkeit und der Turbulenzintensität dargestellt, wie diese sich aufgrund der Windkanaleinbauten (ohne Meßgebäude und Umgebungsmodell) in Modellebene entwickeln.

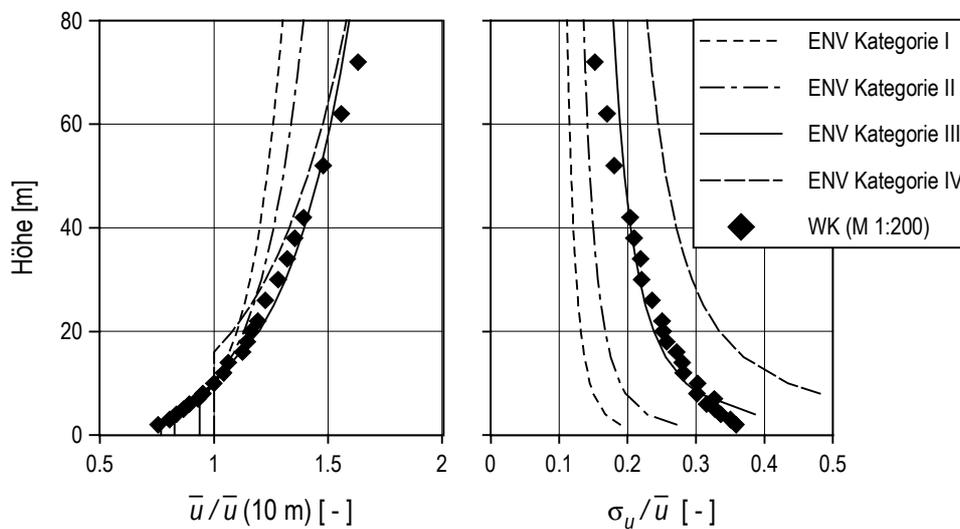


Abb. 3.2 Modellierte Anströmung im Windkanal

Die im Windkanal modellierten Anströmprofile wurden in einem Maßstab von 1:200 auf Naturmaße umgerechnet und sind in Abb. 3.2 zusammen mit den Profilen der 4 Geländekategorien der ENV 1991-2-4 aufgetragen. Es ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung im Verlauf der mittleren Geschwindigkeit und der Turbulenzintensität zwischen dem Gelände der Kategorie III (Vorstadt, Industriegebiet) und der Strömung im Windkanal.

In Abb. 3.3 ist der Verlauf des integralen Längenmaßes L_{ux} normiert mit der Grenzschichtdicke δ über die Höhe im Windkanal aufgetragen. Entsprechend der Angaben in der Literatur (z.B. ROBINS (1979) oder THEURER (1993)) weist L_{ux} ein Maximum bei $z/\delta \approx 0.3$ auf.

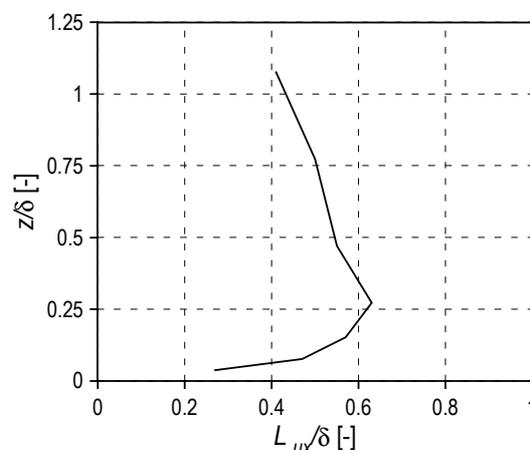


Abb. 3.3 Verlauf des integralen Längenmaßes L_{ux} über die Höhe

Die Größe L_{ux} wird häufig zur Normierung des Geschwindigkeitsspektrums verwendet. Wie in Kapitel 2 erläutert wurde, läßt sich mit Hilfe der Spektralen Dichte $S_u(f, z)$ der Geschwindigkeitsschwankungen eine Aussage über die Verteilung der Energie auf die verschiedenen Wirbelgrößen machen. Die Wirbelgrößen in Modell und Natur sollen möglichst maßstäblich sein. Die Verteilung der turbulenten Energie auf die verschiedenen Wirbelgrößen in Natur kann z. B. mittels des Karman-Spektrums wiedergegeben werden (siehe ESDU 85020):

Gl. 3.1

$$\frac{S_u(f, z)f}{\sigma_u^2} = f \left(\frac{f L_{ux}}{u(z)} \right) = \frac{4x}{(1 + 70.8x^2)^{5/6}}$$

mit: $x = \frac{f L_{ux}}{u(z)}$

In Abb. 3.4 ist das im Windkanal in einer Höhe von 20 m (Naturmaß, M 1:200) ermittelte Spektrum der Geschwindigkeitsschwankungen dem Karman-Spektrum gegenübergestellt. Es wird deutlich, daß die Spektren nahezu deckungsgleich in Natur und Modell sind.

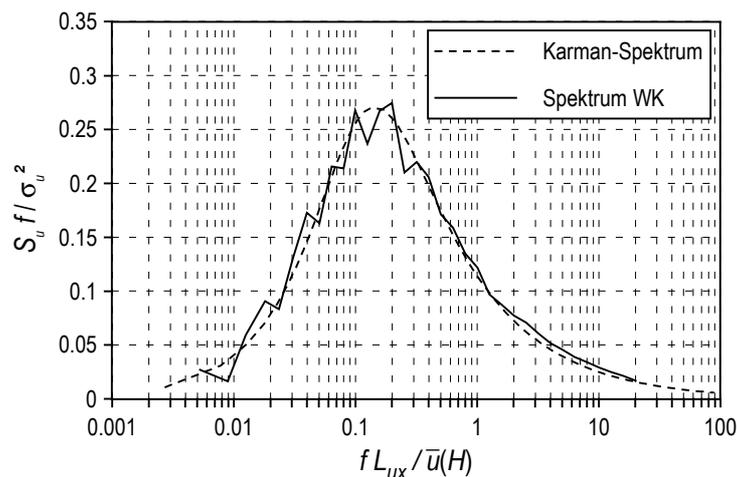


Abb. 3.4 Vergleich des Geschwindigkeitsspektrums der modellierten Anströmung mit dem Karman-Spektrum

Der Modellmaßstab aus dem Vergleich der turbulenten Längenmaße ergibt sich somit aus dem Verhältnis von L_{ux} in Natur und Modell. Die Angaben zu integralen Längenmaßen in der Natur umfassen jedoch eine enorme Bandbreite (z. B. ESDU 85020, COUNIHAN (1975), SMITH (1993)) auch wenn hierbei Werte für gleiche Höhen und Rauigkeiten betrachtet werden.

Bei der Bestimmung des Modellmaßstabes sind alle der genannten Größen einzubeziehen, er ist daher nicht eindeutig festzulegen. Er kann jedoch auf einen Bereich von 1:200 bis 1:300 eingegrenzt werden. Die Verwendung eines Maßstabes von 1:200 für die Gebäude- und Umgebungsmodelle erscheint daher angemessen und ist mit den Richtlinien der WTG (1993) vereinbar.

Die einzeln stehenden Meßgebäude werden maßgeblich der beschriebenen Anströmung ausgesetzt. Bei den Untersuchungen mit Umgebungsbebauung wird die Anströmung durch das Überströmen des Umgebungsmodells entsprechend verändert.

Alle nachfolgenden Längenangaben werden in Naturmaßen gegeben, wobei den Angaben für das Modell der o. g. Maßstab zugrunde liegt.

Die Rauigkeits-Reynoldszahl im Modell beträgt:

$$\text{Re} = \frac{u_* z_0}{\nu} = 65 > 5$$

mit: $\nu =$ kinematische Viskosität der Luft ($= 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)

3.2 Meßeinrichtungen und Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau und die verwendeten Meßeinrichtungen sind in der Prinzipskizze in Abb. 3.5 dargestellt. Für die Ermittlung von mittleren und fluktuierenden Größen kommen hierbei unterschiedliche Meßsysteme zum Einsatz.

Zur Messung der Geschwindigkeitsfluktuationen $u'(z)$ wurde ein Hitzdraht (DISA 55P01) mit einer DISA CTA (Constant Temperature Anemometry) 56C01 Einheit verwendet. Die Messung der mittleren Geschwindigkeiten $\bar{u}(z)$ und die Eichung des Hitzdrahtes wurden mit Hilfe eines Prandtlrohres vorgenommen. Die Meßwerte werden bei beiden Meßvorgängen mittels A/D-Karten digitalisiert und als Dateien gesichert. Die Aufnahme der Mittel- und RMS-Werte ist in der Steuerungssoftware für den Meßwagen integriert. Die Aufnahmefrequenz bei den Geschwindigkeitszeitreihen betrug 1000 Hz.

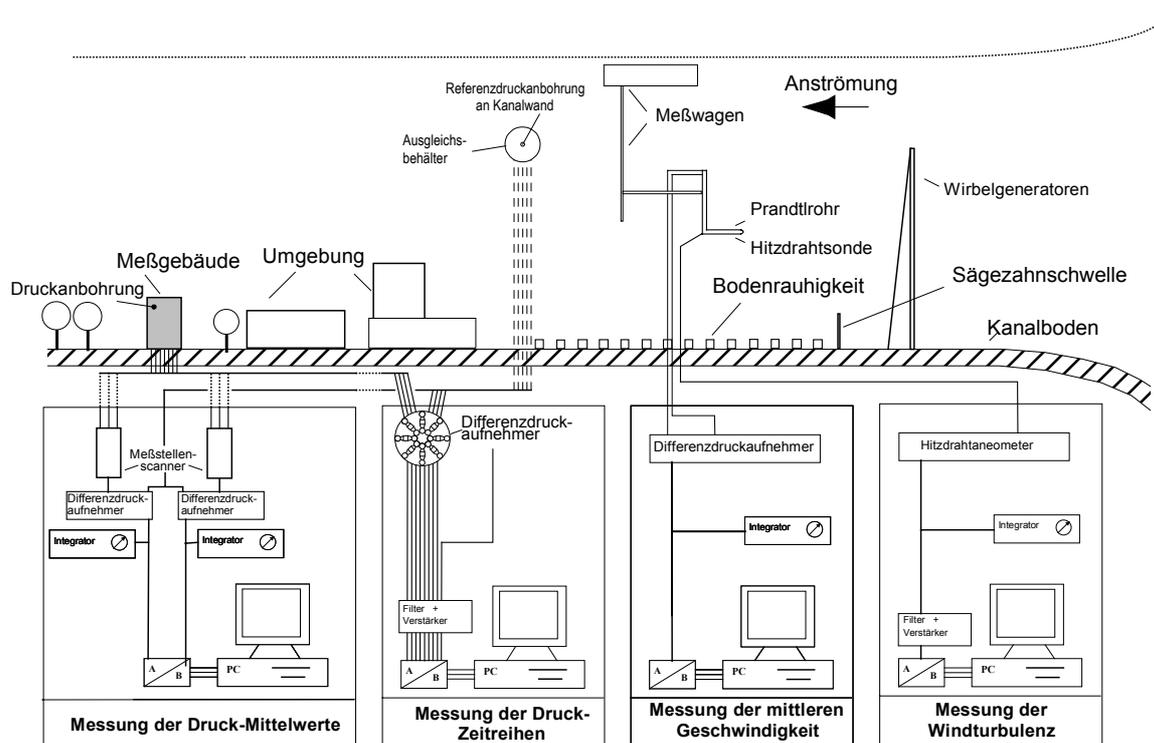


Abb. 3.5 Versuchsaufbau im Windkanal

Bei den Druckmessungen wurden verschiedene Druckaufnehmer für die Bestimmung der mittleren und fluktuierenden Drücke verwendet. Zur Messung der mittleren Drücke wurden zwei BARATRON-Differenzdruckaufnehmer der Firma MKS eingesetzt. Jede der Druckdosen wurde über einen Meßstellenscanner vom Typ SCANIVALVE mit je 48 Kanälen an die Meßpunkte am Modell angeschlossen.

Die Zeitreihenaufnahmen der anliegenden Drücke erfolgten durch direkten Anschluß der Meßpunkte an bis zu 15 Druckaufnehmer des Typs SETRA 239 über ein optimiertes Schlauchsystem, um eine möglichst geringe Verfälschung der Druckschwankungen durch Dämpfung oder Resonanzerscheinungen zu erreichen. Das verwendete optimierte Schlauchsystem ist in der Lage die anliegenden Druckschwankungen unverfälscht bis ca. 100 Hz zu übertragen (Einzelheiten hierzu siehe BADDE (1994)). Die benutzte A/D-Karte kann die Signale von 16 Kanälen gleichzeitig aufzeichnen ("Sample and hold"-Methode). Ein zeitlicher Versatz muß bei Korrelationsrechnungen oder "Online"-Integration (räumliche Integration über mehrere Meßpunkte) daher nicht berücksichtigt werden. Die Druckzeitreihen wurden mit einer Frequenz von 500 Hz aufgezeichnet.

Die Verwendung von zwei unterschiedlichen Meßsystemen bei der Bestimmung der mittleren und fluktuierenden Drücke erfolgte aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften und Vorteilen der Druckaufnehmer. Die Druckaufnehmer des Typs MKS BARATRON zeichnen sich durch eine äußerst geringe Temperaturabhängigkeit und einen stabilen Nullpunkt aus, sind jedoch zu träge hochfrequente Druckschwankungen zu erfassen. Die SETRA 239 Druckaufnehmer können aufgrund ihres geringen Volumens diese wiederum sehr genau wiedergeben, zeigen jedoch ein gewisse Anfälligkeit gegenüber Nullpunktschwankungen durch Temperatureinflüsse. Die gewählte Vorgehensweise kombiniert somit die Vorteile beider Systeme.

3.3 Meßgebäude und Umgebungsmodelle

Für die Messungen des anliegenden Druckes wurden 6 einfache Meßgebäude angefertigt (Tab. 3.1). Die Dachflächen wurden bei allen Gebäuden als Flachdach ausgebildet. Jeweils drei Modelle besitzen die gleiche Grundfläche. Diese ist bei der Modellserie K quadratisch (16 m · 16 m) und bei der Modellserie P rechteckig, mit einem großen Verhältnis der Seitenlängen (16 m · 53 m). Hierdurch können Änderungen des Wiederanlegeverhaltens der Strömung in bebauten Gebieten untersucht werden. Die Gebäudehöhen H wurde in den Schritten 16 m, 32 m und 64 m abgestuft. Abbildungen der Meßgebäude und die Lage der Meßpunkte sind im Anhang enthalten.

Tab. 3.1 Meßgebäude der Windkanaluntersuchungen (Angaben in Naturmaßen)

Gebäude- bezeichnung	Höhe [m]	Länge [m]	Breite [m]	Anzahl Meßpunkte		
				Dach	kurze Seite	lange Seite
P1	16	53	16	30	23	35
P2	32	53	16	30	43	54
P3	64	53	16	30	46	52
K1	16	16	16	39	43	43
K2	32	16	16	39	64	64
K3	64	16	16	39	95	95

Die Reynolds-Zahl der Umströmung im Modell beträgt unter Zugrundelegung der kleinsten Gebäudeabmessung:

$$\text{Re} = \frac{\bar{u}(H) L}{\nu} = 3.9 \cdot 10^5$$

mit: $\bar{u}(H)$ = Geschwindigkeit in Bauwerkshöhe
 L = kleinste Bauwerksabmessung (8 cm im Modell)
 ν = kinematische Viskosität der Luft (= $1.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)

Die Ähnlichkeitsanforderung $\text{Re} > 5 \cdot 10^4$ (Plate (1982)) wird erfüllt. Die Kanten der Gebäudemodelle wurden scharfkantig ausgebildet, um eindeutig fixierte Ablösebereiche zu erzeugen.

Die Umgebungsmodelle, in welche die o. g. Meßgebäude eingebettet wurden, wurden entsprechend der Klassifizierung in Abschnitt 2.5.3 gewählt. Die Wirkung dieser drei grundlegenden Strukturen auf die an den Meßgebäuden anliegenden Drücke wurde im Windkanal ermittelt. In Abb. 3.6 sind beispielhaft die drei unterschiedlichen Bebauungsstrukturen und die Position der Meßgebäude innerhalb der Bebauung dargestellt. Die geometrischen Kenngrößen entsprechend den Definitionen in Abschnitt 2.5 sind in Tab. 3.2 gegeben. Detaillierte Abbildungen der Bebauungsstrukturen und der untersuchten Varianten sind im Anhang enthalten.

Reihenbebauung (Typ I):

Die reihenförmigen Bebauungsstrukturen wurden aus Gebäude mit den gleichen Abmessungen wie Gebäude P1 angefertigt. Die in Abb. 3.6 eingezeichnete Position des Meßgebäudes wurde für alle Messungen beibehalten. Druckmessungen wurden an Meßgebäude P1, P2 und P3 vorgenommen. Folgende Varianten wurden untersucht:

- Anströmrichtungen 0° , 45° , 90° (in Abb. 3.6 Windrichtung 90° dargestellt)
- Gebäudeabstände $s/H_{Beb} = 1, 3, 7$ (in Abb. 3.6 $s/H_{Beb} = 3$ dargestellt)
- Meßgebäude P1, P2, P3

Die Abstände s zwischen den Gebäuden wurden entsprechend gewählt, um für jeden der drei Strömungszustände ein typisches Ergebnis zu erhalten. Weiterhin können aufgrund der recht einfachen Geometrie dieser Bebauungsmuster die wesentlichen für die Laständerungen verantwortlichen Kenngrößen bestimmt werden.

Industriebebauung (Typ II):

Im Gegensatz zu den gleichmäßigen Anordnungen in der Reihenstruktur wurde ein Modell mit variierenden Gebäudeabständen und Gebäudehöhen gewählt, um den in Abschnitt 2.5.3 beschriebenen Bauungs-Typ II zu realisieren. Ausgewählt wurde ein existierendes Industriegelände (BASF Ludwigshafen) und im Modell nachgebildet. Das Modell wurde streifenweise für 3 Windrichtungen (in Abb. 3.6 BASF 45° dargestellt) gebaut (siehe Anhang B). Die Messungen an diesem Modell wurden von BADDE (1994) vorgenommen und die Rohdaten für die vorliegende Studie zur Verfügung gestellt. In erster Linie werden die Messungen am Modell BASF 45° verwendet, da diese die Variabilität der Lasten aufgrund von Veränderungen im Nahfeld des Meßgebäudes durch den Wechsel der Position des Meßgebäudes beinhalten (in Abb. 3.6 Position B, G, H). Zudem kann der innere Kreis des Kernmodells unabhängig vom restlichen Modell gedreht werden und ermöglicht somit einerseits die Variation der Anströmrichtung am Meßgebäude unabhängig von der Ausrichtung des Gesamtmodells, andererseits entstehen durch Drehung auch unterschiedliche Situationen im Nahbereich des Meßgebäudes. Die mittlere Bauungshöhe H_{Beb} für das Modell BASF 45° beträgt 13 m (Tab. 3.2). Dies ist geringfügig niedriger als die Höhe H von Gebäude P1, dennoch wird dieser Fall nachfolgend als $H/H_{Beb} = 1$ bezeichnet. Insgesamt wurden folgende Varianten untersucht:

- Anströmrichtungen (bezogen auf das Meßgebäude):
0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°
- Meßpositionen B, G, H
- Meßgebäude P1, P2, P3

Durch den Wechsel der Meßpositionen und der Drehung um 360° des inneren Modellkreises wurden für die Meßgebäude P1, P2 und P3 Datensätze für jeweils 12 schräge und 12 senkrechte Anströmrichtungen ermittelt.

Blockrandbebauung (Typ III)

Um eine typisch innerstädtische Situation zu simulieren, wurde eine blockweise Anordnung der Gebäude gewählt. Die Länge der Blocks beträgt ca. 100 m, die Breite der Straßenschlucht entspricht der mittleren Bauungshöhe von 16 m. Die Höhenvariabilität der Gebäude wurde entsprechend den Angaben von THEURER (1993) gewählt. Als typische Dachneigung wurde ein Winkel von 45° angenommen. Die Position der Meßgebäude ist in Abb. 3.6 enthalten. Folgende Varianten wurden untersucht:

- Anströmrichtungen (bezogen auf das Meßgebäude): 0°, 45°, 90°
- Meßgebäude P1, P2, P3, K1, K2; K3

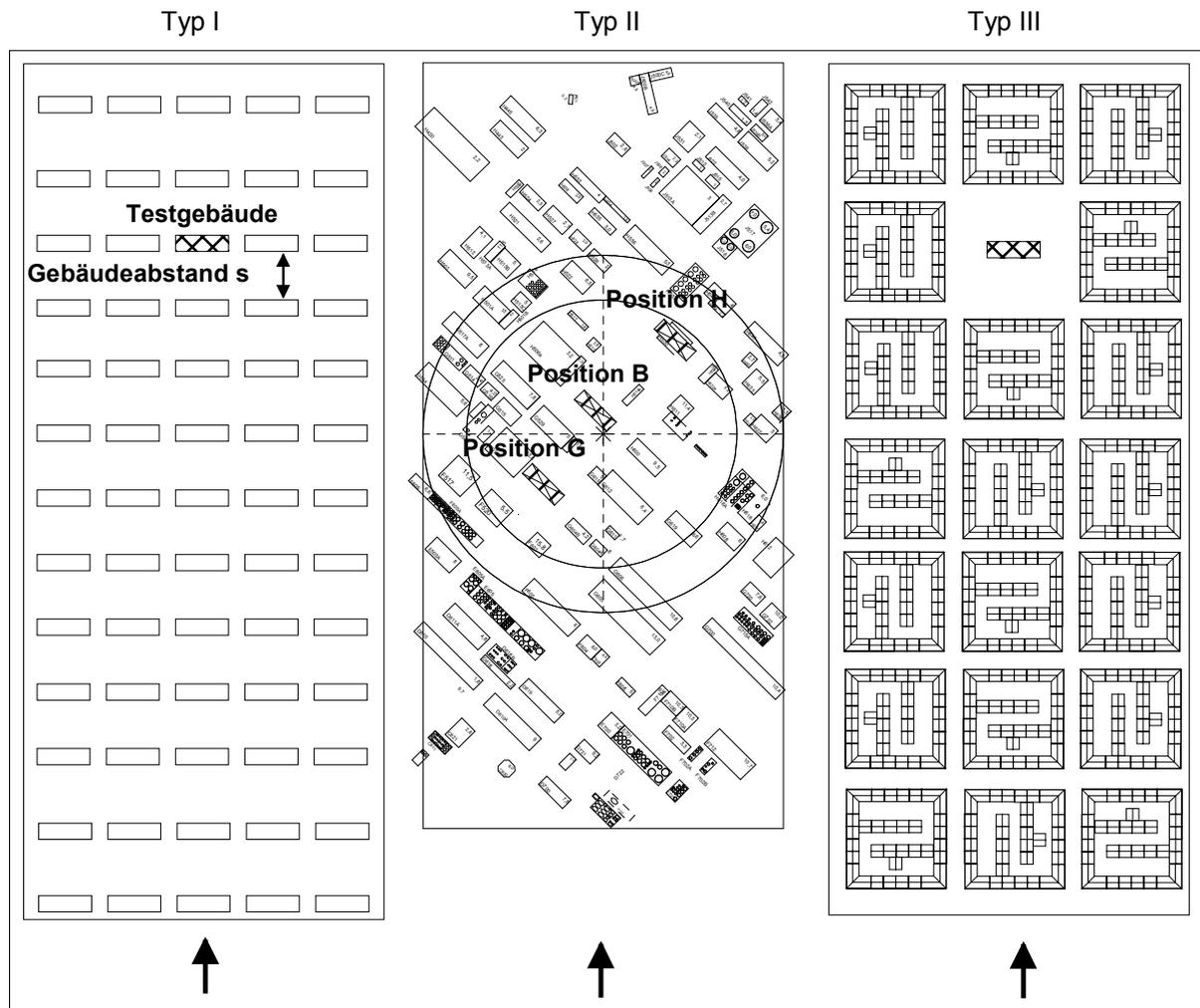


Abb. 3.6 Untersuchte Bebauungsstrukturen im Windkanalmodell

Tab. 3.2 Geometrische Kenngrößen der untersuchten Bebauungsstrukturen

Bebauungsart	Bebauungs- dichte $\lambda_{üb}$ [-]	Frontflächen- zahl λ_{ff} [-]	mittlere Höhe H_{Beb} [m]	Variabilität der Höhen σ_H/H_{Beb} [-]
BASF 0°	0.28	0.10	12.6	0.58
BASF 45°	0.25	0.20	13.0	0.49
BASF 90°	0.30	0.19	12.8	0.50
Reihenbeb. $s/H_{Beb} = 1$	0.38	0.38	16.0	0.00
Reihenbeb. $s/H_{Beb} = 3$	0.17	0.17	16.0	0.00
Reihenbeb. $s/H_{Beb} = 7$	0.10	0.10	16.0	0.00
Blockrandbebauung	0.46	0.38	16.0	0.21
FZU-Komplex – 230° (Naturmessungen)	0.21	0.17	13.8	0.70

3.4 Naturmessungen und Windkanalversuche am FZU-Gebäudekomplex

Für die Naturmessungen wurde der Gebäudekomplex des Forschungszentrums Umwelt (FZU) der Universität Karlsruhe ausgewählt. Der FZU-Gebäudekomplex liegt nordöstlich der Innenstadt von Karlsruhe im Erweiterungsbereich der Universität und besteht aus zwei Hauptgebäuden - Allgemeines Verfügungsgebäude (AVG) und Forschungszentrum Umwelt (FZU). Die Gebäude wurden im Sommer 1997 fertiggestellt und an die Universität übergeben. Während der Bauphase konnten einige Teile der Meßeinrichtungen (Druckmeßrohre, Kabel, Schlauchleitungen, etc.) bereits montiert werden. Erste Messungen erfolgten im Frühjahr 1998.

3.4.1 Lage und Eigenschaften des Testgebäudes

In Abb. 3.7 ist die Lage der Meßgebäude am nördlichen Stadtrand von Karlsruhe anhand eines Ausschnittes der topographischen Karte dargestellt. Es ist zu erkennen, daß vor allem die südliche Umgebung aus bebautem Gebiet besteht, während im Norden eher waldähnliche Flächen an den Gebäudekomplex angrenzen. Hohe Gebäude, welche aus der umgebenden Bebauung herausragen sind in Abb. 3.7 schwarz gekennzeichnet. Die übrigen Gebäudehöhen umfassen nicht mehr als 2 bis 4 Stockwerke. Diese Umgebung wurde für mehrere Richtungen im Windkanalmodell in einer Länge von 800 m (eingezeichnet in Abb. 3.7 sind beispielhaft die Richtungen 230° und 200°) im Maßstab 1:200 gebaut. Es wurden Messungen am Modell mit und ohne Vegetation durchgeführt. Die geometrischen Kenngrößen der Bebauung sind in Tab. 3.2 enthalten.

Die unmittelbare Umgebung der Meßgebäude ist in Abb. 3.8 dargestellt. Hierbei wird noch einmal deutlich, daß vor allem in südlicher Richtung Nachbargebäude unmittelbar an die Meßgebäude angrenzen. Weiterhin wird erkennbar, daß ein dichter Baumbewuchs in unmittelbarer Nähe der Meßgebäude vorhanden ist. Da einige Bäume teilweise die Höhe des AVG-Gebäudes ($H = 17\text{m}$) erreichen, ist von einem wesentlichen Einfluß bei der Umströmung und somit der winderzeugten Bauwerkslasten auszugehen. Die Lage der in Abb. 3.8 eingezeichneten Bäume entspricht relativ exakt der realen Situation, da Abb. 3.8 auf der Grundlage eines Planes des städtischen Gartenbauamtes angefertigt wurde. Die Lage der erhaltenswerten Bäume wurde im Vorfeld der Planung vermessen, um diese bei Positionierung und Ausrichtung der Gebäude zu berücksichtigen. Dieser exakte Plan des Baumbestandes wurde auch bei der Erstellung des Windkanalmodelles verwendet.

In Abb. 3.9 ist der Grundriß des Gebäudekomplexes mit Angabe der Bauwerkshöhen dargestellt. Die Hauptachse des größeren Gebäudes ist um ca. 4° gegen die Nordrichtung im Uhrzeigersinn verdreht. Beim AVG-Gebäude beträgt die Verschiebung 8° gegen den Uhrzeigersinn. Die beiden vier- und fünfstöckigen Hauptgebäude mit Flachdächern besitzen eine Höhe von 17 m bzw. 21 m. Der Verbindungsgang und der Zwischenbau umfassen zwei Stockwerke mit einer Gesamthöhe von ca. 10 m. Das obere Stockwerk des Verbindungsganges ist auf Stützen aufgeständert und ist seitlich geschlossen. Das untere Stockwerk des Verbindungsganges besitzt keine Seitenwände im Bereich zwischen dem

kreisförmigen Bau und dem FZU-Gebäude. Der untere Teil des Verbindungsgebäudes ist somit in diesem Bereich durchströmbar. Die Abmessungen der offenen Flächen betragen ca. 22 m in der Breite und 4 m in der Höhe.



Abb. 3.7 Lage der Testgebäude am nördlichen Stadtrand von Karlsruhe

Eine Ansicht der Westfassade des AVG-Gebäudes ist in Abb. 3.10 abgebildet. Die Hauptgebäude bestehen aus einer Stahlbetonkonstruktion mit massiven Außenwänden und glatten Außenflächen. Eine Ausnahme hiervon bilden die vorspringenden Treppenhäuser. Deren Ausbildung als verglaste, erkerförmige Vorbauten mit einer Tiefe von ca. 2.00m ist von Bedeutung für die Umströmung der Gebäude, da sie bei bestimmten Windrichtungen zu lokalen Ablöse- und Wiederanlegezonen der Strömung führen.

Die Dachgeschosse wurden an beiden Hauptgebäuden nicht über die gesamte Grundfläche der Gebäude ausgebildet. Es wurden an jedem Gebäude drei Dachterrassen angeordnet. Diese

befinden sich im Mittel- und in den Endbereichen. Die Außenwände umschließen die Dachterrassen, um den optischen Eindruck eines kubischen Körpers zu erhalten. In den Seitenwänden wurden im Bereich der Dachterrassen große, fensterartige Öffnungen angeordnet, welche in Abb. 3.10 an der Fassade links und rechts oben zu sehen sind. Die Umströmung der Dachkanten an den Schmalseiten weicht hierdurch vom normalen kubischen Körper ab, da diese von der Gebäudeaußenkante zurückgesetzt liegen. Über den Außenwänden ist umlaufend eine Attika von ca. 0.3 m Höhe angeordnet.



Abb. 3.8 Nähere Umgebung der Testgebäude

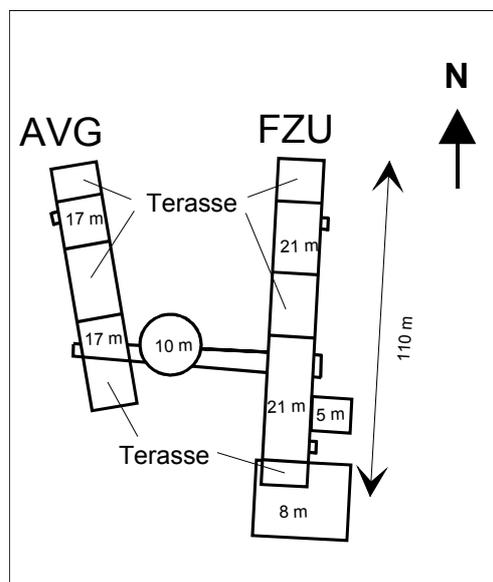


Abb. 3.9 Grundriß der Meßgebäude

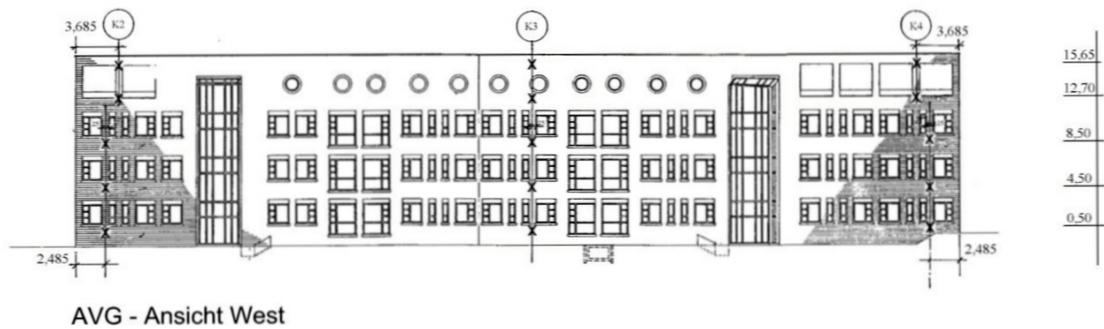


Abb. 3.10 Ansicht AVG Westseite

3.4.2 Windstatistik

Die Windstatistik am Meßstandort ist in Abb. 3.11 in Form einer Windrose für 12 Richtungssektoren dargestellt. Die Hauptwindrichtungen durch die Kanalisierung im Oberrheintal sind aus der Darstellung in Abb. 3.11 ersichtlich. Das Windklima wird entscheidend durch die orographischen Verhältnisse der Talsituation geprägt.

Betrachtet man die Häufigkeit der Geschwindigkeiten, so ist zu erkennen, daß Geschwindigkeiten > 4 m/s vor allem für die Windrichtungen $200^\circ - 270^\circ$ und ca. $40^\circ - 90^\circ$ auftreten, wobei die Häufigkeit bei den nördlichen Richtungen weitaus geringer ist. Die Windkanalversuche wurden ausschließlich für diese beiden angegebenen Richtungsbereiche durchgeführt.

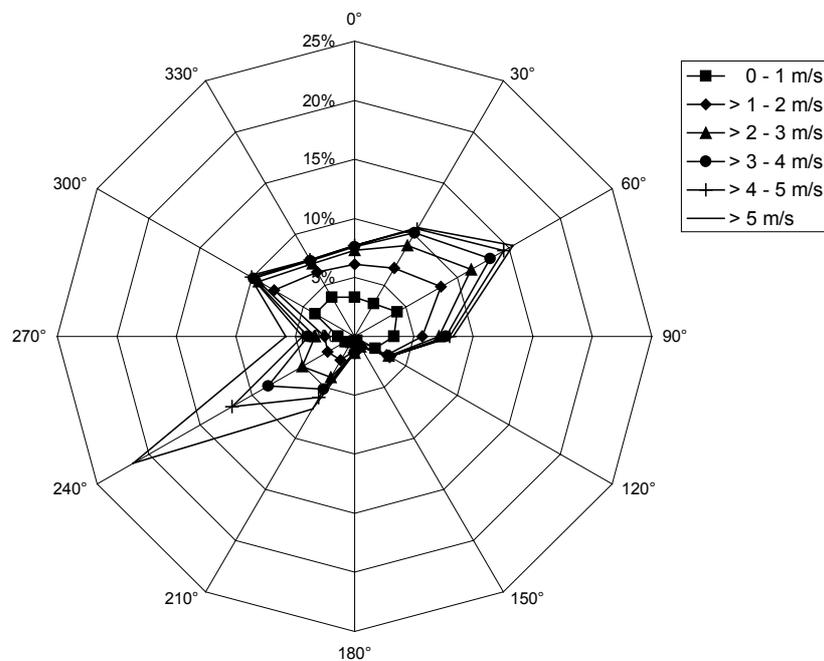


Abb. 3.11 Windrose der Station Karlsruhe Nordwest (1992-1998), LFU BADEN WÜRTTEMBERG (2001)

3.4.3 Meßeinrichtungen

Zur Bestimmung der Referenzgeschwindigkeit wurden die Daten der meteorologischen Meßstation des Institutes für Meteorologie und Klimaforschung auf dem Dach des Physik-Hochhauses verwendet. Der Anemometer dieser Station befindet sich in einer Höhe von 71 m über dem Boden und wird nicht durch Nachbargebäude oder die Gebäudeumströmung beeinflusst. Zur Normierung der Druckbeiwerte der Naturmessungen mit einem Referenzstaudruck wurden diese Daten verwendet, wobei entsprechend dem ungestörten Profil der Anströmung im Windkanal die Geschwindigkeit in Höhe der Meßgebäude mit einem Profilexponent $\alpha = 0.27$ berechnet wurde.

Geschwindigkeitsmessungen wurden auch an einem Meßmast auf dem Dach des FZU-Gebäudes durchgeführt (siehe Abb. 3.8). Die Höhe der Schalenkreuzanemometer über dem Boden beträgt 33 m, 31 m und 28 m (Gebäudehöhe $H = 21$ m). Aufgrund der geringen Höhe im Vergleich zur Umgebung können die Daten dieser Messungen lokal durch Hindernisse beeinflusst werden. Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen in Natur werden in Abschnitt 6.1 vorgestellt.

In der zweiten Phase der Naturmessungen wurden ab Frühjahr 2000 auch Geschwindigkeitsmessungen mit Hilfe eines Ultraschallmeßgerätes durchgeführt. Diese Ergebnisse sollen für ergänzende Untersuchungen im Hinblick auf den Einfluß kleinskaliger Turbulenz verwendet werden.

Prinzipiell ist der Versuchsaufbau in Modell und Natur zur Bestimmung der winderzeugten Lasten gleich. Gemessen wird der Differenzdruck zwischen dem Druck an der Gebäudeaußenfläche und einem Referenzdruck (siehe Gl. 2.12). Während im Modell der statische Druck der Anströmung verwendet werden kann, ist dieser in Natur nur schwer zu bestimmen. Es wurde daher der Gebäudeinnendruck an einer Stelle als Referenzdruck verwendet und über ein Schlauchsystem allen Meßstellen zugeleitet. Die Angleichung des Referenzdrucks an die Windkanaldaten wird in Abschnitt 6 erläutert.

Die Datenübertragung der Meßsignale erfolgte aufgrund der enormen Gebäudeabmessungen über ein Daten-Bussystem der Firma PHOENIX CONTACT. Hierbei werden die Daten zunächst über kurze Strecken analog zu einem mehrkanaligen A/D-Modul geleitet. Ein Bus-Kabel überträgt dann die digitalisierten Daten zu einem zentralen Meßaufnahmegerät. Einzelheiten des Systems werden ausführlich von KIEFER und FUCHS (1997) beschrieben. Das System ist in der Lage die Signale aller angeschlossenen Druckmeßstellen und Anemometer bis zu einer Samplingfrequenz von 50 Hz zu übertragen.

3.4.4 Position und Aufbau der Druckmeßstellen

Die Lage der Druckmeßstellen an den beiden Meßgebäuden an den Wand- und Dachflächen ist in Abb. 3.12 dargestellt. Es wurden insgesamt 88 Druckmeßpunkte an den beiden Gebäuden eingerichtet. In der zweiten Phase der Messungen wurden die Meßstellen am Dach umgruppiert und ein dichteres Meßpunktnetz an der südwestlichen Dachecke des FZU-Gebäudes installiert.

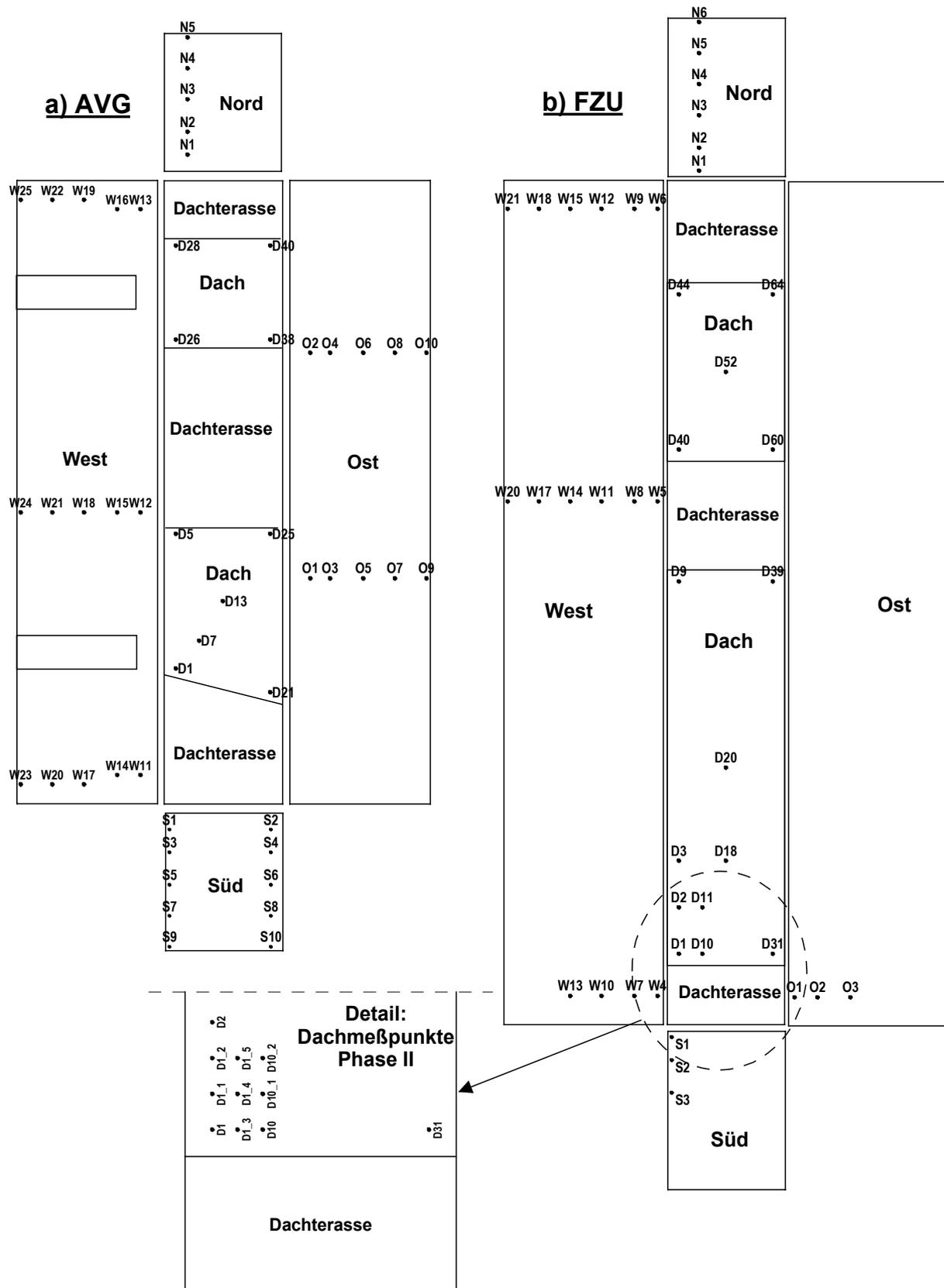
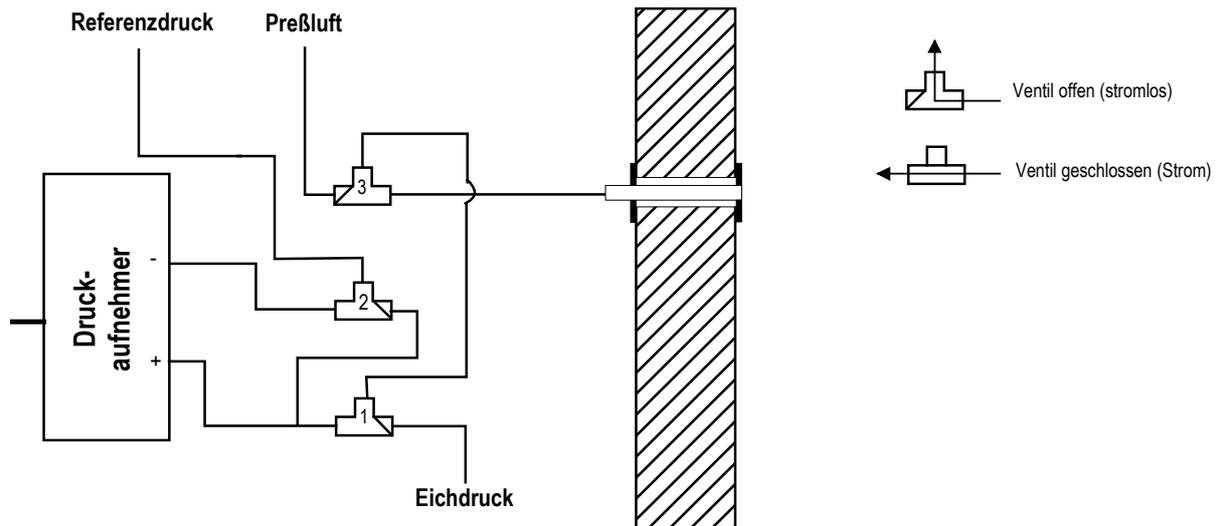


Abb. 3.12 Meßpunkte an den Testgebäuden für die Naturmessungen, Draufsicht, Seitenwände “hochgeklappt“



	Messen	Nullabgleich	Eichen	Reinigen
Ventil 1	stromlos	stromlos	Strom	Strom
Ventil 2	stromlos	Strom	stromlos	Strom
Ventil 3	stromlos	stromlos	stromlos	Strom

Abb. 3.13 Aufbau einer Druckmeßstelle für die Naturmessungen

Diese Anordnung der Meßstellen erlaubt es die lokalen fluktuierenden Lasten im Eckbereich des Daches als Funktion der Größe der Fläche zu bestimmen.

Der Aufbau einer Druckmeßstelle mit dem dazugehörigen Ventilsystem ist in Abb. 3.13 enthalten. Die Druckmeßpunkte an der Wand bestehen aus Mauerhülsen mit einem Innendurchmesser von 10 mm aus Edelstahl mit einer Frontplatte an der Außenöffnung. Am Dach wurden die Meßpunkte als kalottenförmige Aufsätze ausgeführt, ähnlich dem Versuchsaufbau von BÄCHLIN (1985).

Die dahinterliegende Ventilschaltung kann mit Hilfe des Bus-Systems aktiviert werden und ermöglicht folgende Funktionen: Messen, Nullabgleich, Eichen, Reinigen mit Preßluft.

Es sei jedoch darauf hingewiesen, daß trotz der bestehenden Möglichkeit zur Reinigung der Meßöffnungen mit Preßluft, Verstopfungen durch hartnäckigen Schmutz oder Insektenverbau sowie durch eindringendes Regenwasser vor allem an den Meßstellen am Dach und der Westfassade entstanden. Die Daten mußten einer sorgfältigen Prüfung unterzogen werden, um fehlerhafte Meßstellen entsprechend auszusortieren.

Tests ergaben, daß die Druckmeßstellen in der Natur in der Lage sind die anliegenden Drucksignale bis zu einer Frequenz von ca. 20 Hz unverfälscht zu übertragen (KIEFER und PLATE (1996)).

3.5 Datenauswertung und Zeitmaßstab

Generell wurden die Lastbeiwerte auf den Staudruck der ungestörten Anströmung ($\alpha = 0.27$) in der Höhe H des Meßgebäudes bezogen. Abweichungen hiervon werden entsprechend kenntlich gemacht.

Gl. 3.2

$$c_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho \bar{u}(H)^2}_{\text{Norm}}$$

mit: $\bar{u}(H)_{\text{Norm}}$ = Geschwindigkeit der ungestörten Anströmung in Gebäudehöhe H

Auf diese Art wurden die Druckbeiwerte für alle durchgeführten Messungen (Einzelgebäude, bebaute Gebiete, Naturmessungen) einheitlich berechnet. Dies bedeutet, daß die Änderung der Lasten durch die Änderung der Druckbeiwerte beschrieben wird. Die ungestörte Windgeschwindigkeit $\bar{u}(H)_{\text{Norm}}$ wurde mit Hilfe des Profilexponenten $\alpha = 0.27$ der ungestörten Anströmung und Gl. 2.7 aus einer im oberen unbeeinflussten Bereich der Grenzschicht gemessenen Geschwindigkeit berechnet. In Abb. 3.14 wird dies auch grafisch verdeutlicht.

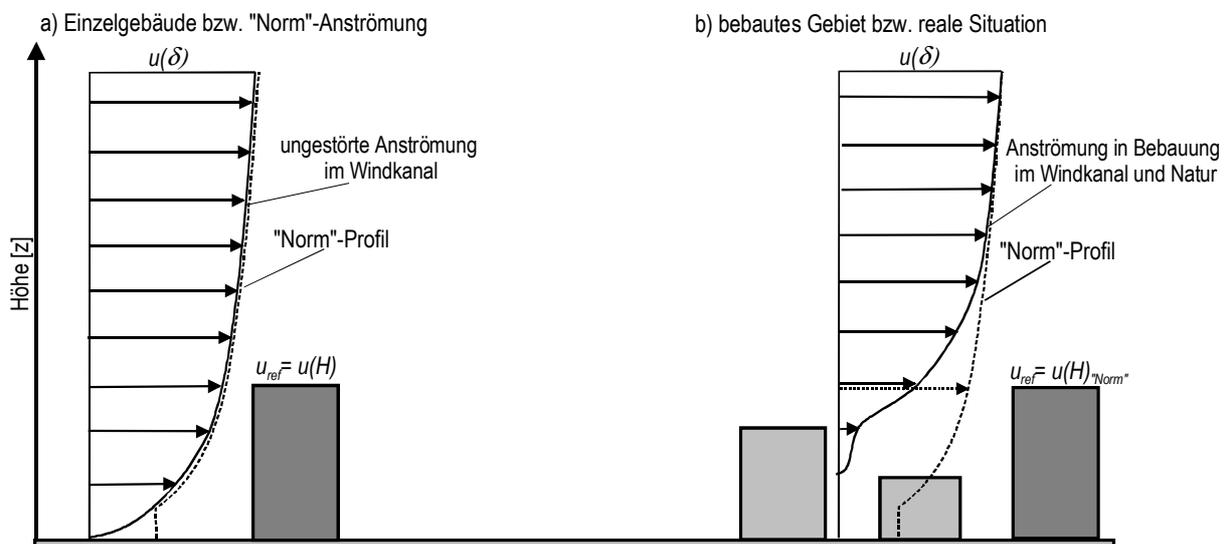


Abb. 3.14 Definition der Referenzgeschwindigkeit für die Berechnung der Druckbeiwerte c_p

Als Grundwerte wurden zuerst die zeitlich gemittelten Werte $c_{p,mean}$ und die Standardabweichung $c_{p,rms}$ bestimmt. Die Bestimmung der lokalen Extremwerte wird in Abschnitt 3.5.2 erläutert. Die Bestimmungsgleichungen für Kraft- und Widerstandsbeiwerte sind thematisch in den entsprechenden Abschnitten enthalten.

3.5.1 Zeitmaßstab

Eine wesentliche Rolle spielt der Zeitmaßstab bei der Bestimmung winderzeugter Lastspitzen im Windkanal. Ausgangspunkt hierbei ist eine repräsentative Geschwindigkeit (10Minuten Mittel) von $\bar{u}_{ref,0} = 28$ m/s, dies entspricht Windlastzone II nach ENV 1991-2-4 in 10 m Höhe und ist eine gute Näherung für die zugrunde gelegten Windgeschwindigkeiten in Deutschland.

Rechnet man diese Geschwindigkeiten mit dem Windmodell der ENV 1991-2-4 (1994) auf ein Gelände der Kategorie III um, so ergibt sich $\bar{u}_{ref} = 21.6$ m/s für $z = 10$ m. Aus der entsprechenden Geschwindigkeit im Windkanal und dem geometrischen Modellmaßstab ergibt sich:

$$\left(\frac{T \cdot \bar{u}}{L}\right)_{Natur} = \left(\frac{T \cdot \bar{u}}{L}\right)_{Modell} \Rightarrow T_N = T_M \cdot \frac{L_N}{L_M} \cdot \frac{\bar{u}_M}{\bar{u}_N} = T_M \cdot 56.5$$

Gl. 3.3

3.5.2 Anpassung der ‘‘Cook-Mayne-Methode’’

Zur Bestimmung der maximalen und minimalen lokalen Druckbeiwerte soll die ‘‘vereinfachte Cook-Mayne Methode’’ (Abschnitt 2.4.5) verwendet werden. Da Gl. 2.36 für die Verwendung des Stundenmittelwertes als Bemessungsgeschwindigkeit entwickelt wurde, muß die Verwendung der Methode in Verbindung mit den mittleren 10-minütigen Geschwindigkeiten nach der ENV 1991-2-4 (1994) überprüft werden. Eine wesentliche Voraussetzung bei der Herleitung von Gl. 2.36 war die Annahme $aU_v = 10$ für das charakteristische Produkt der Geschwindigkeit. Die Bemessungsgeschwindigkeiten der unterschiedlichen Windlastzonen für Deutschland aus der ENV 1991-2-4 (1994) wurden für verschiedene Wahrscheinlichkeiten P nach Gl. 2.40 berechnet und in Abb. 3.15 gegen $-\ln(-\ln(P))$ aufgetragen. Aus den angepaßten Geraden können die Parameter der FT1-Verteilung bestimmt werden. Es ergibt sich für alle 3 Windlastzonen ein charakteristisches Produkt $aU_v = 12$.

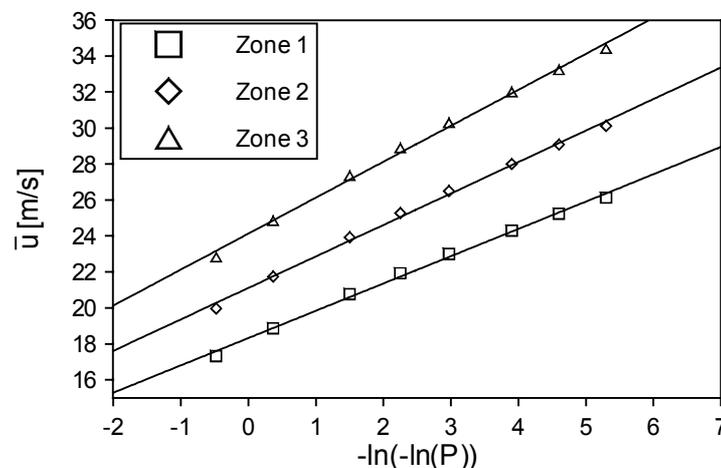


Abb. 3.15 Anpassung der FT1-Verteilung an die Bemessungsgeschwindigkeiten des Eurocode

Die Herleitung von Gl. 2.40 zur Bestimmung von Bemessungsgeschwindigkeiten anderer Wahrscheinlichkeit im Eurocode geht von der Fisher-Tippet Verteilung des dynamischen Geschwindigkeitsdrucks aus. Bildet man das Verhältnis zwischen dem gesuchten Geschwindigkeitsdruck und dem bekannten 50-jährlichen dynamischen Druck, läßt sich Gl. 2.40 herleiten. Hierbei wird als charakteristisches Produkt aU_q des dynamischen Drucks der Wert 5 verwendet, welcher jedoch für das Stundenmittel gilt (COOK (1990)). Entsprechende Zahlenwerte für das 10-Minuten Mittel des dynamischen Drucks sind in der Literatur nicht verfügbar.

Der Wert $aU_v = 12$ aus Abb. 3.15 für das 10-Minuten Mittel weicht ab vom Wert, der für das Stundenmittel verwendet und der vereinfachten Methode zugrunde gelegt wurde. Der Wert $aU_v = 12$ würde zu einem höheren Wert für y_c führen, wenn er für die Herleitung der vereinfachten Methode verwendet wird. Generell ist zu erwarten, daß der Mode-Wert U_v für das 10-Minuten-Mittel höher liegt als für das Stundenmittel. Geht man beim 10-Minuten Mittel von der gleichen Variabilität wie beim Stundenmittel aus, erscheint der Wert $aU_v = 12$ als Annahme plausibel.

Analog zur Vorgehensweise von Cook und Mayne wurde die Variationsbreite des charakteristischen Produkts der Druckbeiwerte aU_c anhand der vorliegenden Daten untersucht. Hierbei bezieht sich der Mode-Wert U_c auf das 10 min-Intervall, welches bei der Selektion der Extremwerte zugrunde gelegt wurde. Abb. 3.16 zeigt, daß die von Cook und Mayne ausgewählte Bandbreite $5 < aU_c < 20$ für die Variation dieses Parameters durchaus zutreffend ist, nach Abb. 3.18a unterschreiten jedoch bei der vorliegenden Studie ca. 2.2 % der Fälle den Wert 5. Für Werte von $aU_c < 5$ sind den Veröffentlichungen von Cook und Mayne allerdings keine Angaben zu entnehmen. Da der zu bestimmende Wert für y_c in diesem Bereich am größten wird und der Anpassung von Gl. 2.36 an die 10-minütigen Datenkollektive die gleiche Unterschreitungswahrscheinlichkeit von nur einem Prozent aller Fälle zugrunde gelegt werden sollte, wurden analog zur in Absatz 2.4.5 beschriebenen Vorgehensweise "Monte-Carlo-Simulationen" durchgeführt, um die Methode für diesen Wertebereich entsprechend ergänzen zu können.

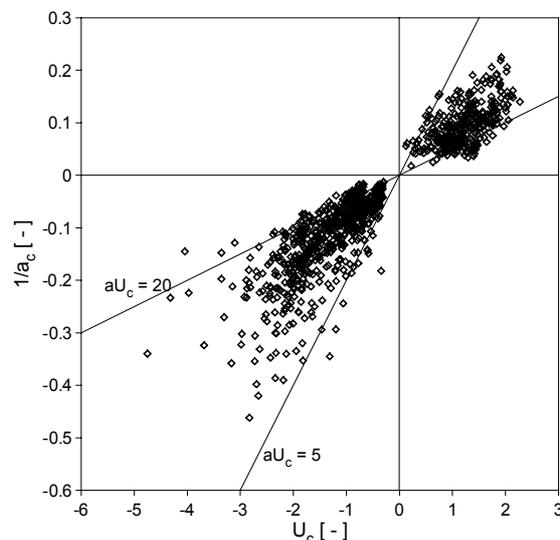


Abb. 3.16 Variationsbreite der FT-1-Parameter für die Druckbeiwerte an den Einzelgebäuden

Die simulierten Extremwertverteilungen und die angepaßten Polynome zweiten Grades sind in Abb. 3.17 enthalten. Anhand dieser Ergebnisse lassen sich mit Hilfe von Gl. 2.33 Werte für y_c bestimmen, die unter der Vorgabe von $aU_v = 12$ die 50jährige Windlast ergeben. Diese sind in Abb. 3.18b zusammen mit den Originaldaten von Cook und den Simulationsergebnissen für $aU_v = 10$ als Funktion von aU_c aufgetragen. Ebenfalls in Abb. 3.18b eingetragen wurde die Summenkurve der Häufigkeitsverteilung von aU_c auf der Basis der durchgeführten Windkanalversuche am Einzelgebäude. Aufgrund der Dichte und Anordnung der Meßpunkte sowie der Variation der Windrichtung kann diese Verteilung als repräsentativ angesehen werden. Bei einer Summenhäufigkeit von 1% ergibt sich ein Wert von $aU_c = 3.5$. Dies bedeutet, daß die Wahl von $y_c = 1.75$ die Windlast mit der geforderten 50jährigen Wiederkehrperiode liefert.

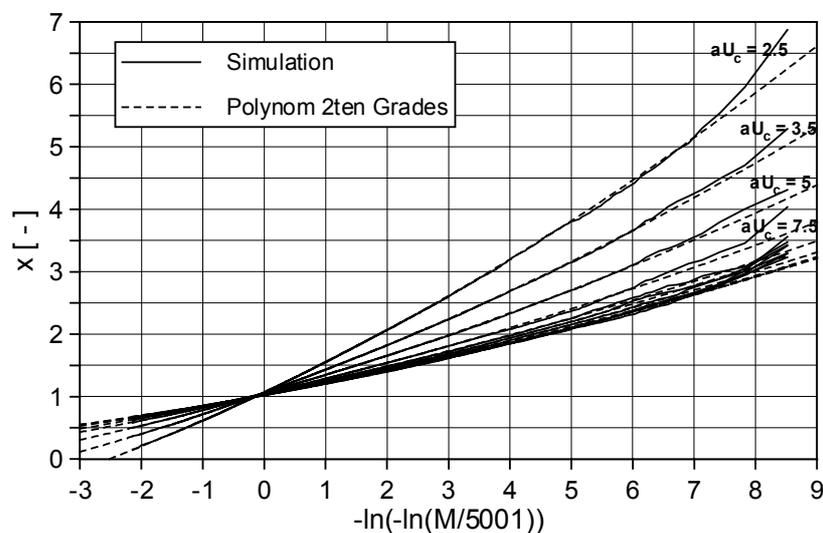


Abb. 3.17 Simulationsergebnisse für $aU_v = 12$

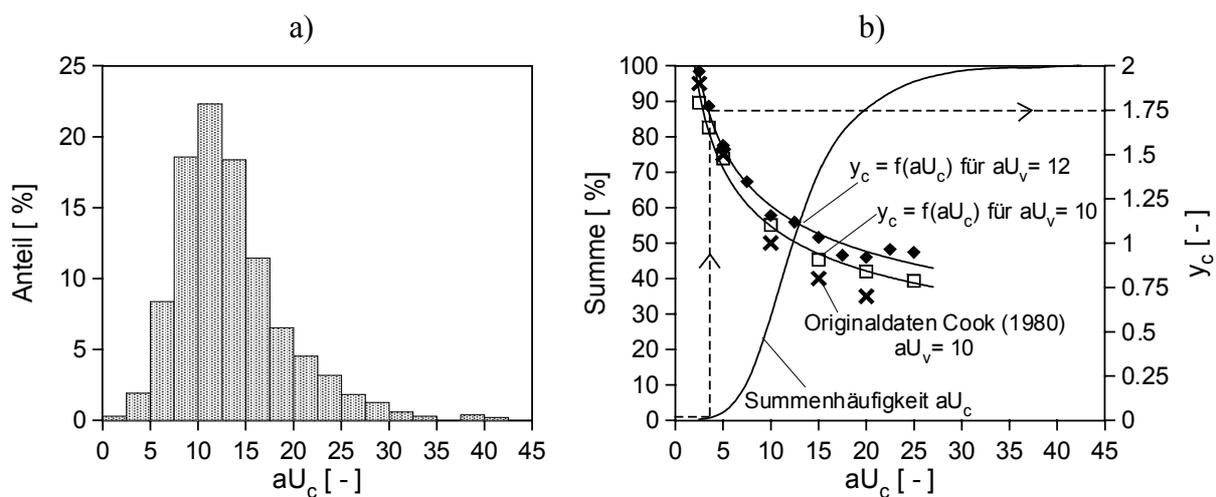


Abb. 3.18 a) Relative Häufigkeit der charakteristischen Produkte aU_c
 b) Summenhäufigkeit der charakteristischen Produkte aU_c sowie $y_c = f(aU_c)$ für $aU_v = 12$ und $y_v = 3.9$

Entsprechend ergibt sich somit für die Bestimmung der lokalen extremen Druckbeiwerte folgende Bestimmungsgleichung:

$$c_{p,min} = U_{cp,min,10Min} + \frac{1.75}{a_{cp,min,10Min}}$$

Gl. 3.4

$$\text{und } c_{p,max} = U_{cp,max,10Min} + \frac{1.75}{a_{cp,max,10Min}}$$

Die Parameter der FT-1 Verteilung Mode U und Dispersion $1/a$ wurden mit der Methode nach LIEBLEIN (1974) (siehe auch COOK 1990) bestimmt. Die entsprechenden Zeitintervalle im Modell können mit dem Zeitmaßstab (Gl. 3.3) ermittelt werden.

4 Ergebnisse der Windkanaluntersuchungen an den Einzelgebäuden

In Kapitel 2 wurde bereits darauf hingewiesen, daß ein einzeln stehendes Gebäude in der Realität ein eher selten auftretender Fall ist. Der weitaus größte Teil existierender Gebäude befindet sich in mehr oder weniger dicht bebauten Siedlungsgebieten. Die umgebenden Gebäude haben nicht nur einen Einfluß auf die sich ausbildende Grenzschicht, bei geringem Abstand wird auch lokal das Strömungsfeld direkt infolge der benachbarten Gebäude nachhaltig verändert, wodurch erhebliche Abweichungen vom idealisierten Einzelgebäude in rauher Grenzschichtströmung eintreten können.

Die ENV 1991-2-4 (1994) berücksichtigt die aerodynamische Wirkung umgebender Bebauung mit Hilfe des "Exposure coefficient" c_e , wodurch der Windlastbestimmung ein für bebaute Gebiete charakteristisches Profil der mittleren Geschwindigkeit und der Turbulenzintensität zugrunde gelegt wird. In Kapitel 3 wurde erläutert, daß die Grenzschicht im Windkanal entsprechend den in der ENV 1991-2-4 (1994) definierten Vorgaben für ein Windprofil in vorstädtischem Gebiet modelliert wurde. Die Ergebnisse an den Einzelgebäuden, welche dieser modellierten Grenzschichtströmung ausgesetzt wurden, können daher als Realisierung des in der ENV 1991-2-4 (1994) idealisierten Falles eines Gebäudes innerhalb einer städtischen Bebauung, jedoch ohne direkte lokale Einflüsse durch Nachbargebäude, aufgefaßt werden. Die aus den Versuchen am Einzelgebäude gewonnenen Daten werden als Referenzfall herangezogen, um die Wirkung realitätsbezogener umgebender Bebauung auf die Windlasten in Kapitel 5 zu quantifizieren. Den an den Einzelgebäuden ermittelten Daten kommt somit im Rahmen der vorliegenden Studie eine große Bedeutung zu. Die Druckbelastung an einzeln stehenden Baukörpern war bisher Thema vieler Forschungsarbeiten und Veröffentlichungen. Die im Rahmen dieser Arbeit erzielten Ergebnisse an den einzeln stehenden Gebäuden werden daher im vorliegenden Kapitel mit entsprechenden Literaturstellen sowie den Windlastvorgaben nach ENV 1991-2-4 (1994) verglichen, um die Güte der ermittelten Daten beurteilen zu können.

4.1 Zeitlich gemittelte Druckbeiwerte $c_{p,mean}$ und Standardabweichung $c_{p,rms}$

Die zeitlich gemittelten Druckbeiwerte $c_{p,mean}$ bildeten lange Zeit in Verbindung mit der quasi-statischen Methode die Grundlage der Windlastbestimmung. Aufgrund der weiterentwickelten Meß- und Modellierungstechnik sowie statistischer Methoden, welche in Kapitel 2 erläutert wurden, sind mittlerweile weitaus genauere Aussagen über zu erwartende Spitzenlasten möglich. Die zeitlich gemittelten Druckbeiwerte $c_{p,mean}$, vor allem deren räumliche Verteilung, beinhalten dennoch wertvolle Information hinsichtlich der Umströmung des Baukörpers sowie der Ausbildung der Ablöse- und Wiederanlegezonen an der Gebäudeoberfläche. Dieses Strömungsverhalten steht in sehr engem Zusammenhang mit dem Auftreten der lokalen Lastspitzen. Anhand der Standardabweichung der Druckfluktuationen $c_{p,rms}$ können Bereiche

erhöhter oder niedriger Lastfluktuationen identifiziert werden. Die Kombination beider Werte mit Hilfe der Spitzenfaktor-Methode (Gl. 2.30) liefert, unter Voraussetzung der Kenntnis der entsprechenden Spitzenfaktoren k , eine Abschätzung der Spitzenlasten, welche für einige Gebäudebereiche bessere Ergebnisse als die quasi-statische Methode ergibt (siehe Kapitel 2).

Nachfolgend werden zunächst in Abschnitt 4.1.1 und Abschnitt 4.1.2 die Meßergebnisse an den Wand- und Dachflächen der Testgebäude der vorliegenden Studien im Zusammenhang vorgestellt. Im Anschluß daran erfolgt in Abschnitt 4.1.3 der Vergleich mit Daten aus der Literatur.

4.1.1 Wandflächen

Isolinienplots erstellt mit Kriging-Verfahren eignen sich sehr gut die räumliche Verteilung der Druckbeiwerte zu beschreiben, da sie einerseits die Position lokaler Maxima, bzw. Minima sowie die zugehörigen Gradienten beinhalten, andererseits durch ihre flächenhafte Darstellung einen Eindruck über die Gesamtbelastung der Tragstruktur einzelner Gebäudeflächen vermitteln.

Der Einfluß unterschiedlicher Grenzschichtprofile auf die räumliche Verteilung der $c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ - Werte wurde im vorliegenden Fall nicht untersucht. Hierzu wird auf die Literatur verwiesen (z. B. CORKE und NAGIB (1979), WACKER (1991)). Die räumliche Verteilung an den untersuchten Gebäuden ist somit in erster Linie abhängig vom Anströmwinkel und den geometrischen Verhältnissen (Breite/Länge, Breite/Höhe). Letztere sind mit entscheidend, ob es bei Strömungsablösung zur Wiederanlegung kommt, bzw. die Strömung abgelöst bleibt. Nachfolgend werden ausschließlich die Ergebnisse an den niedrigen Testgebäuden ($H = 16$ m) und den hohen Gebäuden ($H = 64$ m) dargestellt und erläutert, um den Einfluß der Gebäudehöhe zu veranschaulichen. Für die Testgebäudeserien mit einer Höhe von 32 m wurden Ergebnisse ermittelt, welche generell zwischen jenen für die beiden anderen Höhen liegen. Auf deren ausführliche Darstellung in diesem Teil der Arbeit wird daher verzichtet.

Die Definition der Anströmrichtungen für die Darstellung der Isolinienplots (Abb. 4.2 bis Abb. 4.4) ist in Abb. 4.1 gegeben. Hierbei bedeutet der Anströmwinkel 0° eine frontale Anströmung von vorne, normal zur dargestellten Seitenwand. Im Uhrzeigersinn drehend verändert sich die Richtung in 45° -Schritten bis 180° , wobei die Darstellung für diesen Winkel bedeutet, daß sich die Wand strömungsabgewandt im Lee befindet.

In Abb. 4.2 sind die Isoliniendarstellungen der $c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ - Werte für die Seitenwände der Gebäudeserie K (quadratische Grundfläche, siehe Tab. 3.1) enthalten. Am Beispiel des 16 m hohen würfelförmigen Gebäudes (Abb. 4.2 b) können einige typische Merkmale räumlicher Verteilungen der $c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ - Werte aufgezeigt werden.

Bei frontaler Anströmung (0°) bildet sich der höchste Druck sowie die maximale Fluktuation im Staupunktbereich in einer Höhe von 0.7 bis 0.8 H aus. Bei Schräganströmung (45°) wandert dieser Bereich zur angeströmten Gebäudekante und sowohl der Druck als auch die Fluktuation nehmen entlang der Wandfläche kontinuierlich ab

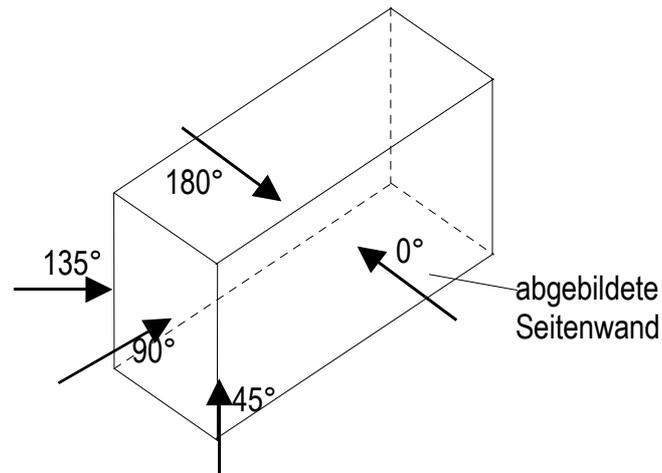


Abb. 4.1 Definition der Anströmrichtungen für Isoliniendarstellungen

Infolge der Strömungsablösung an der vorderen Gebäudekante bei paralleler Anströmung (90°) sind in diesem Bereich hohe Sogbeiwerte vorhanden. Anhand des Druckanstieg zur hinteren Gebäudekante wird die Tendenz zur Wiederanlegung der Strömung deutlich. Die Ursache hierfür sind, zum einen das gleichmäßige Seitenverhältnis ($L/B = 1$), zum anderen die geringe Gebäudehöhe, wodurch sich die Gebäudeflächen im Bereich hoher Turbulenzintensität befinden. Die Zone hoher Fluktuation bildet sich etwas weiter stromab der Gebäudekante aus und ist somit gegenüber der höchsten mittleren Sogbelastung leicht verschoben. Durch die Wiederanlegung an den strömungsparallelen Seitenwänden bilden sich an der Leewand (180°) relativ niedrige Unterdrücke aus. Insgesamt sind die Druckverteilungen im Leebereich (135° und 180°) durch über die Fläche konstante Drücke bei niedriger Fluktuation gekennzeichnet.

Am höheren Gebäude (Abb. 4.2b) bilden sich sehr ähnliche Druckverhältnisse aus, abgesehen von der Seitenwand parallel zur Strömung (90°). Die Tendenz zur Wiederanlegung ist hier aufgrund der geringeren Turbulenzintensität nur noch im bodennahen Bereich zu erkennen, wodurch an der Rückwand (180°) die höheren Sogbeiwerte hervorgerufen werden. Weiterhin ist zu beobachten, daß bei frontaler (0°) und schräger Anströmung (45°) die Fluktuationen im Vergleich zum niedrigeren Gebäude weitaus stärker vermindert werden, als an der strömungsparallelen Wand (90°). Die Ursache hierfür ist die gebäudeinduzierte Turbulenz infolge der Strömungsablösung, die in keinem Zusammenhang zur Anströmturbulenz steht und somit unabhängig von dieser hervorgerufen wird.

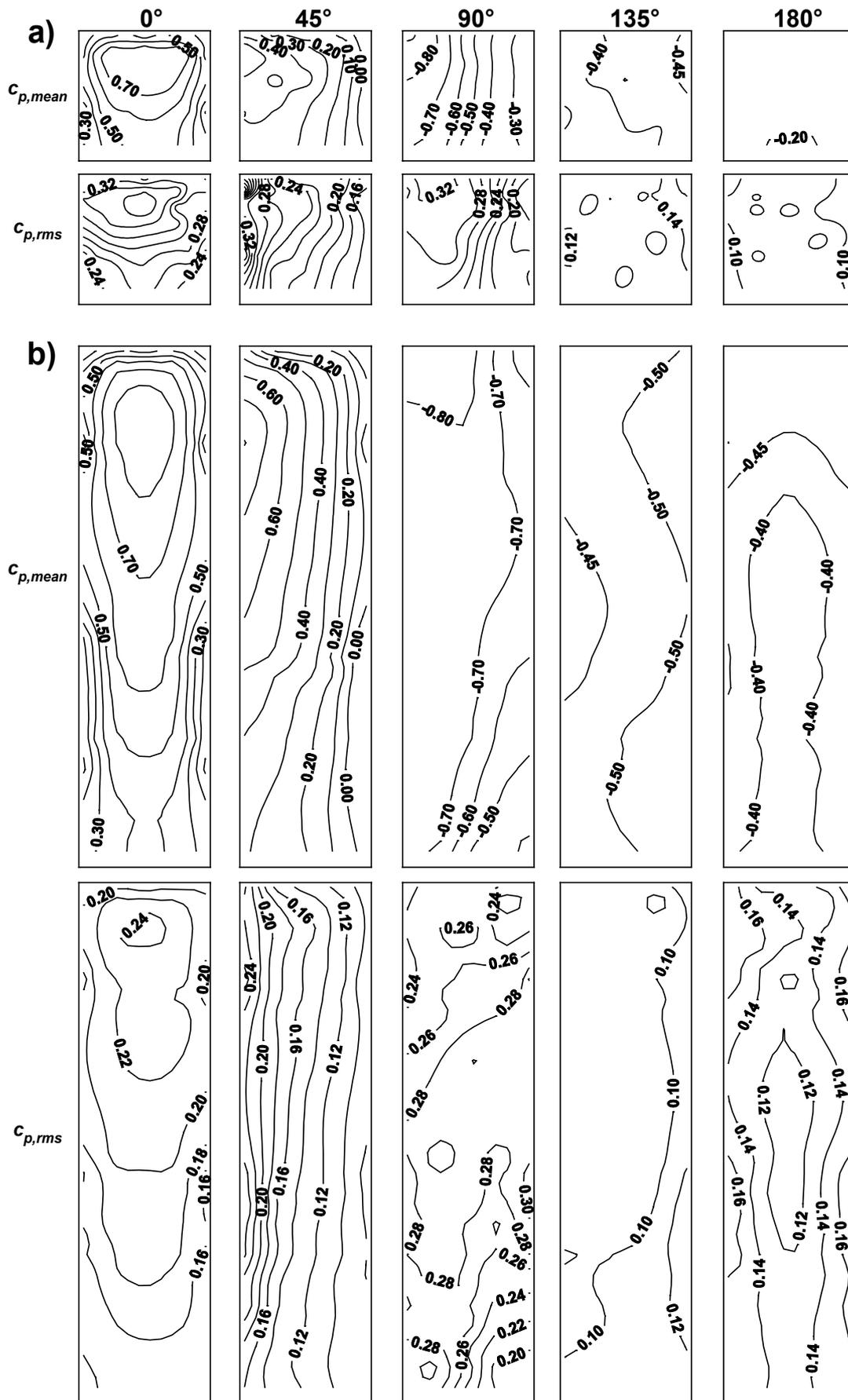


Abb. 4.2: $c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ -Werte, Seitenwände, Modellserie K ($B, L = 16$ m)
 (a) $H = 16$ m und (b) $H = 64$ m

Nachfolgend enthalten Abb. 4.3 und Abb. 4.4 die entsprechenden Darstellungen für die Modellserie P mit rechteckiger Grundfläche. Die Abmessungen der kurzen Seitenwände (Abb. 4.3) sind identisch mit den Abmessungen der Seitenwände der Modellserie K. Aus dem Vergleich der Druckverteilungen (Abb. 4.2 und Abb. 4.3) ergeben sich folgende Unterschiede für die kurzen Seitenwände:

- Bei einer Anströmrichtung von 45° werden bei den P-Modellen ($L/B = 3.3$) zwar kleinere Druckmaxima im Staupunkt erreicht, es erhöhen sich jedoch die $c_{p,rms}$ -Werte.
- Bei einer Anströmrichtung von 90° wird die Wiederanlegung der Strömung erschwert, aufgrund der größeren windzugewandten Frontfläche. Beim höheren P-Gebäude ist keine Tendenz zur Wiederanlegung vorhanden, das Sogmaximum und die Zone maximaler Fluktuation verschiebt sich an die hintere Gebäudekante.
- Bei 180° vermindert sich der Sog aufgrund der Wiederanlegung der Strömung an den langen strömungsparallelen Seitenwänden (siehe auch Abb. 4.4, 90°).

An den langen Seitenwänden (Abb. 4.4) ergeben sich vor allem für Anströmwinkel $\geq 90^\circ$ Unterschiede hinsichtlich der zuvor betrachteten Druckverteilungen. Bei paralleler Anströmung (90°) legt sich die Strömung vollständig wieder an. Der Wiederanlegepunkt verschiebt sich beim höheren Modell deutlich stromabwärts aufgrund der geringeren Turbulenzintensität mit zunehmender Höhe. Der Bereich maximaler Fluktuation bildet sich wiederum etwas stromabwärts des Sogmaximums aus. Am hohen Modell ist ein Bereich erhöhter Fluktuation im bodennahen Bereich zu erkennen.

Weiterhin ist festzustellen, daß sich bei 135° am kleineren Gebäude ein Wirbel im vorderen Bereich ausbildet und dadurch der Sog erhöht wird. Bei 180° treten am hohen Gebäude über die gesamte Fläche konstant verteilte relativ hohe Unterdrücke auf, die von entscheidender Bedeutung für die Gesamtkraft auf das Gebäude sein können.

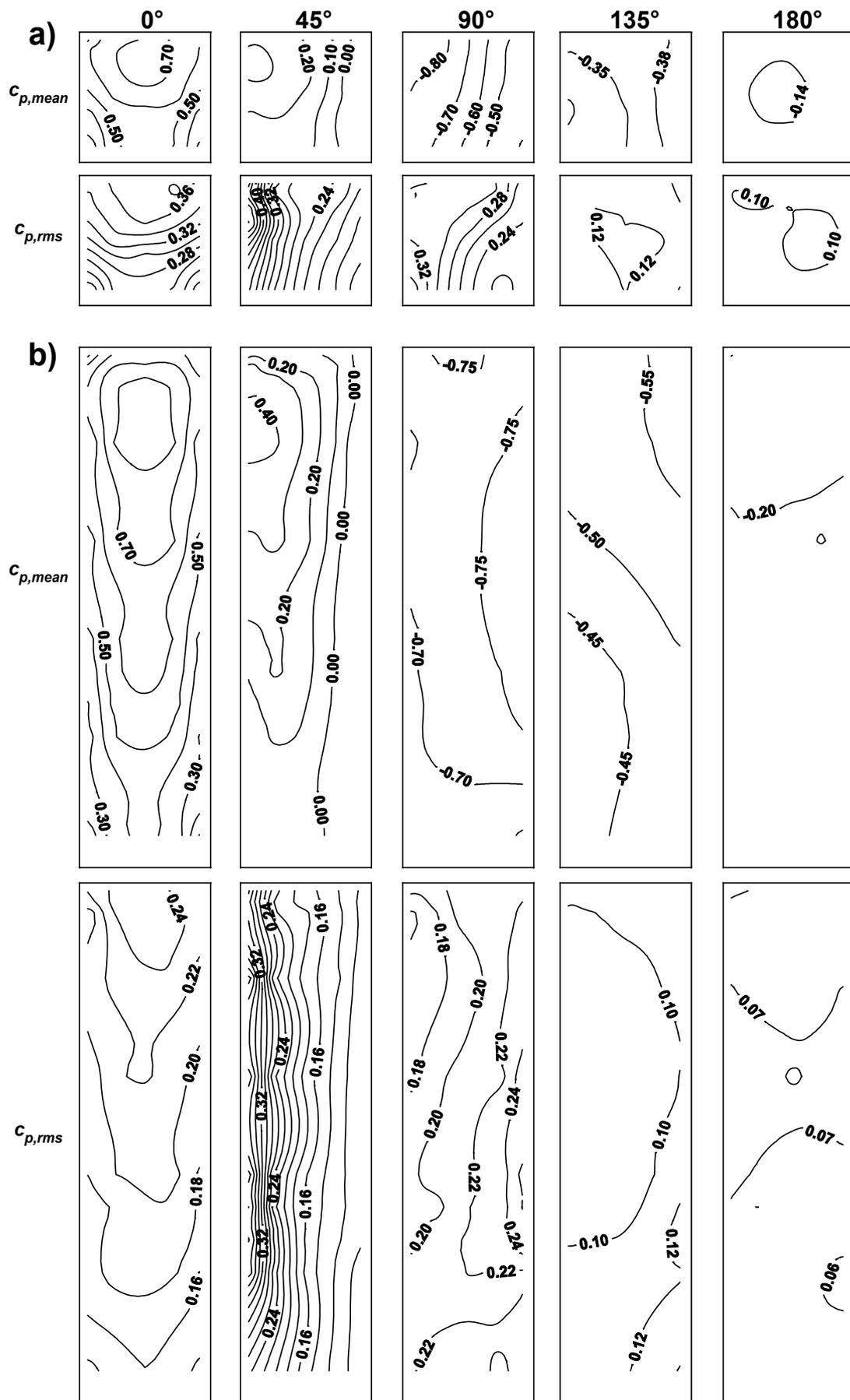


Abb. 4.3: $c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ -Werte, kurze Seitenwände, Modellserie P ($B = 16$ m, $L = 53$ m)
 (a) $H = 16$ m und (b) $H = 64$ m

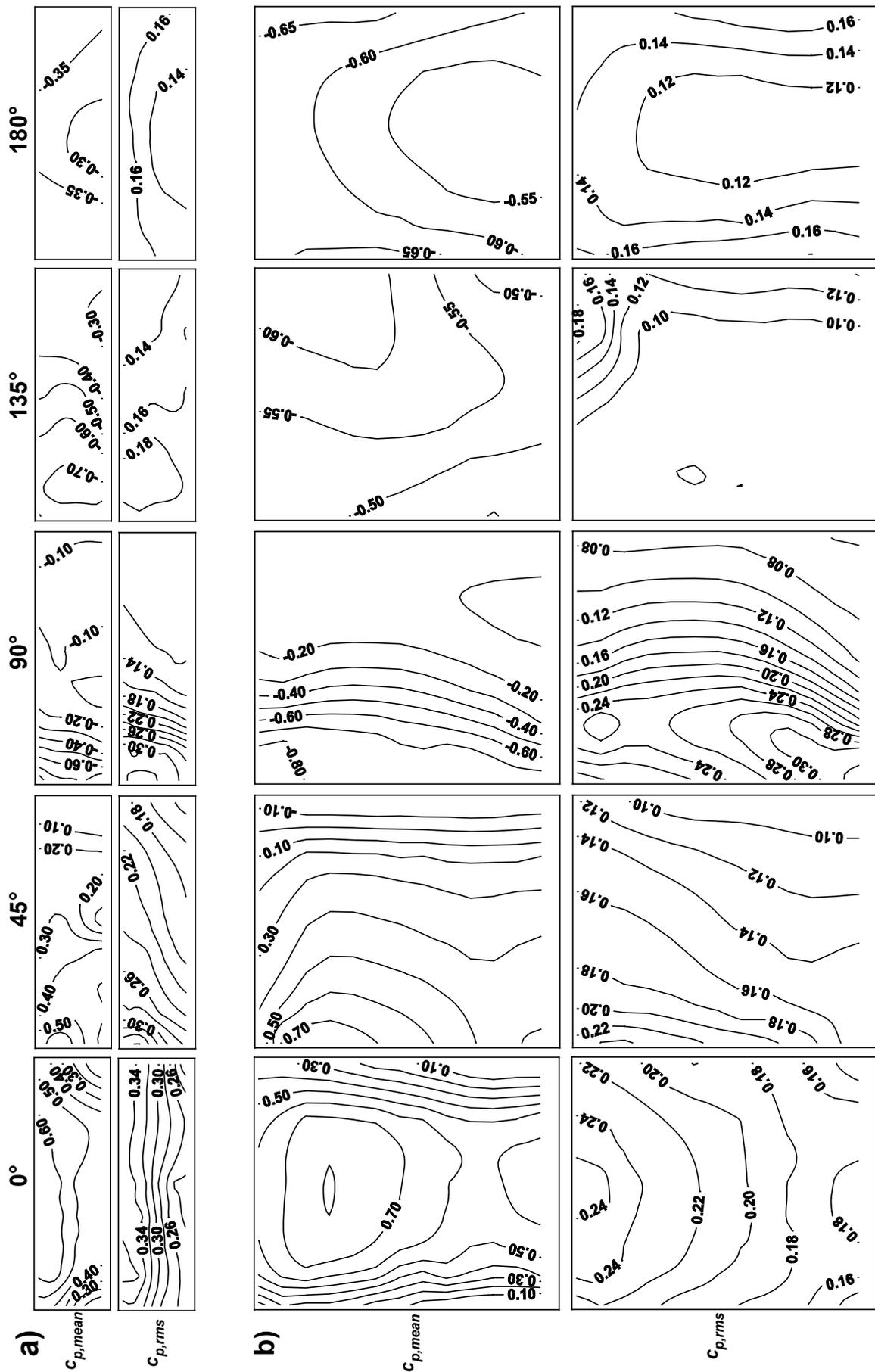


Abb. 4.4: $C_{p,mean}$ - und $C_{p,rms}$ -Werte, lange Seitenwände, Modellserie P ($B = 16$ m, $L = 53$ m)
 (a) $H = 16$ m und (b) $H = 64$ m

4.1.2 Dachflächen

An Flachdächern werden die Druckverhältnisse in ähnlicher Weise wie an einer strömungsparallelen Seitenwand durch die Ablösung der Strömung an der Gebäudevorderkante sowie ihrer eventuellen Wiederanlegung bestimmt. In Abb. 4.5 sind die Isolinienplots der $c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ -Werte an den Dachflächen der Modellserie K (quadratische Grundfläche) für eine senkrechte und schräge Anströmrichtung enthalten.

Die senkrechte Anströmrichtung ruft an den unterschiedlich hohen Gebäuden Druckverteilungen hervor, wie sie aufgrund der unterschiedlichen Turbulenzintensitäten in den entsprechenden Gebäudehöhen zu erwarten sind. Am niedrigen Gebäude entsteht im vorderen Viertel der Dachfläche ein Bereich hohen Soges, welcher dann stromabwärts rasch abnimmt. Am hohen Gebäude umfaßt dieser Bereich nahezu die Hälfte des Daches. Analog hierzu bilden sich die $c_{p,rms}$ -Werte aus, wobei diese am niedrigen Gebäude an der angeströmten Kante weitaus höher sind.

Besonders hohe Unterdrücke entstehen, wie bereits in Kapitel 2 erläutert, durch die Ausbildung sog. "Eck"- oder "Deltaflügel-Wirbel" entlang der vorderen Dachkanten bei einer schrägen Anströmung. Dieser Vorgang ist in Abb. 4.5 erkennbar. Er ruft auf hohem Niveau stark fluktuierende Sogbeiwerte hervor, welche sich jedoch, anhand der Dichte der Isolinien deutlich erkennbar, auf einen räumlich sehr eng begrenzten Bereich beschränken. Dieser Bereich bildet sich symmetrisch zur Strömungsachse im vorderen Bereich der Dachkanten aus. Das niedrigere Gebäude weist zwar ein geringeres mittleres Sogmaximum auf, die $c_{p,rms}$ -Werte lassen jedoch auf hohe zu erwartende Extremwerte schließen.

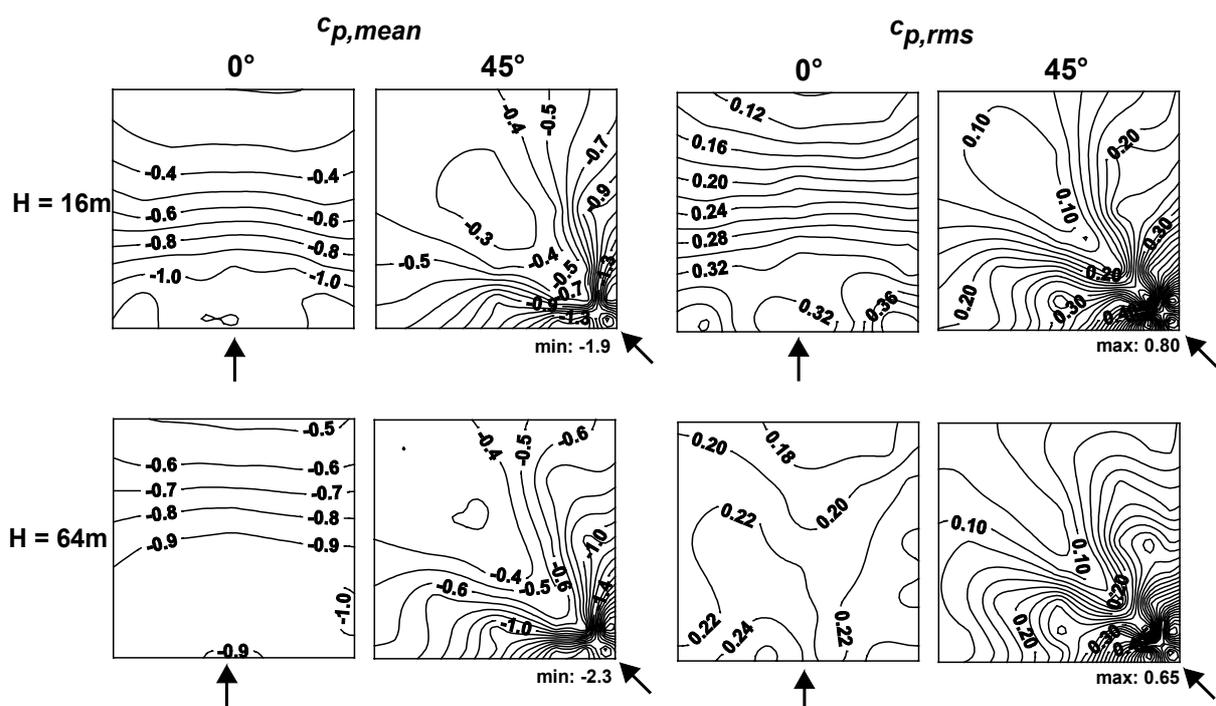


Abb. 4.5 $c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ -Werte an den Dachflächen der Modellserie K; $L = B = 16\text{ m}$

In Abb. 4.6 sind die räumlichen Verteilungen entsprechend für die Dachflächen der Testgebäude mit rechteckiger Grundfläche aufgetragen. Aufgrund der unterschiedlichen Seitenlängen ergibt sich hier eine weitere Anströmrichtung, die beachtet werden muß.

Bei senkrechter Anströmung der langen Gebäudekante (90°) zeigt sich, daß am hohen Gebäude keine Wiederanlegung der Strömung stattfindet. Sowohl die Mittelwerte, als auch die $c_{p,rms}$ -Werte bleiben über die Fläche relativ konstant. Geringfügig höhere Werte sind an der hinteren Dachkante vorzufinden.

Im Fall der Schräganströmung bilden sich ähnlich den zuvor dargestellten Ergebnissen an Gebäuden mit quadratischer Grundfläche Bereiche sehr hohen mittleren Soges mit hohem fluktuierendem Anteil etwas stromab der angeströmten Dachecke. Auch hier zeigt die Dichte der Isolinien starke Gradienten an.

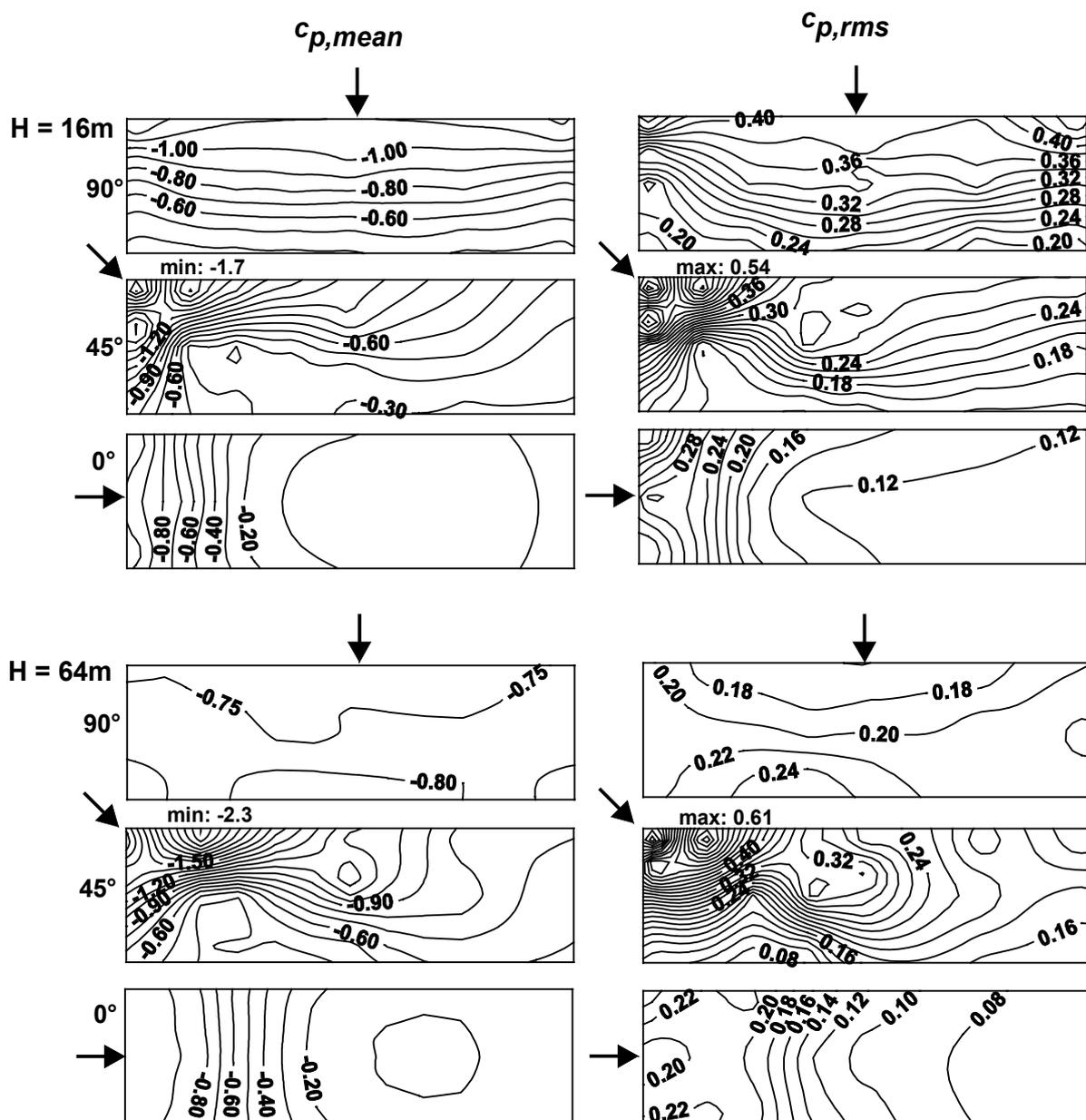


Abb. 4.6 $c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ -Werte an den Dachflächen der Modellserie P; $B = 16\text{ m}$, $L = 53\text{ m}$

Insgesamt betrachtet muß an dieser Stelle angefügt werden, daß die maximalen Werte des mittleren Soges und vor allem auch dessen Schwankungsanteil in hohem Maße von der Plazierung der jeweiligen Druckanbohrung abhängen. Aufgrund der sehr starken Gradienten, welche vor allem bei schräger Anströmung auftreten, kann es möglich sein, daß nicht immer die absolut höchsten am Dach auftretenden lokalen Lasten ermittelt wurden, da eine Erfassung der Daten immer nur an diskreten Punkten durchführbar ist. Durch den Vergleich der vorliegenden Daten mit Werten aus der Literatur kann in den nachfolgenden Abschnitten gezeigt werden, daß die vorhandenen Ergebnisse durchaus repräsentativ für die untersuchten Gebäude sind.

4.1.3 Vergleich mit Daten aus der Literatur

In Kapitel 2 wurde bereits erläutert, daß die Außendrucke an Gebäuden in einer Grenzschichtströmung im wesentlichen abhängig sind von der Gebäudegeometrie, der Anströmrichtung, dem Profil der mittleren Geschwindigkeit und der Turbulenz in der Anströmung. Der Vergleich mit Ergebnissen anderer Studien setzt daher eine ausreichende Übereinstimmung dieser Einflußgrößen voraus. Die Ergebnisse von Messungen an würfelförmigen Gebäuden sind in der Literatur am häufigsten zu finden. Der direkte Vergleich mit Ergebnissen anderer Studien konzentriert sich daher auf diesen Gebäudetyp. In Tab. 4.1 sind die entsprechenden Studien und deren Randbedingungen, welche zum direkten Vergleich herangezogen werden, zusammengestellt. Hierunter befindet sich auch eine experimentelle Untersuchung an einem würfelförmigen Gebäude in Natur (PERNPEINTNER, 1989). Die Ergebnisse dieser Studien wurden in sehr unterschiedlicher Weise dokumentiert und veröffentlicht. Einige Studien enthalten neben den mittleren c_p -Werten auch Angaben über die Druckfluktuationen oder sogar Spitzenwerte, manche enthalten auch detaillierte räumliche Verteilungen in Form von Isolinienplots. STATHOPOULOS (1981) untersuchte ausschließlich die Druckverhältnisse an Dachflächen.

Die Anströmcharakteristik wurde anhand der Angaben entsprechend den Geländekategorien des Eurocode eingestuft (Tab. 2.2). Es wird hierbei deutlich, daß einerseits die untersuchten Gebäude im Naturmaßstab verschiedene Abmessungen aufweisen, und andererseits unterschiedliche Standorte simuliert bzw. untersucht wurden. Mit Unterschieden hinsichtlich der Ergebnisse ist daher zu rechnen.

In Abb. 4.7 sind die $c_{p,mean}$ -Werte entlang charakteristischer vertikaler und horizontaler Schnitte entlang des Gebäudeumfangs für senkrechte und schräge Anströmrichtung enthalten. Insgesamt betrachtet ergibt sich zwischen den Naturmessungen von PERNPEINTNER (1989), den Daten von WACKER (1991) und den Ergebnissen der vorliegenden Studie eine gute Übereinstimmung. Etwas geringere Sogwerte wurden von CASTRO UND ROBINS (1977) am Dach und der parallelen Seitenwand bei senkrechter Anströmung ermittelt.

Tab. 4.1 Grenzschichtparameter der verglichenen Untersuchungen

	Versuchsart	Profil-exponent α	Jensen-Zahl H/z_0	Grenzschichthöhe δH	Turbulenzintensität $I_u(H)$	Gebäudehöhe H in Natur	Geländetyp nach EC (Tab. 2.2)
Vorliegende Studie Bezogen auf Modell K1	Windkanal	0.27	80	8.75	0.27	16 m	III
PERNPEINTNER (1989)	Natur	0.12 - 0.2	5000 - 167	-	-	10 m	I, II
CASTRO U. ROBINS (1977)	Windkanal	0.25	50	10	0.27		III
WACKER (1991) Grenzschicht Y	Windkanal	0.25	167	6	0.13	25 m	II, III
WACKER (1991) Grenzschicht Z	Windkanal	0.33	17.5	6	0.22	25 m	IV
STATHOPOULOS (1981) “Smooth“	Windkanal	0.16	540	3.7	0.12	68 m	II
STATHOPOULOS (1981) “Built-up“	Windkanal	0.37	12	7.4	0.28	68 m	IV

Anhand Abb. 4.5 wurde ersichtlich, daß bei der Druckverteilung am Dach unter 45° lokal sehr starke Gradienten auftreten. Das Sogmaximum ist räumlich sehr eng begrenzt und wird mit Hilfe der Darstellungen in Abb. 4.7 nicht wiedergegeben. Aus den Veröffentlichungen von PERNPEINTNER (1989) und von CASTRO UND ROBINS (1977) gehen die absoluten Sogmaxima nicht hervor. Für die übrigen Studien sind die Zahlenwerte der absoluten Sogmaxima in Tab. 4.2 zusammengestellt. Es zeigen sich zum Teil erhebliche Unterschiede in den Mittelwerten vor allem bei der 45° -Anströmrichtung. Anhand der Ergebnisse von STATHOPOULOS (1981) und WACKER (1991) wird deutlich, daß die Grenzschichteigenschaften einen wesentlichen Einfluß ausüben. In rauherer Strömung nimmt die mittlere Sogbelastung ab, die RMS-Werte steigen jedoch an.

Ein weiterer wesentlicher Faktor ist die Positionierung der Druckanbohrungen auf der Dachfläche, vor allem ihr Abstand zum Rand hin. Auf die starken Gradienten wurde bereits hingewiesen, es ist daher durchaus möglich, daß in einigen Fällen nicht unbedingt die absoluten lokalen Extrema erfaßt wurden. Es erscheint daher für die Quantifizierung der Lasten in bebauten Gebieten (Kapitel 5) sinnvoll, das Verhältnis der Lasten am Gebäude im bebauten Gebiet mit den Lasten des gleichen Meßpunktes oder Teilfläche am Einzelgebäude zu verwenden.

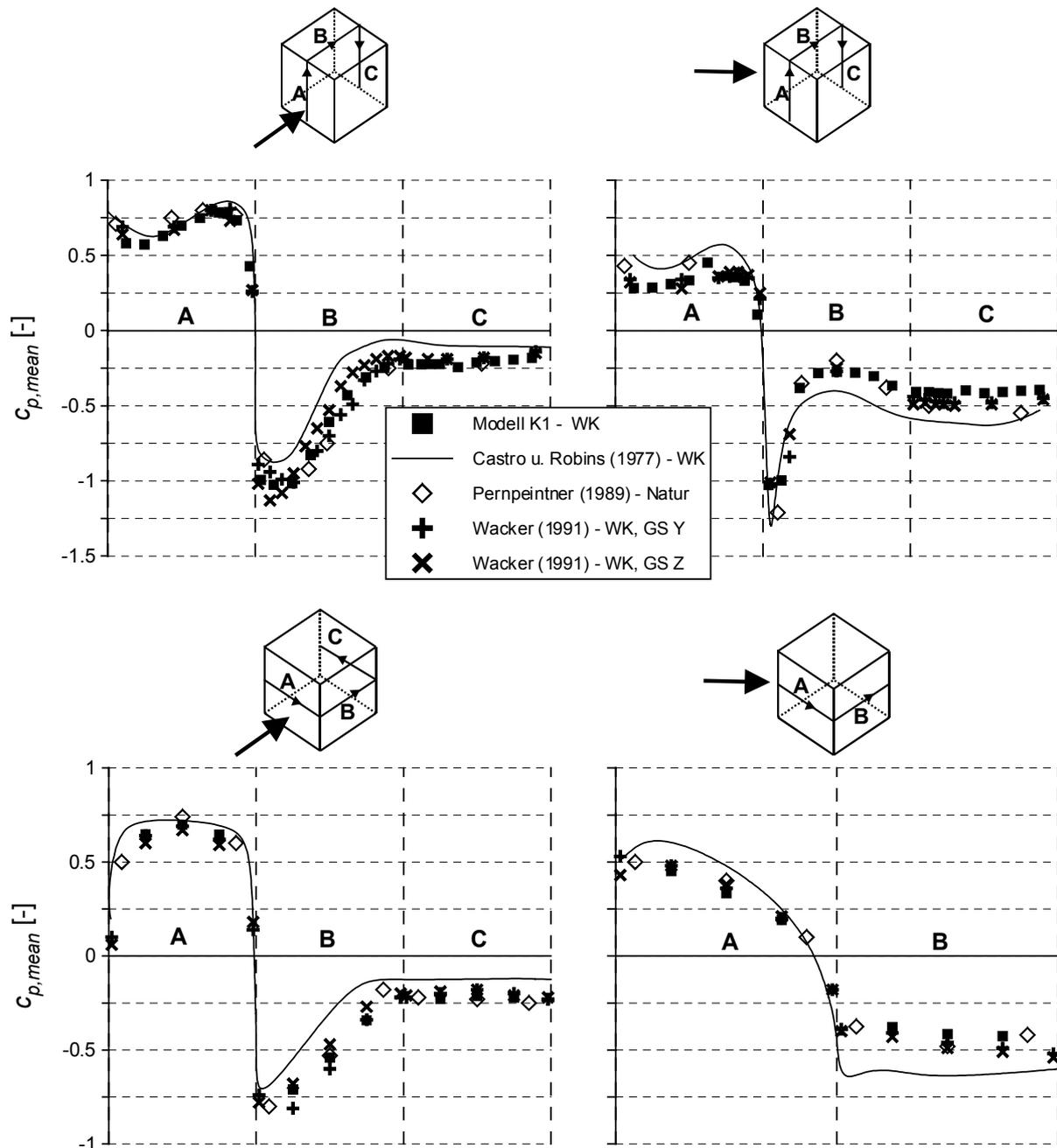


Abb. 4.7 Vergleich der $c_{p,mean}$ -Werte von Modell K1 entlang charakteristischer Vertikal- und Horizontalschnitte mit Daten aus der Literatur

Tab. 4.2: Vergleich lokaler Sogmaxima am Dach würfelförmiger Gebäude

	Grenzschicht	Geometrie $L/B; L/H$	0°		45°	
			$c_{p,mean}$	$c_{p,rms}$	$c_{p,mean}$	$c_{p,rms}$
Gebäude K1	III	1; 1	-1.1	0.4	-1.8	0.8
STATHOPOULOS (1981)	II	1; ≈ 1	-0.7	0.2	-1.6	0.6
	IV	1; ≈ 1	-0.9	0.5	-0.9	0.7
WACKER (1991)	III	1; 1	-1.0	-	-2.8	-
	IV	1; 1	-1.1	0.4	-2.4	1.1

4.2 Windkräfte bezogen auf das gesamte Bauwerk

Windinduzierte Kräfte und Momente, welche sich auf das gesamte Bauwerk beziehen, sind bei der Bemessung der Tragstruktur von besonderer Bedeutung. Allgemein üblich werden Kräfte und Momente in folgender Form als aerodynamische Beiwerte angegeben:

Gl. 4.1

$$C_F = \frac{F}{0.5\rho V_{ref}^2 A_{ref}} \quad \text{bzw.} \quad C_M = \frac{M}{0.5\rho V_{ref}^2 A_{ref} l_{ref}}$$

mit: F = Kraft
 M = Moment
 V_{ref} = Referenzgeschwindigkeit
 A_{ref} = Bezugsfläche
 l_{ref} = Referenzlänge (i. d. R. l_{ref} = Gebäudehöhe H)

Hierbei ist zu beachten, daß je nach Autor sehr unterschiedliche Definitionen der Bezugsgrößen Verwendung finden. Neben den Bezugsgrößen können auch unterschiedliche Definitionen des Koordinatensystems der Beschreibung der Kräfte und Momente zugrunde gelegt sein. Um die Ergebnisse der durchgeführten Messungen mit den Daten anderer Autoren vergleichen zu können, ist es daher erforderlich unterschiedliche Definitionen der aerodynamischen Beiwerte des Gesamtgebäudes anzuwenden bzw. umzurechnen.

Die mittleren Kraftbeiwerte für die einzelnen Gebäudeflächen der untersuchten Meßgebäude wurden aus der Integration über die Fläche der in Abschnitt 4.1 dargestellten Druckverteilungen ermittelt:

Gl. 4.2

$$c_f = \frac{1}{A} \int_A c_{p,mean} dA$$

Durch die Addition der Kraftvektoren, welche normal zu den Gebäudeaußenflächen ausgerichtet sind, können globale resultierende Kräfte bezogen auf unterschiedliche Koordinatensysteme berechnet werden.

Neben den globalen Kräften auf das Bauwerk sind auch die Momente, welche durch die windinduzierten Drücke verursacht werden, von entscheidender Bedeutung bei der Bemessung des Tragwerkes. Da hierbei die räumliche Verteilung der Drücke besonders wichtig ist wurden die Momente aus den Gitterdaten der Isolinienplots von Abschnitt 4.1 bestimmt. Die Gitterdaten der Isolinienplots wurden durch die Interpolation der Meßpunktergebnisse über die Fläche errechnet und liefern daher ein flächendeckendes räumliches Abbild der Druckbelastung.

Häufige Verwendung finden zwei Arten das Koordinatensystem der globalen resultierenden Windkräfte zu definieren:

- a) bezogen auf die Körperachsen - ein körperfestes Koordinatensystem definiert die Richtung der x-, y- und z-Achse

- b) bezogen auf die Hauptströmungsrichtung – klassische Definition des Widerstandsbeiwertes in Strömungsrichtung und der hierzu quergerichteten Kraft in lateraler Richtung (“Drag- and Lift force“)

Eine Umrechnung der Daten von einem Bezugssystem in das andere ist natürlich generell möglich, oft werden jedoch auch unterschiedliche Referenzgrößen hinsichtlich der Geschwindigkeit und der Fläche verwendet. Nachfolgend werden die vorliegenden Ergebnisse zunächst auf ein körperfestes Koordinatensystem bezogen, um einen Vergleich mit den umfangreichen Untersuchungen von AKINS, PETERKA UND CERMAK (1977) zu ermöglichen, welche auch als Basisdaten für die Bemessungsvorgaben von ESDU 80003 (1980) sowie COOK (1990) verwendet wurden.

4.2.1 Kraft- und Momentenbeiwerte bezogen auf ein körperfestes Koordinatensystem

Eine sehr umfangreiche Studie über mittlere Kraft- und Momentenbeiwerte für Gebäude in turbulenten Grenzschichten wurde von AKINS, PETERKA UND CERMAK (1977) veröffentlicht. Das von ihnen verwendete Koordinatensystem und die Definition der Windrichtungen sowie die Drehrichtungen der Momente ist in Abb. 4.8 dargestellt.

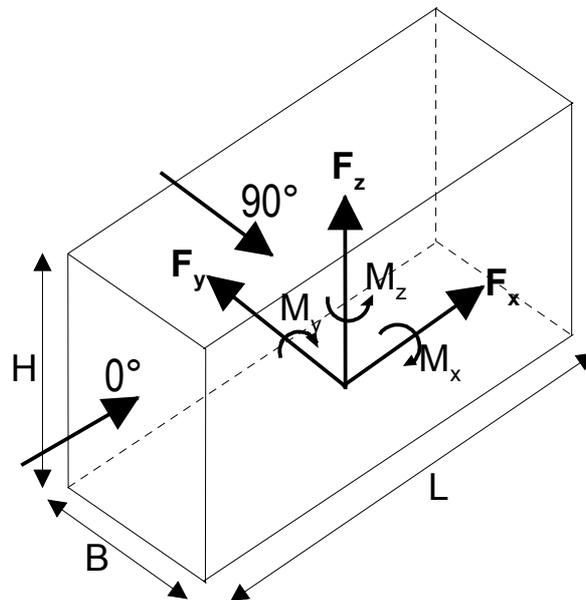


Abb. 4.8 Definition der Windrichtungen, Kräfte und Momente

Die aerodynamischen Beiwerte für die Kräfte und Momente sind wie folgt definiert:

$$C_{FX} = \frac{F_x}{0.5 \rho u_a^2 BH}; \quad C_{FY} = \frac{F_y}{0.5 \rho u_a^2 LH}; \quad C_{FZ} = \frac{F_z}{0.5 \rho u_a^2 BL}$$

Gl. 4.3

$$C_{MX} = \frac{M_x}{0.5 \rho \bar{u}_a^{-2} L H^2}; \quad C_{MY} = \frac{M_y}{0.5 \rho \bar{u}_a^{-2} B H^2}$$

Abweichend von der eher üblichen Normierung der Druckbeiwerte mit dem Staudruck in Gebäudehöhe, wurden von AKINS ET AL. (1977) die aerodynamischen Beiwerte auf die über die Gebäudehöhe gemittelte Geschwindigkeit \bar{u}_a bezogen. Ausgehend vom Potenzansatz (Gl. 2.7) und dem für die vorliegenden Messungen bekannten Profilexponenten α kann eine Umrechnung zwischen den beiden Normierungsarten erfolgen. Die über die Höhe gemittelte Geschwindigkeit \bar{u}_a ergibt sich aus der Integration des Geschwindigkeitsprofils:

Gl. 4.4

$$\begin{aligned} \bar{u}_a &= \frac{1}{H} \int_0^H u_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha dz \\ \Rightarrow \bar{u}_a &= \frac{1}{H} \frac{u_{ref}}{z_{ref}^\alpha} \int_0^H z^\alpha dz = \frac{1}{H} \frac{u_{ref}}{z_{ref}^\alpha} \frac{H^{\alpha+1}}{\alpha+1} = \frac{u_{ref}}{z_{ref}^\alpha} \frac{H^\alpha}{\alpha+1} \end{aligned}$$

Setzt man nun als Referenzhöhe z_{ref} die Gebäudehöhe H ein und berücksichtigt, daß die Geschwindigkeit im Quadrat in die Berechnung des Staudrucks eingeht, ergibt sich ein von der Gebäudehöhe unabhängiger Umrechnungsfaktor, mit dessen Hilfe die aerodynamischen Beiwerte auf die jeweilige Bezugsgeschwindigkeit umgerechnet werden können. Für die vorliegende Studie ergibt sich aufgrund des Profilexponenten α folgender Faktor zur Umrechnung der aerodynamischen Beiwerte von der Bezugsgeschwindigkeit \bar{u}_H auf die höhengemittelte Geschwindigkeit \bar{u}_a :

Gl. 4.5

$$\frac{\bar{u}_H^{-2}}{\bar{u}_a^{-2}} = \left(\frac{\alpha+1}{1} \right)^2 = (\text{mit } \alpha = 0.27) = 1.61$$

Durch diese Art der Normierung werden nach Ansicht von AKINS ET AL. (1977) einheitlichere Kurven bei der Darstellung der Kraftbeiwerte als Funktion der Windrichtung erzeugt, welche nur noch geringe Abhängigkeiten von der Grenzschicht und der Höhe aufweisen. COOK (1990) verwendet auch diese Normierung für seine Angaben von Bemessungswerten für die Gesamtlast auf hohe prismatische Gebäude.

In Abb. 4.9 werden die Ergebnisse von AKINS ET AL. (1977) mit den Kraftbeiwerten der vorliegenden Arbeit, welche entsprechend nach Abb. 4.8, Gl. 4.3 und Gl. 4.5 bestimmt wurden, verglichen. Die Ergebnisse von AKINS ET AL. (1977) werden als an die Datenpunkte angepaßte Kurven mit einem Balken zur Darstellung der Streuung wiedergegeben. Diese resultiert aus unterschiedlichen Grenzschichten und unterschiedlichen Verhältnissen H/B . Die aufgezeigten Streubereiche der Daten von AKINS ET AL. (1977) sind jedoch teilweise nicht unerheblich. Die Ergebnisse von WACKER ET AL. (1990) zeigen, daß die Abhängigkeit der Widerstandsbeiwerte von den unterschiedlichen Grenzschichten durch die Verwendung der

über die Höhe gemittelten Geschwindigkeit zwar verringert wird, jedoch einen Anstieg mit steigendem Verhältnis H/B zu verzeichnen ist. Dies ist auch für die Daten der vorliegenden Studie der Fall, für $H/B = 4$ wurden jeweils die betragsmäßig größten Werte ermittelt.

Insgesamt betrachtet, zeigt Abb. 4.9, daß die Ergebnisse für die Modellserien K und P sehr gut mit den Daten von AKINS ET AL. (1977) und der angegebenen Bandbreite übereinstimmen. Die betragsmäßig größten Horizontalkräfte der untersuchten Testgebäude wurden bei der Modellserie P (rechteckiger Grundriß) bei einer Anströmrichtung senkrecht zur langen Gebäudeseite ermittelt. (siehe Abb. 4.9b, C_{FY}).

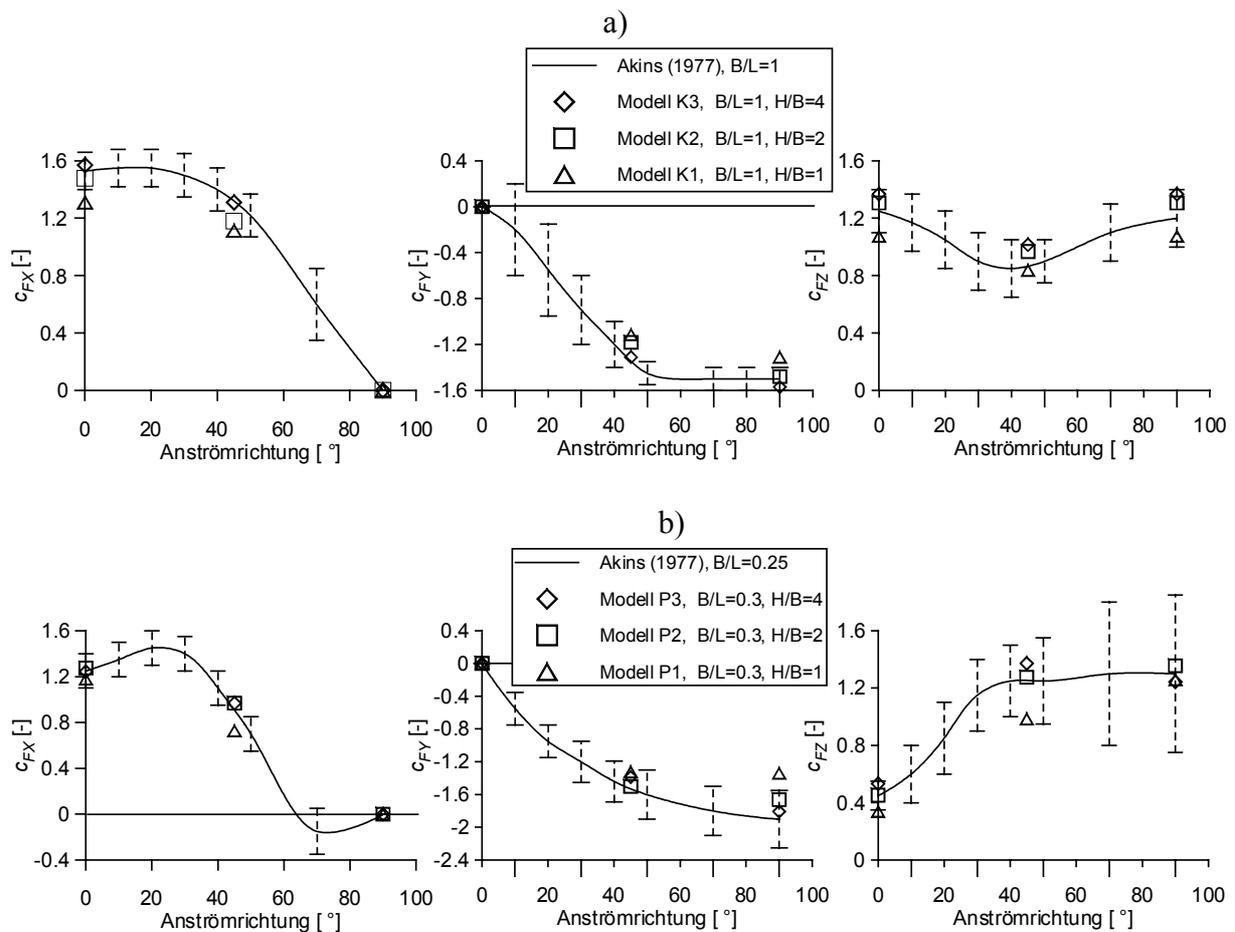


Abb. 4.9 Vergleich der Kraftbeiwerte C_F in Richtung der Körperachsen (bezogen auf \bar{u}_a) mit den Ergebnissen von AKINS ET AL. (1977); a) $B/L = 1$, b) $B/L = 0.25$

Ähnlich wie für die Kraftbeiwerte in Abb. 4.9 wurden von AKINS ET AL. (1977) auch Angaben über die Momentenbeiwerte gemacht. Hierzu ist jedoch anzumerken, daß für die Momentenbeiwerte der Einfluß von H/B weitaus größer ist als bei den Kraftbeiwerten. Nachfolgend werden daher nur Werte miteinander verglichen, welche auch in ihrem Verhältnis H/B ähnlich sind.

In Tab. 4.3 werden die Momente um die jeweils quer (lateral) zur Strömung ausgerichteten Achse miteinander verglichen. Die Momentenbeiwerte der in Tab. 4.3 enthaltenen Anströmrichtungen werden durch die Kraft in Strömungsrichtung (Widerstandskraft) sowie

der vertikalen Komponente F_z verursacht. So ist z. B. der hohe Beiwert für C_{MY} bei 0° des niedrigen rechteckigen Gebäudes ($B/L \approx 0.3$) im wesentlichen auf den Beitrag der Dachfläche und ihrer stark ungleichmäßigen Druckverteilung zurückzuführen.

Auch bei den Momentenbeiwerten zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen von AKINS ET AL (1977). Dies läßt darauf schließen, daß neben den resultierenden Kräften auch die räumliche Verteilungen der Drücke in beiden Studien sehr ähnlich sind.

Tab. 4.3 Vergleich der Momentenbeiwerte C_M (bezogen auf \bar{u}_a) mit den Ergebnissen von AKINS ET AL (1977)

	$B/L = 1$		$B/L \approx 0.3$			
	C_{MY} bei 0°		C_{MY} bei 0°		C_{MX} bei 90°	
	Modelle K	AKINS (1977)	Modelle P $B/L = 0.3$	AKINS (1977) $B/L = 0.25$	Modelle P $B/L = 0.3$	AKINS (1977) $B/L = 0.25$
$H/B = 1$	0.79	0.8	1.71	1.70	0.81	0.85
$H/B = 2$	0.76	0.8	1.11	1.10	0.86	0.9
$H/B = 4$	0.82	0.8	0.64	0.62	0.93	0.9

4.2.2 Kraftbeiwerte in Strömungsrichtung – Widerstandsbeiwerte

Während die Kraftbeiwerte bezogen auf das körperfeste Koordinatensystem häufig bei der Bemessung eines Bauwerks verwendet werden, sind in strömungsmechanischer Hinsicht eher die Kraftbeiwerte in Strömungsrichtung C_D und in lateraler Richtung C_L von Bedeutung. Der Widerstandsbeiwert ist ein Maß für die erzeugten Verluste in der Hauptströmung. Als Bezugsfläche zur Bestimmung der Widerstandsbeiwerte C_D wird hierbei in der Regel die projizierte, senkrecht zur Strömungsrichtung stehende Fläche A_{proj} verwendet:

Gl. 4.6

$$C_D = \frac{F}{0.5 \rho u^2 A_{proj}}$$

mit: F = Kraft in Strömungsrichtung
 A_{proj} = Projizierte Fläche senkrecht zur Strömung

Weiterhin sind die Widerstandsbeiwerte am Einzelgebäude von Bedeutung, da sie in Abschnitt 5 mit den in Bebauung ermittelten Werten in Bezug gesetzt werden, um die Wirkung umgebender Bebauung auf die globalen Windkräfte zu quantifizieren. Zusätzlich zum vorangegangenen Vergleich mit den Daten von AKINS ET AL (1977) sollen die Kraftbeiwerte auf das Gesamtgebäude nachfolgend mit weiteren Literaturdaten sowie der ENV 1991-2-4 (1994) verglichen werden.

Hierzu wurden in Tab. 4.4 die Widerstandsbeiwerte der vorliegenden Studie für senkrechte Anströmrichtungen für die kleinste und größte Gebäudehöhe sowie entsprechende Daten aus

der Literatur zusammengestellt. Die Grenzschichten Y und Z für die Daten von WACKER ET AL. (1990) entsprechen hierbei den Angaben in Tab. 4.1 aus WACKER (1991).

Tab. 4.4 Vergleich der Widerstandsbeiwerte C_D (bezogen auf \bar{u}_H) mit Daten aus der Literatur

		$B/L = 1$	$B/L \approx 0.3$	
		0° 	0° 	90° 
$H/B = 1$	Modell K1 und P1	0.81	0.73	0.83
	WACKER ET AL. (1990) (Grenzschicht Y)	0.80	0.93	1.12
	WACKER ET AL. (1990) (Grenzschicht Z)	0.70	0.78	0.82
	ESDU 80003 (1980)	1.02	1.02	1.27
$H/B = 4$	Modell K3 und P3	0.97	0.77	1.12
	WACKER ET AL. (1990) (Grenzschicht Y)	1.07	0.80	1.17
	WACKER ET AL. (1990) (Grenzschicht Z)	0.86	0.68	0.95
	ESDU 80003 (1980)	0.99	1.04	1.15

Insgesamt betrachtet ist festzustellen, daß die Werte der vorliegende Studie meist zwischen den von WACKER (1990) für die beiden Grenzschichten angegebenen Werten liegen. Hierbei ist anzumerken, daß die Grenzschicht Y nahezu mit dem Proflexponenten α der verwendeten Windkanalströmung übereinstimmt, bei dieser jedoch eine weitaus höhere Turbulenzintensität in Gebäudehöhe vorhanden ist (siehe Tab. 4.1). Die Druckverhältnisse auf der Gebäuderückseite tragen wesentlich zum Widerstandsbeiwert bei und werden maßgeblich von der in der Strömung vorhandenen Turbulenz bestimmt. Da eine höhere Turbulenzintensität bekanntermaßen den Sog an der Gebäuderückseite herabsetzt, werden die Abweichungen in Tab. 4.4 verständlich.

Die Angaben von ESDU 80003 liegen generell über den Widerstandsbeiwerten der vorliegenden Studie. Der Grund hierfür dürfte darin liegen, daß es sich bei den Angaben in ESDU 80003 um Bemessungsvorschläge handelt und diese eher als konservativ anzusehen sind.

Aus den Angaben in ENV 1991-2-4 (1994) kann für die Berechnung der Gesamtkraft auf Gebäude ein Widerstandsbeiwert aus der Addition der Druckbeiwerte an Vorder- und Rückseite (siehe Tab. 2.3) ermittelt werden. Hierbei ergibt sich ein Widerstandsbeiwert von

$C_D = 0.8 + -0.3 = 1.1$. Dieser wäre für alle untersuchten Testgebäude anzusetzen. Auch hierzu ist anzumerken, daß bei Bemessungsvorschriften eher eine leicht konservative Abschätzung vorgenommen wird. Der Wert der ENV 1991-2-4 (1994) stimmt mit dem größten ermittelten Wert (Gebäude P3: $C_D = 1.12$) überein.

Die gute Übereinstimmung der Momentenbeiwerte der vorliegenden Studie mit den von AKINS ET AL (1977) ermittelten Werten bezogen auf \bar{u}_a wurde in Tab. 4.3 aufgezeigt. Zur Abschätzung der Momente um die x - bzw. y -Achse werden von COOK (1990) und ESDU 80003 die Hebelarme z_F als Verhältnis z_F/H zur Gebäudehöhe angegeben, mit welcher die Kraft in Strömungsrichtung anzusetzen ist, um das Einspannmoment zu ermitteln. Aus der Definition des Widerstandsbeiwertes C_D (Gl. 4.6) und des Momentenbeiwertes C_M (Gl. 4.1) mit $l_{ref} = H$ und $A_{ref} = A_{proj}$ ergibt sich:

Gl. 4.7

$$C_M = \frac{M}{0.5\rho V_{ref}^2 A_{proj} H} = \frac{F}{0.5\rho V_{ref}^2 A_{proj}} \frac{z_F}{H} = C_D \frac{z_F}{H}$$

Das Verhältnis des anzusetzenden Hebelarmes zur Gebäudehöhe z_F/H entspricht somit dem Verhältnis C_M/C_D . Diese Werte werden in Tab. 4.5 mit Daten aus den o. g. Literaturstellen verglichen. Die Windrichtungen und Gebäudeabmessungen entsprechen hierbei der Definition in Abb. 4.8. Hierbei ergibt sich abgesehen von der 0° -Anströmrichtung eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit mit den Literaturwerten. Bei der 0° -Anströmung ist zu beachten, daß beim kleinsten Meßgebäuden, wie bereits erwähnt wurde, ein wesentlicher Beitrag des Momentes um die lateral ausgerichtete Gebäudeachse durch die Verteilung der Sogkräfte am Flachdach, welche nach oben gerichtet sind, entsteht. Dieser Umstand wurde bei den Literaturangaben offensichtlich vernachlässigt, da er in diesem Fall dem Knicken um die starke Achse entspricht.

Tab. 4.5 Verhältnis der Hebelarme zur Gebäudehöhe z_F/H – Vergleich mit Literaturdaten

	Verhältnis z_F/H				
	$L/B=1$ 0°	$L/B=3.3$ 0°	$L/B=3.3$ 90°	ESDU 80003	COOK (1990)
$H/B=1$	0.60	1.45	0.60	0.60	0.56
$H/B=2$	0.52	0.87	0.51	0.60	0.56
$H/B=4$	0.53	0.50	0.52	0.60	0.56

4.3 Lokale Windlasten

Die an der Gebäudeoberfläche auftretenden lokalen minimalen und maximalen Druckbeiwerte ($c_{p,min}$, $c_{p,max}$) sind von besonderem Interesse, da hierbei extreme Lastzustände an Teilen des Bauwerks bzw. einzelnen Bauelementen hervorgerufen werden, welche bei der Bemessung mit ausreichender Sicherheit berücksichtigt werden müssen. Das Bemessungskonzept der ENV 1991-2-4 liefert hierfür entsprechende Werte für unterschiedliche Flächengrößen, welche in den nachfolgenden Abschnitten mit den vorliegenden Ergebnissen verglichen werden sollen. Die Methodik („Vereinfachte Cook-Mayne Methode“), nach welcher die extremen Druckbeiwerte aus den im Windkanal gemessenen Zeitreihen berechnet wurden, wurde ausführlich in Abschnitt 2 und 3 dargelegt.

Die ENV 1991-2-4 (1994) verwendet einen Böendruckfaktor, welcher auf der quasi-statischen Theorie beruht und von der Gebäudehöhe sowie der Geländekategorie abhängig ist (siehe Gl. 2.41). Um die lokalen Extremwerte der vorliegenden Studie mit den Bemessungsvorgaben vergleichen zu können, müssen die in Tab. 2.3 und Tab. 2.4 enthaltenen „mittelwert-ähnlichen“ Druckbeiwerte der ENV 1991-2-4 mit Hilfe der entsprechenden Böenfaktoren G (Verhältnis des Böenstaudrucks zum zeitlich gemittelten Staudruck) in $c_{p,min}$ - bzw. $c_{p,max}$ -Werte umgerechnet werden. Für den im Windkanal simulierten Fall eines Geländes der Kategorie III und den entsprechenden Höhen der Testgebäude sind die nach ENV 1991-2-4 (1994) berechneten Böenfaktoren G in Tab. 4.6 enthalten.

Tab. 4.6: Böenfaktoren nach ENV 1991-2-4 (1994)

Höhe z [m]	Böenfaktor G nach ENV-1991-2-4 Geländekategorie III
16	2.760
32	2.499
64	2.305

Das gewählte Format der extremen Druckbeiwerte der vorliegenden Studie entspricht den Werten der ENV 1991-2-4 (1994), welche durch Multiplikation der tabellierten Druckbeiwerte mit den Böenfaktoren aus Tab. 4.6 entstehen, da in beiden Fällen die Lastbeiwerte mit dem 50-jährlichen Bemessungsstaudruck multipliziert werden, um die Windlasten zu berechnen.

4.3.1 Abschätzung der räumlichen Ausdehnung extremer Winddrücke

In Abschnitt 2 wurde bereits erläutert, daß die Beträge der extremen Druckbeiwerte mit zunehmender Fläche kleiner werden, da die Druckschwankungen nur über einen begrenzten Flächenbereich korreliert sind. Da die ENV 1991-2-4 Druckbeiwerte in Abhängigkeit von der belasteten Fläche angibt, ist für einen Vergleich mit den vorliegenden Daten zunächst die Bestimmung der Abhängigkeit der extremen Druckbeiwerte dieser Arbeit von der betrachteten Flächengröße erforderlich.

Ein limitierender Faktor bei der Untersuchung von lokalen Spitzenlasten an Windkanalmodellen ist die Frequenzantwort der verwendeten Druckmeßeinrichtung. Wie bereits in Abschnitt 2 beschrieben, kann das Drucksignal bei der Übertragung vom Meßpunkt über das Schlauchsystem zum Druckaufnehmer nur für einen bestimmten Frequenzbereich korrekt wiedergegeben werden. Kleinflächige, schnell ablaufende Druckschwankungen, welche eine hohe Frequenz besitzen, werden nur in abgeschwächter Form im Meßsignal wiedergegeben. Generell wirkt dieser Umstand ähnlich einer Glättung des Signales durch gleitende Mittelung. Die gemessenen Druckschwankungen repräsentieren somit einen Druckverlauf, der für eine Fläche weitaus größer als die Öffnung der Druckmeßbohrung typisch ist.

Die Abschätzung der Einflußfläche nach der TVL-Formel (Gl. 2.29) ergibt für die aus der o. g. maximalen Frequenzantwort bestimmten Zeit (0.01 sec) und der jeweiligen Geschwindigkeit in Gebäudehöhe Teilflächen zwischen 4.4 m² und 9.3 m² abhängig von der Gebäudehöhe. Hierbei ist jedoch zu bedenken, daß die TVL-Formel und die Umrechnung der Bezugslänge l in eine Fläche auf der sicheren Seite liegend eher größere Bezugsflächen angibt, da daß "Equivalent steady gust model" mehr für Bemessungszwecke entwickelt wurde (COOK (1990)).

Die vorliegenden Meßergebnisse wurden mit Hilfe einer Meßeinrichtung gewonnen, welche die gleichzeitige Aufnahme von 15 Druckzeitreihen erlaubt. Anhand der simultan gemessenen Zeitreihen kann, soweit dies aufgrund der Anordnung der Meßstellen möglich ist, durch räumliche Integration über unterschiedlich viele Meßpunkte die flächenhafte Ausdehnung und der Betrag lokaler Spitzendruckbeiwerte bestimmt werden.

Die höchsten lokalen Lasten treten an den Dachflächen unter schräger Anströmung auf. Um die flächenhafte Ausdehnung von Sogspitzen zu erfassen, wurden einige zusätzliche Messungen vorgenommen, bei denen im Eckbereich des Daches das Meßpunktraster durch weitere Meßstellen ergänzt wurde. In Abb. 4.10 sind für die beiden niedrigen Gebäudemodelle die $c_{p,min}$ -Werte als Funktion unterschiedlicher Teilflächen dargestellt. Hierfür wurden die simultan gemessenen Druckzeitreihen unter Berücksichtigung der räumlichen Einflußflächen gewichtet und addiert. Hierbei wurde ausgehend vom Meßpunkt, wo der größte Sog entsteht durch Hinzunahme der flächengewichteten Zeitreihen an den jeweils nächstliegenden Meßpunkten die betrachtete Flächen nach und nach vergrößert. Aus den resultierenden Zeitreihen der c_p -Werte wurden die Lastbeiwerte dann nach dem Cook-Mayne Verfahren berechnet.

Die Ergebnisse in Abb. 4.10 für Flächen > 1 m² beruhen somit auf der räumlichen Integration über mehrere Meßpunkte. Die Werte am einzelnen Meßpunkt wurden zunächst als repräsentative Ergebnisse für die Flächengröße 1 m² eingesetzt.

Ebenfalls eingetragen in Abb. 4.10 wurden die Bemessungswerte entsprechend ENV 1991-2-4 (1994). Es zeigt sich einerseits eine gute Übereinstimmung hinsichtlich der Abhängigkeit der $c_{p,min}$ -Werte von der Fläche, andererseits wird deutlich, daß die Werte der vorliegenden Arbeit

die Vorgaben des Eurocode nicht überschreiten. Für die anderen Gebäudehöhen ergeben sich ähnliche Ergebnisse.

Die Annahme, daß die Meßergebnisse am Einzelpunkt einer Einflußfläche von 1 m^2 entsprechen, erweist sich als plausibel, wenn man den Anstieg der Lasten bei abnehmender Fläche in Abb. 4.10 betrachtet. Die Werte der Einzelpunkte bei 1 m^2 liegen relativ exakt auf den Regressionsgeraden in Abb. 4.10.

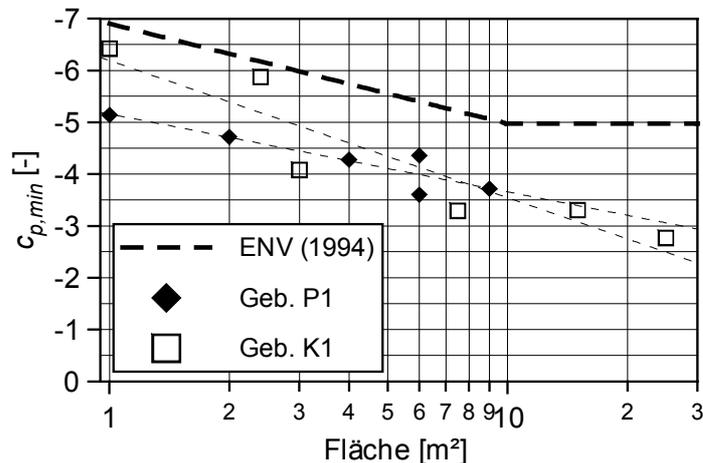


Abb. 4.10: Abhängigkeit der $c_{p,min}$ -Werte von der betrachteten Bauwerksfläche

Um diese Annahme noch weiter zu überprüfen, werden die Ergebnisse der Naturmessungen von HOSOYA, CERMAK UND DODGE (1999) herangezogen. Diese wurden an einem Satteldachgebäude mit geringer Dachneigung durchgeführt. Ein dichtes Meßpunktraster befindet sich an diesem Gebäude auf der Dachfläche direkt hinter dem First in der Nähe der Giebelwand. An dieser Position treten bei schräger Anströmung zwar nicht ganz so hohe Sogspitzen auf wie bei einem Flachdach, ihre Charakteristik ist aufgrund ähnlicher physikalischer Ursachen jedoch durchaus vergleichbar. Von HOSOYA, CERMAK UND DODGE (1999) werden Spitzenwerte für Flächengrößen von 0.84 m^2 bis 0.07 m^2 angegeben. In Abb. 4.11 sind $c_{p,min}$ -Werte an den Dächern der beiden niedrigen Testgebäude sowie die Daten von HOSOYA, CERMAK UND DODGE (1999) als Verhältnis des $c_{p,min}$ -Wertes zum entsprechenden Wert für ca. 1 m^2 Fläche eingetragen. Aufgrund dieser Normierung fallen Unterschiede in der absoluten Größe der Werte nicht mehr ins Gewicht. Es zeigt sich, daß für beide Studien ein sehr ähnlicher Zusammenhang zwischen Spitzenwert und belasteter Fläche besteht.

Die Untersuchungen von LIN, SURRY UND TIELEMAN (1995) im Eckbereich von Dachflächen wurden auch für flächengemittelte c_p -Werte durchgeführt. Die Größe des c_p -Wertes wird als Funktion der betrachteten Fläche zur Gebäudehöhe im Quadrat, $c_p = f(\text{Fläche}/H^2)$ angegeben. Die Beziehung $c_{p,min}/c_{p,min,1m^2} = f(\text{Fläche})$, welche sich hieraus mit der vorliegenden Gebäudehöhe von 16 m ergibt, ist ebenfalls in Abb. 4.11 eingetragen. Auch diese Daten fügen sich in den Verlauf der anhand der Ergebnisse der vorliegenden Studie ermittelten Regressionsbeziehung ein.

Insgesamt betrachtet legt dies für die vorliegende Studie die Schlußfolgerung nahe, daß die Extremwerte am einzelnen Meßpunkt für eine Teilfläche von 1 m^2 repräsentativ sind. Eine ähnliche Betrachtung wird auch noch anhand der Ergebnisse der Naturmessungen in Abschnitt 6.4.1 durchgeführt.

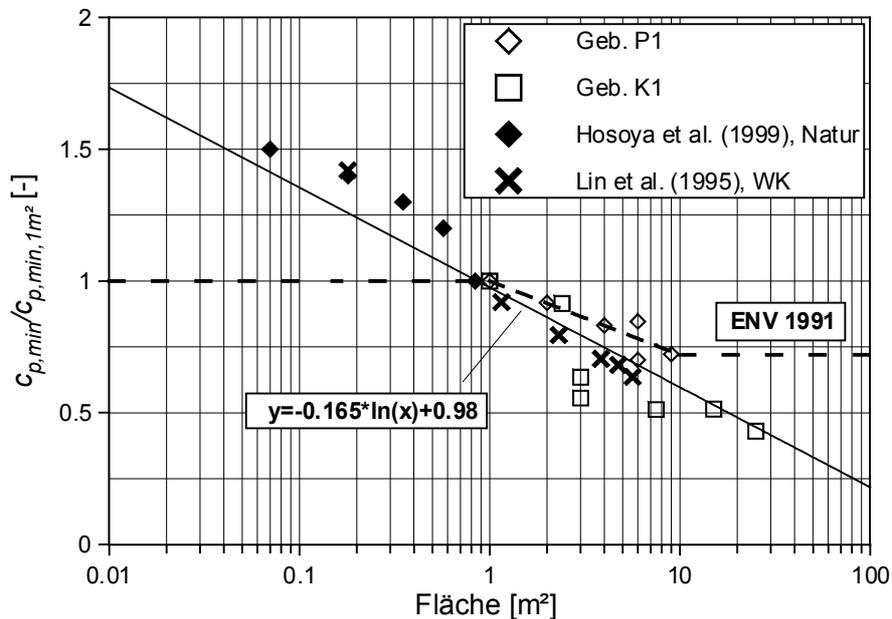


Abb. 4.11: Abhängigkeit der $c_{p,min}$ -Werte von der Größe der Teilfläche am Dach

4.3.2 Lokale Extremwerte für eine Einflußfläche von 1 m^2

Im vorangegangenen Abschnitt konnte gezeigt werden, daß die Ergebnisse der Extremwertanalyse am einzelnen Meßpunkt als repräsentativ für eine Bauteilgröße von 1 m^2 , angesehen werden können. Diese Flächengröße ist identisch mit der Bezugsfläche der $c_{p,l}$ -Werte, welche in der ENV 1991-2-4 (1994) spezifiziert werden.

Aufgrund der Vorgabe für die Bemessung, daß der Bemessungswind für alle Richtungen anzusetzen ist, können die lokalen Lasten als Einhüllende der Extremwerte über alle Windrichtungen bestimmt werden. Hinsichtlich der lokalen Lasten auf kleine Flächen lassen sich an den untersuchten Gebäuden daher folgende für die Bemessung relevante Situationen unterscheiden:

- Wandflächen im Sogbereich – große Sogkräfte an den Wandflächen entstehen im Ablösebereich bei paralleler Ausrichtung der Wand zum Wind. Betragsmäßig kleinere Soglasten entstehen auf den Gebäuderückseiten bei senkrechter oder schräger Anströmung.
- Wandflächen im Druckbereich – große Druckkräfte an Wandflächen entstehen bei frontaler Anströmung der Wand im Staupunktbereich und bei schräger Anströmung im Bereich der vorderen Gebäudekante.

- Dachflächen – an Flachdächern werden aufgrund der Strömungsablösung hohe Soglasten hervorgerufen. Lokale Drucklasten sind in den Bereichen der wieder angelegten Strömung zu erwarten.

Die Extremwerte für die unterschiedlichen Fälle werden nachfolgend zusammengestellt und mit den Angaben der ENV 1991-2-4 (1994) verglichen. Die Bezeichnung der Windrichtungen relativ zur dargestellten Wandfläche entspricht hierbei der Definition nach Abb. 4.1.

Wandflächen im Sogbereich

In Abb. 4.12 ist die räumliche Verteilung der $c_{p,min}$ -Werte über die Seitenwände der Modellserie P (rechteckiger Grundriß) für eine parallele Anströmung ($90^\circ \pm 45^\circ$) dargestellt. Es wurde für jede Meßstelle der jeweils höchste Sogbeiwert für diese drei Richtungen ausgewählt und die räumliche Verteilung dieser Werte in Form von Isolinien dargestellt. Die Auswahl der Werte entspricht somit den Angaben der ENV 1991-2-4 und erlaubt einen direkten Vergleich zwischen den Ergebnissen der Windkanalmessungen am Einzelgebäude und den Bemessungsvorgaben. In den Tabellen unter den Isoliniendarstellungen in Abb. 4.12 sind die entsprechenden c_p -Werte der ENV 1991-2-4, welche mit dem Böenfaktor aus Tab. 4.6 multipliziert wurden, für die Zonen A, B und C gültig für Seitenwände parallel zum Wind ($\pm 45^\circ$) eingetragen. In den Isoliniendarstellungen sind diese Zonen ebenfalls eingezeichnet und markiert.

Generell ist festzustellen, daß die durch die Windkanaluntersuchungen ermittelten $c_{p,min}$ -Werte in der Zone A bzw. A*, dort wo die höchsten Soglasten auftreten, sehr nahe an die Bemessungswerte der ENV 1991-2-4 heranreichen, diese jedoch nicht überschritten werden. Die Sogmaxima treten im bodennahen Bereich auf, ihre Positionen stimmen gut mit dem Auftreten der höchsten $c_{p,rms}$ -Werte (siehe Abb. 4.3 und Abb. 4.4) überein. Auch in den anderen Zonen finden, abgesehen von Zone C beim 32 m und Zone B* beim 64 m hohen Gebäude, keine wesentlichen Überschreitungen der Bemessungswerte statt. In der Zone C des 32 m hohen Gebäudes tritt nahe der Dachkante ein Bereich erhöhten Soges auf, welcher im Modell bei einer Anströmrichtung von 135° hervorgerufen wurde. An dieser Meßstelle wird der Bemessungswert um 70 % überschritten. Beim 64 m hohen Gebäude zeigt sich an der kurzen Seitenwand deutlich eine andere Struktur der Isolinien. Während die Isolinien am 16 m und 32 m hohen Gebäude eine vertikale Ausrichtung aufweisen, welche der in der ENV 1991-2-4 vorgeschlagenen Zoneneinteilung relativ ähnlich ist, verlaufen die Isolinien der ermittelten $c_{p,min}$ -Werte an der kurzen Seitenwand des hohen Gebäudes eher in diagonaler Richtung. Hohe Sogbeiwerte treten wie bei den Seitenwänden der niedrigeren Gebäude in Zone A* im bodennahen Bereich auf, jedoch erstrecken sich diese im Fall des hohen Gebäudes schräg nach oben verlaufend bis zur hinteren Gebäudekante in die Zone B* hinein. Ein ähnliches räumliches Verhalten der Sogspitzen wird auch von SURRY und DJAKOVICH (1995) beschrieben. Die Ursache hierfür liegt in der komplexen, dreidimensionalen Umströmung des Gebäudes. Aufgrund der geometrischen Verhältnisse und der geringeren Turbulenzintensität bei zunehmender Höhe findet in den oberen Bereichen der Seitenwand keine Wiederanlegung der Strömung statt.

Die räumliche Verteilung der Bemessungswerte gibt somit in diesem Fall nicht die reale Verteilung der Windlasten wieder. In der Bemessungspraxis wird dies jedoch dadurch kompensiert, daß der Bemessungswind in der Regel richtungsunabhängig angenommen wird. Dies bedeutet, die Verteilung nach ENV 1991-2-4 wird für den statischen Nachweis sowohl für Wind von der rechten als auch von der linken Seite angesetzt, wodurch dann in den Kantenbereichen generell für höhere lokale Lasten bemessen wird.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß die neue DIN 1055-4 (2001) an der luvseitigen Kante in Zone A deutlich höhere Lastbeiwerte (ca. das 1.5fache) vorschlägt. Diese wurden offensichtlich abweichend von der ENV 1991-2-4 (1994), welche auf allgemein anerkannten Windkanaluntersuchungen der jüngeren Vergangenheit beruht (siehe Abschnitt 2.4.7), aus der alten DIN 1055-4 (1986) übernommen. Im Zusammenhang mit der vorliegenden Studie wird jedoch deutlich, daß diese hohen Lastbeiwerte keinesfalls erreicht werden und als eher zu konservativ einzustufen sind. Dies wird auch im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit deutlich, da einerseits die Naturmessungen die durchgeführten Windkanaluntersuchungen vor allem auch im Bereich der Extremwerte bestätigen, andererseits das Sicherheitsniveau in diesem Fall unverhältnismäßig hoch liegen würde (siehe Kapitel 7) und zu einer unwirtschaftlichen Bemessung führt.

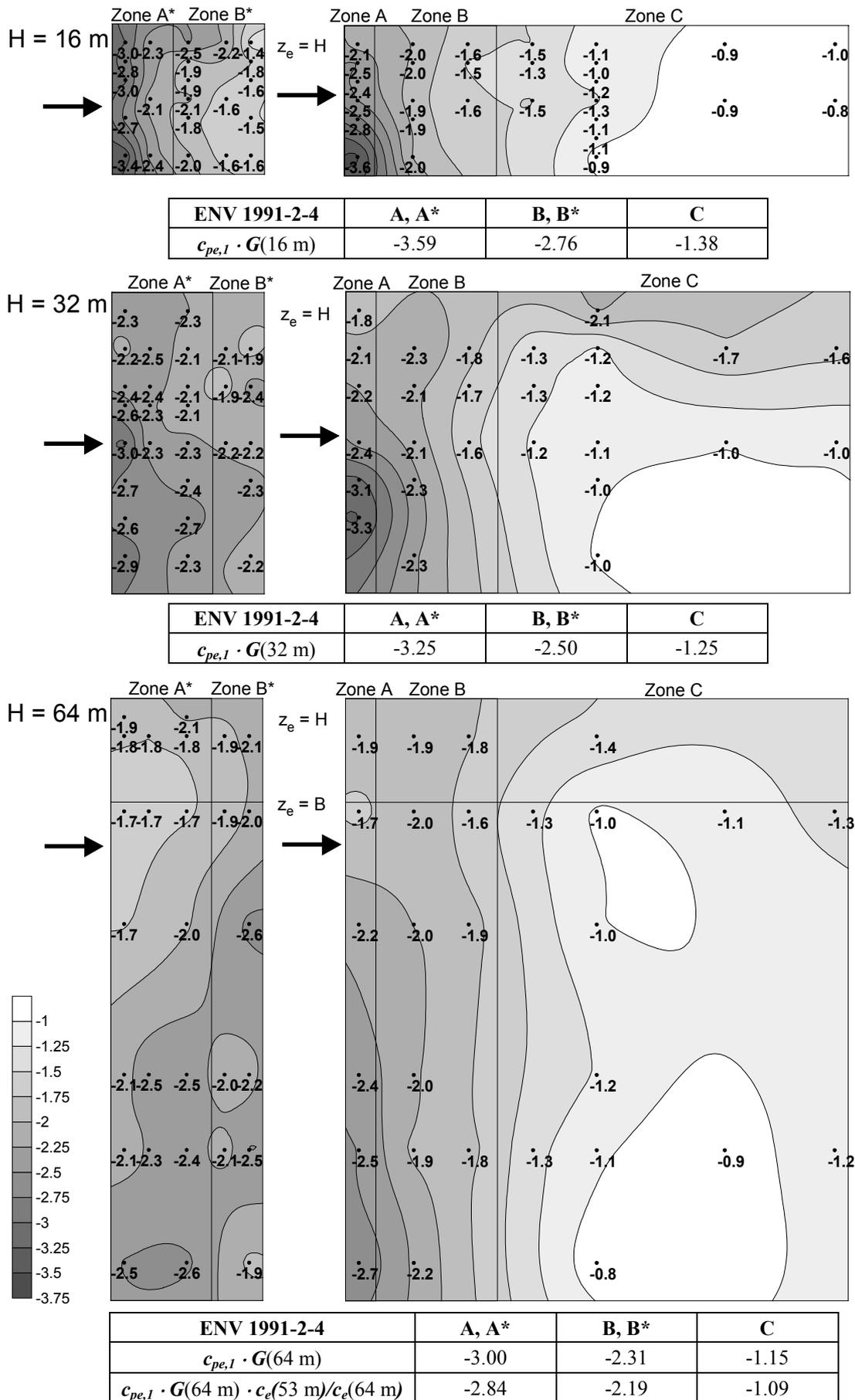


Abb. 4.12: Vergleich der $c_{p,min}$ -Werte mit den Bemessungswerten nach ENV 1991-2-4 (1994), Seitenwände P1-, P2-, P3-Gebäude, parallele Anströmung $\pm 45^\circ$

Wandflächen im Druckbereich

Die jeweils höchsten $c_{p,max}$ -Werte für die Meßstellen an den Wandflächen der Modellserie P unter frontaler Anströmung (0°) und schräger Anströmung (45°) sind entsprechend der vorangegangenen Abbildung in Abb. 4.13 enthalten. Es ist deutlich festzustellen, daß mit zunehmender Höhe des Gebäudes eine Abnahme der maximalen Druckbeiwerte $c_{p,max}$ erfolgt. Ursache hierfür ist die abnehmende Turbulenzintensität mit zunehmender Höhe, wodurch der fluktuierende Anteil der Drucklast vermindert wird. Dies wird auch aus dem Vergleich mit den $c_{p,rms}$ -Werten aus Abb. 4.2 bis Abb. 4.4 deutlich. Analog zu den $c_{p,rms}$ -Werten liegen die höchsten $c_{p,max}$ -Werte beim niedrigen Gebäude am oberen Rand bei ca. $0.9 H$, während die Lage der maximalen Werte sich bei den höheren Gebäuden bei ca. $0.8 H$ befindet. Bei der kurzen Seitenwand treten die Maxima im Staupunktbereich auf und beschränken sich trotz der Einbindung der Werte unter 45° -Anströmung auf diesen Bereich. Aus Abb. 4.3 wird deutlich, daß an der langen Seitenwand die $c_{p,mean}$ -Werte bei 45° -Anströmung im Vergleich zur kurzen Seitenwand höher liegen. An der langen Seitenwand entsteht daher aufgrund der eingebundenen Werte für 45° eine Zone maximalen Druckes, welche sich entsprechend links von der Mitte ausdehnt. Folgt man der Methodik der ENV 1991-2-4 (1994) und gibt die maßgebenden Druckbeiwerte für einen Richtungsbereich $\pm 45^\circ$ an, so müßte man die in Abb. 4.13 Verteilungen entsprechend an der Mittelsenkrechten spiegeln.

Im Hinblick auf die angegebenen Bemessungswerte nach ENV 1991-2-4 (1994) kann festgestellt werden, daß diese durch die in der vorliegenden Studie ermittelten $c_{p,max}$ -Werte nicht überschritten werden. Während am kleinsten Meßgebäude die gemessenen maximalen Werte die Bemessungswerte um ca. 10% unterschreiten, wird der Unterschied mit zunehmender Höhe der Gebäude, vor allem beim höchsten Gebäude, deutlich größer. Die Ursache hierfür liegt darin, daß das Turbulenzintensitätsprofil der modellierten Anströmung bei großen Höhen eine stärkere Abnahme der Turbulenz mit der Höhe aufweist, als das der Berechnung des Böigkeitsfaktors zugrundeliegende Profil (siehe auch Abb. 3.2).

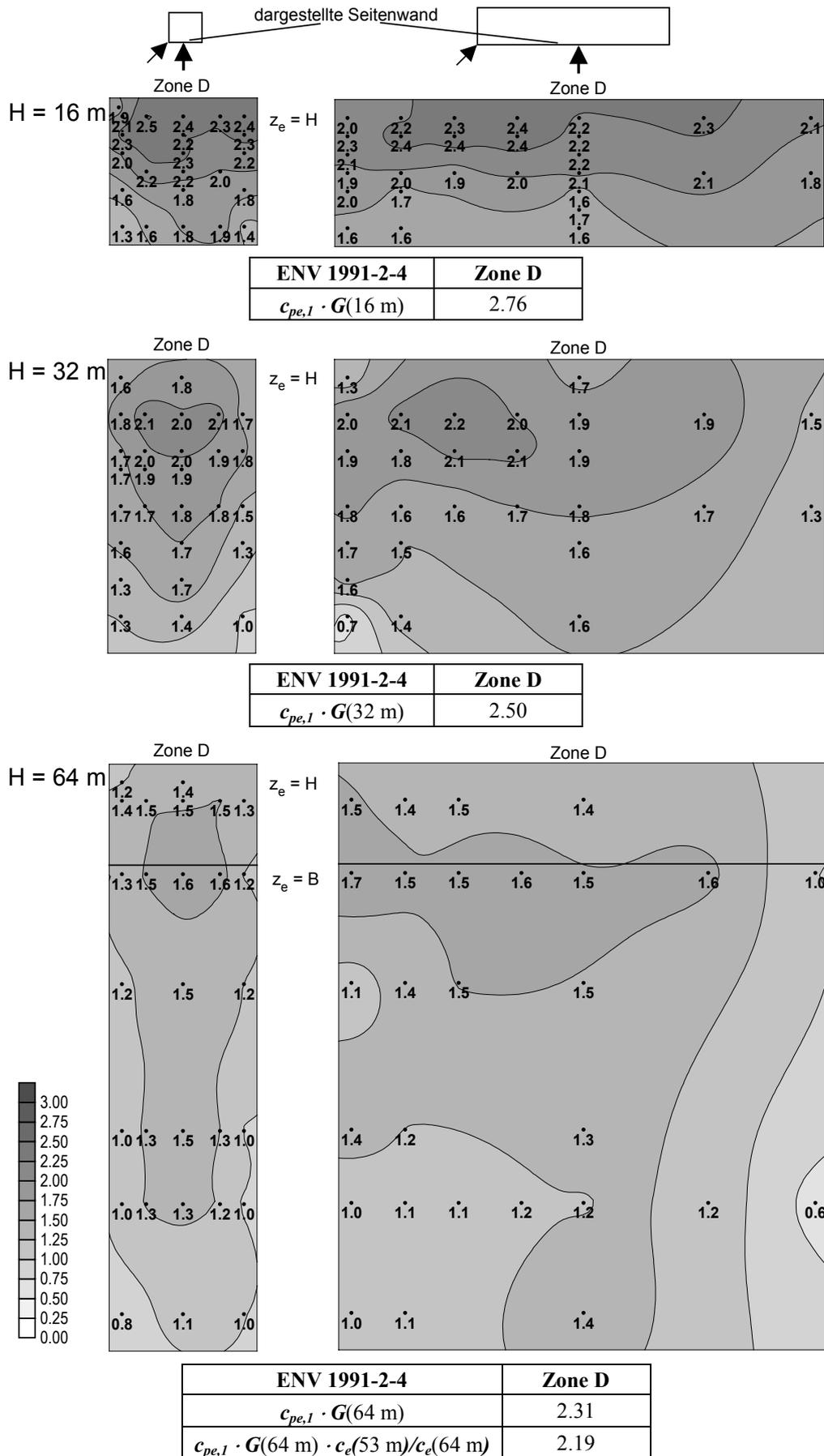


Abb. 4.13 Vergleich der $c_{p,max}$ -Werte mit den Bemessungswerten nach ENV 1991-2-4 (1994), Seitenwände P1-, P2-, P3-Gebäude, frontale Anströmung und schräge Anströmung

Dachflächen - Sog

In gleicher Weise wie für die Seitenwände werden in Abb. 4.14 die extremen Sogbeiwerte an den Dachflächen beider Modellserien verglichen. Hierfür wurde an jedem Meßpunkt der maximale Sogbeiwert aus den Ergebnissen für die beiden eingezeichneten Windrichtungen verwendet. Dies bedeutet, daß jeweils die unteren Hälften der dargestellten Dachflächen mit den Vorgaben der ENV 1991-2-4 verglichen werden können. Hinsichtlich der Unterschiede in den Maximalwerten der beiden Modellserien muß angemerkt werden, daß der Abstand der Meßpunkte zum Dachrand an der Modellserie K (quadratische Grundfläche) mit 0.6 m im Naturmaßstab deutlich geringer ist als bei den Dächern der Modellserie P, wo der Abstand zum Rand 1.4 m beträgt. Aufgrund der großen Gradienten in den Eckbereichen, welche auch in Abb. 4.14 an den quadratischen Dachflächen deutlich erkennbar werden, wurden daher für die Dachflächen der Modellserie K in den Randbereichen höhere maximale Sogbeiwerte ermittelt, welche jedoch ausschließlich auf die Anordnung der Meßpunkte zurückzuführen sind. Zum Vergleich mit den Daten der ENV 1991-2-4 sollten daher vor allem die Ergebnisse der Modellserie K betrachtet werden, da zur Erfassung der Last auf einer Fläche von ca. 1 m² ein Abstand des Meßpunktes zum Rand von 0.6 m als günstig erscheint.

Die Bereiche des höchsten Soges an der unteren Ecke der Dächer von Modellserie K in Abb. 4.14 entstehen bei der schrägen Anströmung unter 45°. Aufgrund der quadratischen Grundfläche des Daches verläuft die Druckverteilung symmetrisch zur diagonalen Achse. In geringer Entfernung von der angeströmten Gebäudeecke bilden sich jeweils an den Kanten zwei Zonen aus, welche zwar nur eine kleine Fläche umfassen, jedoch eine erhebliche Sogbelastung aufweisen. Die Sogbeiwerte in diesem Bereich liegen nur knapp unter den in der ENV 1991-2-4 für die Zone F vorgegebenen Werten. Die Tiefe der Zone F wird im vorliegenden Fall nach der Breite des Gebäudes ($b/10$) bestimmt und ist somit für die Modellserie K entsprechend geringer. Es wird hierbei deutlich, daß nur eines der beiden Sogmaxima durch die hohen Bemessungswerte der Zone F abgedeckt würde, wenn bei der Bemessung der Wind aus den anderen Richtungen unberücksichtigt bleibt. Eine sichere Bemessung ist im vorliegenden Fall daher nur möglich, indem man die Verteilung nach ENV 1991-2-4 für die um 90° gedrehte Windrichtung mit demselben Bemessungsstaudruck ansetzt. Die Abminderung des Staudrucks z. B. infolge eines rauheren Geländes für diese Windrichtung würde zu einer Unterschätzung der Lasten führen.

Sieht man einmal vom bereits diskutierten Eckbereich ab, läßt sich für die Zone H und G insgesamt feststellen, daß die gemessenen Werte und die Bemessungswerte nach ENV 1991-2-4 in der gleichen Größenordnung liegen. Wesentliche Abweichungen ergeben sich hingegen für die Zone I. Die Bemessungswerte der ENV 1991-2-4 werden hier um mehr als das Dreifache überschritten. Die Größenordnung der Bemessungswerte, vor allem ihre Definition sowohl als Sog- als auch als Drucklasten, sind dazu geeignet die Lasten für den Zustand einer wiederangelegten Strömung zu beschreiben. Dieser Fall ist in Abb. 4.15 anhand der Ergebnisse für das Testgebäude P1 für die Anströmrichtung senkrecht zur kürzeren Seite dargestellt.

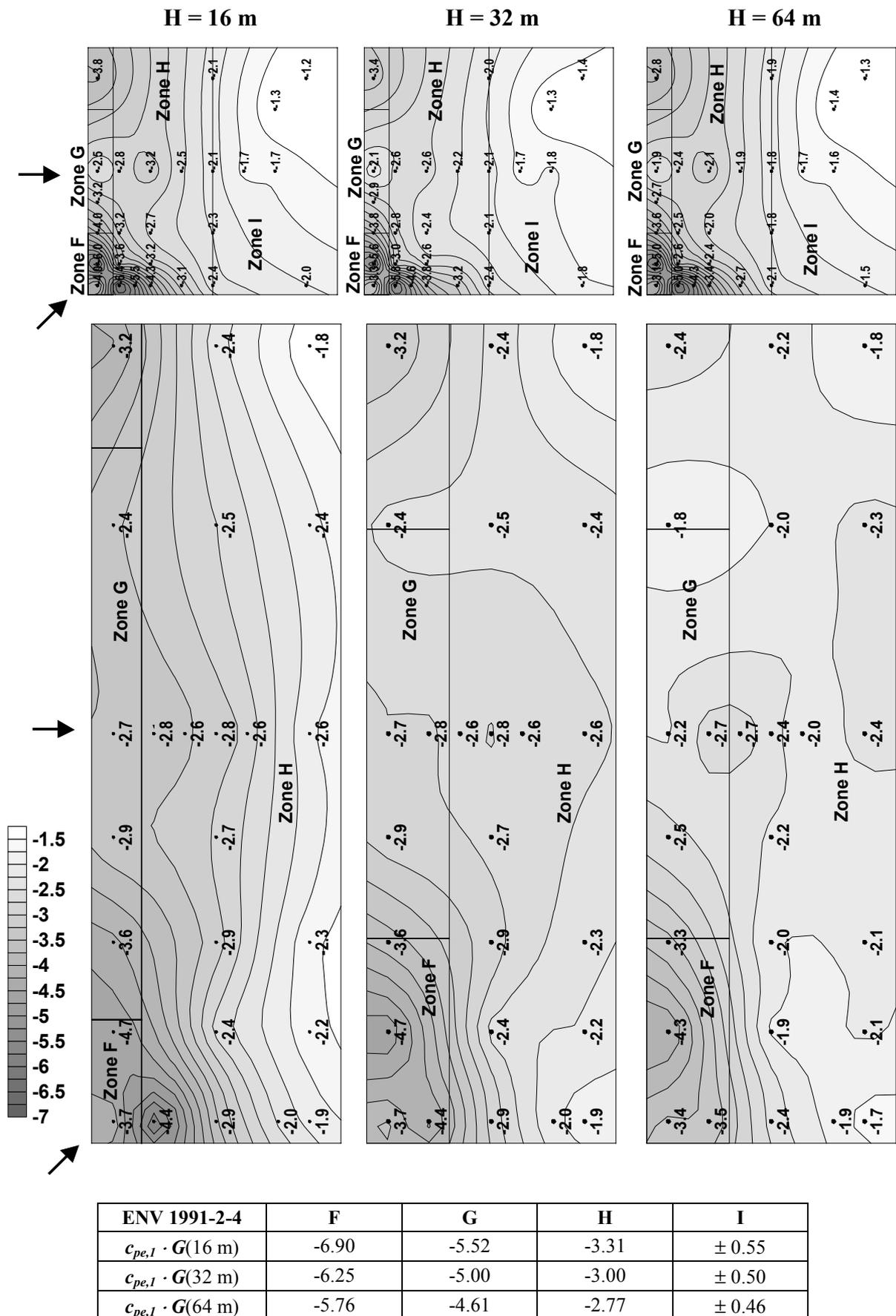


Abb. 4.14: Vergleich der $c_{p,min}$ -Werte mit den Bemessungswerten nach ENV 1991-2-4 (1994), Dachflächen aller Meßgebäude

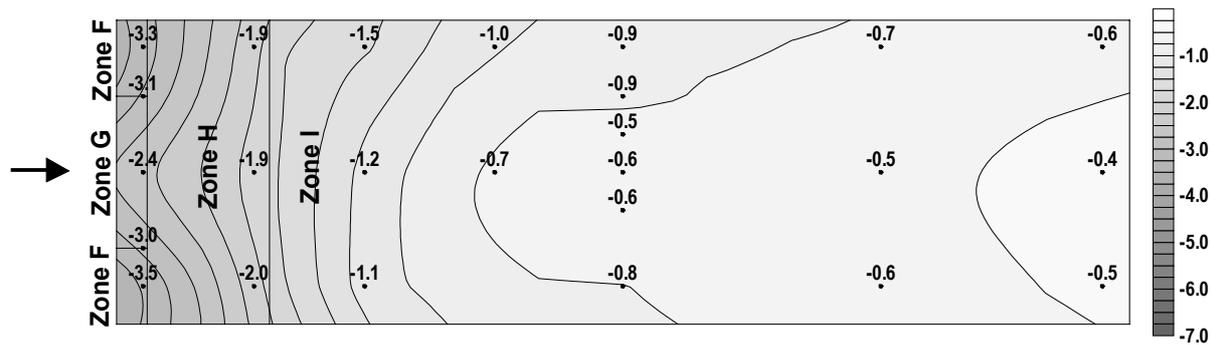


Abb. 4.15: Vergleich der $c_{p,min}$ -Werte an der Dachfläche von Gebäude P1 ($H = 16$ m) für die Windrichtung 0° mit den Bemessungswerten nach ENV 1991-2-4 (1994)

Hierbei ist festzustellen, daß erst im hinteren leeseitigen Dachbereich die ermittelten Sogmaxima in der Größenordnung der Bemessungswerte für die Zone I liegen. Insgesamt sollte jedoch nochmals angemerkt werden, daß bei der Bemessung der Bemessungswind von allen Seiten anzusetzen ist und die für die lokalen Lasten der ungünstigste Wert maßgebend ist. Hierdurch wird die Unterschätzung der lokalen Lasten verhindert.

Dachflächen – Druck

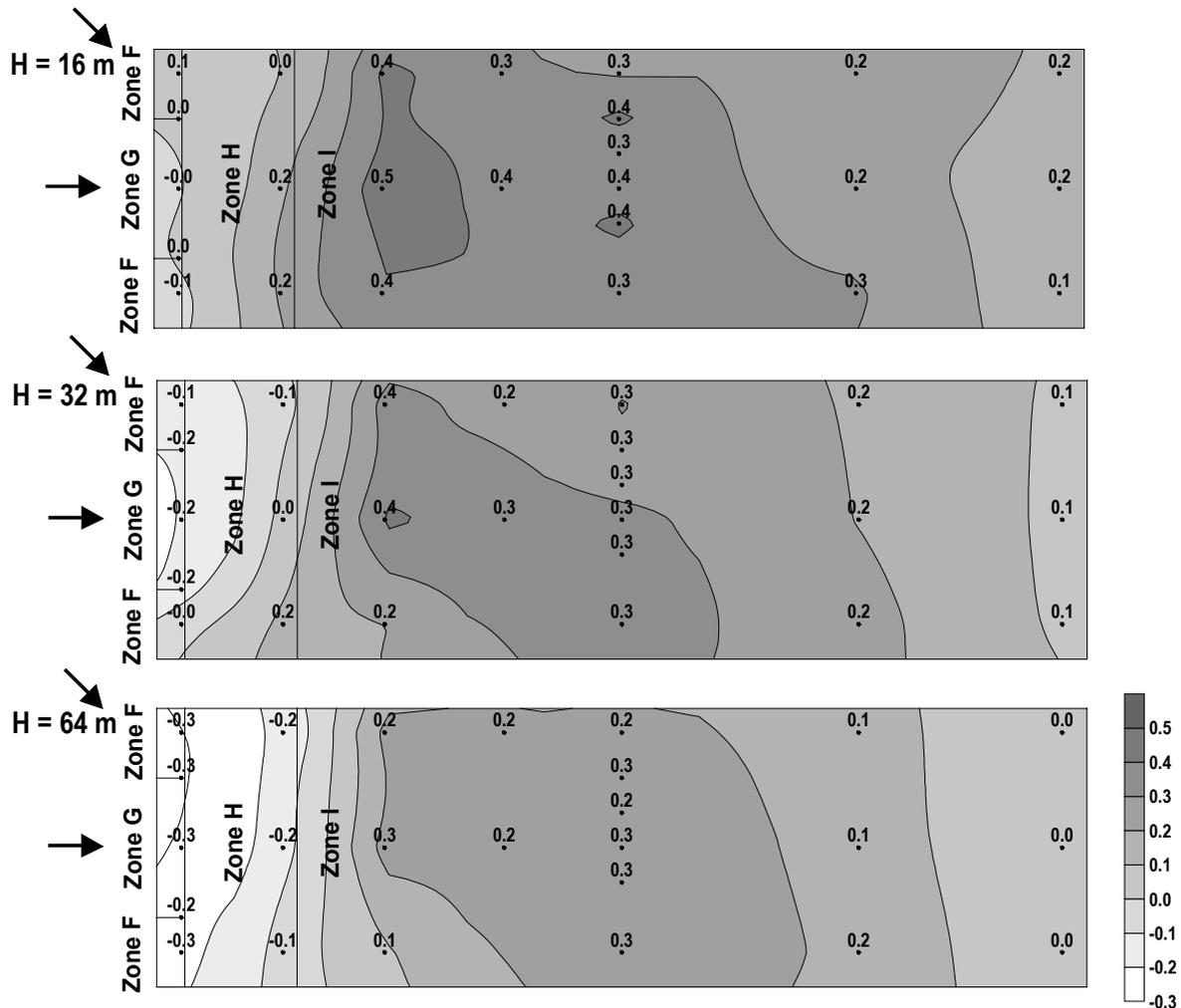
In Kapitel 2 wurden bereits erwähnt, daß an Dachflächen vor allem im Bereich der Wiederanlage kurzzeitig auch Druck d. h. positive Druckbeiwerte auftreten können. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn die Windrichtung parallel zur langen Achse des Gebäudes steht. Die ENV 1991-2-4 (1994) weist daher für die Zone I, welche diesen Bereich an langen Baukörpern abdeckt, sowohl einen negativen als auch einen positiven Lastbeiwert aus (siehe Tab. 2.4).

In Abb. 4.16 werden die jeweils höchsten Druckmaxima $c_{p,max}$ der beiden Windrichtungen 0° und 45° dargestellt. Zum Vergleich sind die Bemessungswerte nach ENV 1991-2-4 (1994) für die Zone I in einer Tabelle gegeben. Die höchsten $c_{p,max}$ -Werte liegen bei allen Gebäuden im Bereich der Wiederanlagezone. Dies wird vor allem aus dem Vergleich mit dem Verlauf der $c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ -Werte in Abb. 4.6 deutlich. Die $c_{p,max}$ -Werte werden jedoch genauso wie die Bemessungswerte nach ENV 1991-2-4 (1994) mit zunehmender Höhe der Gebäude geringer. Hierbei liegen die Ergebnisse am niedrigen Gebäude recht nahe an den Bemessungsvorgaben, mit zunehmender Gebäudehöhe nehmen die Werte der untersuchten Testgebäude stärker ab als dies in der ENV 1991-2-4 (1994) enthalten ist.

Der am 16 m hohen Gebäude ermittelte Maximalwert von 0.5 stimmt exakt mit dem von KASPERSKI (2000) angegebenen Wert für ein niedriges Hallengebäude überein.

Für die Windrichtung 90° (nicht in Abb. 4.16 enthalten) ergeben sich nur am niedrigen Gebäude an der hinteren Dachkante $c_{p,max}$ -Werte der Größenordnung 0.4. Wenn, wie bereits erwähnt, der Bemessungswind für alle Windrichtungen angenommen wird, um die Windlasten nach ENV 1991-2-4 (1994) zu bestimmen, so wird jede Stelle des Daches auch für einen positiven Druckbeiwert bemessen. Insofern erscheinen die Vorgaben der ENV 1991-

2-4 (1994) ausreichend. Von Bedeutung für den Tragwerksplaner sind diese Lasten vor allem im Hinblick darauf, daß sie mit anderen nach unten gerichteten Lasten (Schnee-, Eigengewichts-, Verkehrslasten) zu überlagern sind.



ENV 1991-2-4	Zone I
$c_{pe,I} \cdot G(16\text{ m})$	± 0.55
$c_{pe,I} \cdot G(32\text{ m})$	± 0.50
$c_{pe,I} \cdot G(64\text{ m})$	± 0.46

Abb. 4.16 Vergleich der lokalen Druckmaxima ($c_{p,max}$ -Werte) an den Dachflächen mit den Bemessungswerten nach ENV 1991-2-4 (1994)

4.3.3 Lokale Extremwerte für Teilflächen unterschiedlicher Größe

Entsprechend der in Abschnitt 4.3.1 bereits erläuterten Vorgehensweise zur Bestimmung der extremen Druckbeiwerte in Abhängigkeit von der Größe der betrachteten Fläche, wurden für die in der ENV 1991-2-4 festgelegten Zonen an Wänden und Dächern die $c_{p,min}$ - bzw. $c_{p,max}$ -Werte für Teilflächen unterschiedlicher Größe berechnet. Bei der Bestimmung der extremen Druckbeiwerte für unterschiedliche Teilflächen wurde ausgehend vom Meßpunkt mit einer relativ hohen punktuellen Last innerhalb der Lastzone schrittweise über die Fläche integriert. Hierbei konnte nicht immer der Meßpunkt mit der jeweils höchsten Last innerhalb der Zone

als Ausgangspunkt verwendet werden, da aufgrund der Meßpunktanordnung einerseits ausreichend viele weitere Meßpunkte im Nahbereich dieses Punktes vorhanden sein mußten, um bei der Integration über die Fläche präzise Ergebnisse zu erhalten, andererseits war die Zahl der zur Verfügung stehenden Druckaufnehmer auf 15 beschränkt, weshalb niemals die Zeitreihen an allen Meßpunkten innerhalb einer Zone gleichzeitig aufgenommen werden konnten. Insgesamt wurden jedoch die Meßstellen bzw. Meßstellengruppen anhand der vorliegenden räumlichen Verteilung der extremen Druckbeiwerte an den Einzelpunkten so ausgewählt, daß sie die innerhalb der Zone ermittelten Lasten hinsichtlich der räumlichen Verteilung und der auftretenden Gradienten sinnvoll repräsentieren. Dies zeigen sowohl die Vergleiche mit anderen Studien, als auch die Vergleiche mit den Naturmessungen (Kapitel 6).

Aufgrund der Höhenabhängigkeit der Böigkeitsfaktoren G wurden die ermittelten $c_{p,min}$ - bzw. $c_{p,max}$ -Werte mit dem jeweiligen Wert für 1 m^2 Fläche normiert und werden nachfolgend als Verhältnis $c_{p,min}/c_{p,min,1\text{m}^2}$ bzw. $c_{p,max}/c_{p,max,1\text{m}^2}$ dargestellt. Hierbei ergeben sich für die Bemessungswerte nach ENV 1991-2-4 von der Bauwerkshöhe unabhängige Kurven, so daß die Ergebnisse für die unterschiedlich hohen Meßgebäude für die jeweilige Lastzone in einem Diagramm dargestellt werden können.

Wandflächen im Sogbereich

Wie bereits erläutert, entstehen an Wandflächen die größten Sogkräfte bei paralleler Ausrichtung zum Wind. Die für diesen Fall ermittelten extremen Sogbeiwerte $c_{p,min}$ sind für die Zone A* und B* in Abb. 4.17 enthalten. Das in der ENV 1991-2-4 gegebene Verhältnis $c_{p,min,10\text{m}^2}/c_{p,min,1\text{m}^2}$ beträgt bei Zone A* 0.77 und bei Zone B* 0.8. Zwischen den Werten für diese beiden Flächengrößen ist der Beiwert umgekehrt proportional zum Logarithmus der Fläche. Für Flächen $< 1 \text{ m}^2$ und $> 10 \text{ m}^2$ wird der Druckbeiwert als konstant angenommen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit hinsichtlich der Wandflächen unter starker Sogbelastung in Abb. 4.17 zeigen sowohl hinsichtlich der Größenordnung als auch hinsichtlich der Abnahme mit zunehmender Fläche eine gute Übereinstimmung mit den in der ENV 1991-2-4 enthaltenen Bemessungsvorgaben.

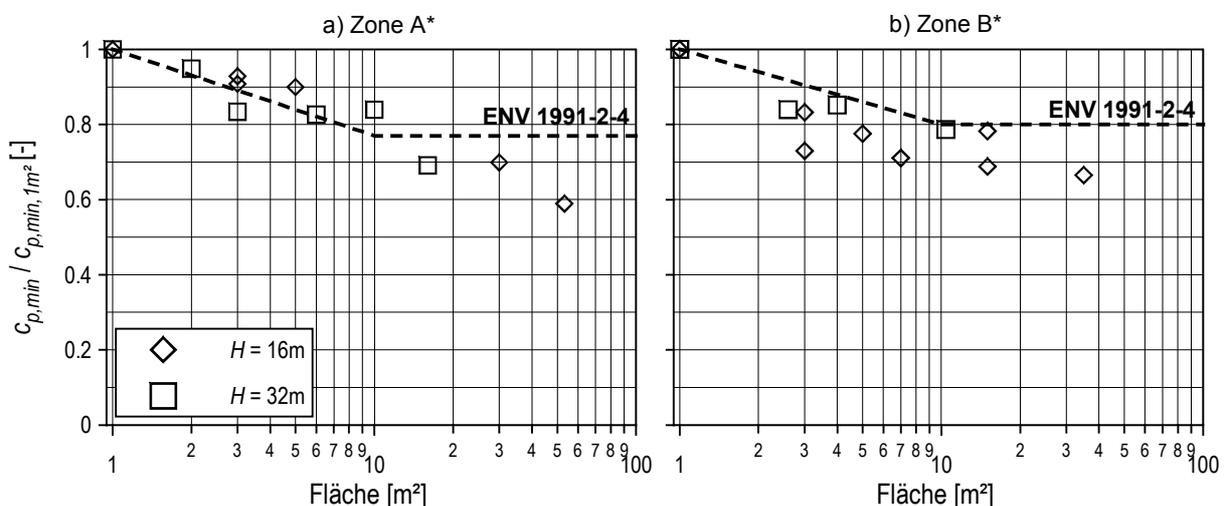


Abb. 4.17: Abhängigkeit der $c_{p,min}$ -Werte von der Fläche für Wandflächen im Sogbereich (parallele Anströmung)

Die ermittelten Werte zeigen einen gewissen Streubereich bzw. unterschiedliche Werte für die gleiche Flächengröße. Dies hängt hauptsächlich damit zusammen, daß die Flächengröße in unterschiedlichen Richtungen um den zuerst betrachteten Einzelpunkt erweitert wurde, der auftretende Druck bzw. Sog jedoch nicht nach allen Seiten hin gleichmäßig korreliert auftritt.

Infolge der Wirbelbildung in der Ablösezone gibt es durchaus Richtungen in welche die auftretenden Lasten höher korreliert sind und somit auch zu höheren Lasten auf die zugrunde gelegte Fläche führen können. Ergebnisse von Korrelationsrechnungen, die dies ebenfalls bestätigen wurden beispielsweise von KAREEM (1997) oder WACKER (1992) vorgelegt.

Wandflächen im Druckbereich

Für Wandflächen, welche infolge frontaler Anströmung hohen Drucklasten ausgesetzt sind, ist die Abhängigkeit der Lastbeiwerte in Abb. 4.18 dargestellt. Für die Gebäudevorderseite wird in ENV 1991-2-4 nur eine Lastzone (Zone D) definiert. Auch hier zeigt sich, daß eine gute Übereinstimmung mit den Vorgaben der ENV 1991-2-4 (1994) besteht.

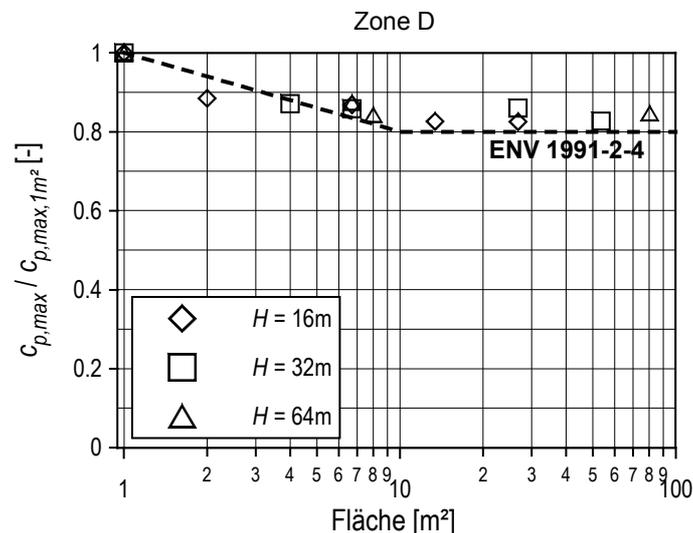


Abb. 4.18 Abhängigkeit der $c_{p,max}$ -Werte von der Fläche für Wandflächen im Druckbereich (frontale Anströmung)

Dachflächen

Der Zusammenhang zwischen den Lastbeiwerten und der Größe der Teilfläche an den Lastzonen von Flachdächern sind in Abb. 4.19 und Abb. 4.20 enthalten. Die Lastzonen F, G und H in Abb. 4.19 sind hierbei für die Sogkräfte maßgebend, während die Lastzone I (Abb. 4.20) das Verhältnis der Druckkräfte zu Flächengröße wiedergibt.

Die Übereinstimmung im Hinblick auf die Abminderung der Last bei zunehmender Fläche an den Lastzonen F, G und H in Abb. 4.19 stimmt mit der ENV 1991-2-4 (1994) gut überein, abgesehen von geringfügigen Abweichungen bei der Lastzone G. Für Lastzone I gibt die ENV 1991-2-4 (1994) keine Abminderung der Drucklast mit der Fläche vor, obwohl diese in Abb. 4.20 anhand der Daten der vorliegenden Studie offensichtlich wird.

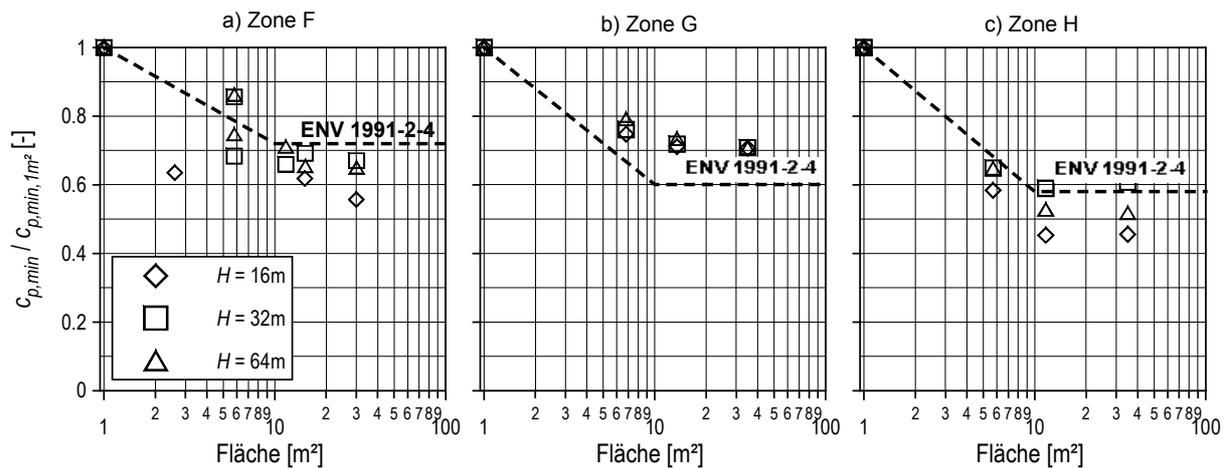


Abb. 4.19 Abhängigkeit der $c_{p,min}$ -Werte von der Fläche für Dachflächen, für Zone F, G und H

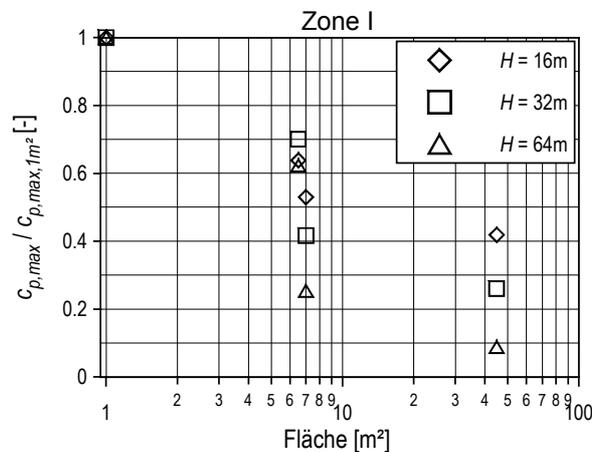


Abb. 4.20 Abhängigkeit der $c_{p,max}$ -Werte von der Fläche für Dachflächen im Bereich der Zone I, Windrichtung 0°

4.4 Schlußfolgerungen

Die ermittelten Ergebnisse am Einzelgebäude zeigen ein hohes Maß an Übereinstimmung mit Daten aus der Literatur und der Vorgaben nach der ENV 1991-2-4 (1994). Dies gilt sowohl für globale Lasten zur Bemessung der Tragstruktur als auch für lokale Lasten auf Bauelemente oder Bauteile unterschiedlicher Größe. Durch eine im Frequenzbereich hochauflösende simultan aufnehmende Druckmeßtechnik ist es gelungen, die räumlich-zeitliche Struktur der Druckschwankungen im Modell zu erfassen und mit Hilfe statistischer Methoden (Cook-Mayne-Methode) in Lastbeiwerte für die Bemessung zu übertragen. Weitere Aufschlüsse über die Güte der ermittelten Daten können anhand der Ergebnisse in Natur (Kapitel 6) gewonnen werden.

Aufgrund der guten Übereinstimmung ist die Simulation der Windlasten an den Einzelgebäuden somit als idealisierte Realisierung der in der ENV 1991-2-4 (1994) definierten Lasten für ein Gebiet der Kategorie III zu interpretieren. Das Verhältnis zwischen den Ergebnissen in der Bebauung und am Einzelgebäude, kann somit direkt als Korrekturfaktor für die Bemessungslasten der ENV 1991-2-4 (1994) angesehen werden.

5 Ergebnisse der Windkanalversuche in umgebender Bebauung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der systematischen Windkanaluntersuchungen an den Testgebäuden, welche in die unterschiedlichen Bebauungsstrukturen eingebettet wurden, dargestellt und erläutert. Die Motivation der vorliegenden Arbeit zielt in erster Linie darauf ab, die Wirkung umgebender Bebauung bei der Erstellung von Bemessungsvorschriften nachhaltiger berücksichtigen zu können. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie liefern hierfür einerseits wertvolle Erkenntnisse im Hinblick auf die grundlegenden Abhängigkeiten zwischen Bebauungsstruktur bzw. deren geometrischen Parametern und den auftretenden Windlasten, andererseits können aufgrund der untersuchten Bandbreite möglicher Gebäudeanordnungen Aussagen über die zu erwartende Variabilität der Windlasten an Gebäuden in bebauten Gebieten getroffen werden. Diese finden dann Eingang in Kapitel 7 bei der Anwendung der Zuverlässigkeitsanalyse zur Ermittlung bemessungsrelevanter Windlasten in bebauten Gebieten.

In den folgenden Abschnitten werden die in den unterschiedlichen Bebauungsgebieten ermittelten Druckbeiwerte denjenigen am Einzelgebäude gegenübergestellt, um den Einfluß der Bebauung und die Bandbreite der ermittelten Werte zu verdeutlichen. Hierbei werden aus der enormen Fülle an Meßdaten hauptsächlich Ergebnisse ausgewählt, die einerseits bei der Bemessung von Bedeutung sind, andererseits dazu geeignet sind wichtige Merkmale der umgebenden Bebauung im Hinblick auf die Windlasten zu identifizieren bzw. die Variabilität der auftretenden Lasten aufzuzeigen. Letztlich gilt es auch zu unterscheiden, ob Einflüsse beispielsweise nur für die globalen Lasten auf das Gesamtbauwerk relevant sind oder ob auch lokale Lasten auf einzelne Bauteile oder Bauelemente davon betroffen sind. In ähnlicher Weise wie im vorhergehenden Kapitel werden daher in Abschnitt 5.1 bis 5.3 die Ergebnisse in umgebender Bebauung für die unterschiedlichen Lastbeiwerte vorgestellt und diskutiert. Abschnitt 5.4 enthält die Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen, diese werden mit den Ergebnissen der Druckmessungen verglichen. Entsprechende Schlußfolgerungen aus den Ergebnissen der systematischen Untersuchungen in verschiedenen Bebauungsstrukturen werden in Abschnitt 5.5 dargelegt.

Generell werden die Lastbeiwerte analog zu den Ergebnissen am Einzelgebäude mit dem Staudruck in ungestörter Anströmung normiert (siehe Abschnitt 3.5). Hierdurch wird die Änderungen der Last ausschließlich durch die Änderung des Lastbeiwertes beschrieben.

5.1 Zeitlich gemittelte Druckbeiwerte $c_{p,mean}$ und Standardabweichung $c_{p,rms}$

Die zeitlichen Mittelwerte der Druckbeiwerte $c_{p,mean}$ sowie die Standardabweichung der Druckbeiwerte $c_{p,rms}$ der Einzelgebäude wurden in Abschnitt 4.1 ausführlich dargestellt und diskutiert. Es konnte gezeigt werden, daß die Ergebnisse der vorliegenden Studie sehr gut mit anerkannten Daten aus der Literatur übereinstimmen. Die Ergebnisse der Testgebäude in

umgebender Bebauung werden nachfolgend diesen Werten am Einzelgebäude gegenübergestellt. Anhand der statistischen Grundkenngrößen Mittelwert und Standardabweichung der am Gebäude anliegenden Winddrücke kann bereits die unterschiedliche Wirkung der untersuchten Bauungsstrukturen auf die Druckbeiwerte aufgezeigt werden. Die räumliche und zeitliche Variabilität werden deutlich und die wichtigsten Einflußgrößen auf die windinduzierte Bauwerksbelastung in bebauten Gebieten können identifiziert werden.

5.1.1 Wandflächen - Luv- und Leeseite

Die Meßergebnisse an den Vorder- und Rückseiten der Testgebäude eingebettet in die reihenförmige Bebauung unterschiedlicher Dichte sind besonders dazu geeignet, einige grundlegende Auswirkungen der Bebauung auf die winderzeugten Drücke deutlich zu machen. Die Ergebnisse in dieser Bauungsstruktur können auch sehr gut mit der umfassenden Studie von HUSSAIN UND LEE (1980) verglichen werden.

In Abb. 5.1 ist für das 16 m hohe P1-Gebäude der Verlauf der $c_{p,mean}$ -Werte über die Höhe in Flächenmitte an den Vorder- und Rückseiten dargestellt. Die Höhe des Meßgebäudes entspricht in diesem Fall der Höhe der umgebenden Bebauung.

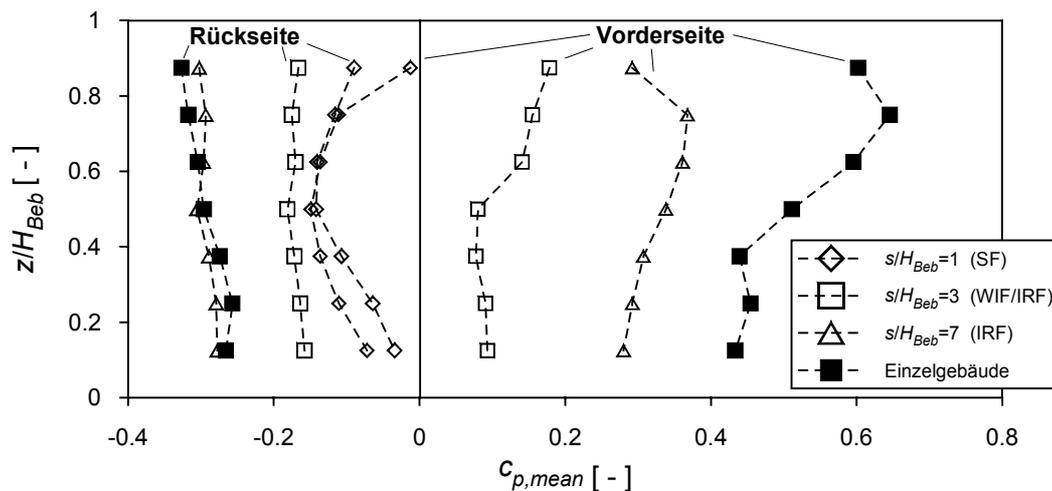


Abb. 5.1 Verlauf der $c_{p,mean}$ -Werte an Vorder- und Rückseite des Testgebäudes P1 in reihenförmiger Bebauung, $H/H_{Beb} = 1$

An der Vorderseite des Meßgebäudes nehmen die $c_{p,mean}$ -Werte mit kleiner werdendem Gebäudeabstand kontinuierlich ab. Es zeigt sich deutlich der von HUSAIN UND LEE (1980) beschriebene Übergang von einem "S-förmigen" Verlauf der $c_{p,mean}$ -Werte am Einzelgebäude hin zu einem "C-förmigen" Verlauf im Fall der "Abgehobenen Strömung" ($s/H_{Beb} = 1$). In diesem Strömungszustand sind die Druckbeiwerte an der Vorder- und Rückseite sowohl in ihrem Verlauf als auch in ihrer Größenordnung nahezu identisch. Dies deutet auf die Ausbildung stationärer Wirbel in den Gebäudezwischenräumen hin. Der Widerstandsbeiwert wird in diesem Fall verschwindend gering. Insgesamt betrachtet wird ersichtlich, daß auch bei einem Abstand von $s = 7 H_{Beb}$ noch eine erhebliche Reduzierung der winderzeugten Drücke im Vergleich zum Einzelgebäude vorhanden ist.

Bei einem Gebäudeabstand $s = 3H_{Beb}$ ist nicht eindeutig erkennbar, ob es sich noch um eine Einzelgebäudeumströmung (“isolierte Rauheitsströmung”) oder bereits um eine “Wirbelüberlagerungsströmung“ handelt. Nach den Ergebnissen von HUSAIN UND LEE (1980) stellt sich genau bei diesen Abstand der Übergang von dem einen in den anderen Strömungszustand ein.

Der Fall des aus der Bebauung herausragenden Gebäudes ist nachfolgend in Abb. 5.2 und Abb. 5.3 anhand der Meßgebäude P2 und P3 dargestellt. Während das P2-Gebäude doppelt so hoch ist wie die Umgebungsbebauung, besitzt das P3-Gebäude die vierfache Höhe der umliegenden Gebäude.

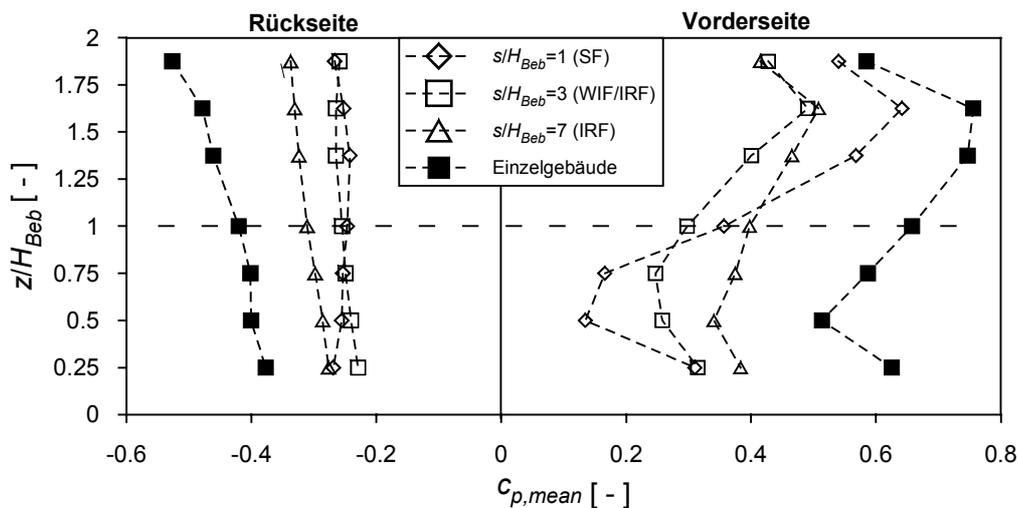


Abb. 5.2 Verlauf der $c_{p,mean}$ -Werte an Vorder- und Rückseite des Testgebäudes P2 in reihenförmiger Bebauung, $H/H_{Beb} = 2$

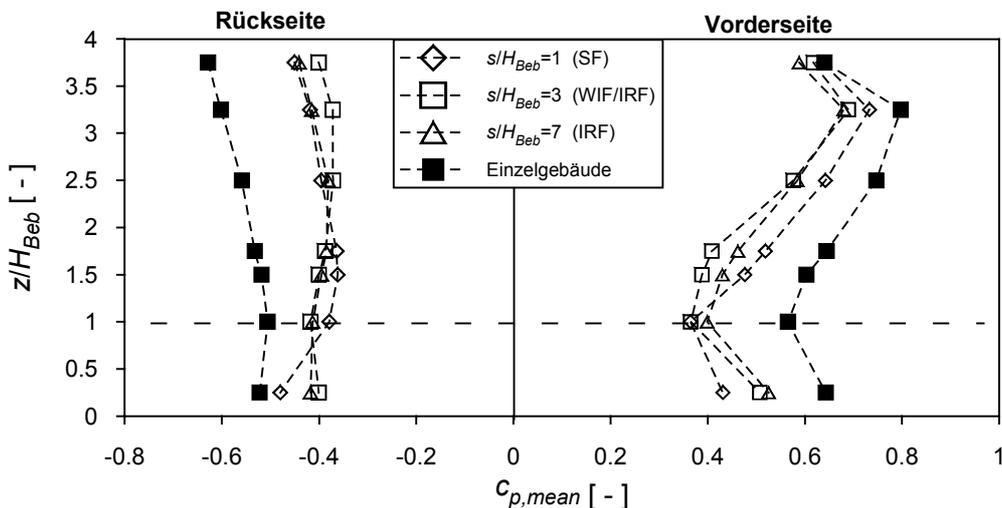


Abb. 5.3 Verlauf der $c_{p,mean}$ -Werte an Vorder- und Rückseite des Testgebäudes P3 in reihenförmiger Bebauung, $H/H_{Beb} = 4$

Die Auswirkungen einer “Abgehobenen Strömung“ ($s/H_{Beb} = 1$) zeigen sich hier dergestalt, daß an den Vorderseiten unterhalb der Höhe der umliegenden Bebauung die niedrigsten Werte ermittelt wurden, während hingegen im darüberliegenden Bereich, welcher aus der Bebauung herausragt, die höchsten Druckbeiwerte für den bebauten Fall erreicht werden. Aufgrund der hohen Dichte der Baukörper wirkt die Rauigkeit aerodynamisch glatter. Dies wird auch

anhand der Geschwindigkeitsmessungen deutlich, welche in Abschnitt 5.4 erläutert werden. Die beiden anderen Strömungsfälle zeigen nur knapp oberhalb der Bebauungshöhe wesentliche Abweichungen voneinander. Diese Aussagen gelten sowohl für die Gebäudehöhe $H/H_{Beb} = 2$ als auch für $H/H_{Beb} = 4$. An den Rückseiten der Gebäude ist in allen Fällen eine deutliche Reduktion des Soges erkennbar.

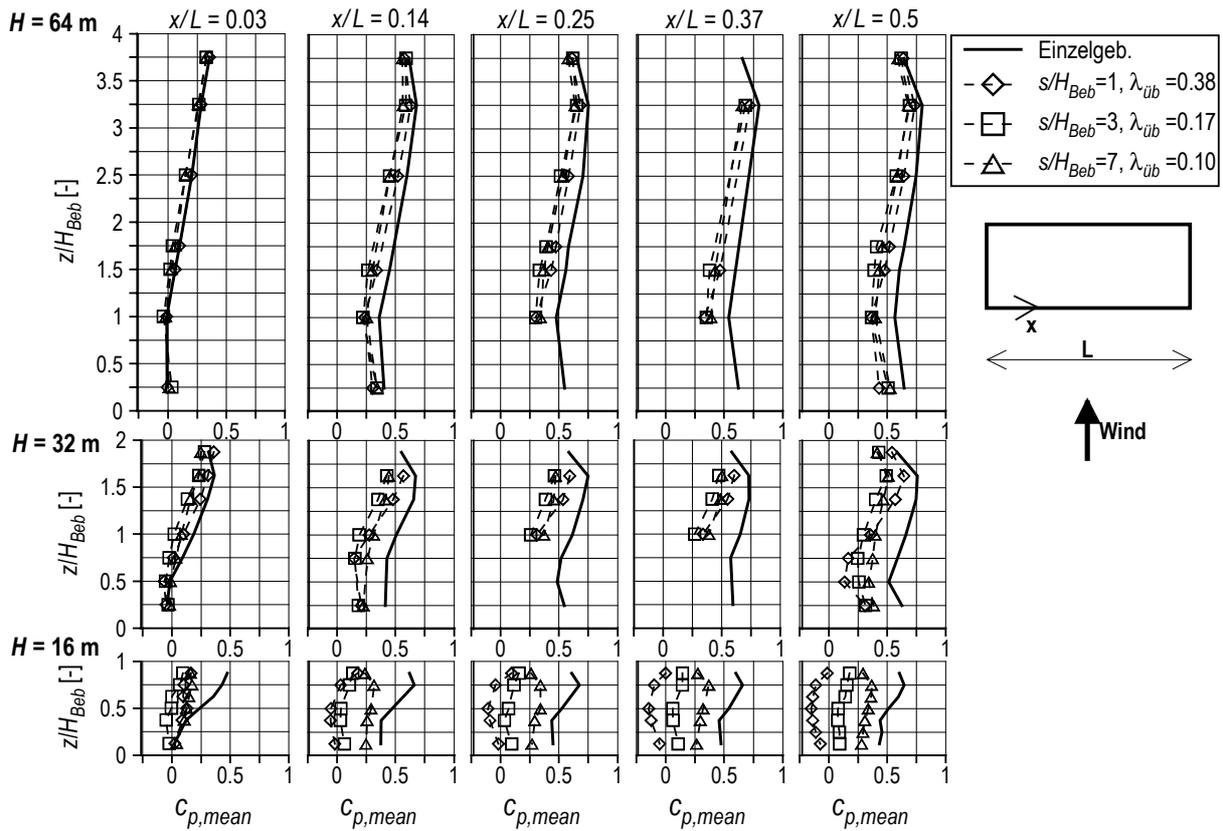
Reihenförmige Bebauungsmuster entsprechend dem Bebauungstyp I sind meistens sehr einfach strukturiert. Die Abmessungen der Gebäude und die Abstände zwischen den Gebäuden variieren innerhalb dieser Anordnungsmuster oft nur sehr geringfügig (siehe Tab. 2.7). Aus den Ergebnissen von HUSAIN UND LEE (1980) wird ersichtlich, daß in derart homogenen Reihenstrukturen unterschiedlicher Bebauungsdichte der Gebäudeabstand s das wesentliche Merkmal zur Abgrenzung der drei Strömungszustände ist. Die Gebäudeabstände in real existierenden Bebauungsmustern sind in den meisten Fällen jedoch nicht konstant, so daß zur Anwendung des Konzeptes der Strömungsregime der Bebauungsgrad λ_{ub} oder die Frontflächenzahl λ_{ff} zur Charakterisierung der Bebauung herangezogen werden muß (siehe auch Abb. 2.20). Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen im Industriegelände beinhalten eine Vielzahl unterschiedlicher Standorte der Meßgebäude, wodurch in erster Linie die unmittelbare Umgebung des Meßgebäudes und somit auch der Abstand zum nächstgelegenen Gebäude variiert wurde, die Frontflächenzahl λ_{ff} und der Bebauungsgrad λ_{ub} bleiben jedoch bei der Betrachtung des gesamten vorgelagerten Geländes konstant. Anhand der Meßergebnisse im Industriegebiet kann überprüft werden, wie stark sich Veränderungen der Gebäudeabstände und –abmessungen im Nahfeld des Meßgebäudes auf die Druckbeiwerte auswirken, während die globale Rauheit der Umgebung insgesamt unverändert bleibt.

In Abb. 5.4 sind die $c_{p,mean}$ -Werte an der langen Seitenwand für alle untersuchten Bebauungsstrukturen enthalten. Die Auftragung über die dimensionslose Höhe z/H_{Beb} für unterschiedliche vertikale Schnitte x/L ermöglicht es die räumliche Verteilung der Druckbeiwerte zu verdeutlichen. Der bereits in Abb. 5.1 bis Abb. 5.3 dargestellte Verlauf in Wandmitte entspricht hierbei dem Schnitt $x/L = 0.5$. Die Ergebnisse der Reihenbebauung (Abb. 5.4a), welche das idealisierte Konzept der drei Strömungszustände verdeutlichen, können mit den Ergebnissen in der Industrie und Blockrandbebauung (Abb. 5.4b) verglichen werden.

Im wesentlichen können folgende Zusammenhänge festgestellt werden:

- Beim niedrigen Gebäude ($H = 16$ m) wird deutlich, daß durch die unterschiedlichen Nahfeldsituationen in der Industriebebauung eine Variabilität erreicht wird, die durch die Gebäudeabstände $s = 1H_{Beb}$ und $s = 3H_{Beb}$ eingegrenzt wird. Dies bedeutet jedoch, daß obwohl die globalen Merkmale der Industriebebauung gleichbleiben, durch unterschiedliche Situationen im Nahbereich eine Streuung der auftretenden Druckbeiwerte hervorgerufen wird, die sowohl den Fall der “abgehobenen Strömung“ als auch der “Wirbelüberlagerungsströmung“ beinhaltet. Das Konzept der Strömungszustände ist daher bei Bebauungstypen mit stark variierenden Abmessungen und Abständen der Baukörper nicht anwendbar.

a) Reihenbebauung



b) Industrie- und Blockrandbebauung

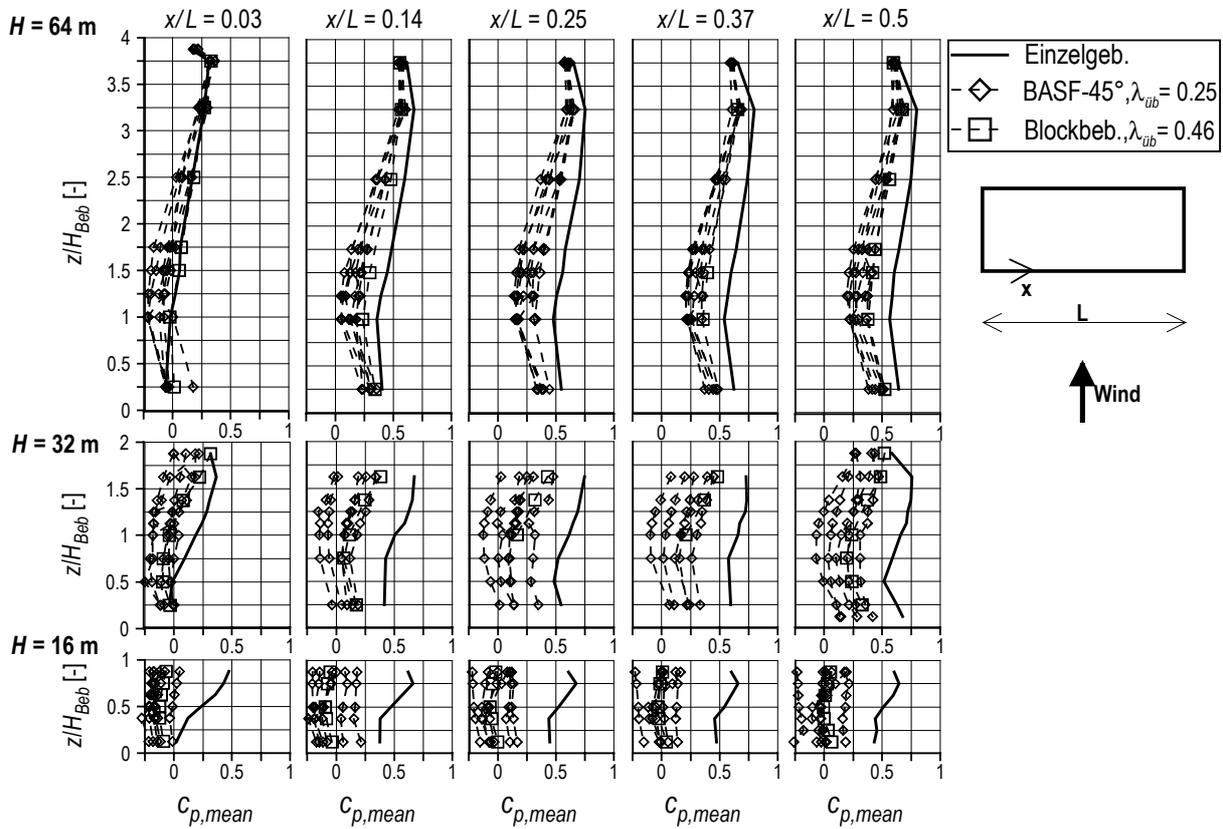


Abb. 5.4 Vergleich der $C_{p,mean}$ -Werte an der langen Seitenwand bei frontaler Anströmung für unterschiedliche Bebauungsstrukturen

- Am mittleren Gebäude ($H = 32$ m) bewirkt die Industriebebauung gegenüber der Reihenbebauung vor allem im oberen Bereich $z > H_{Beb}$ eine weitaus deutliche Abminderung der Lasten als die Reihenbebauung. Die Ursache hierfür ist in der Variabilität der Bauwerkshöhen in der Industriebebauung zu suchen. Diese führt einerseits zu Abschattungssituationen auch für dieses Gebäude, andererseits wird das Geschwindigkeitsprofil oberhalb der Bebauung nachhaltiger verändert (siehe auch Abschnitt 5.4).
- Am hohen Gebäude ($H = 64$ m) ergeben sich in der Reihenbebauung teilweise nur geringe Unterschiede für die untersuchten Gebäudeabstände. Auch die Abweichungen vom Einzelgebäude fallen gering aus. Bei der Industriebebauung wird ersichtlich, daß unterhalb einer Höhe von ca. $z = 2.5H_{Beb}$ die Variabilität der ermittelten Werten rasch zunimmt.

Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse in der Industriebebauung, welche aufgrund der variablen Bauwerksabmessungen und -abstände für eine Vielzahl anderer städtischer Strukturen (siehe Tab. 2.7) repräsentativ ist, daß die globalen Kenngrößen der Rauigkeit – Bebauungsdichte λ_{iib} und Frontflächenzahl λ_{ff} - nur bedingt dazu in der Lage sind, die in real existierenden Bebauungsstrukturen auftretenden Windlasten zu quantifizieren. Obwohl die Bebauungsdichte λ_{iib} und Frontflächenzahl λ_{ff} für alle untersuchten Situationen in der Industriebebauung gleich ist, tritt vor allem bei den beiden niedrigeren Gebäude eine hohe Variabilität der Lasten auf. Offensichtlich wird durch die unmittelbare Bebauungssituation im Nahfeld des Gebäudes ein wesentlicher Einfluß auf die entstehenden Windlasten ausgeübt. Dieser kann mit Hilfe der globalen Kenngrößen für das gesamte bebaute Gebiet nicht erfaßt werden.

In gleicher Weise wie die zeitlich gemittelten Druckbeiwerte $c_{p,mean}$ sind in Abb. 5.5 die fluktuierenden Beiwerte $c_{p,rms}$ an der langen Seitenwand bei frontaler Anströmung aufgetragen. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Am hohen Gebäude ($H = 64$ m) treten nur geringfügige Abweichungen zwischen Einzelgebäude und dem Gebäude in bebautem Gebiet auf. Dies gilt sowohl für die Reihenbebauung als auch für die Industrie- und Blockrandbebauung.
- Am mittleren Gebäude ($H = 32$ m) in der Reihenbebauung werden deutliche Abweichungen erst für $z < H_{Beb}$ ersichtlich. In der Industrie- und Blockrandbebauung ist die Abminderung ausgeprägter und ist auch im oberen, aus der Bebauung ragenden Teil zu beobachten.
- Für das niedrige Gebäude ($H = 16$ m) in der Reihenbebauung können am Randbereich ($x/L = 0.03$) nur geringfügige Abweichungen vom Einzelgebäude festgestellt werden, während in der Wandmitte ($x/L = 0.5$) für die Gebäudeabstände $s = 1H_{Beb}$ und $s = 3H_{Beb}$ eine deutliche Reduktion eintritt. In der Industriebebauung tritt die Reduktion konstant über die gesamte Wandfläche ein. Ursache für dieses unterschiedliche Verhalten ist die kanalisierende Wirkung der parallel zur Strömung ausgerichteten Straßenschluchten der Reihenbebauung.

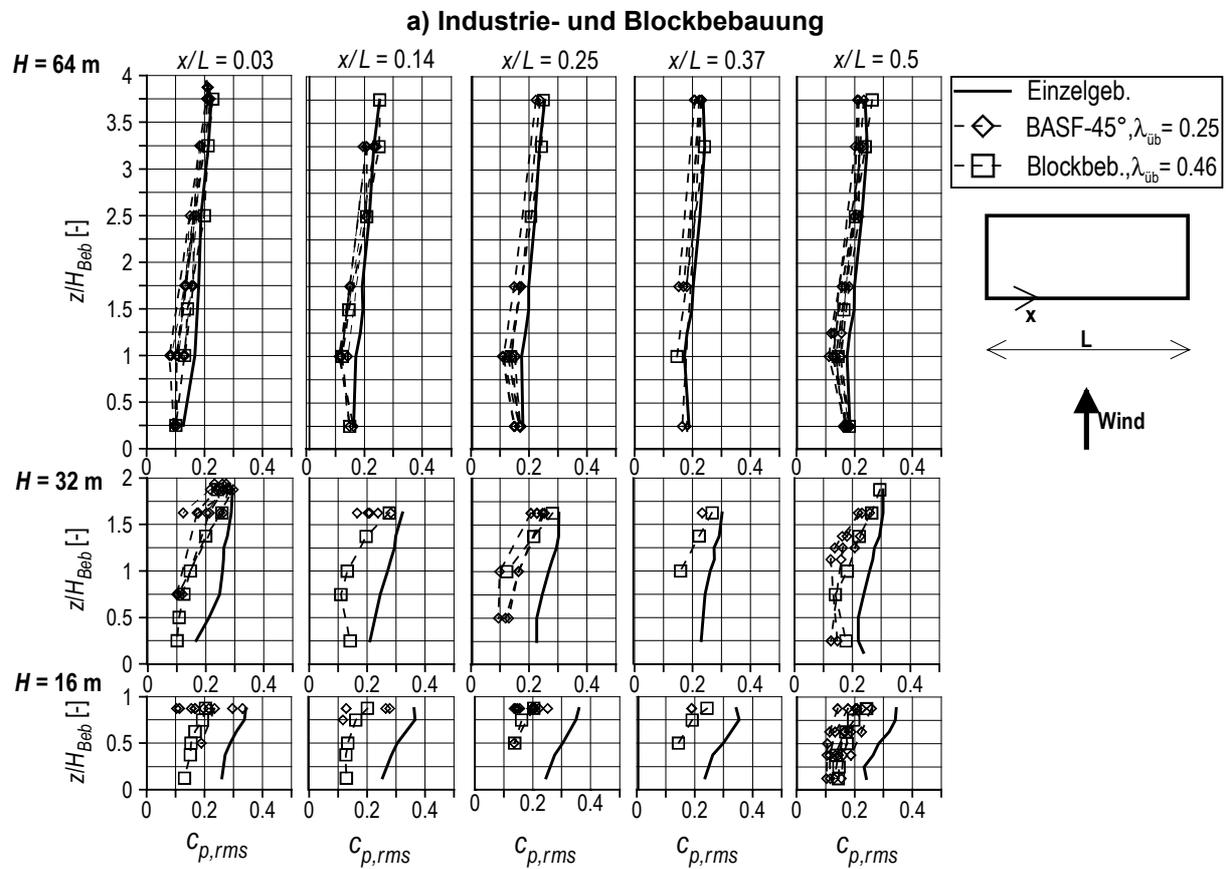
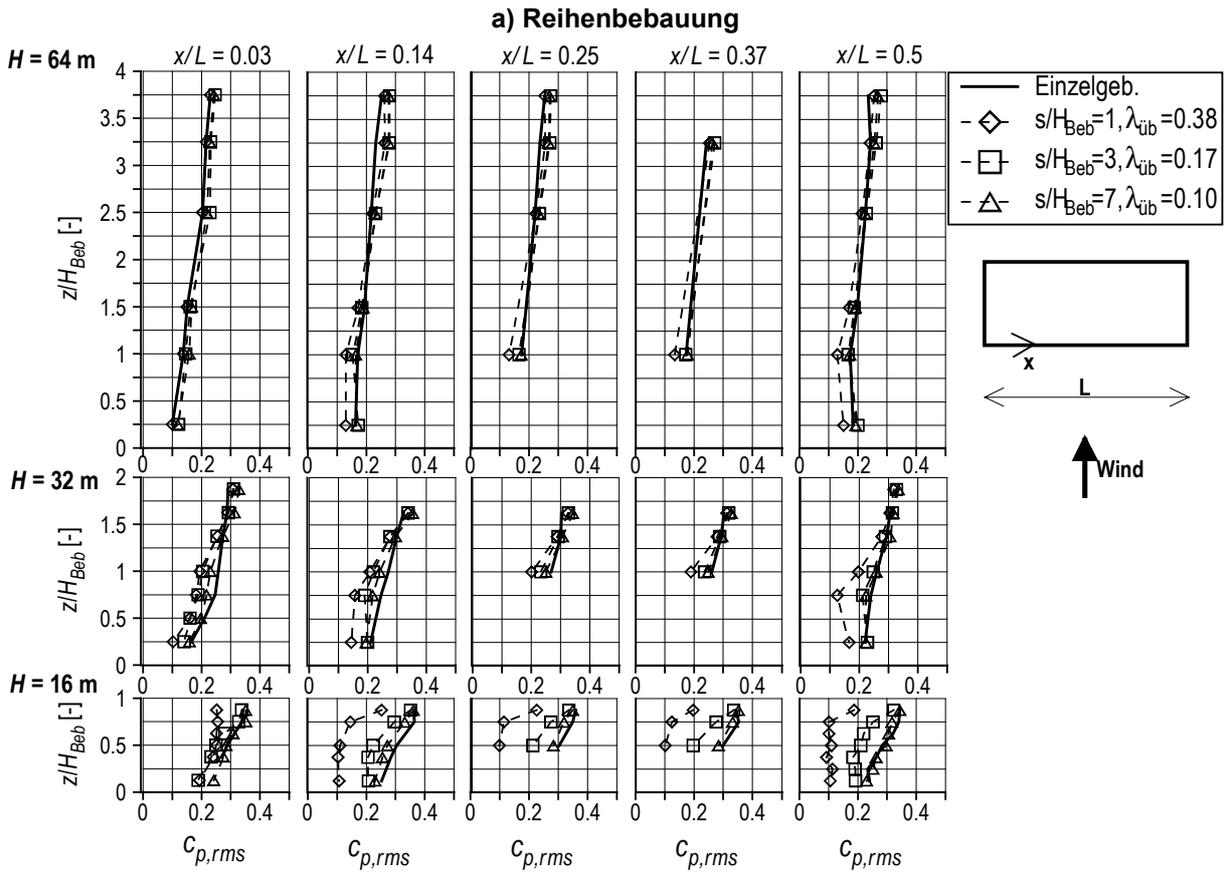


Abb. 5.5 Vergleich der $C_{p,rms}$ -Werte an der langen Seitenwand bei frontaler Anströmung 0° , (Luvseite)

Die räumlichen Verteilungen der $c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ -Werte auf den Gebäuderückseiten der Einzelgebäude sind durch relativ konstante Werte über die gesamte Fläche geprägt (siehe Abb. 4.4). Die Veränderungen der $c_{p,mean}$ -Werte auf der Gebäuderückseite aufgrund der umgebenden Bebauung werden größtenteils bereits aus den Darstellungen in Abb. 5.1 bis Abb. 5.3 deutlich. Die Rückseiten erfahren generell eine geringere Veränderung als die Vorderseiten. Der über die Rückwand relativ gleichmäßig verteilte Sog wird je nach Bebauungsdichte ebenso gleichmäßig über die Fläche reduziert.

Im Hinblick auf die Bemessung sind die Druckbeiwerte an der Gebäuderückseite lediglich für die Bestimmung der globalen Last auf das gesamte Tragwerk von Interesse. Für diesen Bereich des Gebäudes sind daher nur die über die Fläche integrierten Werte von Bedeutung. Diese sind auch in Abb. 5.10 enthalten. Die Druckverteilungen an den Gebäuderückseiten ermittelt in der Bebauung gehen in die Berechnung der globalen Widerstandsbeiwerte und der Momentenbeiwerte in Abschnitt 5.2 ein. Auf eine ausführliche Darstellung wird daher an dieser Stelle verzichtet.

Erwähnenswert wäre, daß bei kleinen Gebäuden in umgebender Bebauung an der Leeseite auch positive Drücke auftreten können, wenn nahe am Gebäude stromabwärts ein hohes Gebäude steht. Durch die an der Vorderseite des hohen Gebäudes abwärts gerichtete Strömung kann im Gebäudezwischenraum ein Überdruck entstehen. Dies wurde teilweise an den Meßergebnissen in der Industriebebauung ersichtlich.

Hinsichtlich der $c_{p,rms}$ -Werte an den Gebäuderückseiten kann angemerkt werden, daß nur eine sehr geringfügige Änderung, in den meisten Fällen eine leichte Reduktion der Werte, feststellbar ist.

Aus den an den Luv- und Leeseiten ermittelten $c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ -Werten in der Bebauung lassen sich insgesamt betrachtet bereits folgende Schlüsse ziehen:

- Die Widerstandsbeiwerte C_D werden infolge der Bebauung an Gebäuden mit im Vergleich zur Umgebungsbebauung geringer Bauwerkshöhe stark reduziert (siehe auch Abschnitt 5.2).
- Da in der Reihenbebauung die $c_{p,rms}$ -Werte an der Luvseite im Randbereich der Wände zum Teil weniger reduziert werden als im inneren Bereich der Wandfläche, ist für diese Bauungsart im Randbereich mit ähnlich hohen Spitzenwerten $c_{p,max}$ zu rechnen wie am Einzelgebäude.

5.1.2 Wandflächen - parallel zum Wind

Die Sogbelastung an einer Wand wird in der Regel dann am größten, wenn die Wand parallel zum Wind ausgerichtet ist. An Gebäuden mit rechteckigem Grundriß entstehen bei frontaler Anströmung der langen Seitenwand besonders ausgedehnte Gebiete hohen Soges an der kurzen Seitenwand, da sich die Strömung nicht wieder anlegt (siehe auch Abschnitt 4.1.1). Die $c_{p,mean}$ -Werte für diesen Fall sind in Abb. 5.6 zusammengestellt.

Für die unterschiedlichen Bebauungsarten und Gebäudehöhen kann folgendes festgestellt werden:

- Erwartungsgemäß tritt am niedrigen Gebäude ($H = 16$ m) eine deutliche Reduktion der Sogbelastung ein. Für die Reihenbebauung $s = 1H_{Beb}$ und $s = 3H_{Beb}$ beträgt diese an der luvseitigen Kante ($y/B = 0.09$) nahezu zwei Drittel, während für die weniger dichte Bebauung $s = 7H_{Beb}$ nur eine geringe Abminderung zu verzeichnen ist. Bei der Industriebebauung zeigt sich wiederum eine große Streubreite der Daten. Der Mittelwert stimmt etwa mit dem Verlauf für die Reihenbebauung $s = 3H_{Beb}$ überein.
- Am mittleren Gebäude ($H = 32$ m) wird deutlich, daß sich in der Reihenbebauung die Strömung im Gegensatz zum Einzelgebäude wiederanlegt. Im bebauten Fall fällt der Sog von der luvseitigen ($y/B = 0.09$) zur leeseitigen Gebäudekante ($y/B = 0.91$) stark ab. Die unterschiedliche Bebauungsdichte der Reihenbebauung macht sich vor allem im Bereich $z < H_{Beb}$ bemerkbar. In der dichtesten Bebauung ($s = 1H_{Beb}$) wird an der luvseitigen Kante im Bereich unterhalb der Bebauungshöhe ein höherer Sog als am Einzelgebäude erreicht. Dieser baut sich jedoch rasch entlang der Wandfläche wieder ab. In der Industriebebauung streuen die Werte am mittleren Gebäude ähnlich stark wie am niedrigen Gebäude, wobei jedoch an keiner Stelle ein höherer Sog als am Einzelgebäude eintritt. Die Ursache für die Unterschiede zwischen der Reihenbebauung $s = 1H_{Beb}$ und der Industriebebauung liegt vor allem im Geschwindigkeitsprofil der Anströmung begründet (siehe auch Abschnitt 5.4). Bereits im vorangegangenen Abschnitt deuten die niedrigen Druckbeiwerte der Frontseite auf niedrigere Anströmgeschwindigkeiten im Fall der Industriebebauung hin.
- Am hohen Gebäude ergeben sich in der Reihenbebauung nur geringfügige Unterschiede im Vergleich zum Einzelgebäude. Lediglich an der leeseitigen Gebäudekante ($y/B = 0.91$) ergibt sich ein etwas geringerer Sog. Dies deutet daraufhin, daß die Strömung aufgrund der höheren Turbulenzintensität im bebauten Fall dazu tendiert, sich wieder anzulegen. Ähnliches gilt für die Ergebnisse am hohen Gebäude in der Industriebebauung, wobei jedoch eine deutlich höhere Variabilität der Daten zu verzeichnen ist. Dies gilt vor allem für den Bereich $z/H_{Beb} < 2$, hier wird eine ähnlich hohe Streubreite wie bei den niedrigeren Gebäude erreicht.

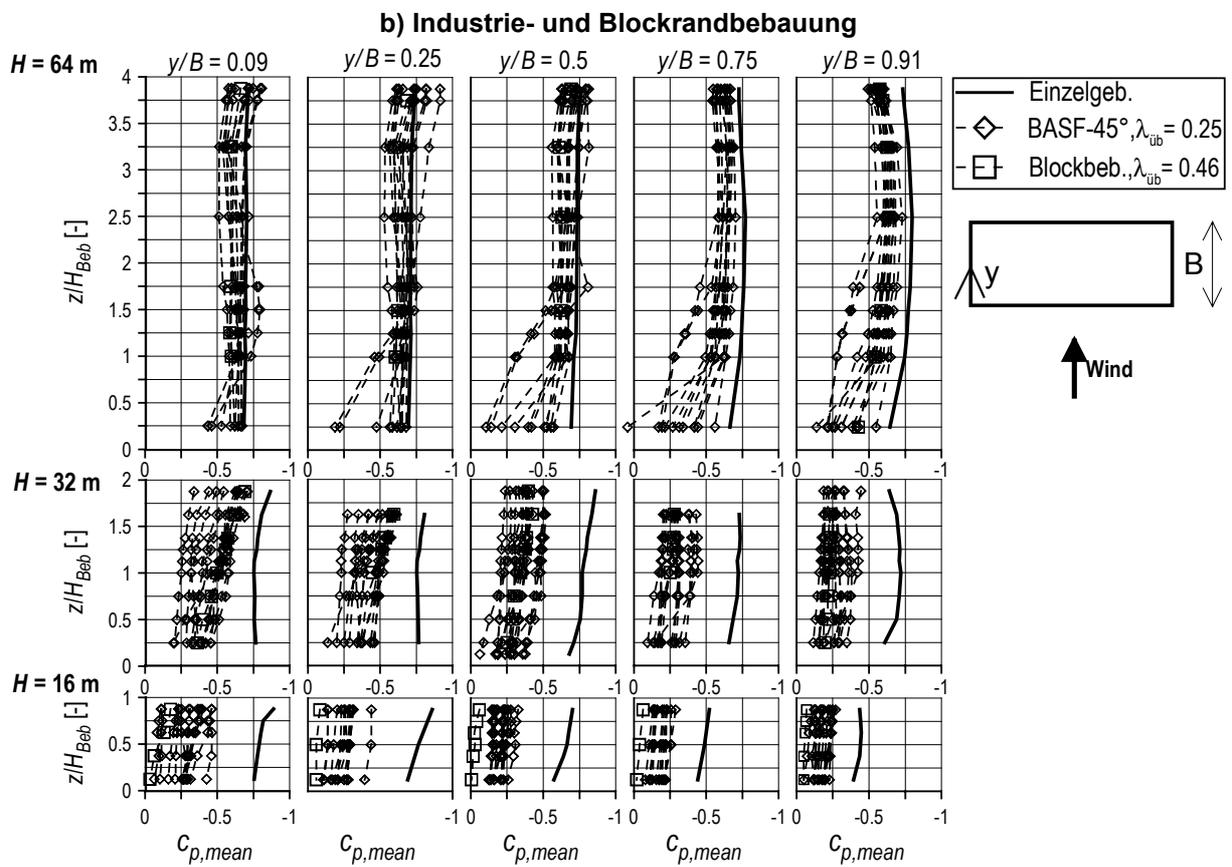
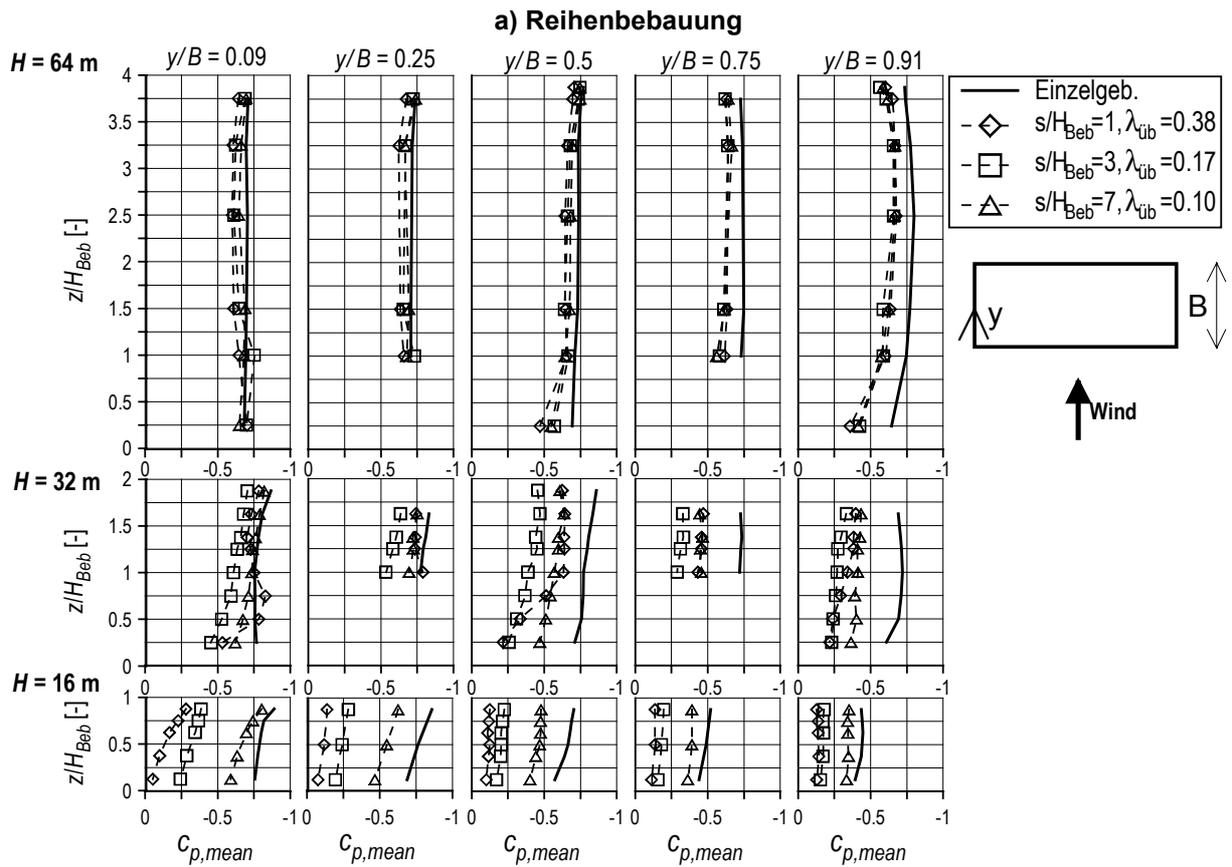


Abb. 5.6 Vergleich der $c_{p,mean}$ -Werte an der kurzen Seitenwand bei paralleler Ausrichtung zum Wind (Windrichtung 90°)

In gleicher Weise werden in Abb. 5.7 die $c_{p,rms}$ -Werte bei paralleler Anströmung der kurzen Seitenwand dargestellt, um die fluktuierenden Drücke in der Bebauung und am Einzelgebäude vergleichen zu können. Die Ergebnisse der $c_{p,rms}$ -Werte bei paralleler Anströmung für die untersuchten Gebäude und Bauungsarten können folgendermaßen zusammengefaßt werden:

- Am niedrigen Gebäude ($H = 16$ m) in der Reihenbebauung ist vor allem in der vorderen Hälfte der Wand $y/B < 0.5$ ein deutlicher Unterschied zwischen den Reihenstrukturen verschiedener Dichte erkennbar. Während für den größten Gebäudeabstand $s = 7H_{Beb}$ im vorderen Bereich die Werte des Einzelgebäudes überschritten werden, tritt beim geringsten Gebäudeabstand $s = 1H_{Beb}$ eine deutliche Reduktion der Druckfluktuation ein. Die Streuung der Daten bei der Industriebebauung ergibt an der luvseitigen Kante $y/B = 0.09$ einen Bereich, der sich von sehr kleinen Werten ($c_{p,rms} \approx 0.1$) bis zu den Werten des Einzelgebäudes ($c_{p,rms} \approx 0.3$) erstreckt.
- Am mittleren Gebäude ($H = 32$ m) sind in der Reihenbebauung an der luvseitigen Kante ($y/B = 0.09$) vor allem für den Bereich $z/H_{Beb} < 1.5$ $c_{p,rms}$ -Werte zu beobachten, die den Wert des Einzelgebäudes um bis zu 40% übersteigen. Entlang der Wandfläche verringern sich die Unterschiede und an der leeseitigen Kante ($y/B = 0.91$) werden die Werte kleiner als am Einzelgebäude. Für die Industriebebauung liegen für den luvseitigen Bereich nur wenig Daten vor. Diese lassen jedoch vermuten, daß wiederum eine enorme Streubreite vorhanden ist und die Werte des Einzelgebäudes zumindest erreicht werden.
- Am hohen Gebäude ($H = 64$ m) ist in der Reihenbebauung eine Tendenz zu höheren Werten als am Einzelgebäude erkennbar, während in der Industriebebauung die Werte eher um die Werte des Einzelgebäudes schwanken.

Die zeitlich gemittelten Druckbeiwerte $c_{p,mean}$ stehen in engem Zusammenhang mit der Kraft auf die Gesamtfläche, während sich die lokale Belastung kleiner Teilflächen aus dem zeitlichen Mittelwert $c_{p,mean}$ - und der überlagerten Fluktuation $c_{p,rms}$ ergibt. Insgesamt betrachtet ergeben sich aus den Ergebnissen der $c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ -Werte folgende Zusammenhänge für die Lasten an den parallel zum Wind stehenden Seitenwänden:

- In der Bebauung erfahren parallel zum Wind stehende Seitenwände geringere Lasten wenn die Gesamtlast auf die Tragstruktur der Wand betrachtet wird. Dies zeigen eindeutig die reduzierten zeitlich gemittelten Druckbeiwerte $c_{p,mean}$. Der Grad der Reduktion ist abhängig von der Höhe des Gebäudes im Vergleich zur Umgebungsbebauung, wobei wie Bauungstyp II und III zeigen, erhebliche Streubreiten zu erwarten sind.
- Die lokalen Lasten an der luvseitigen Kante können sich erhöhen, wenn das Gebäude aus der Bebauung herausragt. Darauf deuten die erhöhten $c_{p,rms}$ -Werte in diesem Bereich hin. In Abschnitt 5.3 werden die ermittelten lokalen Extrema näher erläutert.

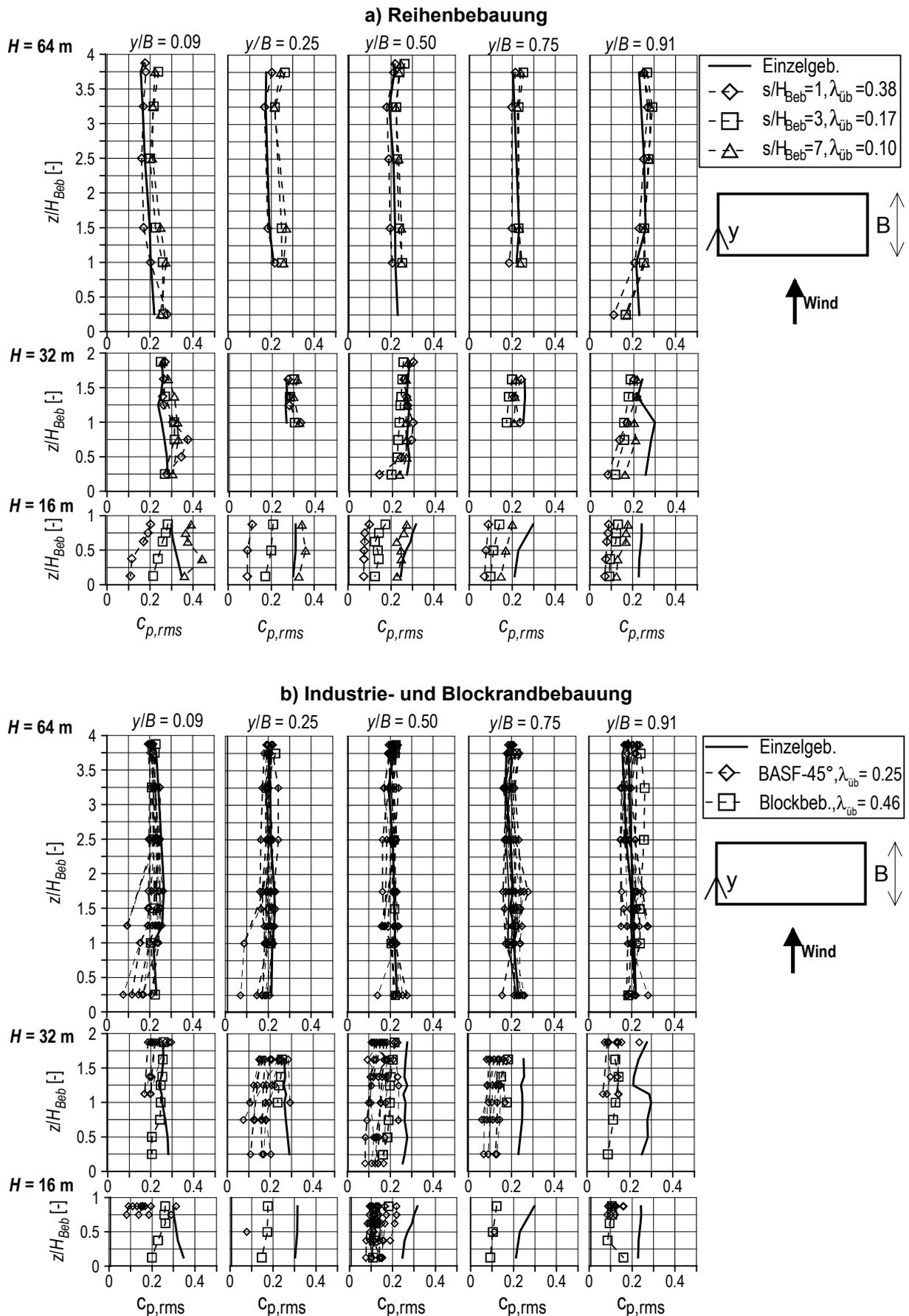


Abb. 5.7 Vergleich der $c_{p,rms}$ -Werte an der kurzen Seitenwand bei paralleler Ausrichtung zum Wind (Windrichtung 90°)

5.1.3 Dachflächen

Hohe Soglasten an Flachdächern werden in der Regel bei einer schrägen Anströmung erreicht. Die größten lokalen Soglasten treten für diese Windrichtungen im Bereich der Ecken auf (siehe auch 4.1.2). Nachfolgend werden daher die $c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ -Werte für die untersuchten Windrichtungen, welche schräg auf die Testgebäude auftreffen, dargestellt und diskutiert. Hinsichtlich der globalen Lasten auf das Flachdach ist diese Anströmrichtung jedoch bei den beiden kleineren Testgebäuden nicht maßgeblich im Bemessungsfall. Die zeitlich gemittelten Druckbeiwerte integriert über die Gebäudeteilflächen werden in Abschnitt 5.1.4 abhängig von der Windrichtung betrachtet.

In Abb. 5.8 und Abb. 5.9 sind die $c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ -Werte an der Dachfläche unter schräger Anströmung für die einzeln stehenden Gebäude und in bebautem Gelände enthalten.

Beim Vergleich der $c_{p,mean}$ -Werte (Abb. 5.8) für die verschiedenen Bebauungsarten und Bauwerkshöhen lassen sich einige Unterschiede feststellen. Diese traten zum Teil schon in ähnlicher Weise im vorangegangenen Abschnitt über die parallel ausgerichteten Seitenwände auf:

- Am niedrigen Testgebäude ($H = 16$ m) werden die zum Teil sehr hohen Sogbeiwerte im Eckbereich infolge der Bebauung stark reduziert (um ca. 70%). Lediglich in der Reihenbebauung $s = 7H_{Beb}$ erreichen die $c_{p,mean}$ -Werte annähernd die Werte des Einzelgebäudes. In der Industriebebauung ist die zu erwartende Variabilität der Daten erkennbar. Die Werte stimmen in der Größenordnung mit der Reihenbebauung $s = 3H_{Beb}$ und $s = 1H_{Beb}$ überein.
- Am mittleren Gebäude ($H = 32$ m) ist ein deutlicher Unterschied zwischen der Reihenstruktur und der Industriebebauung zu verzeichnen. Während in der Reihenbebauung die $c_{p,mean}$ -Werte fast den Werten am Einzelgebäude entsprechen, ist in der Industriebebauung ein deutlich geringerer Sog festzustellen als am Einzelgebäude. Ursache hierfür ist wiederum die im Vergleich zur Reihenbebauung variable Höhe der Umgebungsgebäude in der Industriebebauung, welche offensichtlich auch zu merklich reduzierten Geschwindigkeiten oberhalb der mittleren Bebauungshöhe führt.
- Am hohen Gebäude ($H = 64$ m) liegen die Werte sowohl in der Reihenbebauung, als auch in der Industriebebauung geringfügig unter den Ergebnissen am Einzelgebäude. Auch am Dach des hohen Meßgebäudes ist in der Industriebebauung ein gewisser Streubereich zu erkennen.

Die räumliche Verteilung der $c_{p,rms}$ -Werte (Abb. 5.9) ermittelt in den unterschiedlichen Bebauungsstrukturen zeigt ähnliche Tendenzen wie bei den parallel ausgerichteten Seitenwänden aus Abschnitt 5.1.2:

- Am niedrigen Gebäude ($H = 16$ m) erhöhen sich in der Reihenbebauung $s = 7H_{Beb}$ die $c_{p,rms}$ -Werte im Eckbereich, dort wo auch die höchsten Fluktuationen ermittelt wurden. In Verbindung mit den für diese Bebauungsstruktur im Vergleich zum Einzelgebäude nur geringfügig verminderten $c_{p,mean}$ -Werten, ergibt sich, daß hier mit erhöhten lokalen

Spitzenogbeiwerten $c_{p,min}$ zu rechnen ist. Die übrigen Ergebnisse in der Reihenbebauung für diese Gebäudehöhe zeigen eine Abnahme der Werte mit zunehmender Bebauungsdichte. Die Ergebnisse in der Industrie- und Blockrandbebauung liegen wiederum im Bereich der Ergebnisse der Reihenbebauung $s = 3H_{Beb}$ und $s = 1H_{Beb}$.

- An den beiden höheren Gebäuden ($H = 32$ m und $H = 64$ m) zeigt sich auch das bereits zuvor geschilderte Verhalten. Während am 32 m hohen Gebäude in der Reihenbebauung nahezu die Werte des Einzelgebäudes erreicht werden, findet aufgrund der Höhenvariabilität in der Industriebebauung eine deutliche Reduktion statt. Am hohen Gebäude gleichen sich auch in der Industriebebauung die Werte an die Ergebnisse des Einzelgebäudes an, wobei jedoch wiederum eine Streuung der Daten zu verzeichnen ist.

Anhand der $c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ -Werte läßt sich insgesamt betrachtet bereits für alle untersuchten Teilflächen (Seitenwände und Dachflächen) feststellen, daß durch die Bebauung vor allem für das niedrige Gebäude ($H = 16$ m), welches die umliegende Bebauung nicht überragt, eine zum Teil erhebliche Reduktion der globalen und lokalen Windlasten im Vergleich zum Einzelgebäude hervorgerufen wird. Die Reduktion beschränkt sich jedoch meist auf die Höchstwerte und ist nicht gleichmäßig über die Fläche verteilt. Dies gilt vor allem auch für die höheren Gebäude, die deutliche Unterschiede für die Bereiche unterhalb und oberhalb der Bebauungshöhe H_{Beb} aufweisen. Es erscheint daher nur wenig sinnvoll, die Abminderung der Lasten durch pauschale Reduktionsfaktoren zu beschreiben. Aufgrund der aufgezeigten Variabilität der Lasten ist daher eine Einbeziehung der ermittelten Streubreite in die Bemessungsvorgaben ein weitaus effektiveres Vorgehen für eine sichere und wirtschaftliche Bemessung.

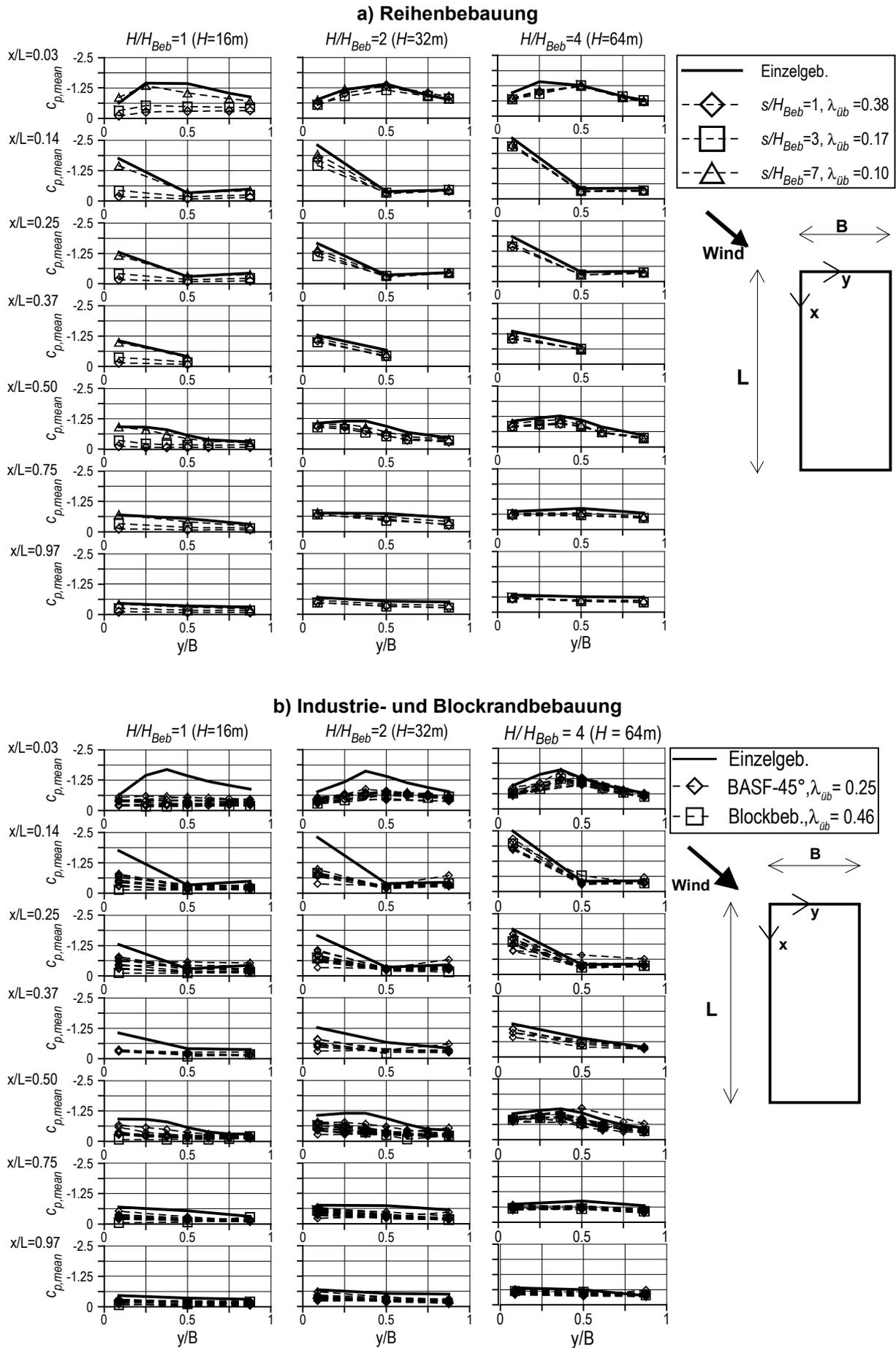
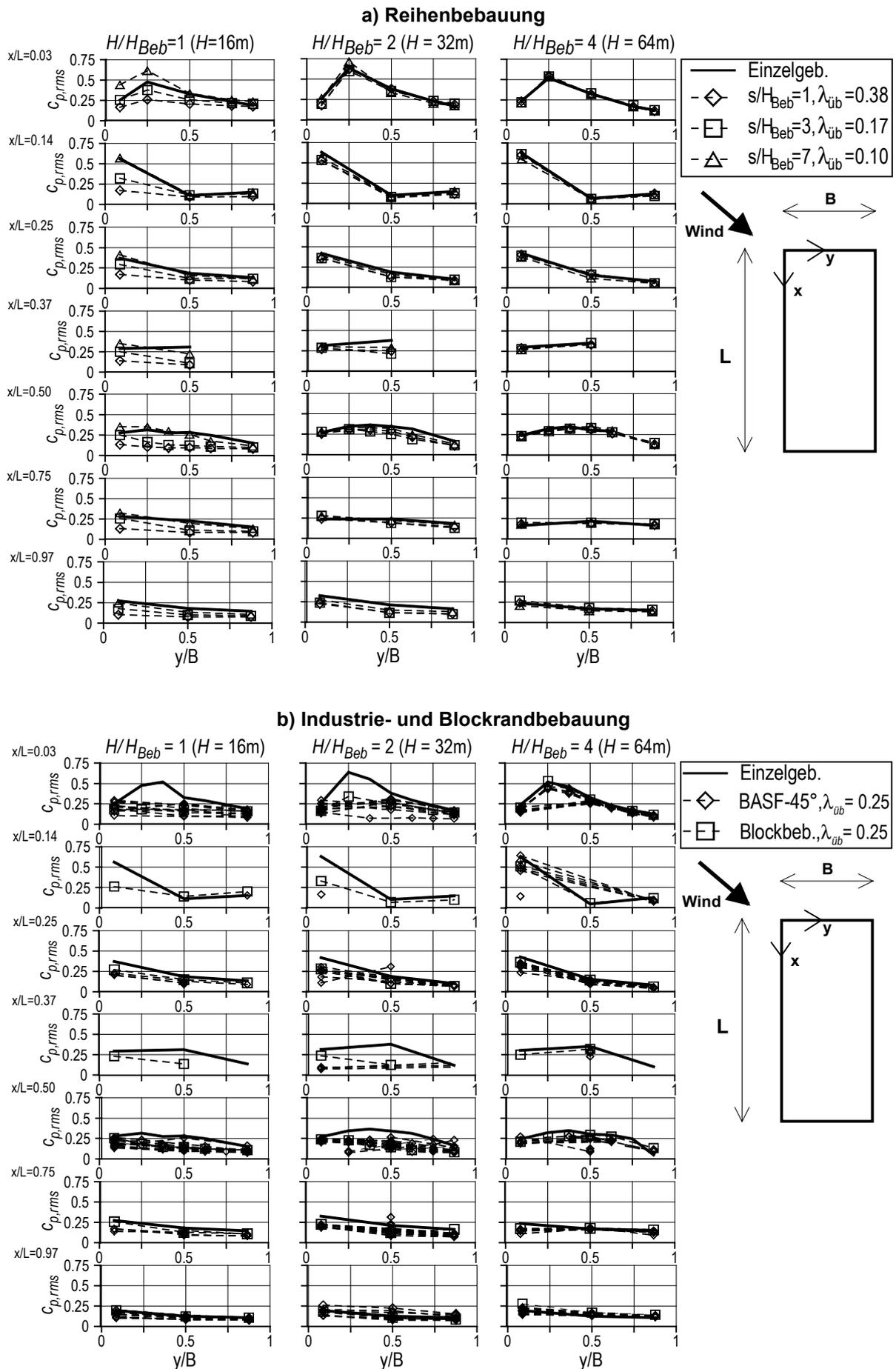


Abb. 5.8 Vergleich der $c_{p,mean}$ -Werte an der Dachfläche bei Schräganströmung (45°)



5.1.4 Kraftbeiwerte c_f der Gebäudeteilflächen

Eine übersichtliche und zusammenfassende Darstellung der Wirkung umgebender Bebauung auf die Druckbeiwerte $c_{p,mean}$ kann anhand der Mittelung über die Fläche erfolgen. Die Kraftbeiwerte für die einzelnen Gebäudeflächen – lange Seitenwand, kurze Seitenwand, Dachfläche - wurden mit Hilfe von Gl. 4.2 aus der Integration der räumlichen Druckverteilungen berechnet.

In Abb. 5.10 sind für alle untersuchten Bebauungssituationen die Kraftbeiwerte jeweils bezogen auf die gesamte Fläche einer Wand bzw. eines Flachdaches als Funktion der Windrichtung gegeben. Bei den Seitenwänden bedeutet die Windrichtung 0° eine senkrechte Anströmung von vorne, während die Dachfläche bei 0° senkrecht zur kurzen Dachkante angeströmt wird. Die Definition der Windrichtungen entspricht der Darstellung in Abb. 4.1. Die Kraftbeiwerte c_f an den Gebäudeflächen des Einzelgebäudes werden als durchgezogene Linie dargestellt, die Werte für bebauten Gebiete sind als unterschiedliche Symbole enthalten.

Wie bereits aus den vorhergehenden Abschnitten deutlich wurde, hat die Umgebungsbebauung für den Fall $H/H_{Beb} = 4$ die geringsten Auswirkungen auf die Windlasten (Abb. 5.10 – obere Diagramme). Die Werte für die bebauten Gebiete folgen relativ genau dem Verlauf der Ergebnisse am Einzelgebäude, wobei jedoch ersichtlich wird, daß bei besonders großen Druck- und Sogkräften in der Industriebebauung eher geringere Lasten erreicht werden. Es wird deutlich, daß die maximal auftretenden Werte des Einzelgebäudes sowohl beim Sog als auch beim Druck nicht überschritten werden.

Beim kleinsten Testgebäude ($H/H_{Beb} = 1$, untere Diagramme) ist festzustellen, daß durch die Umgebungsbebauung, mit Ausnahme der Reihenbebauung $s/H_{Beb} = 7$, eine erhebliche Abminderung der Lasten im Druck und Sogbereich hervorgerufen wird. An den Seitenwänden streuen die Kraftbeiwerte für diese Bauungsarten in einem Bereich von +0.25 bis -0.35. An der Dachfläche beträgt die Streubreite 0 bis -0.35. Dies bedeutet, daß die Kraftbeiwerte der Gebäudeteilflächen für die untersuchten Bebauungsgebiete nur ca. 50% der betragsmäßig höchsten Werte erreichen. Die Reihenstruktur $s/H_{Beb} = 7$ bewirkt aufgrund der geringen Bebauungsdichte bzw. der großen Bauwerksabstände nur eine Abminderung in geringerem Umfang.

Weiterhin wird deutlich, daß bei der geringen Gebäudehöhe $H/H_{Beb} = 1$ die Lastbeiwerte nur noch geringfügig mit der Windrichtung variieren. Die ermittelten Kraftbeiwerte in den dichteren Bebauungsstrukturen treten unabhängig von der Windrichtung in der o. g. Schwankungsbreite auf.

Die Kraftbeiwerte für das Höhenverhältnis $H/H_{Beb} = 2$ liegen zwischen den beiden zuvor beschriebenen Fällen. Es zeigt sich eine höhere Abhängigkeit der Werte von der Windrichtung, im Industriegebiet weisen die Werte jedoch eine sehr deutliche Abminderung im Verhältnis zum Einzelgebäude auf.

Für einige Anströmrichtungen wurden die Ergebnisse der $c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ -Werte in Abschnitt 5.1.1 bis 5.1.3 nicht aufgeführt (Bsp. Wände bei Schräganströmung, Dach bei

rechtwinkliger Anströmung). Es wird jedoch aus Abb. 5.10 ersichtlich, daß die Feststellungen aus Abschnitt 5.1.1 bis 5.1.3 hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen Bebauungsart und Größenordnung der Werte auch für die dort nicht ausführlich dargestellten Fälle gelten.

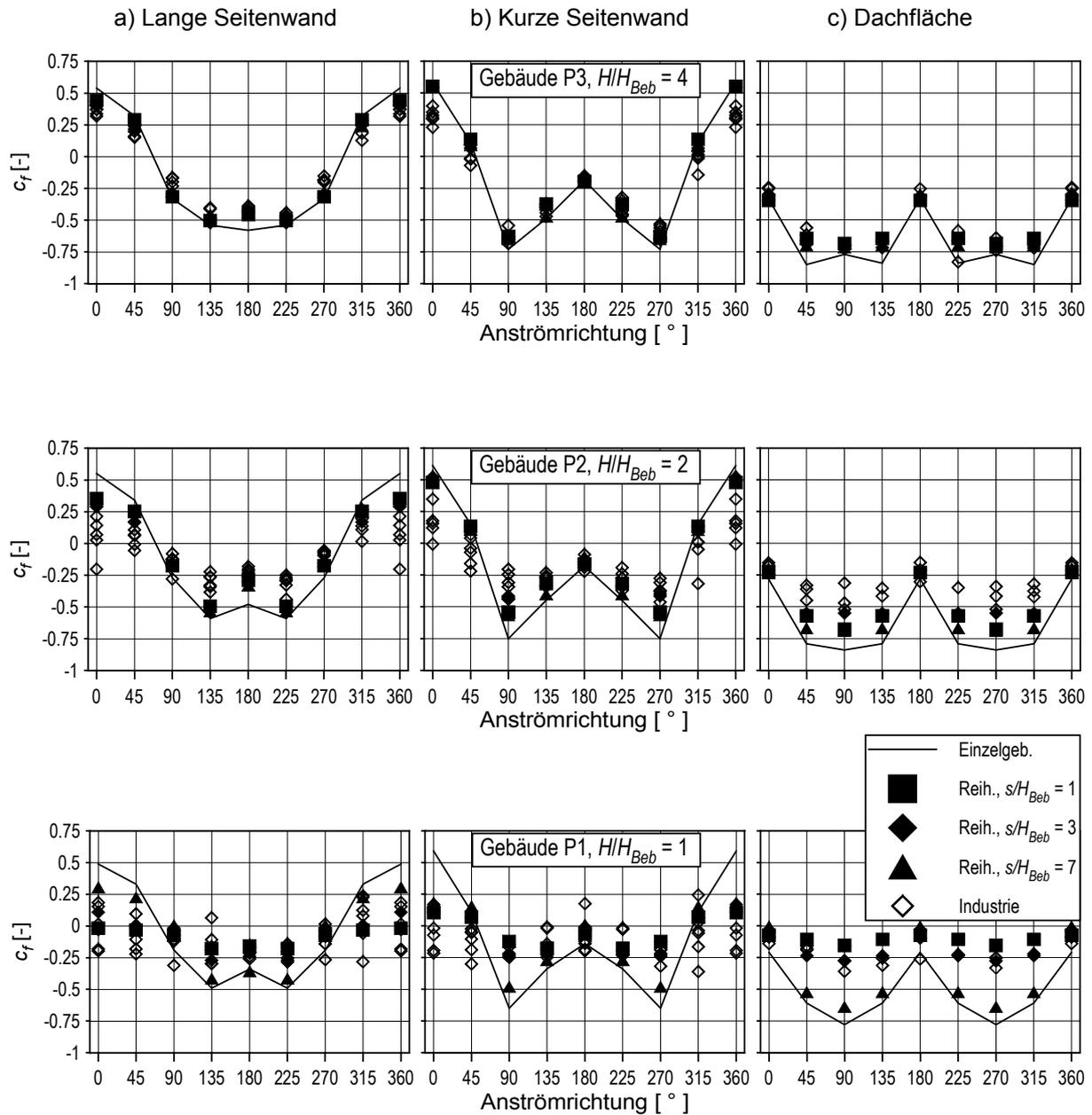


Abb. 5.10 Flächengemittelte $c_{p,mean}$ -Werte für unterschiedliche Anströmrichtungen, bei den Seitenwänden entspricht 0° einer Anströmrichtung senkrecht von vorne (Luvseite), bei den Dachflächen wird bei 0° die kurze Seite senkrecht angeströmt.

5.2 Globale Windlasten

Die auf das gesamte Gebäude bezogenen Lastbeiwerte für den Fall des einzeln stehenden Gebäudes wurden in Abschnitt 4.2 dargestellt und mit Daten aus der Literatur verglichen. Inwiefern sich diese für die Bemessung der Tragstruktur wesentlichen Kenngrößen infolge der Umgebungsbebauung ändern, wird in den beiden nachfolgenden Abschnitten erläutert. Die Betrachtung beschränkt sich hierbei in erster Linie auf die Windrichtung senkrecht zur langen Gebäudeseite (entspricht 90° in Abb. 4.8) der Modellserie P. Einerseits wurden hier am Einzelgebäude die höchsten Widerstandsbeiwerte ermittelt, andererseits wird durch die hierbei erzeugten Kräfte Knicken um die schwache Achse verursacht.

5.2.1 Widerstandsbeiwerte

Das Verhältnis der Widerstandsbeiwerte C_D (definiert nach Gl. 4.6) ermittelt in umgebender Bebauung zum Widerstandsbeiwert am Einzelgebäude (siehe Abschnitt 4.2.2) wird verwendet, um den Einfluß der Umgebungsbebauung auf die am Gebäude anliegende Gesamtkraft zu quantifizieren. In Abb. 5.11 ist dieses Verhältnis für das Testgebäude P1 ($H = 16$ m, $H/H_{Beb} = 1$) für die Anströmrichtung 90° (senkrecht zur langen Seitenwand) für alle untersuchten Bebauungsstrukturen dargestellt. Das Verhältnis der Widerstandsbeiwerte für die Reihenbebauung ist sowohl als Funktion des Gebäudeabstandes s , als auch in Abhängigkeit vom Bebauungsgrad λ_{ub} gegeben. Ebenfalls eingetragen in Abb. 5.11 wurde die von HUSSAIN und LEE (1980) ermittelte Beziehung für eine reihenförmige Bebauungsstruktur. Da die in der vorliegenden Arbeit verwendete Gebäudeanordnung nicht exakt mit dem von HUSSAIN und LEE (1980) gewählten Anordnungsmuster übereinstimmt, weichen in Abb. 5.11 die Kurven bezogen auf die Bebauungsdichte λ_{ub} und bezogen auf den Gebäudeabstand s bei geringerer Bebauung zunehmend voneinander ab. Die Daten für die beiden anderen Bebauungsstrukturen (Industriegebiet und Blockrandbebauung) sind über den entsprechenden Werten des Bebauungsgrades λ_{ub} aufgetragen. Aufgrund der variablen Bauwerksabstände dieser Bebauungsformen ist die obere Koordinatenachse, welche den Gebäudeabstand s wiedergibt, in diesem Fall ohne Bedeutung.

Die in der Reihenbebauung ermittelten Werte für das Verhältnis $C_{D, mit\ Beb.}/C_{D, Einzelgeb.}$ zeigen eine gute Übereinstimmung mit der von HUSSAIN und LEE (1980) ermittelten Abnahme der Werte bei geringer werdendem Gebäudeabstand in homogenen Reihenbebauungen. Die Ergebnisse für die unterschiedlichen Gebäudekonstellationen im Industriegebiet BASF45° schwanken in einer Bandbreite von 0.43 bis -0.05. Der Wert aus der Kurve nach HUSSAIN und LEE (1980) für die entsprechende Bebauungsdichte λ_{ub} beträgt ca. 0.27. Einerseits wird durch die Ergebnisse in der Industriebebauung die Reduktion der globalen Last in bebauten Gebieten aufgezeigt, andererseits wird wiederum deutlich, daß die Windlasten ganz wesentlich durch die Bebauungssituation im unmittelbaren Nahfeld des Bauwerks bestimmt wird und somit einer enormen Variabilität unterworfen sind.

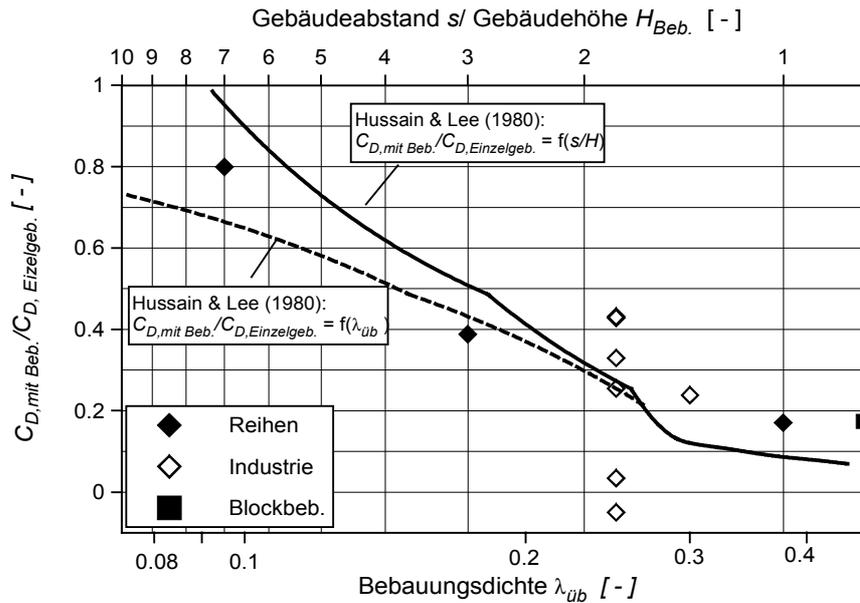


Abb. 5.11 Verhältnis der Widerstandsbeiwerte C_D (definiert nach Gl. 4.6) am Testgebäude P1 ($H=16$ m) in bebautem Gebiet zum Wert am Einzelgebäude für die Anströmrichtung 90° (senkrecht auf lange Seitenwand), $H/H_{Beb} = 1$

Für das Testgebäude P2 ($H = 32$ m, $H/H_{Beb} = 2$) sind die Ergebnisse der Widerstandsbeiwerte in der gleichen Form in Abb. 5.12 aufgetragen. HUSSAIN und LEE (1980) führten ihre Messungen an Gebäudemodellen, welche die umliegende Bebauung überragen, verglichen mit der Anzahl der Versuche für den Fall $H/H_{Beb} = 1$, nur noch an einer geringen Anzahl von Reihenstrukturen unterschiedlicher Dichte durch. Die Daten sind Abb. 5.12 daher als Einzelpunkte dargestellt.

Die Abnahme der Widerstandsbeiwerte der Reihenbebauung mit zunehmender Bebauungsdichte, welche in der vorliegenden Studie ermittelt wurde, weist eine gute Übereinstimmung mit den von HUSSAIN und LEE (1980) ermittelten Daten auf. Bei dem kleinsten Gebäudeabstand ($s/H_{Beb} = 1$) ergibt sich ein Wiederanstieg des Widerstandsbeiwertes, in diesem Bereich der Bebauungsdichte wurden jedoch von HUSSAIN und LEE (1980) keine Messungen mehr vorgenommen. Am Verlauf der Druckbeiwerte $c_{p,mean}$ über die Höhe entlang der Vorder- und Rückseite des P2-Gebäudes in Abb. 5.2 konnte bereits gezeigt werden, daß sich bei einer Bebauung dieser Dichte eine Verminderung der winderzeugten Drücke auf den unteren Gebäudeteil beschränkt, während der obere aus der Bebauung herausragende Teil eine weitaus geringere Abminderung erfährt. Weitere Aufschlüsse über den Zustand der Strömung bei dieser dichten Bebauung liefern die Daten der Geschwindigkeitsmessungen in Abschnitt 5.4.

Die in der Industriebebauung BASF45° ermittelten Werte für das Verhältnis der Widerstandsbeiwerte $C_{D, mit\ Beb.} / C_{D, Einzelgeb.}$ schwanken zwischen 0.53 und 0.09. Bei den Ergebnissen der Industriebebauung wird deutlich, daß der in der Reihenbebauung ermittelte Wert von ca. = 0.56 bei einer Bebauungsdichte λ_{ueb} , welche der Industriebebauung BASF45° entspricht, eher als obere Schranke anzusehen ist.

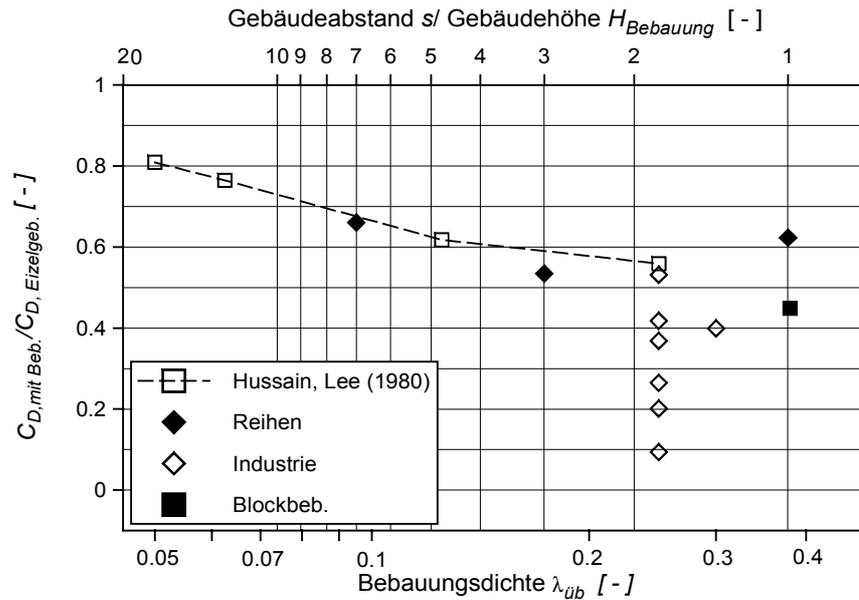


Abb. 5.12 Verhältnis der Widerstandsbeiwerte C_D (definiert nach Gl. 4.6) am Testgebäude P2 ($H=32$ m) in bebautem Gebiet zum Wert am Einzelgebäude für die Anströmrichtung 90° (senkrecht auf lange Seitenwand), $H/H_{Beb} = 2$

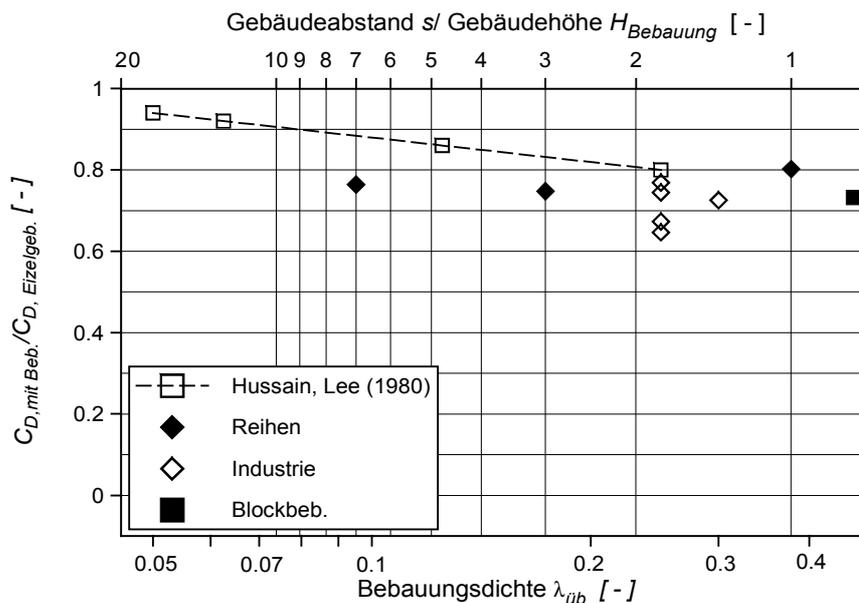


Abb. 5.13 Verhältnis der Widerstandsbeiwerte C_D (definiert nach Gl. 4.6) am Testgebäude P3 ($H = 64$ m) in bebautem Gebiet zum Wert am Einzelgebäude für die Anströmrichtung 90° (senkrecht auf lange Seitenwand), $H/H_{Beb} = 4$

Hier zeigt sich entsprechend dem Vergleich der $c_{p,mean}$ -Werte in Abb. 5.4b aufgrund der Streubreite der Daten, daß infolge der variierenden Gebäudehöhen in der Industriebebauung, bei einigen der untersuchten Nahfeldsituationen eine stärkere Abschattung durch Nachbargebäude erreicht wurde.

In Abb. 5.13 wird das Verhältnis der Widerstandsbeiwerte $C_{D, mit\ Bebauung}/C_{D, Einzelgeb}$ für das hohe Meßgebäude ($H/H_{Beb} = 4$) dargestellt. Hierbei wird deutlich, daß die Ergebnisse der

vorliegenden Arbeit eine etwas größere Reduktion der Widerstandsbeiwerte in der Reihenbebauung ergeben, als die von HUSSAIN und LEE (1980) durchgeführten Messungen. Insgesamt zeigt sich der bereits bei der Betrachtung der $c_{p,mean}$ -Werte festgestellte Trend, daß bei zunehmendem Verhältnis H/H_{Beb} die Unterschiede zwischen Einzelgebäude und Gebäude in bebauten Gebieten geringer werden. Generell sind auch keine wesentlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Bauungsarten zu erkennen. Die Streubreite der Daten für die Industriebebauung BASF45° ist im Vergleich zu den niedrigeren Testgebäuden deutlich reduziert.

Die in Abb. 5.11 bis Abb. 5.13 dargestellten Widerstandsbeiwerte C_D beziehen sich auf die gesamte projizierte Fläche des Gebäudes senkrecht zur Anströmrichtung (siehe Gl. 4.6). Durch die angrenzende Bebauung wird jedoch im unteren Bereich des Gebäudes ein Teil der angeströmten Wandfläche des Testgebäudes abgeschirmt. Der Nullhöhenversatz d_0 des logarithmischen Geschwindigkeitsgesetzes (Gl. 2.6) kann als Maß hierfür angesehen werden. Bezieht man die C_D -Werte auf die verbleibende der Strömung ausgesetzten Angriffsfläche, kann dies im vorliegenden Fall der senkrechten Anströmung der langen Gebäudeseite durch Multiplikation der C_D -Werte in der Bebauung mit dem Faktor $H/(H-d_0)$ berücksichtigt werden. Andererseits ergibt sich aus dem Kehrwert dieses Faktors ein Abminderungsfaktor für die C_D -Werte des Einzelgebäudes, um den Bebauungseinfluß zu berücksichtigen. Die Zahlenwerte von d_0 der untersuchten bebauten Gebiete sind in Tab. 5.2 enthalten. Die berechneten Werte $(H-d_0)/H$ sind in Tab. 5.1 den aus den Druckmessungen ermittelten Werten $C_{D,mit\text{Beb.}}/C_{D,Einzelgeb}$ gegenübergestellt.

Tab. 5.1 Vergleich der aus den Messungen ermittelten Widerstandsbeiwerte $C_{D,Beb.}/C_{D,Einzelgeb}$ mit $(H-d_0)/H$

	$H/H_{Beb} = 1$		$H/H_{Beb} = 2$		$H/H_{Beb} = 4$	
	$\frac{C_{D,mitBeb.}}{C_{D,Einzelgeb}}$	$\frac{H-d_0}{H}$	$\frac{C_{D,mitBeb.}}{C_{D,Einzelgeb}}$	$\frac{H-d_0}{H}$	$\frac{C_{D,mitBeb.}}{C_{D,Einzelgeb}}$	$\frac{H-d_0}{H}$
$s/H_{Beb} = 7$	0.80	0.75	0.66	0.88	0.76	0.94
$s/H_{Beb} = 3$	0.39	0.50	0.53	0.75	0.75	0.88
$s/H_{Beb} = 1$	0.18	0.13	0.62	0.56	0.8	0.78
BASF45°	0.19	0.56	0.32	0.78	0.79	0.89
Block	0.17	0.25	0.45	0.63	0.73	0.81

Anhand von Tab. 5.1 kann festgestellt werden, daß in einigen der untersuchten Fällen eine recht gute Übereinstimmung von $C_{D,mit\text{Beb.}}/C_{D,Einzelgeb}$ und $(H-d_0)/H$ vorzufinden ist. Es wird offensichtlich, daß durch den Parameter $(H-d_0)/H$ zwar die abgeschirmte Fläche, jedoch nicht der Profilverlauf der Geschwindigkeit berücksichtigt wird. Generell ist daher die Tendenz zu beobachten, daß bei Bauungsstrukturen, deren Geschwindigkeitsprofil nur geringfügig von der ungestörten Anströmung abweicht, eine gute Übereinstimmung auftritt, während bei den

anderen Strukturen (z. B. Industrie- und Blockrandbebauung) vor allem bei den beiden kleineren Gebäuden eine Überschätzung der Lasten eintritt (siehe auch Abschnitt 5.4).

5.2.2 Momentenbeiwerte

Die Momentenbeiwerte für die Anströmrichtung 90° (Definition nach Abb. 4.8), welche dem Knicken um die schwache Achse entsprechen, sind für alle untersuchten Bebauungsarten in Abb. 5.14 als Funktion von H/H_{Beb} dargestellt. Zum Vergleich wurden auch die Werte der Einzelgebäude eingetragen.

Bei den Reihenbebauungen zeigt sich, daß die Momentenbeiwerte sehr unterschiedlich mit dem Verhältnis H/H_{Beb} abnehmen. Während beim Gebäudeabstand $s/H_{Beb} = 7$ Werte erreicht werden, die dem Verlauf der eingezeichneten Regressionsgeraden für die Einzelgebäude annähernd folgen, weist der Verlauf für $s/H_{Beb} = 1$ einen deutlichen Knick auf. Der Momentenbeiwert für $H/H_{Beb} = 2$ liegt im oberen Bereich der ermittelten Werte für bebauten Gebiete, während für $H/H_{Beb} = 1$ eine erhebliche Abminderung erreicht wird.

Für die Reihenbebauung $s/H_{Beb} = 3$ und die Blockrandbebauung ist ein annähernd lineares Verhalten im Hinblick auf den Anstieg mit H/H_{Beb} festzustellen. Für die Industriebebauung wurde eine Regressionsgerade ermittelt, welche die Mittelwerte der streuenden Daten sehr gut beschreibt.

Die oben geschilderten Zusammenhänge zwischen Momentenbeiwert, Bebauungsart und Höhenverhältnis H/H_{Beb} sind zum Teil durch die zuvor beschriebenen Änderungen des Widerstandsbeiwertes erklärbar. Jedoch vor allem für den Fall $H/H_{Beb} = 2$ zeigt sich, daß die Momentenbeiwerte in der Bebauung im Verhältnis zum Wert des Einzelgebäudes weniger abnehmen als die Widerstandsbeiwerte. Dies bedeutet, daß der Angriffspunkt der resultierenden Last in Strömungsrichtung im bebauten Fall aufgrund der Abschirmung im unteren Bereich weiter oben liegt und daher im Verhältnis zu einem höheren Moment führt.

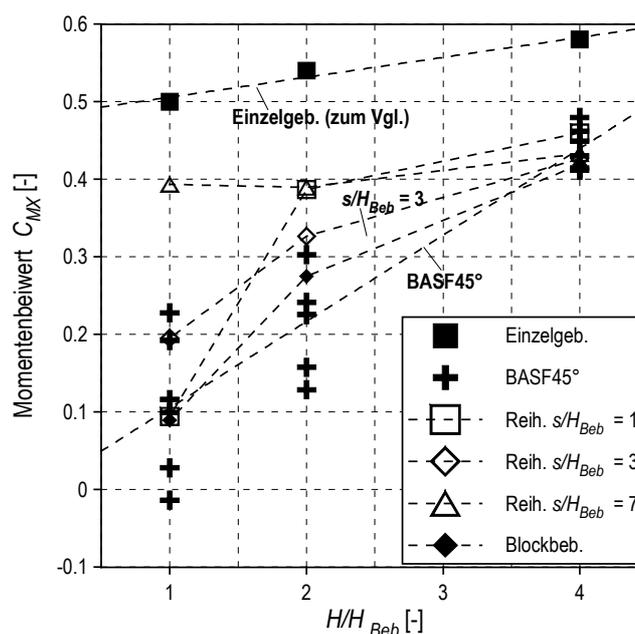


Abb. 5.14 Momentenbeiwerte ohne und mit Umgebungsbebauung

5.3 Lokale Extremwerte

Die lokalen Extremwerte bilden die Basis für die Bemessung von kleinflächigen Bauteilen und Bauelementen sowie deren Befestigungen. Die Ergebnisse der Extremwertstatistik zur Bestimmung der lokalen $c_{p,min}$ - und $c_{p,max}$ -Werte in den untersuchten bebauten Gebieten sind daher von besonderem Interesse hinsichtlich der lokalen Lasten und der zu erwartenden Variabilität dieser Lasten innerhalb bebauter Gebiete.

Während die globalen Lasten im vorangegangenen Abschnitt für alle untersuchten Bauungsarten Lastbeiwerte lieferten, welche geringer waren als die Werte der jeweiligen Einzelgebäude, deuten die in Abschnitt 5.1 vorgestellten $c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ -Werte bereits darauf hin, daß vor allem an den hohen Meßgebäuden innerhalb der Bebauung lokal auch höhere Spitzenlasten auftreten könnten als am Einzelgebäude. Dies ist vor allem dann möglich, wenn die $c_{p,mean}$ -Werte in der Bebauung ähnlich hoch sind wie am Einzelgebäude, die $c_{p,rms}$ -Werte für den bebauten Fall jedoch höher liegen als am Einzelgebäude aufgrund des größeren Turbulenzgehaltes in der durch die Bebauung erzeugten internen Grenzschicht. Auch die Möglichkeit für eine Abminderung der lokalen Extremwerte im Fall niedriger Gebäude in dicht bebauten Gebieten, welche die umliegende Bebauung nicht überragen, sollte näher betrachtet werden. Nachfolgend werden daher die in den unterschiedlichen Bauungsarten ermittelten Werte für alle untersuchten Testgebäude den Ergebnissen am Einzelgebäude gegenübergestellt.

5.3.1 Lokale Extremwerte für 1m²

Wandflächen - Sog

An Seitenwänden treten bei paralleler Ausrichtung zum anströmenden Wind große lokale Sogkräfte auf. Für alle Meßgebäude werden in Abb. 5.15 die $c_{p,min}$ -Werte an der kurzen Seitenwand in bebauten Gebieten und des einzeln stehenden Gebäudes für diese Ausrichtung miteinander verglichen.

Am niedrigen Gebäude ($H = 16$ m) in der Reihenbebauung (Abb. 5.15a) sind die Werte des Einzelgebäudes und der Reihenbebauung $s = 7 H_{Beb}$ in Größe und Verlauf nahezu identisch, während mit zunehmender Bebauungsdichte und abnehmendem Gebäudeabstand die Spitzensogbeiwerte $c_{p,min}$ erheblich reduziert werden. An der luvseitigen Kante ($y/B = 0.09$) fällt auf, daß der maximale Sog für die Gebäudeabstände $s = 7 H_{Beb}$ und $s = 3 H_{Beb}$ analog zum Einzelgebäude im bodennahen Bereich auftritt. Für die dichte Reihenbebauung $s = 1 H_{Beb}$ wurde der maximale Sog im oberen Wandbereich ermittelt. Die Reduktion des Maximalwertes im Vergleich zum Einzelgebäude beträgt in diesem Fall ca. 50 %. In der Industriebebauung ist wiederum ein sehr hohes Maß an Variabilität der auftretenden Soglasten zu verzeichnen. Die ermittelten Werte liegen in der Größenordnung der Reihenbauungen $s = 3 H_{Beb}$ und $s = 1 H_{Beb}$.

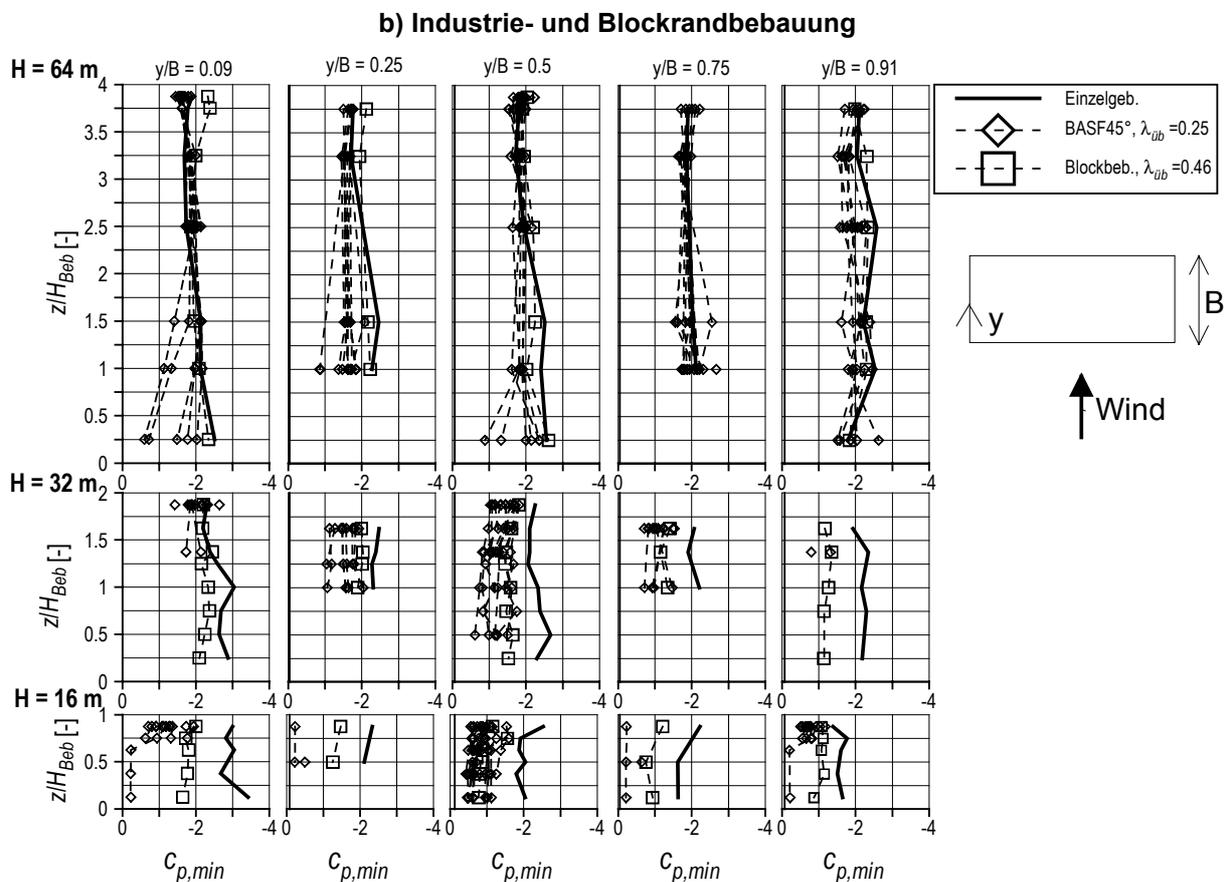
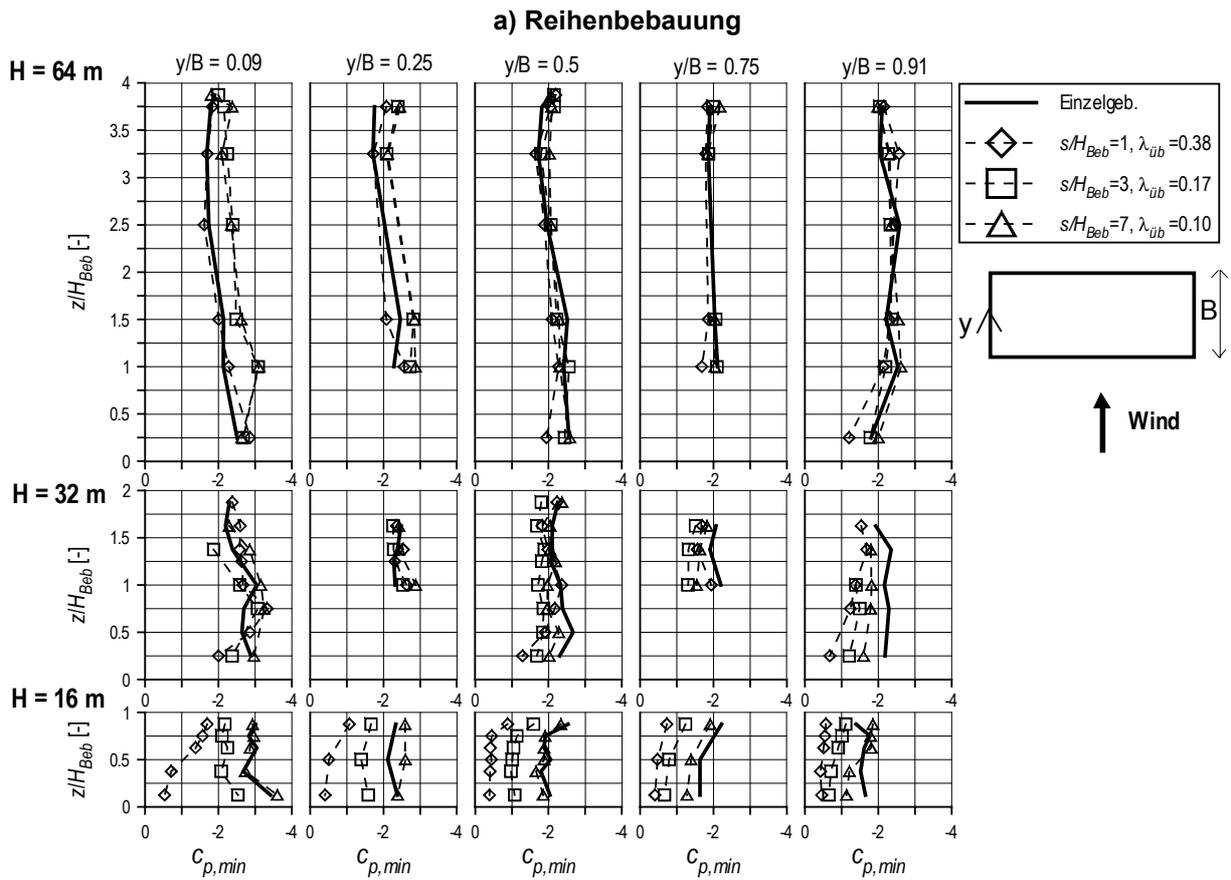


Abb. 5.15 Vergleich der $c_{p,min}$ -Werte an der kurzen Seitenwand bei paralleler Ausrichtung zum Wind (90°)

Am mittleren Gebäude ($H=32$ m) werden in der Reihenbebauung die lokalen Sogbeiwerte an der luvseitigen Kante ($y/B = 0.09$) im Vergleich zum Einzelgebäude erhöht, mit zunehmendem Abstand von der Kante unterschreiten die Spitzensogbeiwerte allerdings wieder die Werte des Einzelgebäudes. In der Industriebebauung ist im Vergleich zur Reihenbebauung eine etwas stärkere Reduktion zu verzeichnen, wobei sich im Hinblick auf die Variabilität der Lasten eine ähnliche Streubreite wie beim niedrigen Gebäude einstellt.

Am hohen Gebäude wird in der Reihenbebauung der Spitzensog an der Luvkante ($y/B = 0.09$) über die ganze Höhe hinweg deutlich erhöht, während in der Industrie- und Blockrandbebauung vor allem im unteren Bereich für $z < 2H_{Beb}$ eher eine Reduktion erreicht wird. Es ist jedoch eine enorme Streubreite vorhanden, die im bodennahen Bereich Werte von -0.6 bis -2.3 umfaßt. In der Reihenbebauung $s = 3 H_{Beb}$ und $s = 7 H_{Beb}$ wird in der Höhe der Umgebungsbebauung

($z = H_{Beb}$) der maximale Spitzensogbeiwert von ca. -3.0 erreicht. Dieser liegt über dem in der ENV 1991-2-4 (1994) für diese Höhe und Lastzone vorgeschlagenen Wert von -2.84 (siehe Abb. 4.12). Die Erhöhung der lokalen Extremwerte resultiert vor allem aus der Erhöhung des fluktuierenden Anteils $c_{p,rms}$ bei nahezu unverändertem Mittelwert $c_{p,mean}$ (siehe auch Abb. 5.6 und Abb. 5.7) Im weiteren Verlauf entlang der Wandfläche gleichen sich die Werte in der Reihenbebauung zunehmend an die Werte des Einzelgebäudes an. In der Industriebebauung ist eine ähnliche Tendenz vorhanden, wobei die starke Variabilität und die Reduktion der Soglasten im unteren Bereich in etwa bis zur Wandmitte ($y/B = 0.5$) erhalten bleibt.

Wandflächen - Druck

An der Luvseite der Gebäude entstehen die höchsten extremen Druckbeiwerte $c_{p,max}$. In Abb. 5.16 sind die $c_{p,max}$ -Werte an der langen Seitenwand für alle untersuchten Gebäude und Bauungsstrukturen den Werten des einzeln stehenden Gebäudes gegenübergestellt.

Für das niedrige Gebäude in der Reihenbebauung ($H = 16$ m, Abb. 5.16a) ist festzustellen, daß lediglich für den Gebäudeabstand $s = 1 H_{Beb}$ eine deutliche Abminderung, jedoch nicht für alle Meßpunkte, zu verzeichnen ist. Vor allem im seitlichen ($x/L = 0.03$) und oberen Randbereich ist lediglich eine geringe Reduktion der $c_{p,max}$ -Werte erkennbar, während infolge des geringen Gebäudeabstandes der mittlere Bereich der Wandfläche sehr stark abgeschirmt wird. In der Industrie- und Blockrandbebauung (Abb. 5.16b) wird hingegen über die gesamte Wandfläche eine spürbare Abminderung erreicht, wobei die Streubreite einen Bereich der $c_{p,max}$ -Werte von ca. 0.5 bis 1.7 umfaßt.

Am mittleren Gebäude ($H = 32$ m) ist in der Reihenbebauung im unteren Bereich ($z < H_{Beb}$) eine Reduktion vor allem für den Gebäudeabstand $s = 1 H_{Beb}$ festzustellen. In der Industriebebauung ist die Reduktion der Werte größer und umfaßt auch den oberen über die mittlere Bauungshöhe H_{Beb} hinausragenden Bereich.

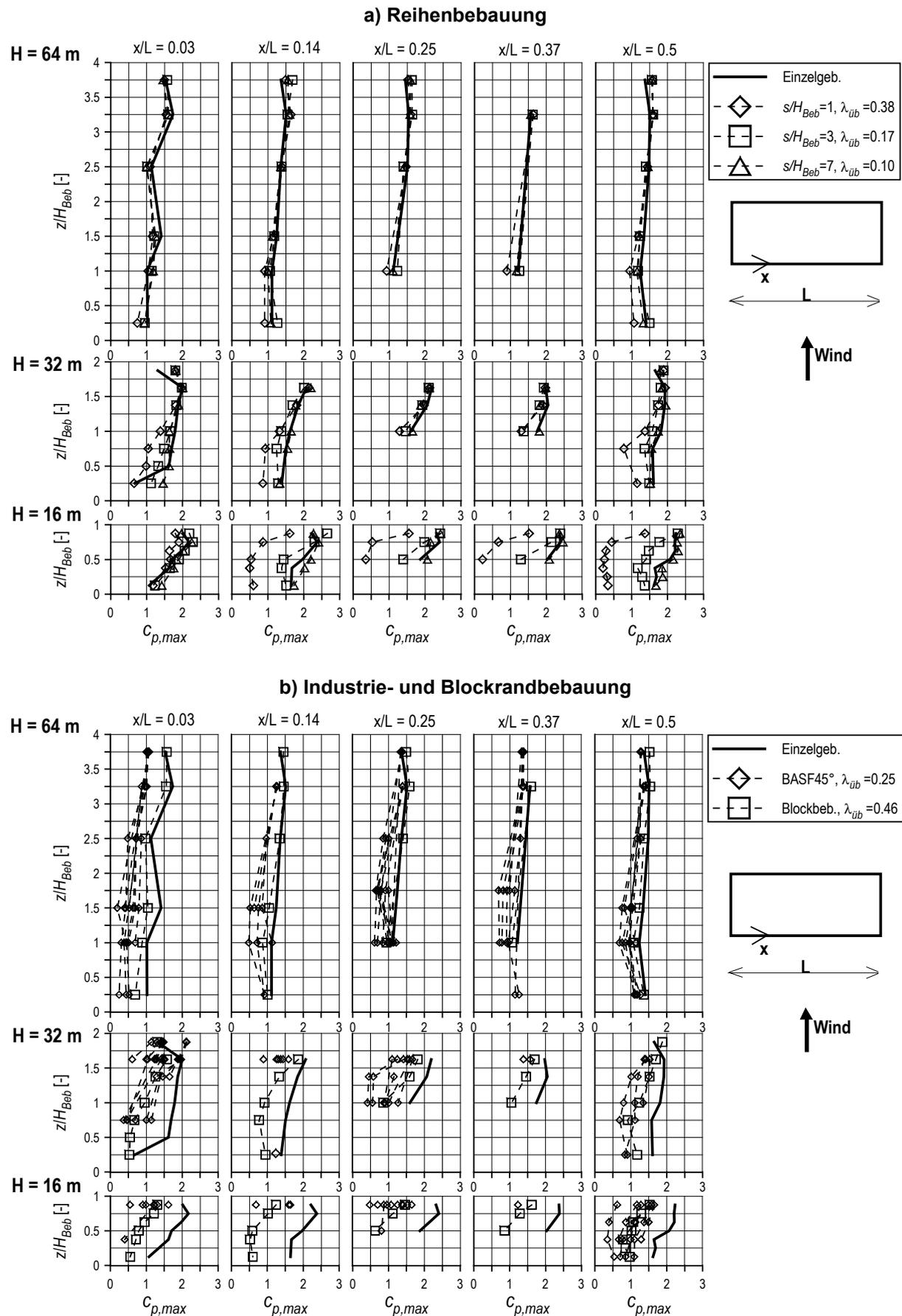


Abb. 5.16 Vergleich der $C_{p,max}$ -Werte an der langen Seitenwand bei frontaler Anströmung (0°)

Die $c_{p,max}$ -Werte am hohen Gebäude ($H = 64$ m) sind in der Reihenbebauung nahezu mit den am Einzelgebäude ermittelten Werten identisch, lediglich im unteren Bereich ($z < H_{Beb}$) ergeben sich geringfügig reduzierte Werte. In der Industrie- und Blockrandbebauung werden die lokalen Druckmaxima vor allem in einem Bereich $z < 2.5 H_{Beb}$ verringert. Die Ursache hierfür ist in der stark verringerten Anströmgeschwindigkeit für diesen Bereich begründet (siehe Abschnitt 5.4).

Dachflächen - Sog

Maßgeblich für die Bemessung von Dacheindeckungen und deren Befestigungselemente für die Eckbereiche von Flachdächern sind die unter Schräganströmung auftretenden lokalen Lasten. Für diese Anströmrichtung sind in Abb. 5.17 die Ergebnisse der $c_{p,min}$ -Werte für die verschiedenen Bauungsarten den Werten des Einzelgebäudes gegenübergestellt.

Im Fall des niedrigen Gebäudes ($H = 16$ m, Abb. 5.17a) in der Reihenbebauung ergibt sich eine Abminderung der Werte, welche jener an der parallel angeströmten Seitenwand für die unterschiedlichen Bauwerksabstände sehr ähnlich ist. Während die für den Abstand von $s = 7 H_{Beb}$ ermittelten Werte nahezu den Werten des Einzelgebäudes entsprechen, wird für jeden der beiden kleineren Abstände eine Reduktion vor allem der hohen Werte am Randbereich um jeweils ca. ein Drittel erreicht. Die Werte in der Industrie- und Blockrandbebauung liegen hier ebenfalls in einem Bereich, wie er durch die Ergebnisse in der Reihenbebauung für die Gebäudeabstände $s = 1 H_{Beb}$ und $s = 3 H_{Beb}$ eingegrenzt wird.

Für das mittlere Gebäude ($H = 32$ m) ergibt sich ein Verhalten, welches auch bereits zuvor bei der parallel angeströmten Seitenwand festgestellt wurde. Während in der Reihenbebauung keine wesentliche Änderung der Werte im Vergleich zum Einzelgebäude eintritt, wird in der Industrie- und Blockrandbebauung auch für diese Gebäudehöhe noch eine deutliche Reduktion der Werte erreicht.

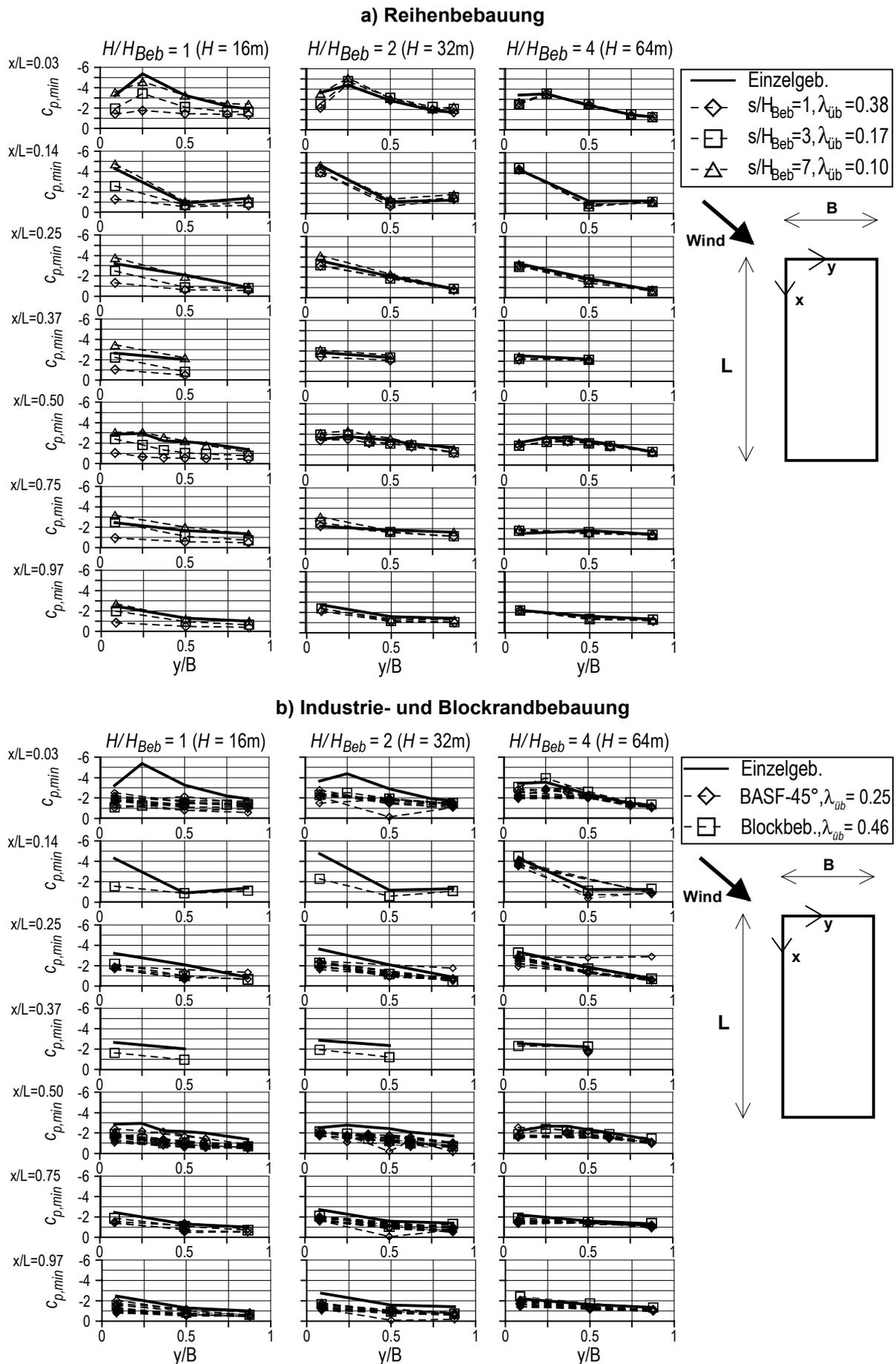
Am hohen Gebäude ($H = 64$ m) werden sowohl in der Reihenbebauung als auch in der Industrie- und Blockrandbebauung keine wesentlichen Veränderungen im Vergleich zum Einzelgebäude hervorgerufen. In der Industriebebauung ist eine gewisse Variabilität der Daten zu verzeichnen.

Dachflächen - Druck

In Abb. 5.18 sind die $c_{p,max}$ -Werte der Dachflächen für die Anströmrichtung senkrecht zur kurzen Seite der Testgebäude enthalten. Bei dieser Anströmrichtung wurden am Einzelgebäude die höchsten Druckbeiwerte $c_{p,max}$ erreicht. Diese treten am Einzelgebäude vor allem im hinteren Bereich der langgezogenen Dachfläche auf, dort wo eine Wiederanlegung der Strömung stattfindet. Für das niedrige Gebäude ($H = 16$ m) kann festgestellt werden, daß sich eine vom Einzelgebäude völlig verschiedene räumliche Verteilung der Druckmaxima ausbildet. Im Gegensatz zum Einzelgebäude treten in der Bebauung die höchsten lokalen Spitzendruckbeiwerte $c_{p,max}$ an der luvseitigen Kante auf. Dies gilt sowohl für die Reihenbebauung als auch für die Industrie- und Blockrandbebauung.

Die lokalen extremen Druckbeiwerte $c_{p,max}$ am kleinen Gebäude ($H = 16$ m) liegen teilweise deutlich über den Werten des Einzelgebäudes. Die maximalen Werte erreichen in der Reihenbebauung die Größenordnung 0,6, in der Blockrandbebauung liegen sie sogar über 0,8. Die $c_{p,max}$ -Werte am kleinen Gebäude liegen somit zum Teil deutlich höher als die in der ENV 1991-2-4 (1994) für den vorliegenden Fall angegebenen Werte von $c_{p,max} = 0,55$ (siehe Abb. 4.16). Dies ist insofern kritisch, da die nach unten gerichteten Winddruckkräfte am Dach bei der Bemessung mit den nach unten gerichteten Kräften aus den Lastfällen Schnee, Eigenlasten, etc. überlagert werden müssen. Die Ursache für die erhöhten Druckbeiwerte $c_{p,max}$ in der Bebauung sind vor allem in dem erhöhten Anteil turbulenter Schwankungen sowie in den betragsmäßig herabgesetzten Mittelwerten zu suchen. Druckkräfte an Dachflächen werden an niedrigen Gebäuden auch dann erreicht, wenn hohe Gebäude sich in unmittelbarer Nähe an der Leeseite befinden. Dies ist die Folge der abwärtsgerichteten Strömungskomponente an der Luvseite des hohen Gebäudes. Im vorliegenden Fall trägt dieser Umstand jedoch zumindest bei der Reihen- und Blockrandbebauung nicht zu den erhöhten Werten bei.

An den beiden höheren Gebäude sind die Abweichungen vom Einzelgebäude weitaus geringer als am niedrigen Gebäude. Die Bemessungswerte der ENV 1991-2-4 (1994) werden in diesem Fall nicht überschritten



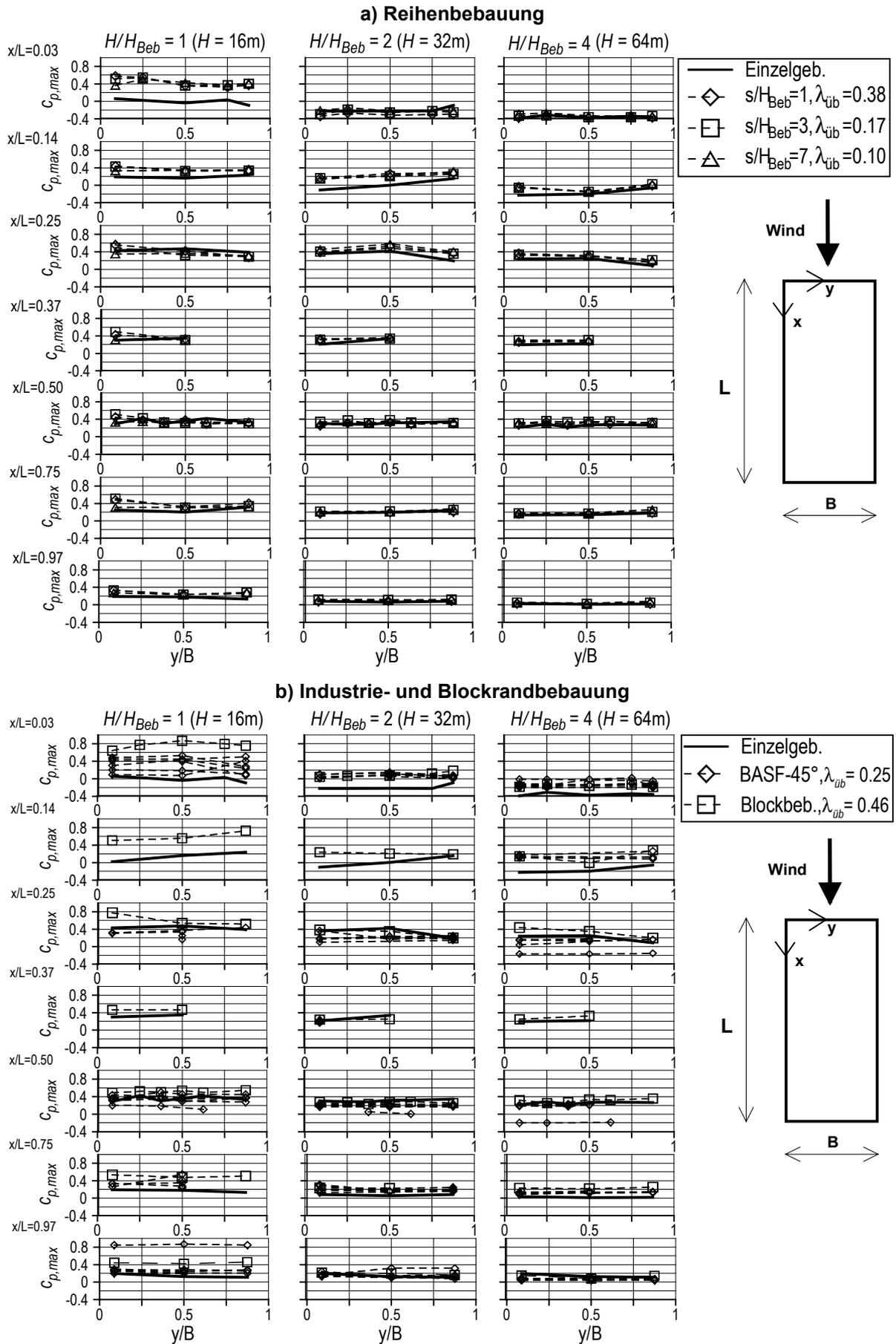


Abb. 5.18 Vergleich der $c_{p,max}$ -Werte an der Dachfläche bei einer Anströmung senkrecht zur kurzen Seite (0°)

5.3.2 Extremwerte für Teilflächen unterschiedlicher Größe

Die extremen Druckbeiwerte für unterschiedliche Flächengrößen am Einzelgebäude wurden in Abschnitt 4.3.3 untersucht. Hierbei wurde eine gute Übereinstimmung zwischen der in der ENV 1991-2-4 (1994) festgelegten Abhängigkeit des lokalen Druckbeiwertes von der Größe der belasteten Fläche und den in der vorliegenden Arbeit ermittelten Werten für unterschiedliche Flächengrößen festgestellt. Nachfolgend werden die in der Bebauung ermittelten lokalen Extremwerte für unterschiedliche Flächengrößen mit den entsprechenden Ergebnissen des Einzelgebäudes der selben Einflußfläche ins Verhältnis gesetzt. Dies bedeutet, daß bei einem nahezu konstanten Verlauf über die Größe der Fläche, der gleiche Zusammenhang zwischen der Größe des Lastbeiwertes und der Flächengröße besteht. Entsprechend der Vorgehensweise in Abschnitt 4.3.3 wurde für die verschiedenen Lastzonen zunächst ein Meßpunkt ausgewählt, welcher die höchste bzw. eine möglichst hohe lokale Last aufweist. Aus dem vorangegangenen Abschnitt wurde deutlich, daß die Lage der maximalen lokalen Lasten in der Bebauung nicht mit der Position am Einzelgebäude übereinstimmen muß. Entsprechend wurden die Rechenabläufe zur Bestimmung der teilflächenbezogenen Lasten angepaßt.

In Abb. 5.19 bis Abb. 5.22 wird das Verhältnis der $c_{p,min}$ -Werte bzw. $c_{p,max}$ -Werte in der Bebauung zu den Werten am Einzelgebäude entsprechend der in ENV 1991-2-4 definierten Lastzonen für die Fälle $H/H_{Beb} = 1$ und $H/H_{Beb} = 2$ als Funktion der betrachteten Flächengröße dargestellt. Enthalten sind die Ergebnisse für die Reihenbebauung und die Blockrandbebauung.

Abb. 5.19 enthält die $c_{p,min}$ -Werte bei paralleler Anströmung für die Lastzonen A* und B* der Seitenwand. Die Definition der Lastzonen ist in Abb. 2.17 gegeben. Die Zone A* an der kurzen Seitenwand beginnt direkt an der Vorderkante und erstreckt sich über eine Breite von 6.4 m am P1-Gebäude und 10.6m am P2-Gebäude. Den restlichen Teil der Wandfläche bildet Zone B*.

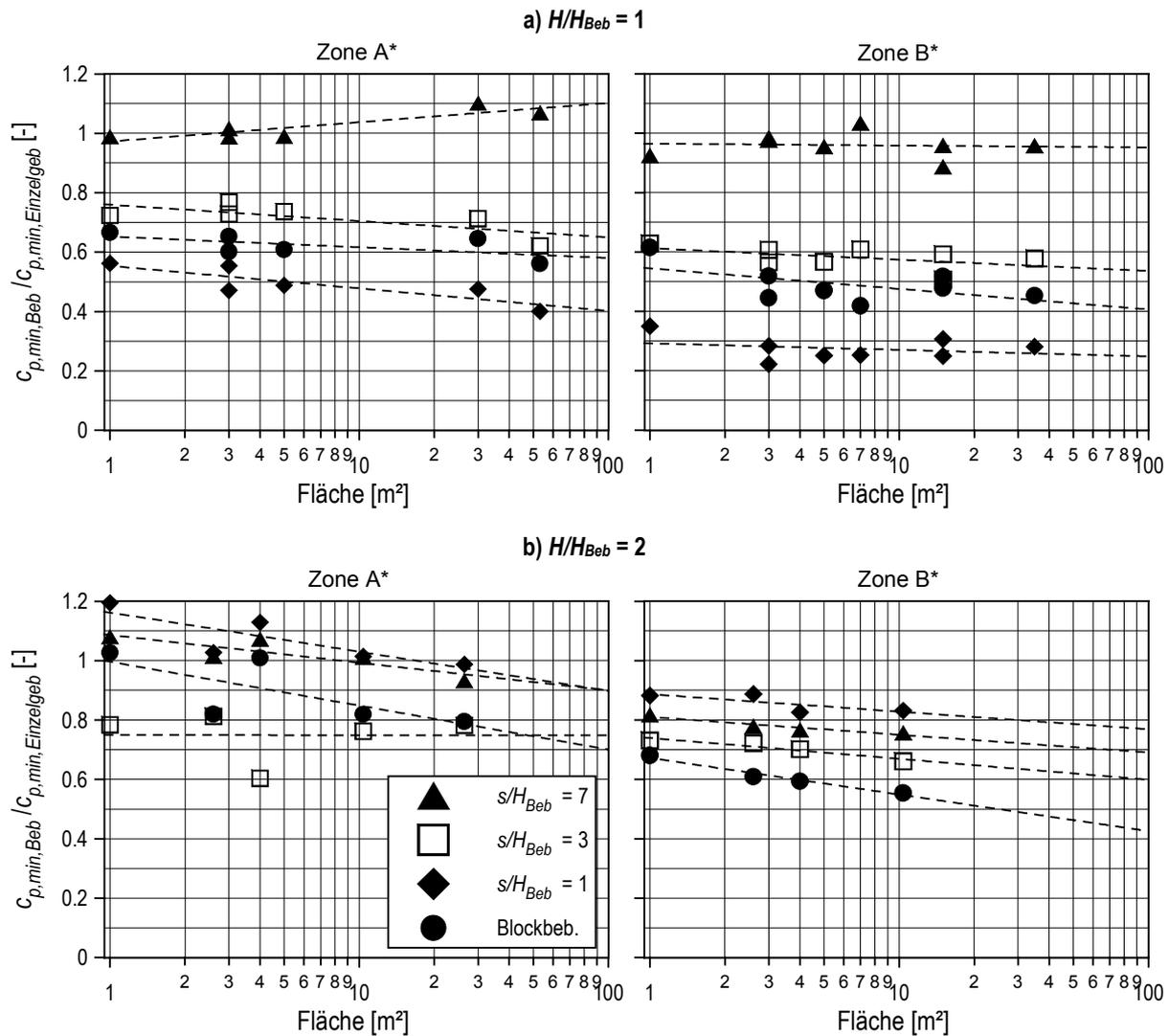


Abb. 5.19 Abhängigkeit der $c_{p,min}$ -Werte von der Flächengröße für Lastzonen A* und B* an Seitenwänden

Mit Ausnahme eines leichten Anstiegs der Kurve für Zone A*, $H/H_{Beb} = 1$, $s/H_{Beb} = 7$ (Abb. 5.19a) wurde für alle in Abb. 5.19 dargestellten Lastzonen und Bebauungsstrukturen ein konstanter oder abfallender Verlauf der Werte $c_{p,min,Beb}/c_{p,min,Einzelgeb}$ über die Teilflächengröße ermittelt. Die Werte für eine Flächengröße von 1 m² spiegeln die bereits im vorangegangenen Abschnitt erläuterten Ergebnisse für die kleinflächigen lokalen Lasten wieder. Am Gebäude P2 in Abb. 5.19b übersteigt in der Reihenbebauung $s/H_{Beb} = 1$ der lokale Sogwerte für 1 m² den Wert am Einzelgebäude um ca. 20 %. Mit zunehmender Fläche geht die Überschreitung jedoch rasch zurück und erreicht bei 10 m² den Wert des Einzelgebäudes. Der Anstieg der Kurve für Zone A*, $H/H_{Beb} = 1$, $s/H_{Beb} = 7$ in Abb. 5.19b ist gering. Für eine Fläche von 10 m² beträgt die Abweichung ca. 4 %. Für größere Flächen ist nach ENV 1991-2-4 keine weitere Abminderung mehr vorgesehen.

In Abb. 5.20 sind der gewählten Darstellungsweise entsprechend die $c_{p,max}$ -Werte für Zone D enthalten. Es wird deutlich, daß für den Fall $H/H_{Beb} = 1$ im Vergleich zum Einzelgebäude vor allem bei dichter Bebauung ($s = 1H_{Beb}$) eine größere Abnahme der Werte mit der Fläche vorzufinden ist. Für $H/H_{Beb} = 2$ wurden Kurven ermittelt, die einen geringen Anstieg des

Verhältnisses $c_{p,max,Beb}/c_{p,max,Einzelgeb.}$ anzeigen. Jedoch auch hier ist keine signifikante Änderung im Vergleich zum Einzelgebäude festzustellen.

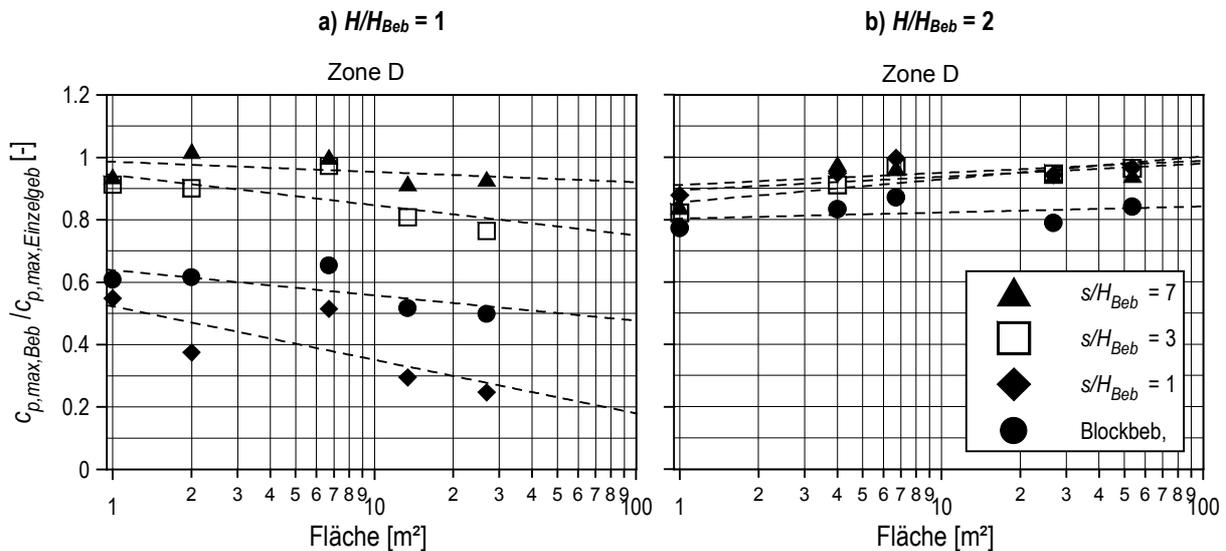


Abb. 5.20 Abhängigkeit der $c_{p,max}$ -Werte von der Flächengröße für Lastzonen D an Seitenwänden

Für die Zonen F, G und H an Flachdächern sind die Ergebnisse für Teilflächen unterschiedlicher Größe in Abb. 5.21 gegeben. Ein geringfügiger Anstieg der Werte innerhalb der Bebauung im Vergleich zum Einzelgebäude ist ähnlich wie bei der Lastzone A* nur innerhalb der Zone F für das P1-Gebäude ($H/H_{Beb} = 1$) beim Gebäudeabstand $s/H_{Beb} = 7$ erkennbar. Eine deutlich stärkere Abnahme der Werte bei zunehmender Fläche tritt vor allem bei Zone H auf.

Die Abhängigkeit der Druckmaxima $c_{p,max}$ von der Größe der betrachteten Teilfläche ist in Abb. 5.22 dargestellt. Anhand der Darstellung in Abb. 5.18 wird deutlich, daß die Positionen der höchsten $c_{p,max}$ -Werte auf der Dachfläche am Einzelgebäude und in Bebauung völlig verschieden sind. Bei der Betrachtung der Flächenabhängigkeit wird daher unterschieden zwischen dem Bereich am vorderen Rand der Dachfläche und dem restlichen Teil der Dachfläche.

Für die Reihenbebauung konnte in Abb. 5.18 festgestellt werden, daß der Gebäudeabstand nur geringen Einfluß auf die Ergebnisse hat. Bei der Darstellung $c_{p,max}$ -Werte auf der Dachfläche als Funktion der Größe der betrachteten Teilfläche in Abb. 5.22 sind daher nur die Werte für die Reihenbebauung $s/H_{Beb} = 3$ enthalten.

Am niedrigen Meßgebäude ($H/H_{Beb} = 1$, Abb. 5.22a) zeigt sich, abgesehen von der Blockbebauung, daß das Verhältnis $c_{p,max,Beb}/c_{p,max,Einzelgeb.}$ nahezu konstant verläuft. Der Anstieg bei der Blockrandbebauung ist darauf zurückzuführen, daß an einem Meßpunkt ein einzelner lokal erhöhter Wert ermittelt wurde und bei der Integration über die Fläche eingeht. Die Werte am Einzelgebäude nehmen, ohne daß dies in der ENV 1991-1-2 (1994) berücksichtigt wird, bei zunehmender Fläche sehr stark ab (siehe Abb. 4.20). Dies führt zu dem in Abb. 5.22a wiedergegebenen Verlauf für diese Bauungsart.

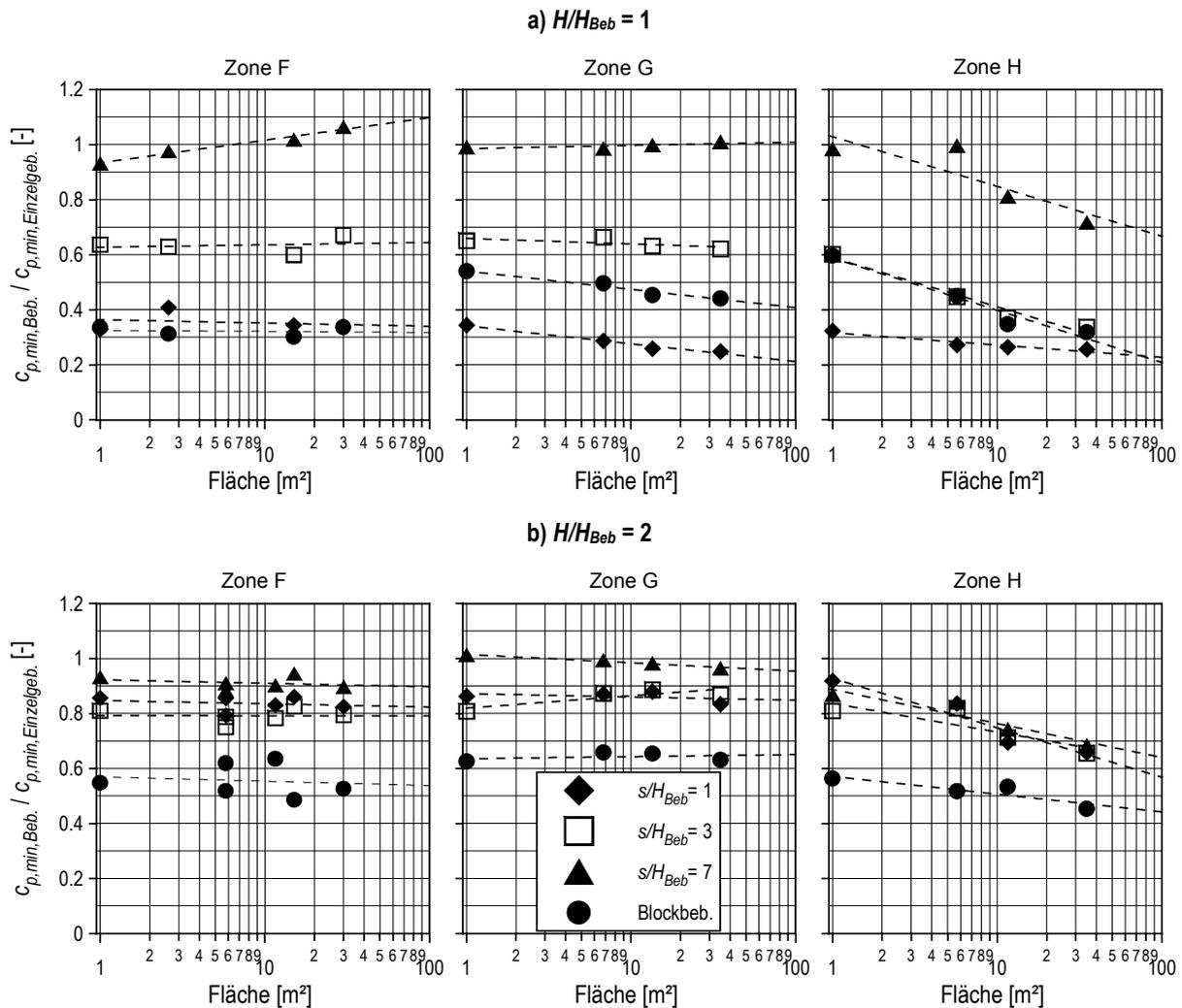


Abb. 5.21 Abhängigkeit der $c_{p,min}$ -Werte von der Flächengröße für Lastzonen F, G und H an Flachdächern

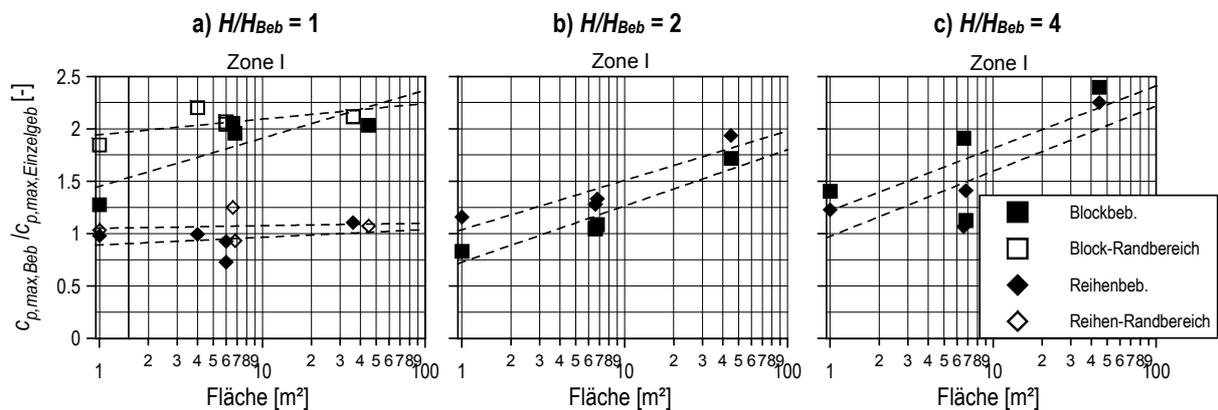


Abb. 5.22 Abhängigkeit der $c_{p,max}$ -Werte von der Flächengröße für Lastzonen I an Flachdächern

An den beiden höheren Maßgebäuden ($H/H_{Beb} = 2$ und 4 , Abb. 5.22b und c) stellt sich ein Anstieg des Verhältnisses $c_{p,max,Beob}/c_{p,max, Einzelgeb.}$ ein. Hierzu muß angemerkt werden, daß die $c_{p,max}$ -Werte an den Dachflächen der Einzelgebäude sehr rasch mit der Fläche abnehmen und

gegen Null gehen (siehe Abb. 4.20). Somit wird das Verhältnis $c_{p,max,Beb}/c_{p,max,Einzelgeb.}$ durch sehr kleine Zahlen im Nenner gebildet. Eine signifikante Abweichung der Abhängigkeit zwischen den $c_{p,max}$ -Werten und der Größe der betrachteten Teilfläche vom Referenzfall des Einzelgebäudes ist für die Druckmaxima am Dach nicht zu erwarten.

Insgesamt betrachtet ist für alle Lastzonen sowohl an den Seitenwänden, als auch an den Dachflächen, festzustellen, daß für die bebauten Gebiete zwischen lokalem Spitzendruckbeiwert und Größe der betrachteten Teilfläche ein ähnlicher Zusammenhang besteht, wie er auch durch die Bestimmungen der ENV-1991-2-4 beschrieben wird. In den meisten Fällen ist eher eine etwas größere Abnahme der Spitzenwerte bei zunehmender Fläche festzustellen, so daß die Verwendung des in der ENV-1991-2-4 gegebenen Verhältnisses von $c_{p,10m^2}/c_{p,1m^2}$ auch für bebauten Gebiete zu einer sicheren Bemessung für Teilflächen unterschiedlicher Größe führen würde.

Aufgrund unterschiedlicher Belegungen der 15 zur Verfügung stehenden Kanäle und Druckaufnehmer bei der Aufnahme der Zeitreihen in der Industriebebauung konnten für diese Bauungsart keine entsprechenden Werte für unterschiedliche Einflußflächen berechnet werden. Aufgrund der eindeutigen Tendenz der Werte bei unterschiedlichen Flächengrößen sowie den bisher festgestellten Gemeinsamkeiten der Bauungsstrukturen kann jedoch anhand der aufgezeigten Beziehungen zwischen Lastbeiwert und Flächengröße die o. g. Schlußfolgerung für alle Bauungsstrukturen verallgemeinert werden.

5.4 Einfluß der Umgebungsbebauung auf das Windfeld

Begleitend zu den Druckmessungen wurden Profile der mittleren Geschwindigkeit und der Turbulenzintensität am Standort der Testgebäude innerhalb der verschiedenen Bauungsstrukturen ermittelt. Generell wurden die Druckbeiwerte der vorangegangenen Abschnitte mit dem Staudruck in der ungestörten Anströmung in Dachhöhe der Meßgebäude normiert (siehe Abschnitt 3.5). Hierdurch äußern sich die Änderungen der Belastung durch die umgebende Bebauung durch Änderung der Lastbeiwerte c .

Anhand der Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen läßt sich überprüfen, ob durch die Wahl einer anderen Bezugsgeschwindigkeit die Veränderung der Lasten infolge der Bebauung beschrieben werden kann und somit die Druckbeiwerte, welche am Einzelgebäude ermittelt wurden, auch für Gebäude in bebauter Umgebung verwendet werden können.

5.4.1 Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden nur Fälle betrachtet, bei denen die untersuchten Gebäude innerhalb des bebauten Gebietes stehen. Gebäudepositionen am Rand des bebauten Gebietes wurden nicht betrachtet. Um bei den hohen Meßgebäuden zu gewährleisten, daß sich das Gebäude möglichst komplett innerhalb der sich ausbildenden internen Grenzschicht befindet, wurden die vorgelagerten Bauungsmodelle in der Länge entsprechend gewählt. Die Ausbildung der internen Grenzschicht ist allerdings auch durch die begrenzte Höhe des

Windkanals beeinträchtigt. Anhand des nachfolgenden Abschnitts kann jedoch gezeigt werden, daß auch das hohe Meßgebäude Grenzschichten ausgesetzt wurde, die für bebaute Gebiete typisch sind.

Die nachfolgend dargestellten Vertikalprofile der Geschwindigkeit und der Turbulenzintensität wurden am Standort der Meßgebäude aufgenommen.

Die Bestimmung der Parameter des logarithmischen Geschwindigkeitsprofils (siehe Gl. 2.6) aus Meßdaten ist nicht einfach, da alle drei Kenngrößen – d_0 , u_* , z_0 – frei wählbar sind und in einem Schritt bestimmt werden müssen. Zudem muß bei Sprüngen in der Rauigkeit, wie sie in der Natur z. B. beim Übergang vom unbebauten Umland zum Stadtgebiet, bzw. im Windkanal am Rand des Stadtmodells zwangsläufig vorhanden sind, die Entwicklung bzw. Anpassung der Grenzschicht über die Höhe an die neue Rauigkeit bei der Bestimmung der Parameter in Betracht gezogen werden. Im bodennahen Bereich dominieren die lokalen Einflüsse einzelner Rauigkeitselemente, so daß empfohlen wird (z. B. WIERINGA (1991)) die Anpassung des logarithmischen Geschwindigkeitsprofils an die Meßdaten erst ab einer Höhe durchzuführen, die der 2.5fachen Höhe der Rauigkeitselemente entspricht. Im vorliegenden Fall würde dies jedoch dazu führen, daß nur noch ein Bereich von ca. $z = 40$ m bis ca. $z = 60$ m für die Bestimmung der Kenngrößen zur Verfügung stünde, da wiederum bei ca. $z = 60$ m die interne Grenzschichthöhe liegt und die Profile in der Bebauung allmählich in das Profil der ungestörten Anströmung übergehen.

BADDE (1994) stellte fest, daß für Rauigkeitsstrukturen ohne wesentliche Höhenvariabilität eine Anpassung des Geschwindigkeitsprofils auch bis zu einer Höhe von $z = 1.5H$ möglich ist. Dies wurde auch bei der Bestimmung der Grenzschichtparameter für die verschiedenen Bebauungsstrukturen festgestellt. Zur Abschätzung von d_0 als einem der freien Parameter wurde der Ansatz von THEURER (1993) verwendet:

Gl. 5.1

$$\frac{d_0}{H_{Beb}} = 1.67 \lambda_{ub} \quad \text{für } \lambda_{ub} < 0.6$$

Durch Auftragen der Geschwindigkeitsdaten über $\ln(z-d_0)$ können die Kenngrößen u_* , z_0 aus der Anpassung einer Geraden als Steigung und Achsenabschnitt bestimmt werden.

Die gemessenen Profile der zeitlich gemittelten Geschwindigkeit $\bar{u}(z)$ für alle untersuchten Bebauungsstrukturen sind in Abb. 5.23 enthalten. Die Werte wurden mit der Geschwindigkeit in 140 m Höhe (Naturmaßstab) normiert. Im Windkanal entspricht diese Höhe ungefähr der Höhe der gesamten Grenzschicht, wobei es sich, wie in Kapitel 3 erläutert wurde, um eine Teilmodellierung der atmosphärischen Grenzschicht handelt. Neben den Meßwerten wird jeweils auch der nach der o. g. Methode angepaßte Kurvenverlauf des logarithmischen Geschwindigkeitsgesetzes (Gl. 2.6) als Linie angezeigt. Die Parameter des logarithmischen Geschwindigkeitsprofils sind in Tab. 5.2 gegeben.

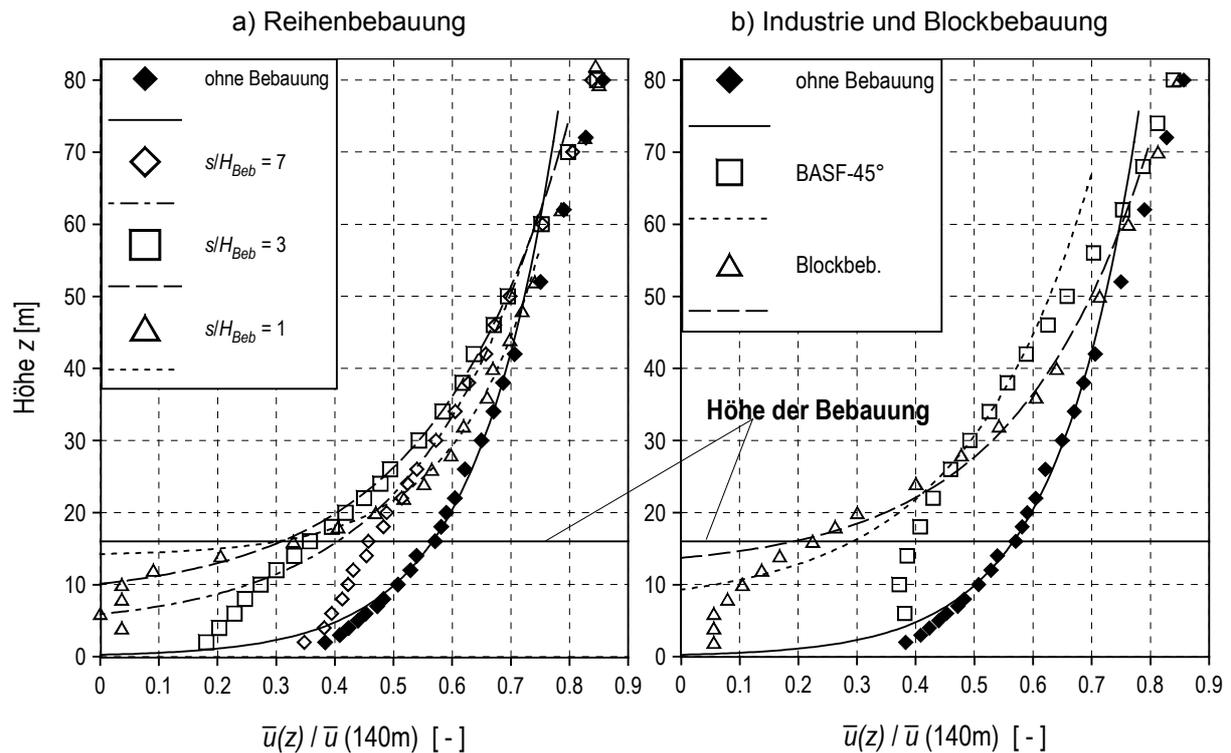


Abb. 5.23 Profile der mittleren Geschwindigkeit \bar{u} in den untersuchten Bebauungsstrukturen, Symbole stellen die Meßwerte dar, Linien entsprechen dem angepaßten Logarithmischen Profil

Tab. 5.2 Parameter des logarithmischen Geschwindigkeitsprofils der untersuchten bebauten Gebiete, Dimensionen im Naturmaßstab, u_{ref} (im Sinne der ENV 1991-2-4) = 28 m/s; $\bar{u}_{natur} / \bar{u}_{modell} = 3.54$

	Rauhigkeitshöhe z_0 [m]	Nullhöhenversatz d_0 [m]	Schubspannungsgeschwindigkeit u_* [m/s]
Ohne Bebauung	0.3	0	2.3
$s/H_{Beb} = 7$	1.9	4	3.7
$s/H_{Beb} = 3$	2.1	8	3.9
$s/H_{Beb} = 1$	0.3	14	2.5
BASF-45°	2.3	7	3.6
BASF-90°	2.6	8	4.6
Blockbebauung	1.7	12	3.8

In der Reihenbebauung (Abb. 5.23a) ist teilweise ein sehr unterschiedlicher Einfluß der Bebauung auf das Geschwindigkeitsprofil oberhalb und unterhalb der Bebauungshöhe erkennbar. Für eine Höhe größer ca. 80 m werden keine wesentlichen Unterschiede im Verlauf der Profile festgestellt. Für die dichteste Reihenbebauung ($s/H_{Beb} = 1$) folgt das

Geschwindigkeitsprofil von oben nach unten betrachtet relativ gleichmäßig dem Verlauf des Geschwindigkeitsprofils der ungestörten Anströmung. Erst für den Bereich $z < 1.5H_{Beb}$ erfolgt eine starke Abnahme der Geschwindigkeit. Während der Geschwindigkeitsverlauf der Reihenbebauung $s/H_{Beb} = 1$ für den Bereich oberhalb der bebauten Gebiete aufweist, erfolgt dann in einem engen Bereich von ca. $z = H_{Beb}$ bis $z = 1.5H_{Beb}$ ein rascher Übergang zu sehr niedrigen Geschwindigkeiten. Der Verlauf der Geschwindigkeit im Bereich unterhalb der bebauten Gebiete deutet auf die bereits in Abschnitt 2.5.2 und 5.1 erwähnte Ausbildung eines stationären Wirbels im Gebäudezwischenraum hin, wie er auch von KASTNER-KLEIN (1999) in engen Straßenschluchten beobachtet wurde. Die Geschwindigkeitsprofile der beiden anderen Reihenstrukturen zeigen einen etwas ausgeglicheneren Verlauf, wobei auch in größeren Höhen noch eine deutliche Reduktion der Geschwindigkeit im Vergleich zur ungestörten Anströmung vorzufinden ist. Hierbei wird die größte Reduktion im Bereich oberhalb der bebauten Gebiete für den Gebäudeabstand $s/H_{Beb} = 3$ erreicht.

Die Geschwindigkeitsprofile für die Industrie- und Blockrandbebauung (Abb. 5.23b) zeigen den Einfluß der Höhenvariabilität der Gebäude auf die Grenzschicht auf. Das Profil für die Industriebebauung wurde aus der Mittelung mehrerer Profilverläufe im Bereich der Modellebene über die Breite des Windkanals ermittelt. Es zeigt von allen Profilen die größte Reduktion der Geschwindigkeit oberhalb der bebauten Gebiete. Auch das Profil, für die Blockrandbebauung, welche hinsichtlich der bebauten Dichte und mittleren bebauten Höhe der Reihenstruktur $s/H_{Beb} = 1$ sehr ähnlich ist, weist aufgrund der variablen Höhe der Gebäude einen nachhaltigeren Einfluß der bebauten Gebiete auf den Verlauf des Geschwindigkeitsprofils oberhalb der bebauten Gebiete auf.

Insgesamt betrachtet, sind die Profile der mittleren Druckbeiwerte $c_{p,mean}$ entlang der Gebäudevorderseiten der beiden größeren Gebäude in Abb. 5.2 und Abb. 5.3 den entsprechenden Profilen der mittleren Geschwindigkeit in Abb. 5.23a in ihrem Verlauf sehr ähnlich. Die Unterschiede am Druckverlauf auf der Gebäuderückseite lassen sich anhand der Profile der Turbulenzintensität erklären.

In Abb. 5.24 sind die gemessenen Turbulenzintensitätsprofile der bebauten Gebiete dargestellt. Eingetragen wurde auch der Verlauf entsprechend Gl. 2.10 sowie für einen Wert basierend auf der Annahme, daß σ_u/u_* in bebauten Gebieten einen Wert von 1.7 annimmt (siehe Abschnitt 2.5.2). Insgesamt wird aus Abb. 5.24 deutlich, daß nur bei geringer Rauigkeitshöhe z_0 für einen Bereich geringer Höhe eine gewisse Übereinstimmung der Meßdaten mit den analytisch hergeleiteten Verlauf besteht. Die Ursache kann darin bestehen, daß die verwendete Einfach-Hitzdrahtsonde für Bereiche mit Turbulenzintensitäten $I_u > 30\%$ und dreidimensionaler Strömung, wie es in bebauten Gebieten in Bodennähe der Fall, keine zuverlässigen Ergebnisse mehr liefert (siehe z. B. BOTTEMA (1993)).

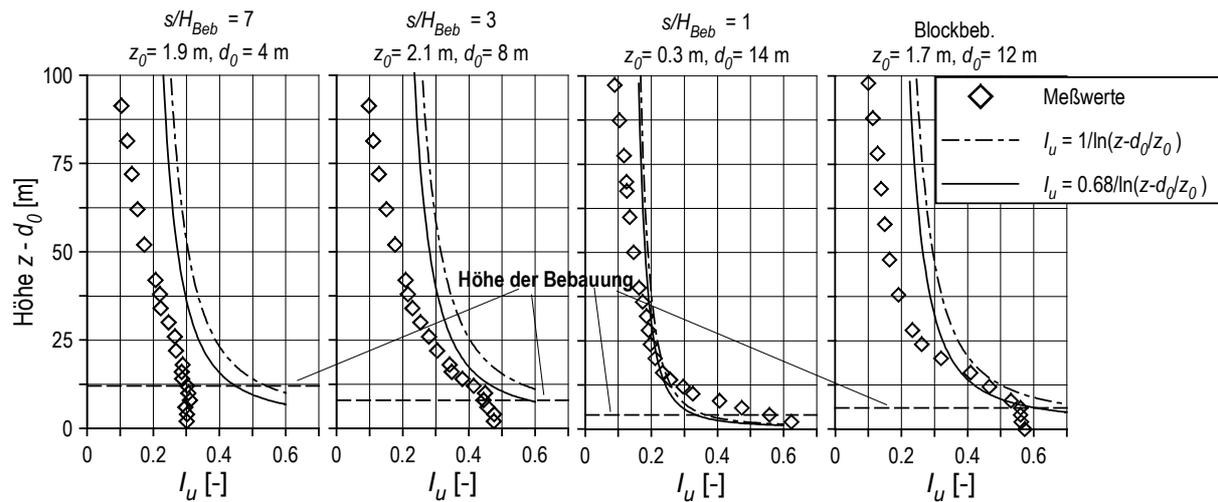


Abb. 5.24 Vertikalprofile der Turbulenzintensität I_u innerhalb der bebauten Gebiete

Die von KASTNER-KLEIN (1999) mit Hilfe von Laser-Doppler-Anemometrie ermittelten Daten in und über einer Straßenschlucht ergeben in Gebäudehöhe eine Turbulenzintensität I_u von ca. 70 % in Schluchtmittle, wenn man die Angaben entsprechend auf die Definition gemäß Gl. 2.8 umrechnet. Werte dieser Größenordnung werden durch Messung mit einer Einfach-Hitzdrahtsonde nicht erreicht.

Um die ermittelten Rauigkeitslängen z_0 mit Daten aus der Literatur zu vergleichen, sind diese in Abb. 5.25 mit den von THEURER (1993) zusammengestellten Werten enthalten. THEURER (1993) stellte folgenden Zusammenhang zwischen z_0 und der Frontflächenzahl λ_{ff} fest:

Gl. 5.2

$$\frac{z_0}{H - d_0} = 1.6\lambda_{ff} \quad \text{für } \lambda_{ff} < 0.25$$

In Abb. 5.25 ist diese Beziehung ebenfalls eingetragen. Es wird deutlich, daß die in der vorliegenden Studie ermittelten Rauigkeitslängen z_0 mit diesem Ansatz gut übereinstimmen. Dies liegt auch daran, daß bei der Bestimmung von d_0 die von THEURER (1993) vorgeschlagene Methodik angewendet wurde.

Aus Abb. 5.25 wird jedoch auch ersichtlich, daß die Abhängigkeit der Rauigkeitslänge z_0 von der Frontflächenzahl λ_{ff} in allen Bereichen der Strömungszustände einer hohen Streuung unterworfen ist. Mit Hilfe von Gl. 5.1 kann die Beziehung für z_0 in λ_{ub} als unabhängige Variable überführt werden, die Prognose von z_0 anhand Gl. 5.2 scheint insgesamt jedoch mit hohen Unsicherheiten verbunden zu sein. Die Änderung der Lastbeiwerte infolge der Bebauung wird daher mit den tatsächlich ermittelten Werten aus den Anströmprofilen in Abb. 5.23 verglichen.

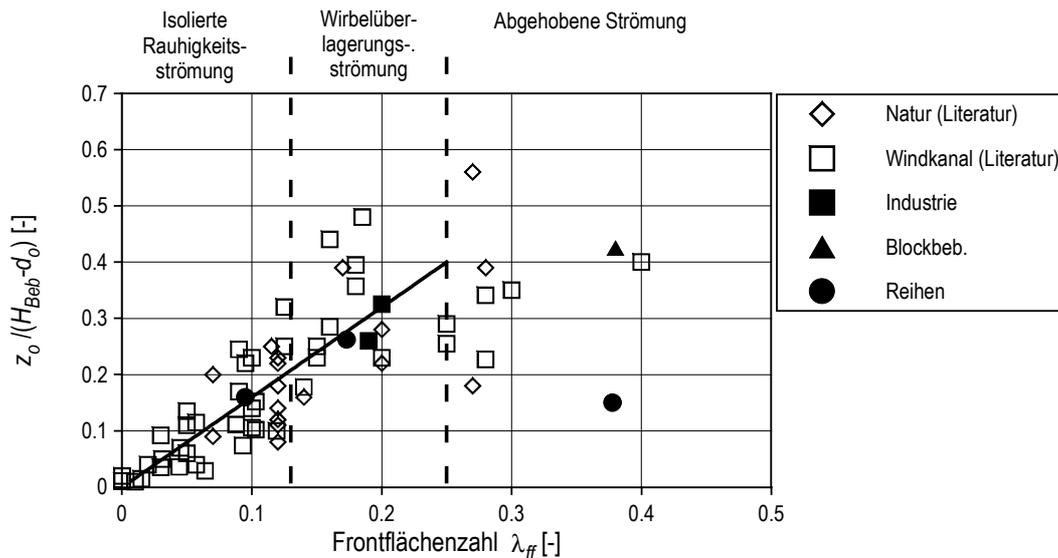


Abb. 5.25: Zusammenhang zwischen Frontflächenzahl λ_{ff} und Rauigkeitslänge z_0 nach THEURER (1993), ergänzt durch weitere Literaturdaten und eigene Windkanalmessungen

5.4.2 Vergleich der Ergebnisse aus Druck- und Geschwindigkeitsmessungen

Es muß darauf hingewiesen werden, daß die in Abb. 5.23 dargestellten Profile der mittleren Geschwindigkeit $\bar{u}(z)$ in longitudinaler Richtung mit einem Prandtlrohr ermittelt wurden. Dieses ist prinzipiell nur dazu in der Lage die Geschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung zu messen. Eine Anwendung sollte daher ausschließlich in Strömungsfeldern erfolgen, die auch eine dominierende Hauptrichtung aufweisen. Andernfalls können durch Anliegen eines dynamischen Drucks an der Meßöffnung des statischen Drucks die Ergebnisse verfälscht werden. Betrachtet man das Strömungsverhalten bei der Umströmung von Gebäuden oder das Strömungsgeschehen innerhalb der Straßenschluchten in bebauten Gebieten (siehe z. B. KASTNER-KLEIN (1999)) so ist festzustellen, daß es sich in Bodennähe im Bereich der "Urban Canopy Layer" (siehe Abb. 2.1) um hochgradig dreidimensionale Strömungsvorgänge handelt, die mit einem Prandtlrohr nicht mehr erfaßt werden können. Es erscheint daher sinnvoll, die Geschwindigkeit in Dachhöhe $\bar{u}(H)$ des niedrigen Gebäudes ($H = 16$ m) durch die Extrapolation des angepaßten logarithmischen Geschwindigkeitsprofils zu bestimmen. Die Anpassung der Geschwindigkeitsprofile nach dem logarithmischen Gesetz beruht auf den Geschwindigkeitsdaten im Bereich oberhalb der Bebauung, wo eindeutig die Strömung in longitudinaler Richtung dominiert. Mit Hilfe der Parameter in Tab. 5.2 kann die Geschwindigkeit $\bar{u}(H)$ der angepaßten Profile berechnet werden.

Die Bezugsgeschwindigkeit geht bei der Bestimmung der dimensionslosen Druckbeiwerte c_p im Quadrat ein. Der Kehrwert des Verhältnisses $(\bar{u}_{mitBeb.}(H)/\bar{u}_{ohneBeb.}(H))^2$ würde einem Anpassungsfaktor entsprechen, mit dessen Hilfe die ermittelten Druck- und Kraftbeiwerte anstatt auf die Geschwindigkeit der ungestörten Anströmung auf die in der Bebauung ermittelten Geschwindigkeit bezogen werden können. Die ermittelten Werte für dieses Verhältnis sind in Tab. 5.3 enthalten.

Tab. 5.3 Verhältnis der Geschwindigkeiten in Bebauung und der ungestörten Anströmung $(\bar{u}_{mitBeb.}(H)/\bar{u}_{ohneBeb.}(H))^2$

	$H/H_{Beb} = 1$	$H/H_{Beb} = 2$	$H/H_{Beb} = 4$
$s/H_{Beb} = 7$	0.56	0.86	1.07
$s/H_{Beb} = 3$	0.33	0.78	1.08
$s/H_{Beb} = 1$	0.27	0.91	1.08
BASF45°	0.29	0.64	0.88
Block	0.13	0.76	1.11

Um den Zusammenhang der Druck- und Kraftbeiwerte aus den Versuchen mit Bebauung und den Daten am Einzelgebäuden auch durch einen einzelnen Faktor zu beschreiben, wurde für jede Bebauungsart eine Regressionsgerade durch den Ursprung an die gegeneinander aufgetragenen Werte für eine gesamte Gebäudefläche angepaßt:

Gl. 5.3

$$c_{p,mit\,Beb} = a \cdot c_{p,Einzelgeb.}$$

In Tab. 5.4 ist die Steigung a der Regressionsgeraden durch den Ursprung sowie der Korrelationskoeffizient r zwischen den Werten am Einzelgebäude und den Werten für die bebauten Gebiete beispielhaft für die windzugewandten Wandflächen enthalten.

Tab. 5.4 Regressionskoeffizient a und Korrelationskoeffizient r der $c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ -Werte an der Luvseite zwischen dem Einzelgebäude und dem selben Gebäude in bebautem Gebiet

Bebauungs- struktur	$H/H_{Beb} = 1$				$H/H_{Beb} = 2$				$H/H_{Beb} = 4$			
	$c_{p,mean}$		$c_{p,rms}$		$c_{p,mean}$		$c_{p,rms}$		$c_{p,mean}$		$c_{p,rms}$	
	a	r	a	r	a	r	a	r	a	r	a	r
$s/H_{Beb} = 7$	0.52	0.83	0.97	0.92	0.63	0.99	1.00	0.95	0.79	0.97	1.05	0.97
$s/H_{Beb} = 3$	0.20	0.80	0.85	0.83	0.54	0.93	0.95	0.91	0.77	0.95	1.06	0.96
$s/H_{Beb} = 1$	-0.02	-0.24	0.53	0.45	0.67	0.87	0.88	0.93	0.83	0.96	0.95	0.95
BASF45°	-0.05	0.17	0.43	0.45	0.24	0.57	0.70	0.61	0.66	0.85	0.84	0.88
Block	0.00	0.24	0.57	0.67	0.49	0.82	0.71	0.81	0.78	0.96	0.93	0.94

Anhand von Tab. 5.4 wird jedoch auch deutlich, daß ein pauschaler Faktor a , ermittelt durch lineare Regression zwischen den Daten mit und ohne Umgebungsbebauung, nur bedingt dazu geeignet ist, die durch die Bebauung hervorgerufenen Laständerungen zu beschreiben. Vor allem an niedrigen Gebäude ($H = 16$ m) werden für die Reihenbebauung $s/H_{Beb} = 1$, das Industriegebiet und die Blockrandbebauung betragsmäßig sehr kleine

Korrelationskoeffizienten r erreicht. Dies bedeutet, daß die einfache Beziehung nach Gl. 5.3 die Änderung der Druckbeiwerte nicht beschreiben kann. Die Ursache hierfür ist die Änderung der räumlichen Verteilung der Beiwerte (siehe Abb. 5.4), es kann daher kein signifikanter Zusammenhang zwischen den Daten des Einzelgebäudes und den Daten in der Bebauung ermittelt werden.

Um die Ergebnisse aus den Druck- und Geschwindigkeitsmessungen zu vergleichen, kann das Verhältnis der Geschwindigkeiten aus Tab. 5.3 zu den aus den Druckmessungen ermittelten Regressionskoeffizienten a in Bezug gesetzt werden. Für die globalen Widerstandsbeiwerte C_D sowie die $c_{p,mean}$ -Werte an der Luvseitenwand und an der Dachfläche ist dieser Vergleich in Tab. 5.5 enthalten.

Tab. 5.5 Verhältnis des Geschwindigkeitsfaktors zum Faktor a der Druckmessungen
 $(\bar{u}_{mitBeb.}(H)/\bar{u}_{ohneBeb.}(H))^2/a$

	$H/H_{Beb} = 1$			$H/H_{Beb} = 2$			$H/H_{Beb} = 4$		
	Global	Luv- wand	Dach- fläche	Global	Luv- wand	Dach- fläche	Global	Luv- wand	Dach- fläche
	C_D	$c_{p,mean}$	$c_{p,mean}$	C_D	$c_{p,mean}$	$c_{p,mean}$	C_D	$c_{p,mean}$	$c_{p,mean}$
$s/H_{Beb} = 7$	0.69	1.07	0.64	1.30	1.36	1.21	1.41	1.36	1.63
$s/H_{Beb} = 3$	0.83	1.63	0.93	1.48	1.45	1.09	1.44	1.40	1.35
$s/H_{Beb} = 1$	1.49	-13.45	1.58	1.46	1.36	1.15	1.34	1.30	1.34
BASF45°	1.52	-5.77	0.85	2.00	2.66	1.36	1.11	1.33	1.16
Block	0.74	12.64	0.79	1.69	1.55	1.81	1.52	1.42	1.48

Die Angaben in Tab. 5.5 bedeuten, daß bei einem Wert > 1 die Lasten durch die Geschwindigkeitsanpassung zu hoch bzw. für Werte < 1 zu klein abgeschätzt würden. Die grau unterlegten Felder kennzeichnen Fälle, bei denen a nahezu den Wert Null annimmt und somit durch sehr kleine Zahlen dividiert wird. Insgesamt wird deutlich, daß nur in wenigen Fällen ein Wert der Größenordnung 1 erreicht wird. Es treten zum Teil erhebliche Unterschätzungen der Lasten, vor allem für die Dachfläche und die globale Last des niedrigen Gebäudes, aber auch enorme Überschätzungen auf. Die Laständerungen können daher nur bedingt auf die Änderung der mittleren Anströmgeschwindigkeit in Dachhöhe zurückgeführt werden. Als Ursache hierfür können die komplexen dreidimensionalen Strömungsvorgänge innerhalb der Bebauung angesehen werden. So wird beispielsweise durch eine erhöhte Turbulenzintensität der Sog auf der Gebäuderückseite und somit auch die globale Last vermindert, ohne daß sich dies auf die zeitlich gemittelte Geschwindigkeit in Dachhöhe auswirkt. Auch wird der Verlauf des Geschwindigkeitsprofils zwischen Bebauungshöhe und Bodenoberfläche nicht durch die Bezugsgeschwindigkeit in Dachhöhe erfaßt. Diese sind jedoch wesentlich für die Lasten für den Fall des niedrigen Gebäudes $H/H_{Beb} = 1$. Zudem kann auch die Strömung durch Kanalisierungswirkung innerhalb der Straßenschluchten beschleunigt werden, ohne daß sich dies in der Geschwindigkeit oberhalb der Dachhöhe

niederschlägt. Letztlich haben auch die Ergebnisse an den unterschiedlichen Meßstandorten in der Industriebebauung das hohe Maß an Variabilität der zu erwartenden Windlasten in bebauter Umgebung deutlich gemacht. Diese Variabilität sollte auch bei der Bestimmung der Bemessungsvorgaben berücksichtigt werden.

In Tab. 5.5 sind nur beispielhaft einige Werte zum Vergleich enthalten. Es wurde jedoch auch für andere Teilflächen oder die extremen lokalen Druckbeiwerte keine bessere Übereinstimmung mit der Geschwindigkeitsänderung erreicht. Auch unter Verwendung der Böengeschwindigkeit ermittelt anhand der gemessenen Turbulenzintensität und des Böenfaktors G konnte keine Verbesserung erreicht werden. Zur Berücksichtigung des Bebauungseinflusses in den Bemessungsvorschriften wird daher die im nachfolgenden Abschnitt beschriebene Methodik basierend auf der Zuverlässigkeitstheorie verwendet.

5.5 Variabilität der Windlasten in bebauten Gebieten und Schlußfolgerungen

Insgesamt ist festzustellen, daß aufgrund der enormen Vielfalt möglicher Baukonstellationen es nahezu unmöglich ist, die Windlasten auf ein Gebäude mit umgebender Bebauung mit Hilfe verallgemeinerter Ansätze aus systematischen Windkanalversuchen exakt prognostizieren zu können. Dies haben die Ergebnisse in der Industriebebauung (Bebauungstyp II), welche der Realität entsprechende von Gebäude zu Gebäude unterschiedliche Bauwerksabmessungen und Gebäudeabstände aufweist, eindeutig gezeigt. Zusammenhänge zwischen dem dimensionslosen Gebäudeabstand s/H_{Beb} oder der Gebäudehöhe H/H_{Beb} und den Lastbeiwerten bestehen zweifelsfrei, jedoch wird diese Abhängigkeit bei Bebauungsstrukturen mit variablen Gebäudegeometrien durch eine enorme Variabilität der Lasten überlagert. Diese beruht im wesentlichen auf der Bebauungssituation im unmittelbaren Nahfeld des Gebäudes. Da in der Realität anzutreffende Bebauungsstrukturen meistens eher dem untersuchten Typ II entsprechen, erscheint es für die Berücksichtigung der Bebauungssituation bei der Bemessung nicht sinnvoll diese z. B. als Funktion von s/H_{Beb} oder $\lambda_{üib}$ entsprechend der Vorgehensweise von HUSSAIN und LEE (1980) zu erfassen.

Der ausgewählte Bebauungstyp II (Abschnitt 2.5.3) steht für eine Vielzahl ähnlicher Bebauungsstrukturen mit variablen Gebäudegeometrien. Die durchgeführten Untersuchungen im Bebauungstyp II für unterschiedliche Situationen im Nahfeld des Gebäudes (12 Situationen) liefern daher eine ausreichende Datenbasis die zu erwartende Variabilität der auftretenden Lastbeiwerte in Form des Mittelwertes und der Standardabweichung zu erfassen. Dies legt daher den Schluß nahe, bei der weitergehenden Betrachtung eher ein stochastisches Konzept zu verfolgen, welches die Variabilität der Lasten aufgrund der Bebauungssituation mit einbezieht. Ein entsprechendes Verfahren, welches dies anhand von statistischen Merkmalen berücksichtigt, wurde in Form der Methode der zweiten Momente (SMR) in Abschnitt 2.6 vorgestellt. Anhand der im vorliegenden Abschnitt dargestellten Datenbasis für globale und lokale Windlasten in bebauten Gebieten wurden die Eingangsgrößen – Mittelwert

und Variationskoeffizient der Lastbeiwerte - für die SMR-Methode bestimmt. Hierzu wurden für die lokalen Druckbeiwerte für jeden Meßpunkt der Mittelwert und die Standardabweichung über alle Versuchskonstellationen in der Industriebebauung berechnet. Für die einzelnen Lastzonen der ENV-1991-2-4 (1994) sind in Tab. 5.6 der Mittelwert $\overline{c_p}$ und die Standardabweichung σ_{cp} wiedergegeben, die für die jeweilige Zone zu den höchsten Lastbeiwerten nach der SMR-Methode führen.

Tab. 5.6 Mittelwert $\overline{c_p}$ und Standardabweichung σ_{cp} aus den Untersuchungen im Industriegebiet, Maxima bzw. Minima für die jeweilige Teilfläche

Fläche	Druckbeiwert	Lastzone	$H/H_{Beb} = 1$		$H/H_{Beb} = 2$		$H/H_{Beb} = 4$	
			$\overline{c_p}$	σ_{cp}	$\overline{c_p}$	σ_{cp}	$\overline{c_p}$	σ_{cp}
Wand	$c_{p,min,1m^2}$	A	-1.32	0.39	-2.05	0.32	-2.01	0.27
		A*	-1.42	0.32	-1.81	0.29	-2.21	0.32
		B	-0.98	0.38	-1.09	0.28	-2.30	0.28
		B*	-0.96	0.42	-1.18	0.28	-1.68	0.13
		C	-0.61	0.22	-1.01	0.18	-1.50	0.21
	$c_{p,max,1m^2}$	D	1.21	0.58	1.76	0.31	0.86	0.40
Dach	$c_{p,min,1m^2}$	F	-2.60	0.47	-3.05	0.38	-3.62	0.16
		G	-1.99	0.48	-2.46	0.21	-2.61	0.22
		H	-1.15	0.42	-1.92	0.27	-2.14	0.13
	$c_{p,max,1m^2}$	I	0.34	0.26	0.22	0.11	0.39	0.10

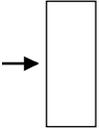
Die Werte in Tab. 5.6 geben die bisher aufgezeigte Charakteristik der ermittelten Lasten wieder. Während am niedrigen Gebäude die Mittelwerte betragsmäßig klein sind und die Streuung entsprechend groß ist, werden am hohen Gebäude die Mittelwerte größer und die Standardabweichungen geringer.

In Kapitel 7 werden neben den in Tab. 5.6 enthaltenen Ergebnissen für einzelne Meßpunkte hoher Belastung auch die Ergebnisse der anderen Meßpunkte betrachtet, um aus dem Gesamtbild die Änderung der zu erwartenden Windlasten infolge der Bebauung beurteilen zu können. In Abschnitt 4 wurde bereits darauf hingewiesen, daß die an den untersuchten Meßpunkten ermittelten Extrema nicht notwendigerweise als absolut obere Schranken angesehen werden sollten. Es ist denkbar, daß z. B. andere Gebäudegeometrien noch höhere Lasten hervorbringen. Es wird daher in erster Linie das ermittelte Verhältnis zwischen den

Lasten am Einzelgebäude und in der Bebauung für die Beurteilung und Bewertung herangezogen.

Entsprechend der Vorgehensweise für die lokalen Druckbeiwerte wurden auch die Mittelwerte und Standardabweichungen für den Widerstandsbeiwert C_D ermittelt. Diese sind in Tab. 5.7 wiedergegeben. Hierbei ist jedoch festzustellen, daß die Mittelwerte für die niedrigen Gebäude teilweise nahe bei null liegen. Dies bedeutet, daß die Variationskoeffizienten, welche in die SMR-Methode eingehen, sehr hoch sind und nicht mehr die tatsächlich vorhandene Variabilität repräsentieren. Hierauf wird in Kapitel 7 noch näher eingegangen.

Tab. 5.7 Mittelwert $\overline{c_D}$ und Standardabweichung σ_{CD} aus den Untersuchungen im Industriegebiet

Windrichtung	H/H_{Beb}	$\overline{C_D}$	σ_{CD}
90° 	1	0.19	0.14
	2	0.32	0.16
	4	0.79	0.06
0° 	1	0.06	0.11
	2	0.35	0.18
	4	0.53	0.11

Die gewählte Vorgehensweise, welche die Streubreite der ermittelten Lasten in der Bebauung berücksichtigt, besitzt noch einen weiteren Vorteil im Hinblick auf die Berücksichtigung der Situation im unmittelbaren Nahfeld des Gebäudes. Entscheidend ist nämlich auch, daß sich diese Situation im unmittelbaren Nahfeld des Bauwerks während der ‘‘Lebensdauer‘‘ eines Gebäudes durch Baumaßnahmen stark verändern kann und somit die anzusetzenden Lasten eine gewisse mögliche Bandbreite abdecken sollten.

Generell sollte noch einmal darauf hingewiesen werden, daß es aufgrund der hohen Variabilität der zu erwartenden Lasten in bebauten Gebieten mit Hilfe der vorliegenden Arbeit grundsätzlich nur möglich sein wird Bemessungswerte zu spezifizieren, die sich auf einem festgelegten Sicherheitsniveau bewegen. Falls die Kenntnis der exakten und nicht die Kenntnis der auf dem Sicherheitskonzept basierenden Windlasten, beispielsweise aus ökonomischen Gründen, von besonderem Interesse ist, wird auch weiterhin eine Einzeluntersuchung im Windkanal unter Einbeziehung der Umgebungsbebauung erforderlich sein. Hierbei muß dann allerdings sichergestellt sein, daß nicht durch eventuelle Änderungen

oder Abriß von Nachbargebäuden bei der Bemessung unberücksichtigte Lastsituationen entstehen können.

Neben den Lastbeiwerten gehen auch andere Kenngrößen in die Berechnung von Bemessungswerten mit Hilfe der SMR-Methode ein (siehe Abschnitt 2.6). Anhand der vorliegenden Ergebnisse kann außer der Variabilität der Lasten in bebauten Gebieten auch der Modellunsicherheitsfaktor μ anhand der vergleichenden Messungen in Modell und Natur bestimmt werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind das Thema des folgenden Abschnitts.

6 Ergebnisse der Naturmessungen und Vergleich mit Windkanaldaten

Die Messungen in Natur sind wesentlicher Bestandteil der durchgeführten experimentellen Untersuchungen und dienen dazu, zu überprüfen, ob mit Hilfe von Windkanalversuchen und der eingesetzten Meßtechnik winderzeugte Bauwerklasten auf Gebäude in einer komplexen Umgebung erfaßt werden können. Die Ergebnisse der Naturmessungen an den beiden Hauptgebäuden des FZU-Komplexes werden nachfolgend mit den Daten aus den Windkanalversuchen am maßstäblich verkleinerten Modell verglichen. Insgesamt wurden in der Natur seit März 1998 die winderzeugten Drücke und die Windgeschwindigkeiten am Meßmast aufgezeichnet. Ab Januar 2000 stehen Daten der modifizierten Meßeinrichtung zur Verfügung, welche die Betrachtung der lokalen Lasten an der Dachecke des FZU-Gebäudes als Funktion unterschiedlich großer Teilflächen erlauben. Meßergebnisse bis einschließlich März 2001 wurden bei der nachfolgenden Auswertung berücksichtigt.

Insgesamt wurden in diesem Zeitraum ca. an 900 Stunden während windreicher Tage Daten aufgezeichnet. In Abb. 6.1 ist beispielhaft der Verlauf der Windgeschwindigkeit für den Zeitraum Januar 2000 bis März 2001 dargestellt. Aus diesem Zeitraum entstammen die Meßergebnisse für die unterschiedlichen Teilflächenlasten am Flachdach.

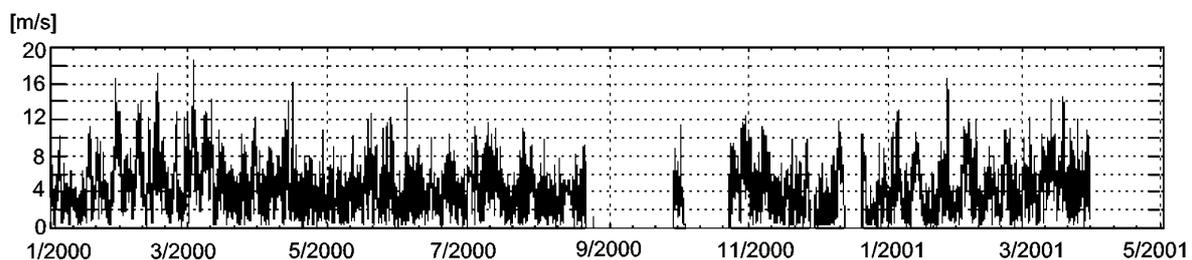


Abb. 6.1 Windgeschwindigkeiten Januar/2000 bis März/2001 (Meßstation Physik-Hochhaus Universität Karlsruhe)

Anhand des Verlaufes der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung kann die Stationarität der Naturmeßreihen beurteilt werden, welche eine der Grundvoraussetzungen für einen Vergleich mit Windkanalergebnissen ist. Die Modellversuche werden im Hinblick auf Windrichtungsänderungen und Schwankungen der mittleren Geschwindigkeit unter extrem stationären bzw. kontrollierbaren Bedingungen durchgeführt. In Natur wurden die Zeitreihen während eines Windereignisses kontinuierlich aufgezeichnet. Aus diesen Aufzeichnungen wurden dann Zeitabschnitte selektiert, welche aufgrund ihrer Stationarität mit den Windkanalergebnissen vergleichbar sind. Diese Zeitabschnitte werden nachfolgend als Meßreihen bezeichnet.

Für die Auswahl der Daten einer Meßreihe wurden folgende Kriterien festgelegt:

- Windgeschwindigkeit am Physik-Hochhaus > 10 m/s (5 bzw. 10 min Mittelwert)

- maximale Abweichung der Windgeschwindigkeit (5min Mittel): $\pm 5\%$
- Maximale Abweichung der Windrichtung (5min Mittel) $\pm 5^\circ$
- Mindestdauer der verhältnismäßig stationären Zustände: 60 min

Die Abweichungen sind als Abweichung des 5 min Mittelwertes vom Gesamtmittelwert des betrachteten Zeitabschnittes zu verstehen. Die Kriterien für die Stationarität wurden einerseits möglichst eng festgelegt, um gute Vergleichsdaten zu den Windkanalergebnissen zu erhalten, andererseits mußten jedoch auch Kompromisse eingegangen werden, um eine noch ausreichende Datenmenge für den Vergleich zur Verfügung zu haben. Beispielsweise bedeutet die zugelassene Schwankungsbreite von 5% hinsichtlich der Geschwindigkeit, daß aufgrund des quadratischen Zusammenhangs zum Staudruck bei der Normierung in manchen Abschnitten der Meßreihe ein 10 % zu niedriger bzw. zu hoher Staudruck zugrunde gelegt wird. In Abb. 6.2 ist beispielhaft die Selektion von 2 Meßreihen dargestellt.

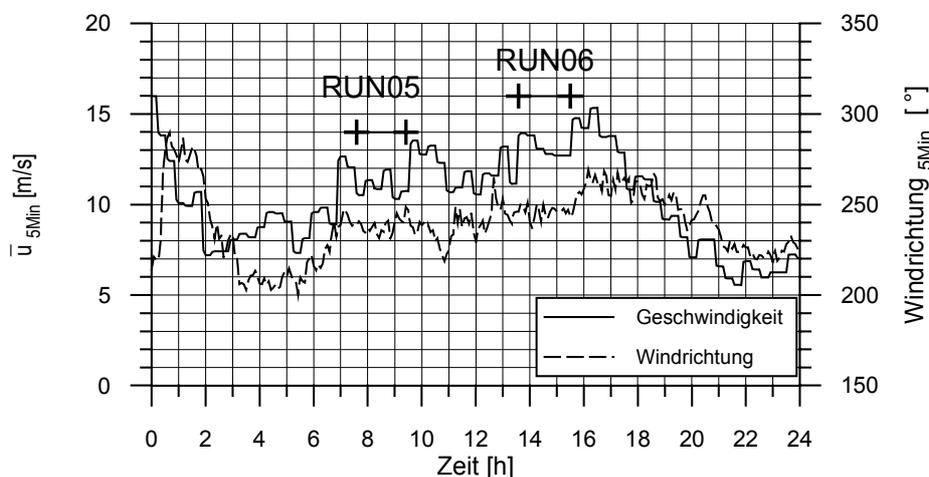


Abb. 6.2 Selektion der Meßreihen

Insgesamt wurden aus den aufgezeichneten Daten ca. 70 Meßreihen selektiert, welche die o. g. Kriterien erfüllen. Die Gesamtdauer dieser Meßreihen beträgt ca. 90 Stunden.

6.1 Windfeld am Meßstandort

Die Simulation winderzeugter Bauwerkslasten erfordert eine korrekte Wiedergabe des maßstäblich verkleinerten Strömungsfeldes im Windkanal. Die hierbei einzuhaltenden Anforderungen hinsichtlich der Ähnlichkeitskriterien wurden in Kapitel 2 ausführlich dargestellt. Nachfolgend sollen die Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen in Natur und Modell im Hinblick auf die Ähnlichkeit der beiden Strömungsfelder verglichen werden. Von besonderer Bedeutung für den Vergleich der Druckbeiwerte in Natur und Modell ist die Wahl einer geeigneten Bezugsgeschwindigkeit, welche für die Anströmung repräsentativ ist.

Die Geschwindigkeitsdaten der meteorologischen Meßstation auf dem Dach des Physik-Hochhauses sind aufgrund der Höhe des Meßstandortes sehr gut geeignet als Referenzgeschwindigkeit herangezogen zu werden. Der Anemometer der Station befindet sich

auf einem 10 m hohen Mast, welcher wiederum auf einem Technikaufbau auf dem Flachdach des Gebäudes montiert ist. Der Anemometer wird somit nicht durch die Umströmung des Gebäudes beeinflusst. Die Meßhöhe über Grund beträgt 71 m. Weitere Gebäude oder andere Hindernisse ähnlicher Höhe, welche die Messung lokal beeinflussen könnten, sind im näherem Umkreis um die Meßstation nicht vorhanden. Die räumliche Distanz von ca. 800 m ist bei der Betrachtung von Mittelwerten über Zeiträume länger als eine Stunde nicht mehr von Bedeutung. Die Geschwindigkeit am Physik-Hochhaus wurde mit dem Profilexponent $\alpha = 0.27$ auf die Geschwindigkeit in Dachhöhe der Meßgebäude umgerechnet. Dies entspricht der Vorgehensweise bei den Windkanalergebnissen, welche ebenfalls auf den Staudruck der Geländekategorie III (nach ENV 1991-2-4) bei ungestörtem Profilverlauf bezogen werden (siehe Abb. 3.14). Bei den Modellergebnissen wird allerdings der Umrechnung die Geschwindigkeit in Grenzschichthöhe, dies entspricht in Natur ca. 140 m, zugrunde gelegt. Aus Abb. 5.23 wird jedoch ersichtlich, daß sich die Geschwindigkeitsprofile im Windkanal bei einer Höhe von 71 m nur noch unwesentlich vom Profil der ungestörten Anströmung (mit $\alpha = 0.27$) unterscheiden. Es daher unerheblich, ob die Geschwindigkeit in Gebäudehöhe zur Normierung der Modellergebnisse anhand der Geschwindigkeit in 71 m oder 140 m Höhe berechnet wird.

In Abb. 6.3 ist die am oberen Punkt des Meßmastes am FZU-Gebäude gemessene mittlere Geschwindigkeit gegen die mittlere Geschwindigkeit am Physik-Gebäude für alle Meßreihen des 230° - und 220° -Windrichtungssektors aufgetragen. Die sich ergebenden Regressionsgeraden sind in die Abbildungen eingetragen. Diese wurden einerseits dazu verwendet, um die benötigte Referenzgeschwindigkeit in den Ausfallzeiten (September/Oktober 2000, siehe Abb. 6.1) der Meßstation Physik-Gebäude zu berechnen, andererseits ergeben sich aus dem Anstieg der Geraden dimensionslose Faktoren, welche zur Bestimmung des Geschwindigkeitsprofils (siehe Abb. 6.4) verwendet werden können.

Abb. 6.3 macht deutlich, daß die Geschwindigkeit an beiden Standorten in Natur in hohem Maße korreliert ist. Die Abweichungen von der Geraden sind in den meisten Fällen gering und werden nicht größer als 1 m/s. Für die beiden anderen Anemometer am FZU-Meßmast (hier nicht dargestellt) ergibt sich bei abnehmender Höhe eine größere Streuung der Meßdaten um die Regressionsgerade. Der Korrelationskoeffizient r nimmt von 0.96 auf 0.69 ab. Ursache hierfür dürfte der steigende Einfluß lokaler Effekte mit abnehmendem Abstand zum Boden hin sein.

Der Verlauf der Geschwindigkeit und der Turbulenzintensität über die Höhe ist sowohl für die Windkanalmessungen als auch für die Naturmessungen in Abb. 6.4 dargestellt. Die Profile der Windkanaldaten entstammen aus Messungen am Modell ohne und mit Vegetation, welche im Bereich vor den Meßgebäuden aufgenommen wurden. Eine der Profilaufnahmen wurde genau über dem Dach des FZU-Gebäudes am Standort des Meßmastes am Modell ohne Vegetation ermittelt. Die Geschwindigkeitswerte wurden mit der Geschwindigkeit in Höhe des Physik-Gebäudes (71 m) normiert. Für die Naturdaten konnten diese Werte den Regressionsbeziehungen entnommen werden (siehe Abb. 6.3).

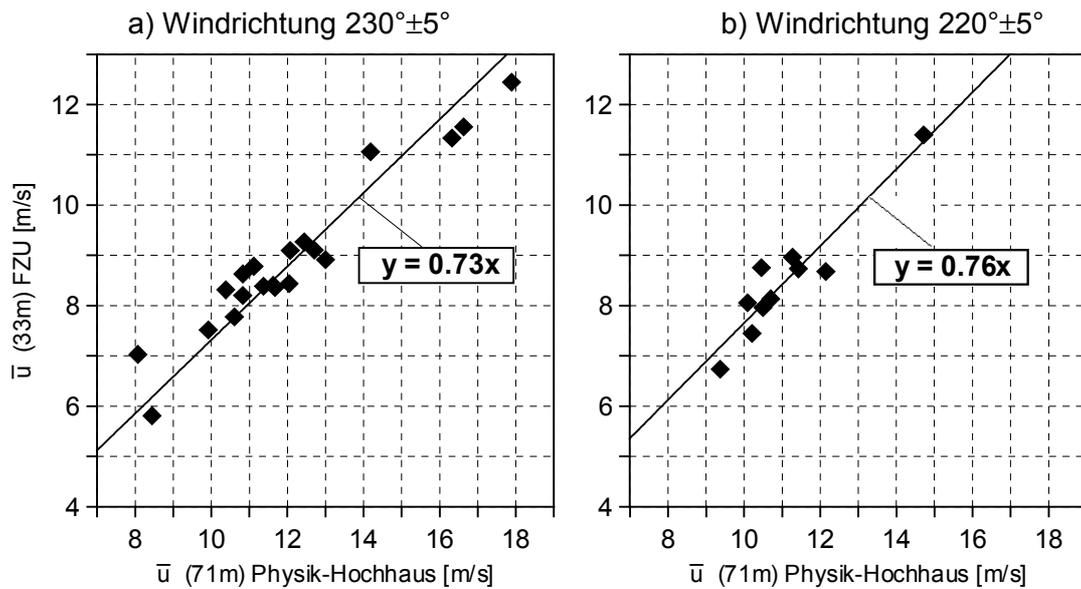


Abb. 6.3 Vergleich der zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten am Physik- und FZU-Gebäude für alle Meßreihen für a) 230° und b) 220°

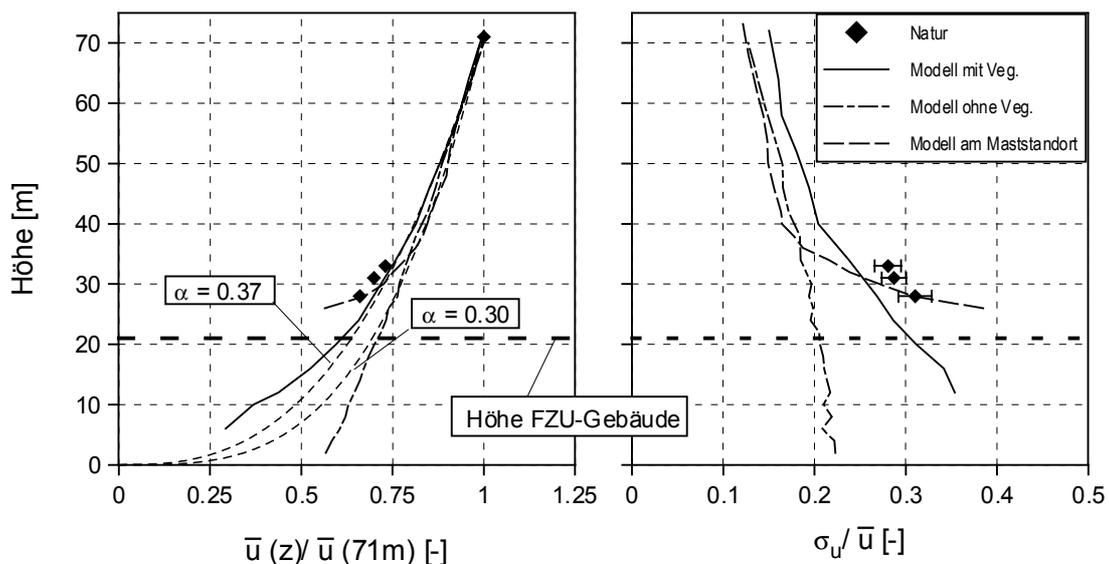


Abb. 6.4 Profil der mittleren Geschwindigkeit und der Turbulenzintensität über die Höhe, Windrichtung 230°

Der Vergleich der beiden im Windkanal ermittelten Geschwindigkeitsprofile mit und ohne Vegetation zeigt deutlich, daß vor allem der untere, bodennahe Bereich durch den Bewuchs beeinflusst wird. Die Naturwerte passen gut in den Kurvenverlauf der Windkanalmessung am Modell ohne Vegetation über dem Standort des Mastes. Die Übereinstimmung mit dem Profil für das Modell mit Vegetation sollte nicht am dargestellten Profil beurteilt werden, da es im Bereich vor den Meßgebäuden aufgenommen wurde. Würde sich beim Modell mit Vegetation eine ähnliche Abnahme der Geschwindigkeit über dem Maststandort einstellen wie beim Modell ohne Vegetation, bedeutet dies, daß die Geschwindigkeiten in Höhe der Anemometer am FZU-Mast im Modell geringer waren als in Natur. Möglicherweise wurde die Vegetation im Modell zu dicht modelliert, wodurch ihre Wirkung bei der Simulation übersteigert wird.

Darauf deuten auch die Ergebnisse der Druckmessungen hin, welche am Modell mit Vegetation meist geringere Werte aufweisen als in Natur. Die Naturwerte für die Turbulenzintensität sind mit einem Balken versehen, welcher die Standardabweichung der ermittelten Werte symbolisiert. Hier zeigt sich die Tendenz, daß im Modell die Turbulenzintensität in größerer Höhe leicht unterschätzt wurde.

In Abb. 6.5 sind die Spektren der Geschwindigkeit in Natur und Modell enthalten. Der Maßstabsfaktor ermittelt sich aus der Verschiebung der Windkanalspektren und beträgt ca. 400. Dies stimmt nicht mit dem Modellmaßstab überein, liegt jedoch in den Grenzen der WTG-Richtlinien (1993).

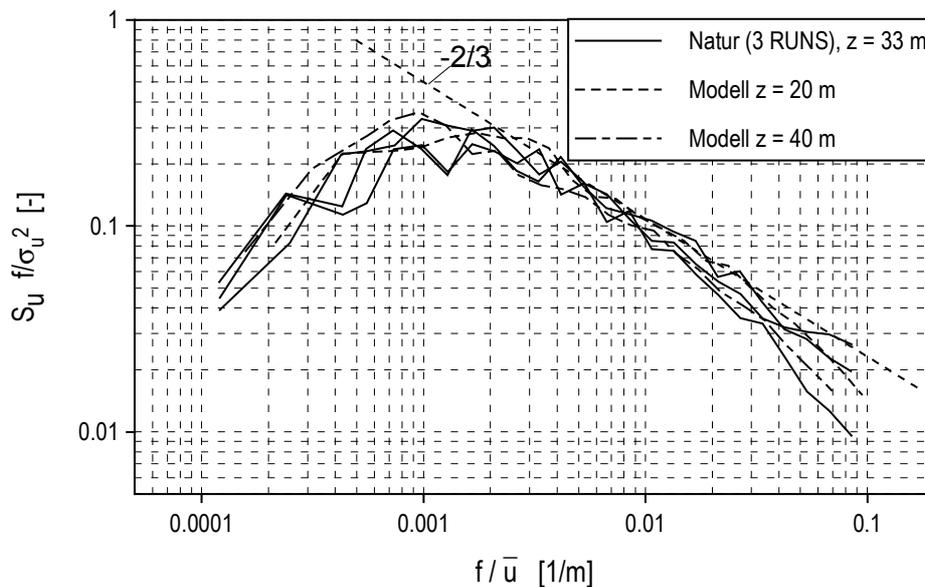


Abb. 6.5 Spektrale Dichte der Geschwindigkeitsfluktuationen in Modell und Natur

6.2 Zeitlich gemittelte Druckbeiwerte $c_{p,mean}$ und Standardabweichung $c_{p,rms}$

Als Referenzdruck bei den Naturmessungen wurde, wie in Kapitel 3 beschrieben, der Gebäudeinnendruck am Standort des Meßaufnahmerechners allen Meßstellen über Schlauchleitungen zugeleitet. Der Gebäudeinnendruck weicht jedoch vom statischen Druck der Anströmung ab, welcher als Referenzdruck für die Windkanalversuche verwendet wurde. Beim Vergleich der Ergebnisse aus Natur- und Modellversuchen wird sich dieser Unterschied als konstante Verschiebung der Werte auswirken. In Abb. 6.6 sind beispielhaft die $c_{p,mean}$ -Werte für zwei Meßreihen in Natur und Modell (mit Vegetation) gegeneinander aufgetragen. Für alle Meßreihen ergeben sich ähnliche Zusammenhänge zwischen den in Natur und am Modell ermittelten Werten. Für alle Meßreihen wurde der Versatz der Werte infolge des Gebäudeinnendrucks anhand des Versatzes der Regressionsgeraden ermittelt und die Meßreihen der Naturdaten entsprechend korrigiert. Im Mittel ergab sich ein Versatz in den $c_{p,mean}$ -Werten von -0.08 bei einer Standardabweichung von 0.028 . Dieser Wert entspricht dem Innendruckbeiwert c_{pi} und ist charakteristisch für relativ dichte Gebäude (BÄCHLIN (1985)).

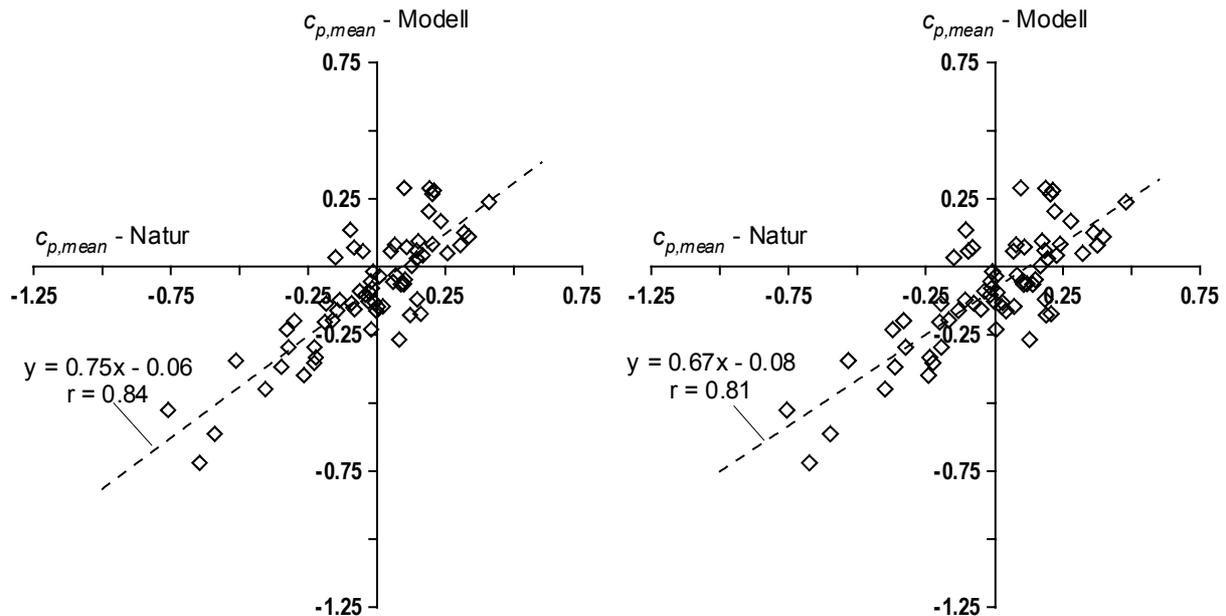


Abb. 6.6 Vergleich $c_{p,mean}$ -Werte Natur –Modell, Korrektur des Referenzdruckes bei den Naturmessungen

Inwiefern die mittleren Druckbeiwerte $c_{p,mean}$ in Natur und Modell übereinstimmen kann am Beispiel einiger repräsentativer Meßpunkte besser erläutert werden. Meßergebnisse in Natur sind für einen Windrichtungssektor von ca. 195° bis ca. 245° vorhanden. Für den Vergleich wurden einzelne Meßpunkte für die beiden Meßgebäude an der windzugewandten und windabgewandten Seite sowie am Dach ausgewählt, um typische Ergebnisse zu verdeutlichen. Die Lage der Punkte am Meßgebäude wird anhand Abb. 6.7 ersichtlich, wo die Position der Punkte in einer Draufsicht auf den Gebäudekomplex eingetragen wurde.

Die Punkte der Westseiten W11 und W10 am FZU sowie W18 und W17 am AVG befinden sich aufgrund des begrenzten Richtungssektors, für den Daten aufgenommen werden konnten, stets auf der windzugewandten Seite. Die Punkte liegen in einer Höhe $z = 0.6H$ (FZU) bzw. $z = 0.5H$ (AVG). Es wurde jeweils ein Punkt in der Mitte der Wand und im Randbereich ausgewählt. Vor allem am Randbereich der Wand an der windzugewandten Gebäudekante wäre an einem freistehenden Gebäude bei schräger Anströmung, welche im vorliegenden Fall meist vorherrscht, mit hohen Drücken zu rechnen (siehe Abb. 4.4 – 45°). Lediglich am FZU-Gebäude tritt für die südlichsten der aufgezeichneten Windrichtungen eher die Charakteristik einer parallelen Anströmung an der Westfassade auf.

Umgekehrt gilt für die Punkte der Ostseite O3 (FZU) und O6 (AVG), daß sie immer auf der windabgewandten Seite liegen. Der Punkt O3 am FZU-Gebäude liegt im Randbereich der leeseitigen Wand, welcher bei Schräganströmung hohe Sogkräfte erfährt (Abb. 4.4 – 135°).

An den Dachpunkten D1 des FZU- und AVG-Gebäudes sind aufgrund ihrer Lage zu den meist südwestlichen Windrichtungen die höchsten Sogbeiwerte gemessen worden. Hierbei ist es von besonderem Interesse, ob die hohen lokalen Sogkräfte auch mit Hilfe der Windkanalversuche simuliert werden können.

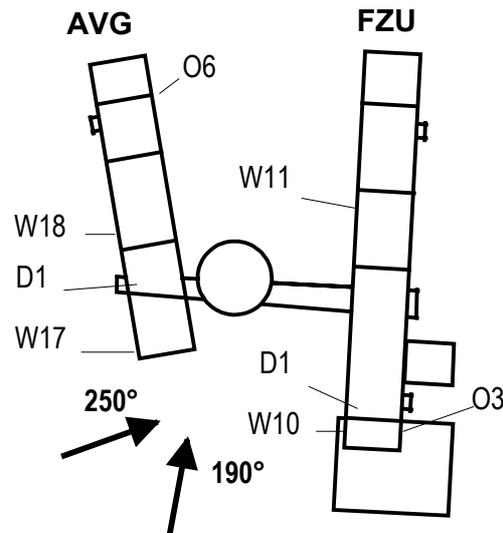


Abb. 6.7 Lage der ausgewählten Druckmeßpunkte

In Abb. 6.8 sind die in Natur und Modell ermittelten $c_{p,mean}$ -Werte als Funktion der Windrichtung dargestellt. Um den Verlauf der stark streuenden Naturdaten deutlich zu machen, wurde ein Polynom dritten Grades an diese Daten angepaßt. Eingezeichnet sind für die entsprechenden Windrichtungen neben den Naturdaten die $c_{p,mean}$ -Werte der Windkanalversuche am Einzelgebäude (FZU- und AVG-Gebäude jeweils allein stehend), am Gesamtmodell ohne Vegetation und mit Vegetation.

Insgesamt betrachtet, läßt sich hinsichtlich der Übereinstimmung der Werte in Natur und Modell anhand Abb. 6.8 folgendes feststellen:

- Die Windkanalversuche am Einzelgebäude prognostizieren Druckbeiwerte die zum Teil erheblich größere Lasten liefern würden, als in Natur ermittelt wurde. Dies gilt vor allem für den Punkt D1 am Dach des FZU-Gebäudes, an welchem beispielsweise für 240° der mittlere Sog am Einzelgebäude nahezu doppelt so stark ist wie er in Natur ermittelt wurde, und auch für die Meßstelle O3 an der Ostfassade des FZU-Gebäudes, an welcher der Sog in Natur für Windrichtungen von 220° bis 240° ebenfalls nur ca. die Hälfte des Wertes am Modell des Einzelgebäudes beträgt.
- Bei den Windkanalversuchen am Modell mit Vegetation wurden $c_{p,mean}$ -Werte ermittelt, welche stellenweise eher zu einer Unterschätzung der Last führen würden. Hieraus läßt sich schließen, daß die Vegetation im Modell zu dicht modelliert wurden.
- Die Versuche am Modell ohne Vegetation erbrachten $c_{p,mean}$ -Werte die meist sehr nahe an der für die Naturergebnisse eingezeichneten Kurve liegen. Dies bedeutet, daß diese Versuche sehr gut den aus der Streuung der Naturdaten resultierenden Mittelwert prognostizieren würden.

- Die Naturdaten streuen ca. in einer Breite von ± 0.25 um die berechnete Ausgleichskurve. Diese Variabilität ist bei der weiteren Bewertung der Daten mit einzubeziehen. Ähnliche Streubreiten von Naturdaten wurden auch z. B. von GEURTS (1997) und HOLMES (1982) festgestellt.

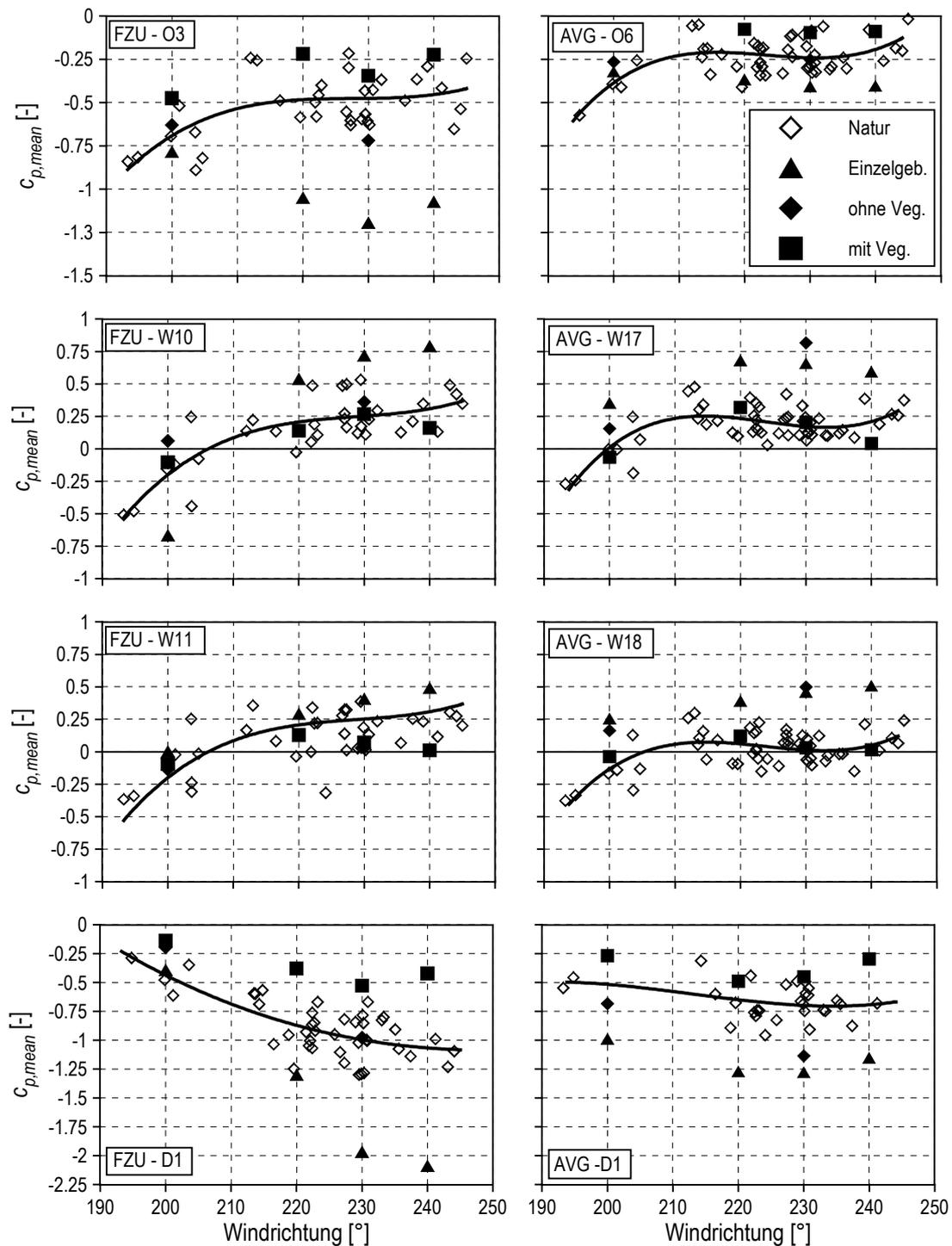


Abb. 6.8 Vergleich der mittleren Druckbeiwerte $C_{p,mean}$ in Natur und Modell

Weiterhin ist in Abb. 6.8 zu erkennen, wie sich die Druckbeiwerte mit der Windrichtung ändern. An den Dachpunkten wird der Sog bei schräger Anströmung am höchsten, an den Westfassaden werden die Beiwerte negativ wenn die Windrichtung nach Süden dreht und somit eher parallel zur Westseite verläuft.

Für die gleichen Meßpunkte, deren Lage in Abb. 6.7 dargestellt ist, sind in Abb. 6.9 die Ergebnisse der fluktuierenden Druckbeiwerte $c_{p,rms}$ enthalten. Hier zeigt sich, daß vor allem an der windzugewandten Westfassade des AVG-Gebäudes und am Punkt W10 des FZU-Gebäudes die RMS-Werte im Windkanal unterschätzt werden. An den Gebäuderückseiten stimmen jedoch vor allem bei den Messungen im Modell mit Umgebungsbebauung die $c_{p,rms}$ -Werte gut mit den Naturdaten überein. Auch am Punkt W11 des FZU-Gebäudes, welcher wie aus Abb. 6.7 ersichtlich wird, bei den südwestlichen Anströmungen durch das vorgelagerte AVG-Gebäude abgeschirmt wird, werden am Einzelgebäude im Windkanal höhere $c_{p,rms}$ -Werte erreicht. Die Ergebnisse am Modell ohne Vegetation stimmen am Punkt W11 jedoch gut mit den Naturdaten überein.

Am Dach ist die Situation ähnlich wie bei den $c_{p,mean}$ -Werten, durch Versuche am Einzelgebäude werden sie überschätzt, während sie im Modell mit Vegetation eher unterschätzt werden. Am besten fällt die Übereinstimmung für die Messungen am Modell ohne Vegetation aus.

Die Ursache für die Unterschätzung der RMS-Werte auf den Westfassaden (windzugewandt, FZU W10, AVG W17 und W18) kann darin liegen, daß die Turbulenzintensität im Strömungsfeld des Windkanalmodells geringer ist als in Natur. Darauf deutet auch Abb. 6.4b hin. Weiterhin ist denkbar, daß es im Windkanalmodell nicht gelungen ist, die durch die Vegetation mechanisch erzeugte Turbulenz richtig wiederzugeben. Die bisher aufgezeigten Ergebnisse legen die Vermutung nahe, daß die verwendeten Modellbäume zu dicht bzw. strömungsundurchlässig sind und nicht dem aerodynamischen Verhalten von Bäumen in der Natur entsprechen.

Anders hingegen verhält es sich an den übrigen dargestellten Gebäudeflächen, wo die Druckfluktuationen mehr durch die bauwerksinduzierte Turbulenz dominiert werden. Diese entsteht durch intermittierende Strömungsablösung an den Gebäudekanten und verhält sich offensichtlich durch Einhaltung der maßgebenden Modellgesetze geometrisch ähnlich in Modell und Natur. Die $c_{p,rms}$ -Werte in der Natur stimmen vor allem an den Meßstellen der windabgewandten Seiten, den Dachmeßpunkten und Punkt W11 am FZU-Gebäude, welcher im abgeschirmten Teil der Westfassade liegt, mit den Ergebnissen am Modell ohne Vegetation sehr gut überein.

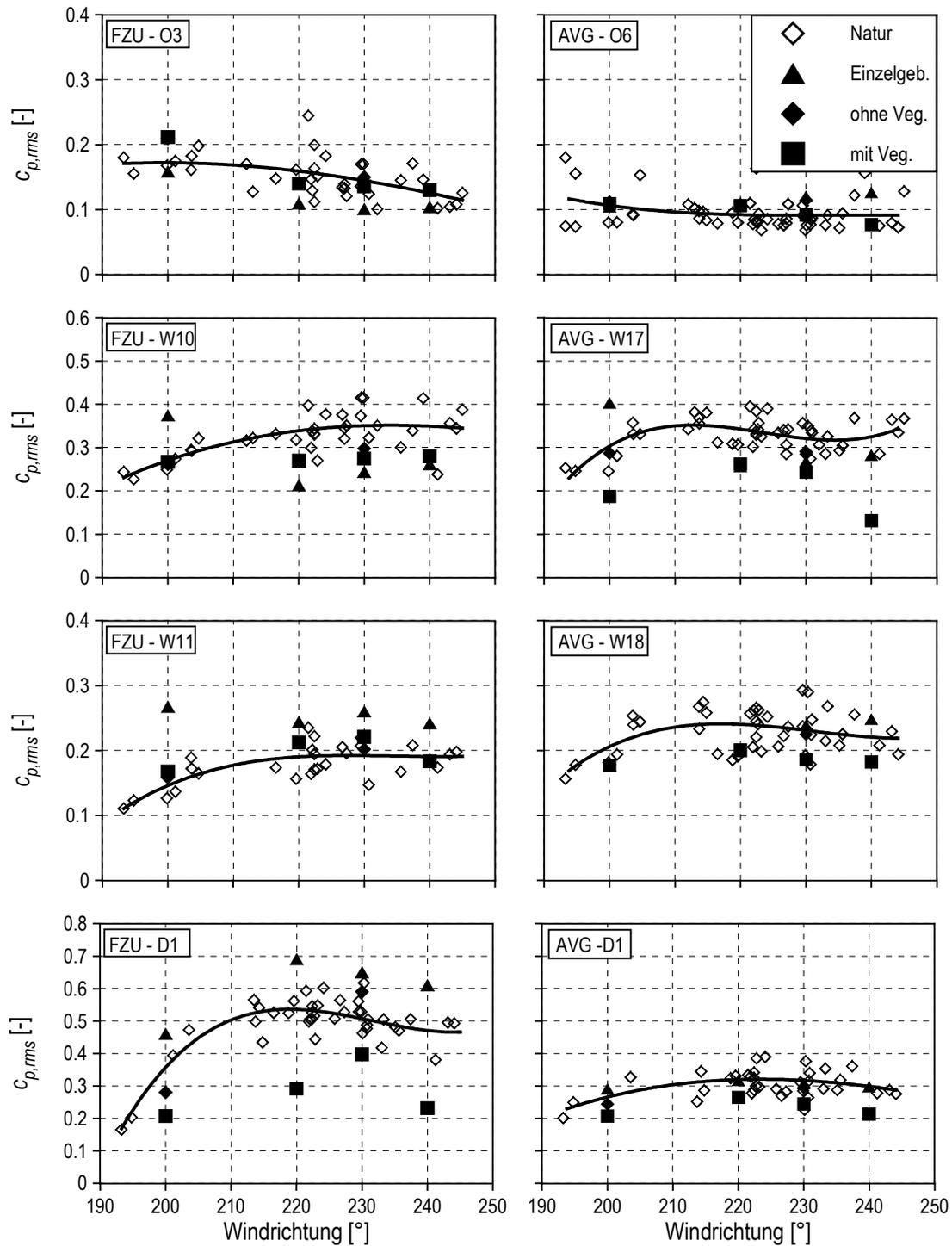


Abb. 6.9 Vergleich der fluktuierenden Druckbeiwerte $c_{p,rms}$ in Natur und Modell

In den vorherigen Kapiteln über die Windkanalergebnisse der systematischen Studie wurden die zeitlich gemittelten Druckbeiwerte $c_{p,mean}$ anhand von Isolinien dargestellt und diese dann über die gesamte Oberfläche integriert, um Kraftbeiwerte bezogen auf das gesamte Gebäude zu berechnen. Die Anzahl und die räumliche Verteilung der Druckmeßstellen an den beiden Testgebäuden der Naturmessungen sind jedoch nicht dazu geeignet Isolinien und mit diesen dann Kraftbeiwerte auf das Gesamtgebäude zu berechnen. Für die vertikalen Meßpunktfolgen an den Seitenwänden wurde jedoch das Integral über die Höhe berechnet, da die Anzahl der

Meßstellen entlang der Vertikalen zur Wiedergabe des typischen Profils der Druckbeiwerte als ausreichend angesehen wird.

In Abb. 6.10 sind für den Windrichtungssektor $230^\circ \pm 5^\circ$ die über die Höhe gemittelten $c_{p,mean}$ -Werte in der Draufsicht auf die beiden Meßgebäude dargestellt. Die Windrichtung 230° bedeutet für das FZU-Gebäude eine Anströmrichtung von 46° bezogen auf die Gebäudelängsachse und entsprechend 58° für das AVG-Gebäude.

Da am Windkanalmodell weitaus mehr Meßpunkte eingerichtet wurden als in Natur, wurden diese Ergebnisse als durchgehende Linien in Abb. 6.10 eingezeichnet. Insgesamt betrachtet lassen sich die zuvor gemachten Feststellungen bezüglich der $c_{p,mean}$ -Werte an den einzelnen Meßpunkten auf die integralen Werte übertragen. Durch die Modellversuche am Einzelgebäude werden die Lasten eher überschätzt, während die Ergebnisse am Modell mit Umgebungsbebauung mit den Mittelwerten aus den einzelnen Meßreihen in Natur gut übereinstimmen. Hieraus kann geschlossen werden, daß die zeitlich gemittelten Kräfte auf das Gesamtbauwerk durch die Windkanalversuche bestimmt werden können.

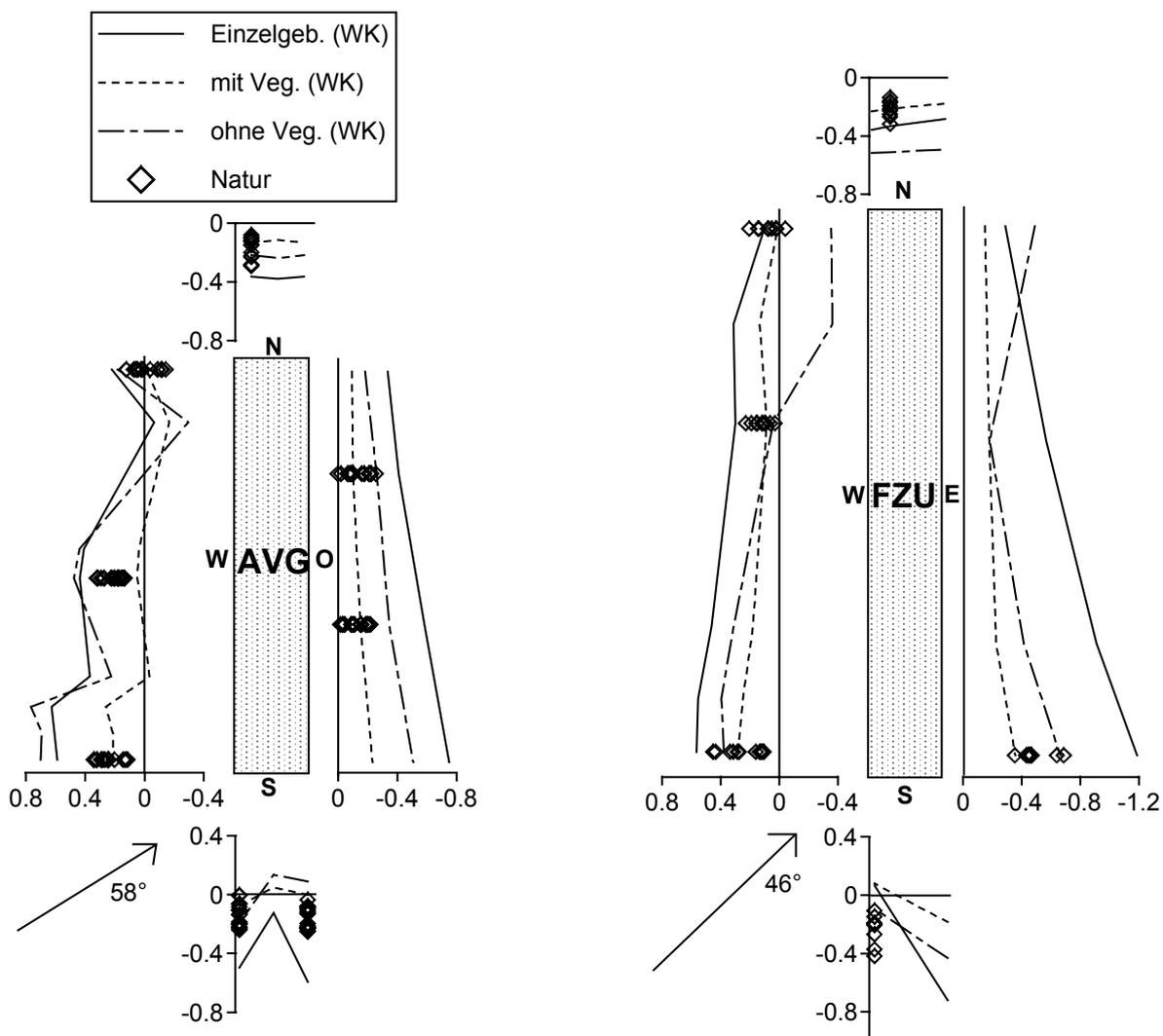


Abb. 6.10 $c_{p,mean}$ -Werte gemittelt über die Höhe, Richtungssektor $230^\circ \pm 5^\circ$

In dieser Darstellung, welche die Druckverteilung um das Gebäude beinhaltet wird auch klar, daß die Vernachlässigung der Vegetation im Modell stellenweise auch zu Abweichungen im Druckverlauf führen kann, während die Ergebnisse in Natur eher im Bereich des Modells mit Vegetation liegen. Durch Kanalisierungseffekte zwischen den Gebäuden entsteht beispielsweise an der Westseite des AVG im südlichen Bereich ein höherer Druck als am Einzelgebäude ermittelt wurde. Auch an der nördlichen Spitze des FZU entsteht am Modell ohne Vegetation ein weitaus höherer Sog als in der Natur und den anderen Windkanalversuchen. In diesen Zonen liegen die Naturwerte weitaus näher bei den Windkanalergebnissen am Modell mit Vegetation. In den übrigen Bereich liegen sie eher zwischen den Ergebnissen der Messungen am Modell mit und ohne Vegetation.

Generell ist für die bisher dargestellten Meßergebnisse der Naturdaten festzustellen, daß diese in einer teilweise großen Bandbreite streuen, die Mittelwerte stimmen jedoch sehr gut mit den im Windkanal ermittelten Daten am Modell mit Umgebungsbebauung überein.

6.3 Vergleich der Druckspektren

Die spektrale Dichtefunktion gibt Aufschluß darüber, welche Frequenzbereiche zur Varianz eines Prozesses beitragen. Bei Druckschwankungen an Gebäudeflächen lassen sich mit Hilfe des Spektrums Aussagen über deren Ursachen machen. Hierfür kommen zum einen die in der Anströmung enthaltenen turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen in Frage, zum anderen werden in den Ablösebereichen an den Kanten des Gebäudes auch Turbulenzwirbel erzeugt, welche zusätzlich einen Beitrag zu den Druckschwankungen an der Gebäudeoberfläche leisten können. Von besonderem Interesse sind die Spektren der am Gebäude anliegenden Drücke auch im Hinblick auf windinduzierte Gebäude- und Bauteilschwingungen, da die Spektraldichte den Energiegehalt im Bereich der Eigenfrequenz des Gebäudes bzw. Bauteiles angibt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen die spektralen Dichtefunktionen der an der Gebäudeoberfläche in Natur und Modell ermittelten Druckschwankungen vor allem darüber Aufschluß geben, inwiefern es gelungen ist die in der Natur vorhandene Charakteristik der Druckzeitreihen im Windkanalversuch wiederzugeben. Hierzu werden die Spektren der Druckfluktuationen in Abb. 6.11 als Funktion der dimensionslosen sog. "Reduced Frequency" $fB/\bar{u}(H)$ dargestellt, welche als Verhältnis der Bauwerksbreite B zur Wellenlänge $\bar{u}(H)/f$ der Druckfluktuationen aufgefaßt werden kann. Dieser Parameter ist unabhängig vom Maßstab und somit gut geeignet die Form der Spektren in Natur und Modell zu vergleichen. Als charakteristische Gebäudeabmessung wurde die Länge der kleineren Gebäudeseite die Breite B , welche für beide Gebäude 15 m beträgt, gewählt.

In Abb. 6.11 sind die Druckspektren für die Meßpunkte, deren Lage in Abb. 6.7 skizziert ist, dargestellt. Durch die Auswahl der Meßpunkte werden unterschiedliche Bereiche der Gebäudeumströmung repräsentiert, wodurch auch Spektren unterschiedlicher Form hervorgerufen werden.

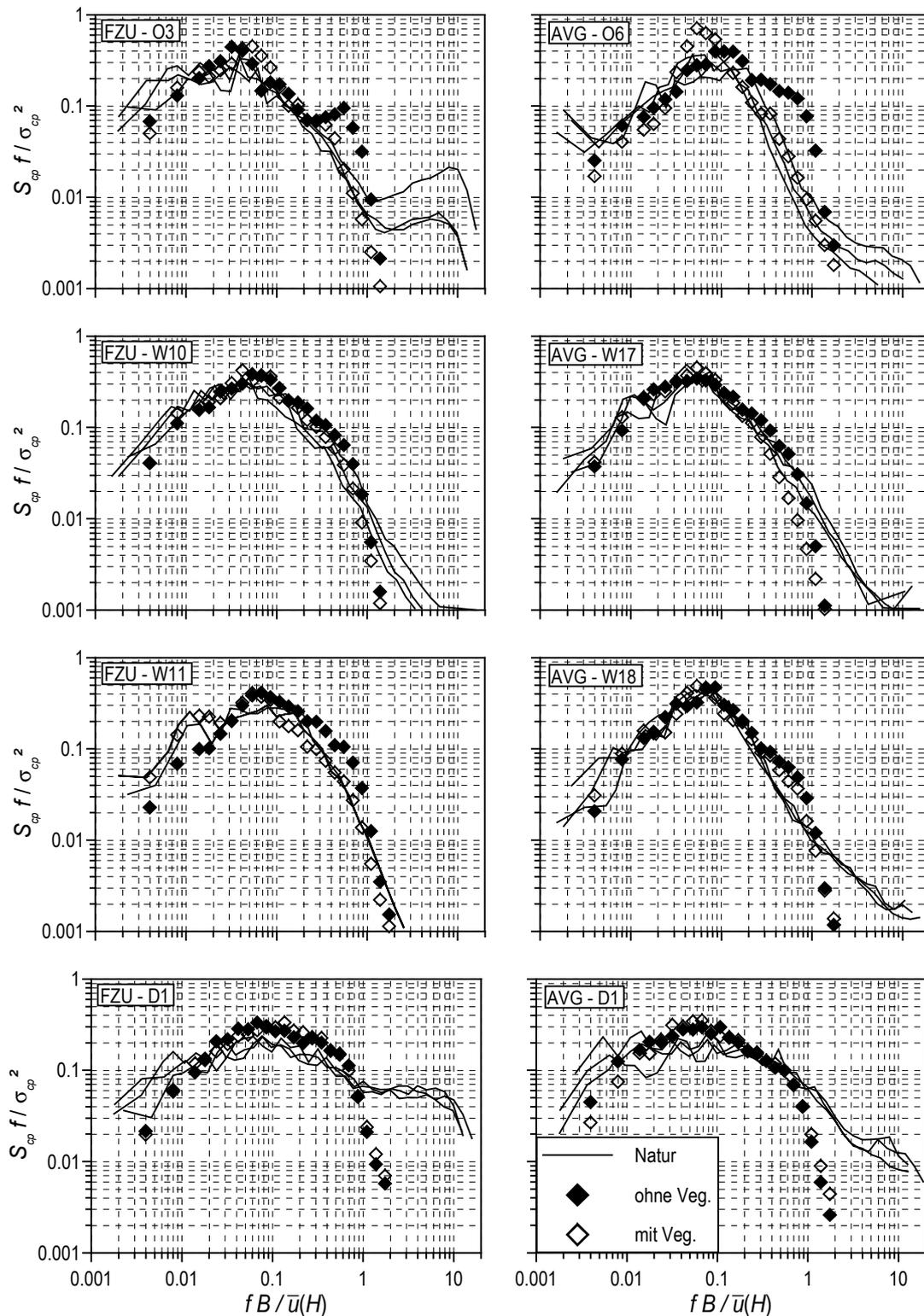


Abb. 6.11 Spektrale Dichte der Druckfluktuationen in Natur und Modell, Windrichtung $230^\circ \pm 5^\circ$

Bei allen Meßpunkten fällt auf, daß die Spektren der Windkanalzeitreihen bei ca. $f B/\bar{u}(H) = 0.8$ beginnen steil abzufallen. Die Ursache hierfür ist das beschränkte Auflösungsvermögen der Druckmeßeinrichtung im höher frequenten Bereich. Rechnet man die maximal auflösbare Frequenz von 100 Hz im Windkanal auf die “Reduced Frequency“ um, so ergibt sich $f B/\bar{u}(H) = 100 \text{ Hz} \cdot 0.075 \text{ m} / 9.2 \text{ m/s} = 0.82$. Die Meßeinrichtung in

Natur besitzt ein weitaus höheres Auflösungsvermögen und zeigt den Verlauf der Spektren über dem Frequenzlimit der Windkanaldaten an.

An den Punkten der windzugewandten Westfassaden entstehen typischerweise spektrale Dichtefunktionen, die in ihrer Form mit dem Spektrum der Geschwindigkeitsfluktuationen der Anströmung (siehe Abb. 6.5) übereinstimmen. Dies ist vor allem für die Punkte W10 am FZU und W17 am AVG-Gebäude der Fall, welche nur bedingt durch Vegetation oder vorgelagerte Bebauung beeinflusst werden. Bei den Druckspektren erfolgt nach dem Maximum ein ähnlich konstanter Abfall wie beim Geschwindigkeitsspektrum. Die Form der Spektren in Natur und Modell stimmt in diesem Fall grundlegend überein, auch die Position des Energiemaximums und die anschließende Abnahme der spektralen Dichte sind in Natur und Modell annähernd gleich.

Die Spektren am Dach und der windabgewandten Ostseite hingegen zeigen deutliche Einflüsse der gebäudeinduzierten Turbulenz. Dies zeigt sich vor allem darin, daß sich die Abnahme der spektralen Dichte nach dem Energiemaximum vom Verlauf des Geschwindigkeitsspektrums unterscheidet. Am Dach ist die Abnahme der spektralen Dichte bei ansteigender Frequenz infolge des zusätzlichen Energieeintrags durch gebäudeinduzierte Turbulenz weitaus geringer. Dies resultiert in einem eher langgezogenen flachen Spektrum. Da in den Spektren an den Dachmeßpunkten in Natur im Bereich jenseits des Frequenzlimits der Windkanaldaten noch ein gewisser Energiegehalt vorhanden ist, weichen die Spektren in Natur und Modell aufgrund ihrer Normierung voneinander ab. Da für alle Spektren der Flächeninhalt unter der Kurve gleich ist, im Windkanalspektrum der Energiegehalt im hochfrequenten Bereich jedoch fehlt, zeigen die Windkanalspektren daher bei anderen Frequenzen einen höheren Energiegehalt an als tatsächlich vorhanden. Die Position des Maximums und die Abnahme der Spektraldichte bei zunehmender Frequenz werden jedoch richtig wiedergegeben.

Im Gegensatz zu den Dachmeßpunkten weisen die Spektren an den Ostseiten eher einen steileren Abfall der spektralen Dichte auf. Die Ursache hierfür ist, daß die in der Anströmung enthaltenen Turbulenzwirbel nicht mit der Rückseite in Berührung kommen und sich dort ein eigenständiges eher großskaliges Wirbelsystem ausbildet. Die Windkanalspektren am Modell ohne Vegetation zeigen aufgrund von Wirbelablösungen an den Gebäudekanten einen zusätzlichen Energieeintrag im höherfrequenten Bereich. Dieser Effekt scheint jedoch durch die Vegetation unterdrückt zu werden, da er am Modell mit Vegetation und vor allem auch in Natur nicht zu verzeichnen ist. Insgesamt geben die Spektren der Windkanalversuche die Verteilung der Spektraldichte über die dimensionslose Frequenz auch für die Meßpunkte der Gebäuderückseite gut wieder.

Inwiefern sich das Frequenzlimit der Meßeinrichtung für die Modellversuche auf die Bestimmung der lokalen Spitzenwindlasten auswirkt, wird im folgenden Abschnitt noch eingehend erläutert werden.

6.4 Lokale Lasten

Beim Vergleich der lokal auftretenden Spitzenlasten in Natur und Modell sind sowohl Einflüsse des Modellmaßstabs als auch die Eigenschaften der unterschiedlichen Meßsysteme zu beachten. Aus diesen beiden Randbedingungen ergibt sich die bei den Modellmessungen maximal erreichbare Frequenzauflösung. Überträgt man die im Modell maximal auflösbare Frequenz der Druckschwankungen (ca. 100 Hz) mit Hilfe von Gl. 3.3 auf die Verhältnisse in Natur, so erhält man:

$$T_N \cdot = T_M \cdot 56.5 = 0.01\text{s} \cdot 56.5 = 0.56\text{s} \quad \Rightarrow 1.8 \text{ Hz}$$

Das Auflösungsvermögen der Meßeinrichtung für die Naturversuche beträgt hingegen ca. 15 Hz. Im Vergleich zum zeitlichen Auflösungsvermögen der Meßvorrichtung im Modell wird deutlich, daß die Meßeinrichtung in Natur in der Lage ist Lastfluktuationen zu erfassen, die zeitlich schneller ablaufen. Diese treten meist jedoch nur auf einer sehr kleinen Fläche voll korreliert auf und sind somit auch nur für kleinere Flächen repräsentativ.

Die Bemessungswerte die COOK (1990) angibt, basieren auf Mittelungszeiten von 1 Sekunde für lokale Lasten und 4 Sekunden für Tragwerkslasten. Dies bedeutet, daß die Meßvorrichtung im Windkanal durchaus in der Lage ist, die für die Ermittlung von lokalen Bemessungswerten benötigte zeitliche Auflösung der Druckschwankungen zu erbringen. WACKER und PLATE (1993) empfehlen jedoch eher eine Mittelungszeit von 0.5 Sekunden zu verwenden, um die Lasten auf kleinflächige Bauteile zu erfassen.

Um die lokalen Lasten in Natur mit den Ergebnissen der Modelluntersuchungen und den Vorgaben in der ENV 1991-2-4 vergleichen zu können, erscheint es daher sinnvoll die in Natur ermittelten lokalen Lastbeiwerte entsprechend der Vorgehensweise in Abschnitt 4.3.1 auf die Größe einer Teilfläche zu beziehen. Hierzu können ähnlich wie bei den Windkanalversuchen die zeitgleichen Messungen benachbarter Meßpunkte räumlich integriert werden.

Bei den nachfolgenden Betrachtungen der lokalen Extremwerte wird, wie dies bereits bei der Umrechnung des Frequenzlimits getan wurde, von einem Geschwindigkeitsmaßstab bezogen auf die Bemessungsgeschwindigkeit in der Natur ausgegangen. Aufgrund der Reynolds-Unabhängigkeit der Druckbeiwerte an scharfkantigen Gebäuden für $Re > 50\,000$ kann davon ausgegangen werden, daß die in Natur bei einer geringeren Geschwindigkeit als der Bemessungsgeschwindigkeit ermittelten dimensionslosen Spitzenlastbeiwerte repräsentativ für die zu erwartenden Lasten sind.

6.4.1 Lokale Extremwerte für Teilflächen unterschiedlicher Größe

Der Eckbereich des FZU-Daches ist für eine genauere Analyse der lokalen Lasten besonders geeignet, da hier bei schräger Anströmung die höchsten lokalen Lasten entstehen. Aufgrund der schrägen Ausrichtung des Gebäudes zur Hauptwindrichtung stellt sich auch entsprechend häufig diese Anströmsituation in Natur ein (siehe Abb. 3.11). Aufgrund der Anordnung von zusätzlichen Meßstellen im Eckbereich des Daches des FZU-Gebäudes in der zweiten Phase

der Naturmessungen, können für diesen Bereich, die lokalen Spitzenwerte als Funktion der Teilflächengröße bestimmt werden. Hierbei wurden analog zum Vorgehen bei den Windkanalergebnissen (Abschnitt 4.3.1) Zeitreihen für unterschiedliche Teilflächen durch räumliche Integration ermittelt.

In Abb. 6.12 ist die Lage der Meßpunkte im Eckbereich des Daches und ihre Ausrichtung zu Hauptwindrichtung (230°) dargestellt. Es wurden 9 Meßpunkte rasterförmig angeordnet, sie umfassen insgesamt eine Fläche von ca. 19 m^2 . Ausgehend vom Punkt D1, wo die höchsten Sogspitzen auftreten, wurden aus den zeitgleichen Messungen an den Einzelpunkten Zeitreihen für Teilflächen unterschiedlicher Größe gebildet und entsprechend statistisch ausgewertet, um die $c_{p,min}$ -Werte zu bestimmen.

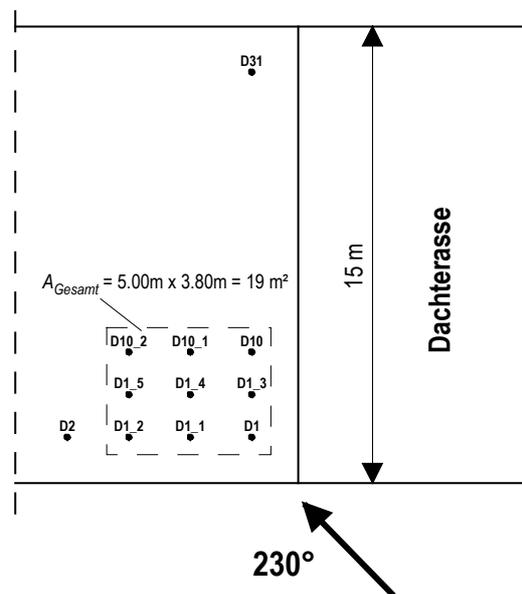


Abb. 6.12 Position der Druckmeßstellen im Eckbereich des FZU-Daches

In gleicher Weise wurden die Messungen am Windkanalmodell des FZU-Komplexes ausgewertet. Die $c_{p,min}$ -Werte für die Teilflächen unterschiedlicher Größe im Eckbereich des Daches sind sowohl für die Naturmessungen als auch für die Modelluntersuchungen in Abb. 6.13 für eine Anströmrichtung von $230^\circ \pm 5^\circ$ enthalten. Die Messungen am Windkanalmodell mit dem dichten Meßpunktraster im Eckbereich des Dachs liegen nur für die Version mit Vegetation vor. Die in Abb. 6.13 eingetragenen Ergebnisse für die beiden anderen Modellversionen (Einzelgebäude und Modell ohne Vegetation) basieren auf der Zeitreihe am Meßpunkt D1 und wurden bei einer Flächengröße von 1 m^2 eingetragen. In Abschnitt 4.3.1 konnte gezeigt werden, daß die $c_{p,min}$ -Werte am einzelnen Meßpunkt bei einem Modellmaßstab von 1:200 die Last auf eine Fläche von ca. 1 m^2 in Natur wiedergeben. Auch in Abb. 6.13 zeigt sich bei den Ergebnissen am Modell mit Vegetation für unterschiedliche Teilflächengrößen, daß sich der am Punkt D1 ermittelte $c_{p,min}$ -Wert sehr gut bei 1 m^2 in die Regressionsgerade über die Fläche einfügt. Die Steigung der Regressionsgerade wurde für die Ergebnisse der anderen Modellmessungen (Einzelgebäude und Modell ohne Vegetation) übernommen, da für diese Modelle wie bereits erwähnt nur Ergebnisse für den einzelnen Meßpunkt D1 vorliegen.

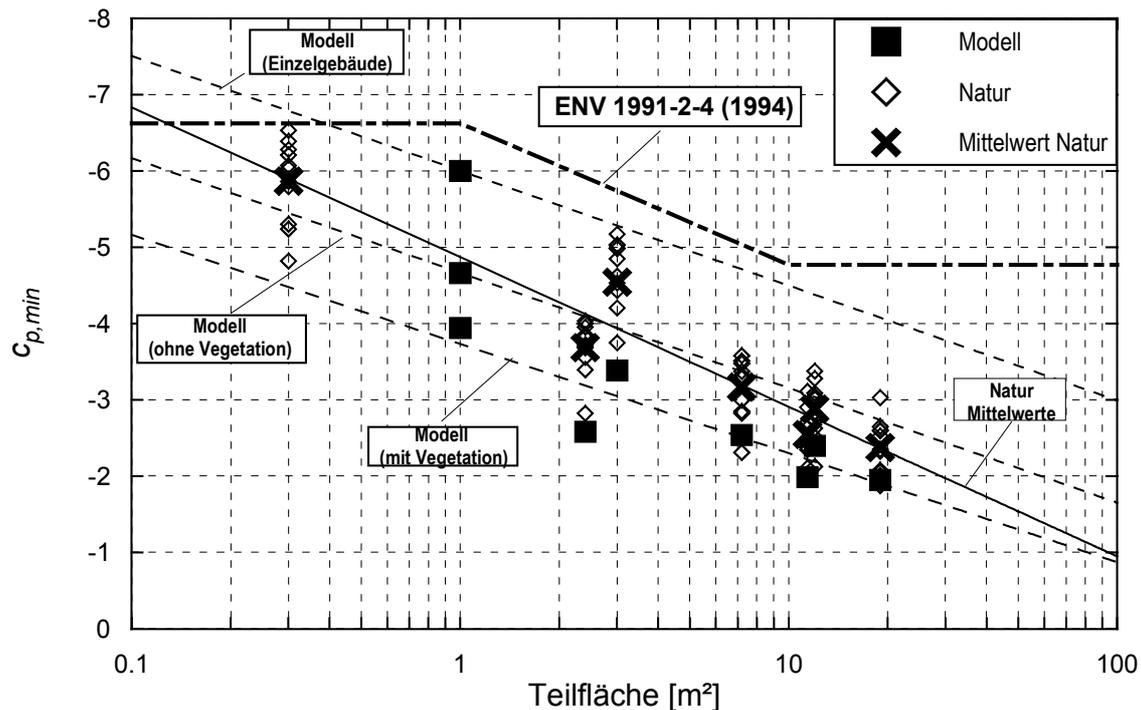


Abb. 6.13 Lokale Sogmaxima $c_{p,min}$ als Funktion der Größe der betrachteten Teilfläche am Dach des FZU-Gebäudes in Natur und Modell

Die Naturereignisse werden durch 11 von einander unabhängige Meßreihen für die ausgewählte Anströmrichtung repräsentiert. Es wird ersichtlich, daß eine große Streubreite der Ergebnisse der einzelnen Meßreihen vorhanden ist, die jedoch mit zunehmender Fläche etwas geringer wird. Für jede der Teilflächen wurde der Mittelwert aus den Ergebnissen der einzelnen Meßreihen berechnet und eine Regressionsgerade an diese Mittelwerte angepaßt, welche deren Abhängigkeit von der Teilflächengröße gut beschreibt. Die Ergebnisse am Einzelpunkt blieben hierbei unberücksichtigt. Diese fügen sich bei einer Teilflächengröße von ca. 0.3 m² in die Regressionsgerade ein. Dies weicht erwartungsgemäß deutlich von der Teilflächengröße der Windkanalergebnisse am Einzelpunkt ab.

Insgesamt betrachtet, ergibt sich eine gute Übereinstimmung der Naturdaten mit dem Verlauf der Regressionsgerade der Windkanalergebnisse für das Modell ohne Vegetation, vor allem für den Bereich zwischen 1m² und 10m². Es ist festzustellen, daß bei kleinen Flächen die Lasten in Natur die Ergebnisse am Modell ohne Vegetation eher übersteigen, während bei großen Teilflächen die am Modell ermittelten Werte eher unterschritten werden.

Die Steigung der Regressionsgeraden der Naturdaten entspricht relativ exakt dem Verlauf des durch die ENV 1991-2-4 (1994) vorgegebenen Zusammenhangs zwischen der Teilflächengröße und der Größe des Lastbeiwertes. Die Steigung der Geraden für die Modellergebnisse ist etwas geringer.

Die räumliche Mittelung zeitgleicher Spitzenwerte ist nur durch hohen Aufwand hinsichtlich der Anzahl der Meßpunkte auf geringer Fläche und dem Leistungsvermögen der Datenerfassung aufgrund der erforderlichen simultanen Erfassung der Druckschwankungen zu bewerkstelligen. Bei den Naturmessungen konnte daher nur ein Bereich für eine genauere

räumliche Betrachtung ausgewählt werden. Aufgrund der Windbedingungen, der Ausrichtung des Gebäudes sowie der hohen lokalen Sogbelastung in den Eckbereichen von Flachdächern unter Schräganströmung kam für diese Auswahl in erster Linie der Dachbereich des FZU-Gebäudes in Frage.

Neben der räumlichen Mittelung von zeitgleichen Lastspitzen besteht jedoch auch die Möglichkeit den Einfluß unterschiedlich großer Teilflächen in Anlehnung an die quasi-statische Theorie durch die Mittelung im Zeitbereich zu erfassen. Für den räumlich gut aufgelösten Eckbereich des FZU-Daches bietet es sich daher an, die Ergebnisse aus räumlicher und zeitlicher Mittelung zu vergleichen. In Abb. 6.14 sind die $c_{p,min}$ -Werte in Natur am Meßpunkt D1 für unterschiedliche Mittelungszeiten dargestellt. Es wurde ebenfalls der Mittelwert aus den Ergebnissen der einzelnen Meßreihen ermittelt und eine Regressionsgerade an diese angepaßt. Es ergibt sich ein sehr guter Zusammenhang zwischen dem Logarithmus der Mittelungszeit und der Größe der $c_{p,min}$ -Werte.

Aus Abb. 6.13 ergibt sich für eine Teilfläche von 1 m^2 ein repräsentativer $c_{p,min}$ -Wert von ca. -4.9 . Bei zeitlicher Mittelung wird dieser Wert bei einer Mittelungszeit von ca. 0.32 Sekunden erreicht.

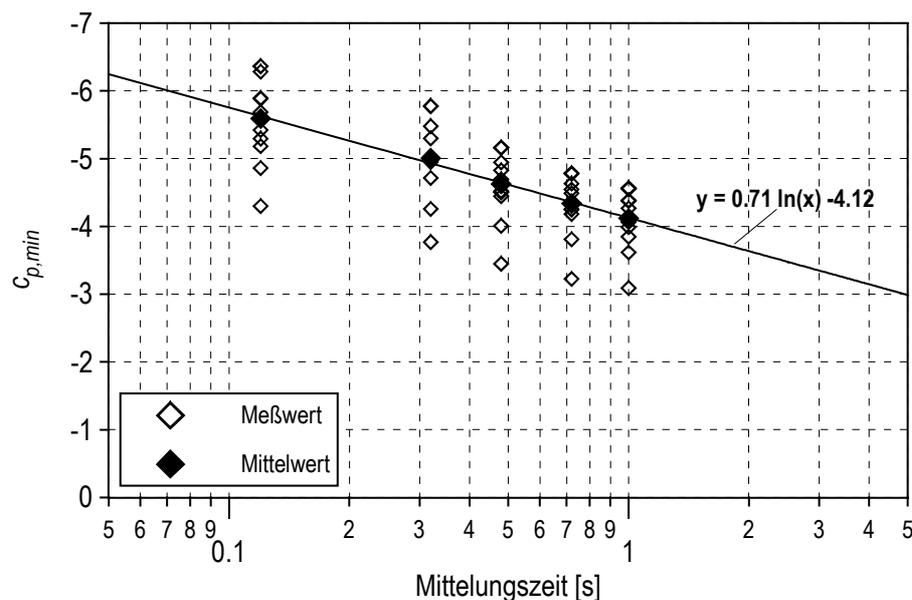


Abb. 6.14 Lokale Sogmaxima $c_{p,min}$ am Meßpunkt D1 in Natur für unterschiedliche Mittelungszeiten

Für die anderen Bereiche der Meßgebäude konnte aufgrund der begrenzten Anzahl von Druckaufnehmern und Aufnahmekapazität kein ähnlich dichtes Meßpunktraster eingerichtet werden, um die räumliche Ausdehnung der lokalen Spitzenlasten exakt zu erfassen. Um die räumliche Ausdehnung von Druckmaxima an luvseitigen Wänden dennoch etwas näher zu betrachten, wurden auch die Druckschwankungen an den vertikal ausgerichteten Meßpunktreihen der Seitenwände räumlich integriert. Hierbei wird jedoch nur die Korrelation der Druckschwankungen in vertikaler Richtung berücksichtigt. Die hieraus erhaltenen $c_{p,max}$ -Werte in der Mitte der Westfassade des AVG-Gebäudes sind in Abb. 6.15 über die vertikalen

Abstände Δz der Meßpunkte aufgetragen. Ausgangspunkt hierbei ist der Meßpunkt W12, an welchem die höchsten Druckmaxima in dieser Meßpunktreihe ermittelt wurden. Die Ergebnisse für die unterschiedlichen Windkanalmodelle sind ebenfalls in Abb. 6.15 eingetragen.

Unter der Annahme, daß die Korrelation in horizontaler Richtung gleich der vertikalen Richtung ist, kann das Ergebnis am Einzelmeßpunkt in Natur bei $\Delta z = 0.55$ m eingetragen werden. Dies entspricht der oben ermittelten Fläche von 0.3 m^2 als typische räumliche Einflußfläche für die Druckschwankungen an einem Meßpunkt in Natur. Analog hierzu wurden die Modellergebnisse am einzelnen Meßpunkt bei $\Delta z = 1.00$ m in Abb. 6.15 eingefügt. Für die $c_{p,max}$ -Werte in Natur ist jedoch festzustellen, daß dieses Ergebnis am Einzelmeßpunkt eher unzureichend mit dem Verlauf der Regressionsgerade übereinstimmt. Die Ursache hierfür liegt in erster Linie darin, daß derart hochfrequente bzw. kleinräumige Druckschwankungen an frontal angeströmten Wänden im Gegensatz zum Dach offenbar nicht mehr vorhanden sind. Dies zeigt auch deutlich der Vergleich der Spektren der Dachmeßpunkte und der Meßpunkte an der luvseitigen Westfassade im hochfrequenten bzw. kleinskaligen Bereich (Abb. 6.11). Die Energiegehalte in diesem Bereich des Spektrums sind bei den Meßpunkten an der windzugewandten Westfassade deutlich geringer.

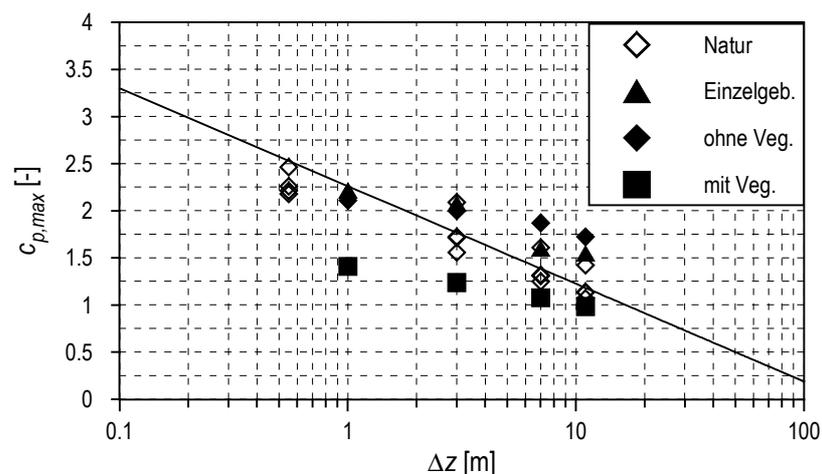


Abb. 6.15 Lokale Druckmaxima $c_{p,max}$ für unterschiedliche Flächengrößen an der Westfassade des AVG-Gebäude, ausgehend von Meßpunkt W12, Windrichtung $230^\circ \pm 5^\circ$

Unter der Annahme gleichmäßiger Korrelation in horizontaler und vertikaler Richtung lassen sich die Ergebnisse für eine Fläche von 1 m^2 bei $\Delta z = 1 \text{ m}$ und für 10 m^2 bei $\Delta z = \sqrt{10 \text{ m}^2} = 3.2 \text{ m}$ ablesen. Die Abnahme des $c_{p,max}$ -Wertes von ca. 2.5 bei 1 m^2 auf ca. 1.9 bei 10 m^2 bedeutet eine Reduktion auf 76 % infolge der Zunahme der Fläche. Dies stimmt gut mit dem in der ENV 1991-2-4 vorgeschlagenen Wert von 80% überein.

Hinsichtlich der Übereinstimmung der Natur- und Modelldaten in Abb. 6.15 läßt sich feststellen, daß die Ergebnisse am Modell mit Vegetation die $c_{p,max}$ -Werte stark unterschätzen, während die Ergebnisse am Modell mit Vegetation und am Einzelgebäude gut mit dem Wert für 1 m^2 übereinstimmen. Die Abnahme des $c_{p,max}$ -Wertes mit zunehmender Fläche erfolgt im

Modell jedoch nicht so rasch wie in der Natur, so daß der $c_{p,max}$ -Wert für größere Teilflächen durch die Windkanalversuche eher überschätzt wird. Dies wurde bereits auch für den Eckbereichs des Daches festgestellt.

Insgesamt betrachtet, wird dadurch, daß die lokalen Extremwerte als Funktion der Flächengröße bestimmt werden, für die ausgewählten Bereiche eine gute Übereinstimmung der Werte in Modell und Natur nachgewiesen. Durch die Umrechnung der Naturzeitreihen mit Hilfe der Mittelungszeit auf repräsentative Ergebnisse für 1m^2 können, auch die anderen Bereiche bzw. Meßpunkte in Modell und Natur miteinander verglichen werden. Die Ergebnisse der lokalen Extremwerte bezogen auf eine Fläche von 1m^2 werden im folgenden Abschnitt behandelt.

Im Hinblick auf die oben ermittelte Mittelungszeit von 0.32 Sekunden, um die Ergebnisse in Natur am Einzelmesspunkt auf eine Einflußfläche von 1m^2 zu beziehen, ergibt sich, daß diese im Prinzip bei den Seitenwänden ohne Einfluß ist, da keine wesentliche Energiegehalte in diesem Frequenzbereich vorhanden sind. Die in Natur gemessenen Zeitreihen an allen Meßpunkten wurden daher für den nachfolgenden Vergleich der Naturergebnisse mit den Modellmessungen über ein Zeitintervall von 0.32 Sekunden gemittelt, um Extremwerte bezogen auf eine Einflußfläche von 1m^2 zu erhalten.

6.4.2 Lokale Extremwerte für eine Teilfläche von 1m^2

Grundlegend für die Bestimmung der lokalen $c_{p,min}$ - und $c_{p,max}$ -Werte sind die Parameter (Mode, Dispersion) der FT-1 Verteilung. Um die Extremwertverteilungen in Natur und Modell zu vergleichen sind in Abb. 6.16 die 5-Minuten Extremwerte der Druckbeiwerte für einige Meßpunkte und Meßreihen in Natur und Modell bei einer Windrichtung von $230^\circ \pm 5^\circ$ enthalten. Die extremen Druckbeiwerte werden als Funktion von $-\ln(-\ln(M/(N+1)))$ (M = Rang in der Liste der aufsteigenden Werte und N = Anzahl der 5min-Werte in der Meßreihe) abgebildet. Die FT-1 Verteilung erscheint somit als Gerade in dieser Darstellungsform. Die Positionen der einzelnen Druckmeßpunkte an der Oberfläche der Meßgebäude sind in der Skizze in Abb. 6.7 enthalten.

Folgende Feststellungen können anhand Abb. 6.16 getroffen werden:

- Die FT1-Verteilung beschreibt weitgehend den Verlauf der Extremwerte in Modell und Natur für alle dargestellten Meßpositionen.
- Für die Modellmessungen ist hinsichtlich der Größenordnung der Werte meist eine genaue Staffelung – Einzelgebäude, Modell ohne Vegetation, Modell mit Vegetation - vorzufinden, wobei die angepaßten Geraden oft die gleich Steigung aufweisen und lediglich um einen bestimmten Betrag in der Höhe verschoben sind.
- Die FT1-Verteilung in Natur weist häufig eine steilere Neigung auf als im Modell, die höchsten Werte erreichen in einigen Fällen die Größenordnung der Werte am Einzelgebäude im Modell. Die "Mode"-Werte der Naturdaten, abzulesen bei $x = 0$, liegen

jedoch meistens im Bereich zwischen den Windkanalergebnissen am Modell mit und ohne Vegetation.

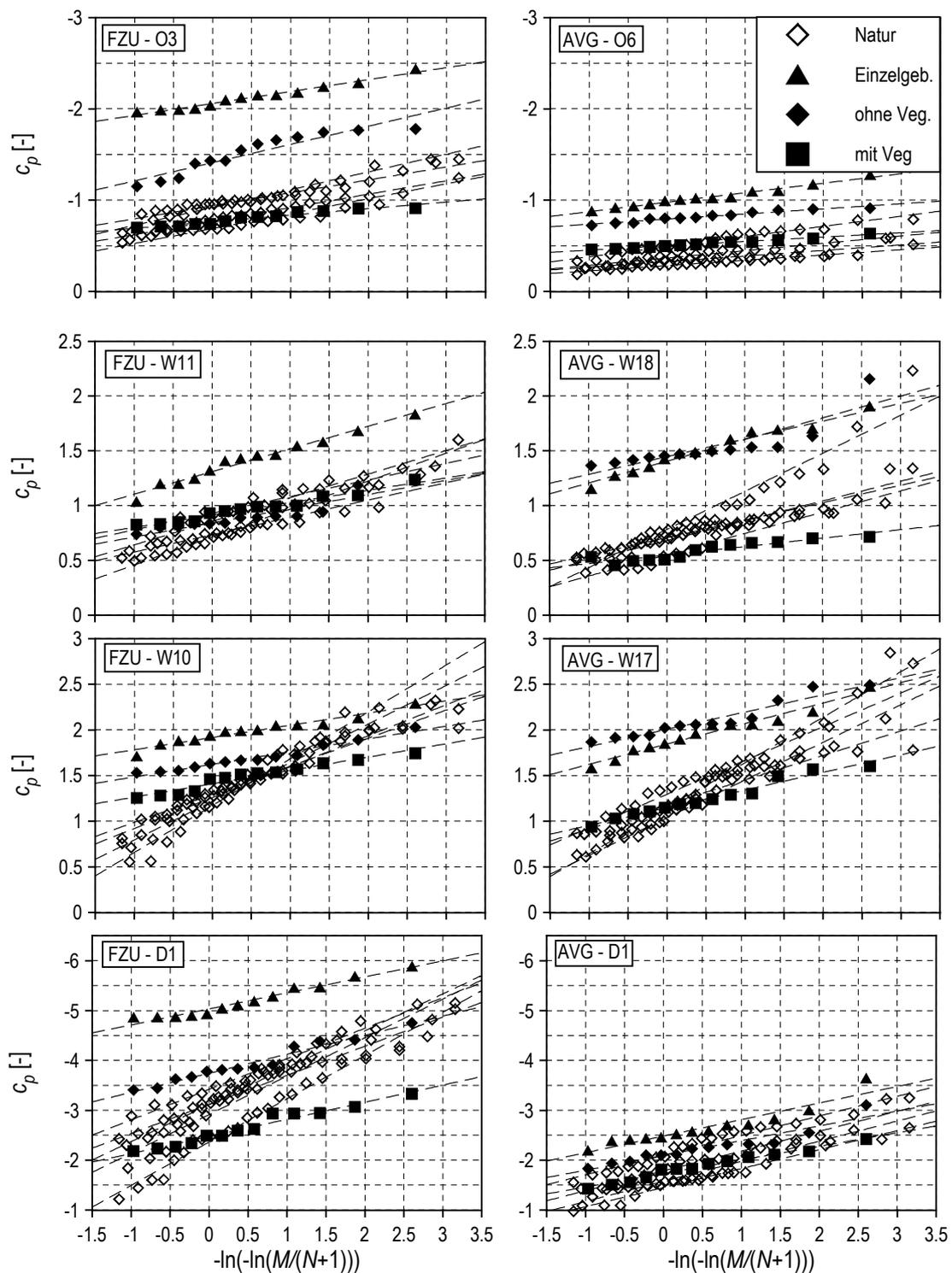


Abb. 6.16 Extremwertverteilungen der Druckbeiwerte für einige Meßpunkte in Natur und Modell bezogen auf eine Fläche von 1 m^2 , Windrichtung $230^\circ \pm 5^\circ$

Der größere Anstieg der FT1-Verteilung in der Natur ist vor allem an den Punkten W10 und D1 am FZU-Gebäude und W17 und W18 am AVG-Gebäude zu beobachten. Die Größenordnung der $c_{p,min}$ - bzw. $c_{p,max}$ -Werte kann bei $-\ln(-\ln(M/(N+1))) = 2.44$ abgelesen werden. Dieser Wert ergibt sich aus der Umrechnung von 5min- in 10min-Werte und dem in Abschnitt 3.5.2. ermittelten Wert von 1.75 bei der Anwendung der vereinfachten ‘‘Cook-Mayne-Methode‘‘. Hierbei ergibt sich, daß die in der Natur auftretenden $c_{p,min}$ - bzw. $c_{p,max}$ -Werte durch die Versuche am Modell ohne Vegetation dennoch gut vorhergesagt werden.

Die stärkere Steigung bzw. ‘‘Dispersion‘‘ $1/a$ in Natur und der nahezu gleichem ‘‘Mode‘‘-Wert bedeutet, daß das charakteristische Produkt der FT1-Verteilung aU_c in Natur größer ist als bei den Modellversuchen im Windkanal. In Natur wurde für den Meßpunkt D1 am FZU-Dach bei einer Windrichtung von $230^\circ \pm 5^\circ$, bei welcher der höchste lokale Sog gemessen wurde, als Mittelwert über die 11 vorhandenen Meßreihen $\overline{aU_c} = 4.5$ ermittelt. Die Standardabweichung beträgt 0.9. Bei der Anpassung der ‘‘Cook-Mayne-Methode‘‘ in Abschnitt 3.5.2 wurde ein Wert von $aU_c = 3.5$ zugrunde gelegt, während die Originalmethode einen Wert von $aU_c = 5$ verwendet. Auch vor diesem Hintergrund erscheint die durchgeführte Anpassung der ‘‘Cook-Mayne-Methode‘‘ gerechtfertigt.

Die $c_{p,min}$ - und $c_{p,max}$ -Werte bezogen auf 1 m^2 sind für die ausgewählten Meßpunkte in Abb. 6.17 für unterschiedliche Windrichtungen enthalten. Aus der Darstellung der $c_{p,mean}$ -Werte in Abb. 6.8 wird ersichtlich, daß an der Westfassade der Gebäude ein Vorzeichenwechsel stattfindet zwischen südlichen und südwestlichen Windrichtungen. Nachfolgend sind daher in Abb. 6.17 für die beiden Punkte W10 am FZU- und W17 am AVG-Gebäude im Randbereich der Westfassade sowohl die $c_{p,max}$ - als auch $c_{p,min}$ -Werte dargestellt.

Hinsichtlich der Übereinstimmung der Werte in Natur und Modell können für die $c_{p,min}$ - und $c_{p,max}$ -Werte anhand Abb. 6.17 zum Teil ähnliche Aussagen wie bereits zuvor getroffen werden:

- An den Meßpunkten am Dach und der Westfassade im Randbereich (W10 und W17) werden lokalen Kräfte durch die Modellierung mit Vegetation unterschätzt.
- Die Ergebnisse am Modell ohne Vegetation liegen sehr nahe an der Ausgleichskurve der Naturwerte. Ausgenommen hiervon ist der Randbereich an der Westfassade des FZU (Punkt W10), hier liegen die Naturwerte eher im Bereich der Ergebnisse am Einzelgebäude, und der Punkt O3 an der Ostseite des FZU, hier wird der lokale Sog im Modell ohne Vegetation bei südwestlicher Windrichtung überschätzt.
- Die Versuche am Einzelgebäude liefern häufig zu hohe lokale Lasten.
- Die Streubreite der Daten in Natur ist sehr groß und beträgt bei Meßpunkten mit hohen lokalen Lasten ca. ± 0.5 .

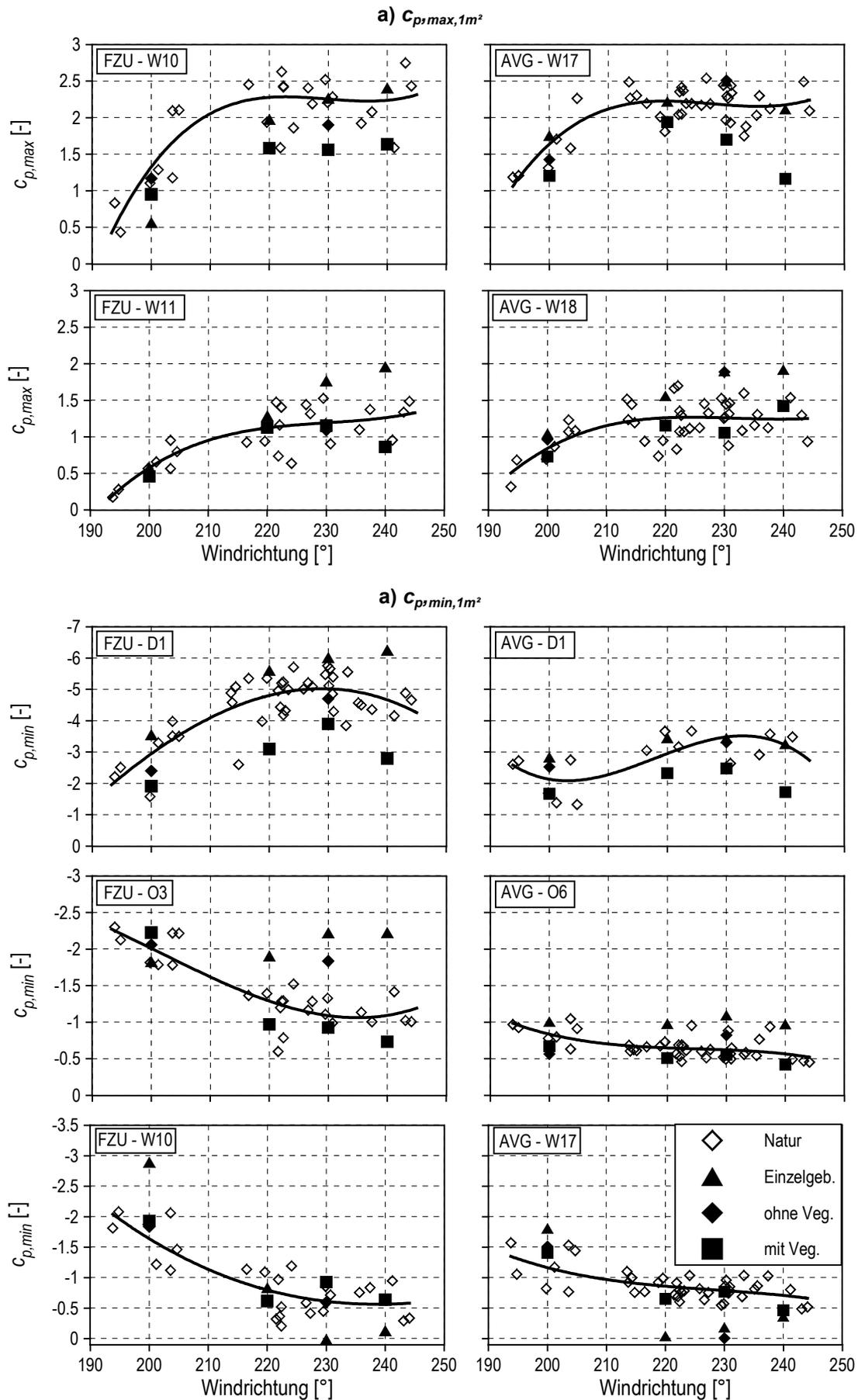


Abb. 6.17 Vergleich der $c_{p,min}$ - und $c_{p,max}$ -Werte bezogen auf 1 m² in Natur und Modell für unterschiedliche Windrichtungen

6.5 Schlußfolgerungen

Im vorliegenden Kapitel wurden die in Natur und Modell ermittelten Druckbeiwerte verglichen, um zu überprüfen, ob mit Hilfe von Windkanalversuchen repräsentative winderzeugte Lasten an Gebäuden in bebautem Gebiet simuliert werden können. Insgesamt betrachtet, werden vor allem durch die Messungen am Modell ohne Vegetation die winderzeugte Lasten in der Natur gut wiedergegeben. Die Übereinstimmung konnte insbesondere durch die Verwendung statistischer Kenngrößen und der Bestimmung repräsentativer Teilflächengrößen nachgewiesen werden.

Besondere Bedeutung kommt den vergleichenden Messungen in Natur und Modell bei der Bestimmung des Modellunsicherheitsfaktors μ zu, welcher in der Zuverlässigkeitsanalyse verwendet wird. Eine wesentliche Komponente dieses Faktors ist die Unsicherheit bei der Übertragung der im Windkanal gewonnenen Lastbeiwerte auf die Verhältnisse in Natur. Bei der Anwendung der SMR-Methode gehen die Mittelwerte und die Variationskoeffizienten der verschiedenen Einflußgrößen in die Berechnung ein. Auf diese Weise kann auch die festgestellte hohe Variabilität der in der Natur ermittelten Daten durch den Variationskoeffizient des Modellunsicherheitsfaktors berücksichtigt werden.

Grundlegend für die Beurteilung der Modellunsicherheit ist das Verhältnis der Lastbeiwerte in Natur zu den im Windkanal ermittelten Daten. Die statistischen Kenngrößen dieses Verhältnisses sind für einige Meßpunkte in Tab. 6.1 enthalten. Als Modelldaten wurden die Ergebnisse der Simulation ohne Vegetation zugrunde gelegt. Da es für die Bewertung der Übereinstimmung der Daten in Modell und Natur entscheidend ist, die für die Bemessung relevanten Windkräfte zu vergleichen, wurden nur Meßpunkte und Windrichtungen betrachtet, welche durch hohe lokale Druck- oder Sogkräfte gekennzeichnet sind.

Aus Tab. 6.1 wird deutlich, daß die in der Natur ermittelten lokalen Lasten durch Windkanalversuche sowohl über-, als auch unterschätzt werden. Auf die Schwierigkeiten bei der Modellierung im Windkanal, insbesondere die aerodynamisch korrekte Wiedergabe der Vegetation, wurde bereits hingewiesen. Die Unterschätzung der lokalen Lasten an einigen Meßpunkten hängt hiermit sicherlich zusammen.

Für den Punkt D1 am Dach des FZU-Gebäudes stehen die meisten Naturergebnisse zur Verfügung, hier wird im Mittel ein Verhältnis Natur/Modell von 1.07 und ein Variationskoeffizient von 0.11 erreicht. Diese Werte werden für lokale Extremwerte hinsichtlich der Übertragung von Modelldaten auf die Natur als repräsentativ und auf der sicheren Seite liegend betrachtet.

Tab. 6.1 Verhältnis der extremen lokalen Druckbeiwerte in Natur und Modell, statistische Kenngrößen

Meßpunkt	Maxima $c_{p,max,1m^2}$		Minima $c_{p,min,1m^2}$				
	FZU W10	AVG W17	FZU D1	FZU O3	FZU W10	AVG D1	AVG W17
Windrichtung	230°±5°	230°±5°	230°±5°	200°±5°	200°±5°	230°±5°	200°±5°
$\overline{c_{p,Nat.} / c_{p,Mod.}}$	1.14	0.87	1.07	0.87	0.81	0.80	0.76
$\sigma_{cp,Nat/cp,Mod.}$	0.08	0.10	0.12	0.1	0.21	0.06	0.18
$V_{cp,Nat/cp,Mod.}$	0.07	0.12	0.11	0.11	0.26	0.08	0.23

Globale Lastbeiwerte bezogen auf das Gesamtgebäude konnten aus den Naturdaten aufgrund der beschränkten Meßstellenzahl nicht bestimmt werden. Alle dargestellten Ergebnisse für Lastbeiwerte bezogen auf unterschiedliche große Teilflächen, zeigten jedoch, daß mit zunehmender Fläche der Unterschied zwischen Modell und Natur geringer wird, und daß bereits bei einer Flächengröße von 10 m² die Lasten durch die Modellversuche eher überschätzt werden (Abb. 6.13, Abb. 6.15). Auch die über die Gebäudehöhen gemittelten $c_{p,mean}$ -Werte zeigen eine gute Übereinstimmung in Modell und Natur (Abb. 6.10). Als konservative Abschätzung kann daher für globale Lasten das Verhältnis Natur/Modell mit 1 angenommen werden.

7 Anwendung der Zuverlässigkeitsanalyse zur Bestimmung bemessungsrelevanter Windlasten in bebauten Gebieten

Der Vergleich der Ergebnisse der Windkanaluntersuchungen am Einzelgebäude mit den Bemessungsvorgaben der ENV 1991-2-4 (1994) in Kapitel 4 hat gezeigt, daß die an einem Einzelgebäude auftretenden winderzeugten Lasten anhand dieser Bemessungsvorschrift gut prognostiziert werden können. In Kapitel 5 wurde deutlich, daß sich die windinduzierten Lastbeiwerte an Gebäuden in bebauten Gebieten teilweise erheblich vom Einzelgebäude unterscheiden und mit einer hohen Variabilität infolge der Vielzahl möglicher Bebauungssituationen behaftet sind. Stochastische Sicherheitskonzepte beziehen die Variabilität aller in die Bemessung eingehenden Faktoren mit ein und stellen einen Bezug zwischen der Belastung und der damit verbundenen Versagenswahrscheinlichkeit her. Die "Methode der zweiten Momente" (SMR), deren Grundlagen und deren Anwendung in Abschnitt 2.6.1 erläutert wurden, wird daher verwendet, um Windlasten in bebauten Gebieten auf einem festgelegten Sicherheitsniveau zu bestimmen. Dieses Sicherheitsniveau soll sich an der ENV 1991-2-4 (1994) orientieren, da ein konstantes Sicherheitsniveau für Einzelgebäude und Gebäude in bebauten Gebieten erreicht und die derzeit vorliegende Fassung der Bemessungsvorschrift möglichst nur durch einfache Ergänzungen modifiziert werden soll. Auf dieser Basis kann dann eine sowohl sichere als auch wirtschaftliche Bemessung von Gebäuden in bebauten Gebieten vorgenommen werden.

Nachfolgend werden zunächst die Eingangsgrößen für die Zuverlässigkeitsanalyse sowie das in der ENV 1991-2-4 (1994) im Hinblick auf die untersuchten Einzelgebäude bestehende Sicherheitsniveau bestimmt. Der Vergleich der mit Hilfe der SMR-Methode berechneten Lastbeiwerte am Einzelgebäude und an Gebäuden im bebauten Gebiet bildet die Grundlage für die Beurteilung der ENV 1991-2-4 (1994) im Hinblick auf ihre Anwendung für Bauwerke in bebauten Gebieten.

7.1 Eingangsgrößen

Die in Abschnitt 2.6 vorgestellte Methode zur Bestimmung der winderzeugten Lasten auf der Basis der Sicherheits- und Zuverlässigkeitstheorie erfordert die Kenntnis der ersten beiden statistischen Momente aller in die Berechnung eingebundenen Größen (Gl. 2.51). Die für die durchgeführte Zuverlässigkeitsanalyse verwendeten Eingangsdaten werden nachfolgend erläutert.

7.1.1 Bemessungsstaudruck q

Die ENV 1991-2-4 gibt die Bemessungsgeschwindigkeiten als 10 min Mittelwert mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 0.02 vor. Dies entspricht im statistischen Mittel einem Wiederkehrintervall von 50 Jahren.

Der zu erwartende Wert des 50-jährlichen Bemessungsstaudrucks \bar{q} entspricht dem Mittelwert der Verteilung der 50-jährlichen Extremwerte (DAVENPORT (1983)). In Abb. 7.1 ist

skizziert, daß die 50-jährlichen Werte wiederum eine Extremwertverteilung ähnlich der Jahresmaxima bilden. Der Mittelwert dieser Verteilung kann aus den Parametern der FT1-Verteilung der jährlichen Geschwindigkeitsmaxima bestimmt werden.

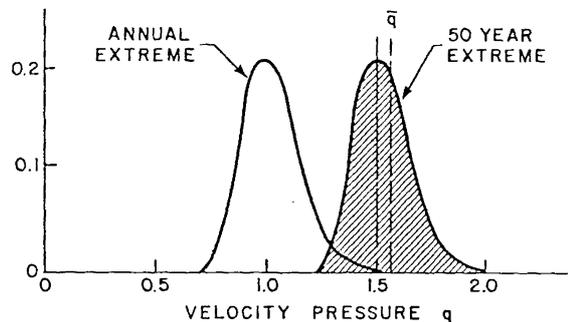


Abb. 7.1 Statistische Verteilung der Bemessungswindgeschwindigkeit (DAVENPORT (1983))

Der Modalwert der 50-jährlichen Extremwerte beträgt:

$$U_{q,50} = U_{q,1} + 1/a_q \ln(50) \quad \text{Gl. 7.1}$$

mit: $U_{q,T}$ = Modalwert der T-jährlichen Extremwerte
 $1/a_q$ = Dispersion der Jahresmaxima

Mit Hilfe der Beziehungen zur Berechnung des Mittelwertes und der Standardabweichung aus den Parametern der FT1-Verteilung ergibt sich:

$$\bar{q} = U_{q,50} + 0.5772 \frac{1}{a_q} \quad \text{Gl. 7.2}$$

$$\sigma_q = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \frac{1}{a_q}$$

Die in der ENV 1991-2-4 spezifizierten Werte für Staudruck q_s wurden aus der Anpassung einer FT1-Verteilung an die Jahresmaxima berechnet:

$$q_s = U_{q,1} + 1/a_q (-\ln(-\ln(0.98))) \quad \text{Gl. 7.3}$$

Mit $(-\ln(-\ln(0.98))) \approx \ln(50)$ ergibt sich, daß der spezifizierte Wert q_s dem 50-jährlichen Modalwert $U_{q,50}$ entspricht (Gl. 7.1). Dies bedeutet (siehe Gl. 7.2), daß für das Verhältnis \bar{q}/q_s gelten muß: $\bar{q}/q_s \geq 1$, da $q_s = U_{q,50}$. Zur Berechnung des exakten Wertes werden Zahlenwerte für Mode-Wert und Dispersion benötigt. Entsprechende Werte aus der Literatur sind in Tab. 7.1 gegeben.

Die bisherige Vorgehensweise definiert die Bemessungswindgeschwindigkeit als Ereignis, welches im statistischen Mittel alle 50 Jahre eintritt. Multipliziert man den hieraus resultierenden Staudruck mit den jeweils ungünstigsten Lastbeiwerten, wird unterstellt, daß der Bemessungswind immer aus der für die Lastannahme ungünstigsten Windrichtung

kommt. Diese Vorgehensweise ist jedoch nur bei rotationssymmetrischen Baukörpern sinnvoll, die im Gegensatz zu den untersuchten Gebäuden von der Windrichtung unabhängige Lastbeiwerte aufweisen. Dies bedeutet, daß ohne Berücksichtigung des Windrichtungseffektes für die untersuchten Gebäudeformen nicht die 50-jährliche Windlast berechnet würde, sondern eine Last mit einer weitaus höheren Jährlichkeit.

DAVENPORT (1983) schlägt auf der sicheren Seite liegend einen Abminderungsfaktor von 0.8 für den zu erwartenden Bemessungsstaudruck \bar{q} vor, um den Einfluß der Windrichtung auf die Lasten entsprechend zu berücksichtigen. Grundlage hierfür ist die Überlagerung einer über die Windrichtungen gleichmäßigen Geschwindigkeitsverteilung mit einer Cosinus-förmigen Abhängigkeit des Lastbeiwertes von der Windrichtung. Für das Verhältnis \bar{q}/q_s und V_q ermittelte DAVENPORT (1983) die Werte 1.06 und 0.11 anhand der Beziehungen in Gl. 7.2. Unter Berücksichtigung des Richtungsfaktors ergibt sich $\bar{q}/q_s = 0.85$ und $V_q = 0.14$.

Anhand ähnlicher Überlegungen bestimmten FÜRNIß (1991) und WACKER (1994) für den mitteleuropäischen Raum die Werte $\bar{q}/q_s = 0.86$ und $V_q = 0.185$. Diese Größen werden für die vorliegende Studie übernommen.

7.1.2 Ausgesetztheitsgrad c_e

Der höhenabhängige "Exposure"-Faktor der ENV 1991-2-4 umfaßt einerseits, wie in Abschnitt 2.4.6 erläutert, die Umrechnung der Referenzgeschwindigkeit von der Standardrauhigkeit (Geländekategorie II) und der Standardhöhe (10m über Grund) auf die am Gebäudestandort vorhandenen Geländebedingungen und die Höhe des Bauwerks, andererseits enthält er auch einen Böenfaktor zur Berücksichtigung der turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen. Die fluktuierende Komponente der Windlast ist bei der vorliegenden Studie jedoch in den $c_{p,min}$ - bzw. den $c_{p,max}$ -Werten enthalten. Das Verhältnis $\bar{c}_e/c_{e,s}$, welches für die Durchführung Zuverlässigkeitsanalyse benötigt wird, beschreibt daher im wesentlichen das Verhältnis des zu erwartenden Geschwindigkeitsprofils zum in der ENV 1991-2-4 festgelegten Geschwindigkeitsprofil. Die Lastbeiwerte der vorliegenden Studie wurden standardmäßig auf das Profil der ungestörten Anströmung bezogen, welches sehr gut der Vorgabe der ENV 1991-2-4 für das simulierte Gelände entspricht. Da die ENV 1991-2-4 für 4 unterschiedliche Geländearten Profile angibt, kann davon ausgegangen werden, daß die zu erwartenden Werte \bar{c}_e den für die Geländeart spezifizierten Werten $c_{e,s}$ etwa entsprechen. Es wurde daher die Annahme $\bar{c}_e/c_{e,s} = 1$ getroffen, der Variationskoeffizient $V_{ce} = 0.06$ wurde von WACKER (1994) übernommen.

7.1.3 Modellunsicherheitsfaktor μ

Der Modellunsicherheitsfaktor μ beinhaltet nach DAVENPORT (1983) zum einen die Unsicherheit verbunden mit der Übertragung von Windkanalergebnissen auf die Naturverhältnisse, zum anderen die Unsicherheit bei der Abschätzung des Windklimas.

Die Unsicherheit im Hinblick auf die Übertragung der Modelldaten auf die Natur kann anhand der Ergebnisse aus Kapitel 6 beurteilt werden. Beim Vergleich der Lastbeiwerte in Modell und Natur zeigte sich die Tendenz, daß die Übereinstimmung bei der Betrachtung größerer Teilflächen zunimmt, während lokale Lasten auf kleine Flächen eher geringfügig unterschätzt werden.

Aus dem Vergleich der Ergebnisse der Naturmessungen mit den Daten aus den Windkanaluntersuchungen am FZU-Gebäudekomplex ergibt sich, daß für die lokalen Lasten das Verhältnis von Natur zu Modell im Mittel mit 1.07 angenommen werden kann und der Variationskoeffizient 0.11 beträgt. Für die globalen Lasten wird dieses Verhältnis auf 1.0 abgeschätzt, der Variationskoeffizient der lokalen Lasten wird übernommen.

DAVENPORT (1983) nimmt für die restlichen Unsicherheiten des Modells einen Mittelwert von 1.0 und einen Variationskoeffizient von 0.1 an. Aus der Kombination der beiden Einflußgrößen auf die Modellunsicherheit ergibt sich:

$$\begin{aligned} \text{Lokale Lasten: } \bar{\mu} &= 1.07 \cdot 1.0 = 1.07 \\ V_{\mu} &= \sqrt{0.11^2 + 0.1^2} = 0.15 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Globale Lasten: } \bar{\mu} &= 1.0 \cdot 1.0 = 1.0 \\ V_{\mu} &= \sqrt{0.11^2 + 0.1^2} = 0.15 \end{aligned}$$

7.1.4 Lastbeiwerte c

Entsprechend den in Abb. 7.1 dargestellten Verteilungen der extremen jährlichen und 50-jährlichen Windgeschwindigkeit existieren Verteilungen auch für die extremen Druckbeiwerte $c_{p,min}$ und $c_{p,max}$. Die modifizierte Cook-Mayne-Methode (Abschnitt 3.5.2) basiert auf der Verteilung der extremen Druckbeiwerte, welche sich aus der Verschiebung des Mode-Wertes für die Extrema des 10-Minuten Intervalls um den Betrag $1.75/a_{cp}$ ergibt.

Hieraus folgt entsprechend Gl. 7.2 für die Bestimmung der zu erwartenden extremen Druckbeiwerte $\overline{c_{p,min}}$ und $\overline{c_{p,max}}$:

$$\overline{c_{p,min}} = U_{cp,min,10Min} + (1.75 + 0.5772) \frac{1}{a_{cp,min,10Min}}$$

Gl. 7.4

$$\text{und } \overline{c_{p,\max}} = U_{cp,\max,10Min} + (1.75 + 0.5772) \frac{1}{a_{cp,\max,10Min}}$$

Die "Dispersion" der Verteilung bleibt unverändert, für die Standardabweichung gilt daher:

Gl. 7.5

$$\sigma_{cp,\min} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \frac{1}{a_{cp,\min,10Min}} \quad \text{und} \quad \sigma_{cp,\max} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \frac{1}{a_{cp,\max,10Min}}$$

Auf diese Weise wurden die zu erwartenden extremen Druckbeiwerte und deren Variationskoeffizienten bestimmt, welche als Eingangsdaten für die Berechnung von lokalen Druckbeiwerten nach der SMR-Methode (Gl. 2.51) verwendet wurden.

Für die bebauten Gebiete ist zusätzlich die Variabilität infolge der Bebauung zu berücksichtigen. Hierzu wurde in einem zweiten Schritt der zu erwartende Lastbeiwert $\overline{c_{p,\min}}$ bzw. $\overline{c_{p,\max}}$ und deren Variationskoeffizienten für bebaute Gebiete anhand der durch die Windkanalversuche gewonnenen Datenbasis für unterschiedliche Bebauungssituationen ermittelt. Die Untersuchungen im Industriegebiet an unterschiedlichen Meßpositionen und für verschiedene Anströmrichtungen liefern Daten für eine Vielfalt möglicher Bebauungssituationen im unmittelbaren Umfeld des Meßgebäudes. Analog zu Kapitel 5 wurde aufgrund der Symmetrieeigenschaften der Testgebäude die Daten für die 8 untersuchten Windrichtungen in drei Hauptanströmrichtungen unterschieden: 0°, 45°, 90°. Für jede dieser Richtungen wurden dann Mittelwert und Variationskoeffizient aus den Daten der unterschiedlichen Bebauungssituationen berechnet.

Die globalen Lasten wurden nur in Form von zeitlich gemittelten Widerstandsbeiwerten bestimmt. Hierbei ergibt sich, daß diese Werte im Fall des Einzelgebäudes bereits dem zu erwartenden Wert \overline{c} entsprechen. Für die bebauten Gebiete ergeben sich dann Mittelwert und Variationskoeffizient, wie oben erläutert aus der Verteilung über die unterschiedlichen Bebauungssituationen.

7.1.5 Zusammenstellung der Eingangsgrößen

Die Eingangsgrößen für die Berechnung von Lastbeiwerten basierend auf der SMR-Methode sind in Tab. 7.1 zusammengestellt und werden mit Werten aus anderen Studien verglichen. Insgesamt betrachtet sind die Werte für alle durchgeführten Studien sehr ähnlich.

DAVENPORT (1983a) verwendet $\overline{c_e}/c_{e,s} = 0.8$, da die kanadische Norm nur einen Geländetyp (offenes Gelände) definiert. Er bezieht daher die Abweichung von diesem Geländetyp als zusätzliche Variabilität ein. Die Werte für \overline{q}/q_s ohne Klammer berücksichtigen den Richtungsfaktor, während die Werte in Klammern von der Annahme ausgehen, daß der Bemessungswind immer aus der Richtung mit den ungünstigsten aerodynamischen Beiwerte kommt. Das Verhältnis $\overline{c_p}/c_{p,s}$ wird von DAVENPORT (1983a) pauschal mit 0.8 angesetzt, da er in erster Linie an einer ersten Abschätzung des Sicherheitsindex β der kanadischen Norm

interessiert ist. In der vorliegenden Studie gehen die nach Abschnitt 7.1.4 aus den Windkanaldaten ermittelten zu erwartenden Lastbeiwerte \bar{c} in Gl. 2.51 ein, um Lastbeiwerte basierend auf der SMR-Methode zu berechnen.

HO (1992) ermittelte das Verhältnis \bar{q}/q_s und den Variationskoeffizient V_q unter Einbeziehung von weltweiten Windklimadaten, auch unter Einbeziehung von Regionen mit tropischen Wirbelstürmen. Für den Geltungsbereich der ENV 1991-2-4 (1994) werden jedoch die von FÜRNIß (1991) und WACKER (1994) ermittelten Werte als maßgeblich angesehen.

Tab. 7.1 Eingangsgrößen für die Zuverlässigkeitsanalyse und Vergleich mit Werten aus der Literatur

	DAVENPORT (1983)	HO (1992)	FÜRNIß (1991)	WACKER (1994)	Vorliegende Studie
\bar{q}/q_s	0.86 (1.06)	0.95	0.86	0.86	0.86
\bar{c}_e/c_{es}	0.8 (U_{ref} nur für "Open Country" definiert)	1.0	1.0	1.0	1.0
$\bar{\mu}$	1.05	1.0	1.05	1.05	1.0 (global) 1.07 (lokal)
\bar{c}_p	$0.8 c_{p,s}$	WK-Daten	WK-Daten	WK-Daten	WK-Daten
τ_p	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
V_q	0.14 (0.11)	0.28	0.185	0.185	0.185
V_{ce}	0.16	0.1	0.16	0.06	0.06
V_{cp}	0.15	WK-Daten	WK-Daten	WK-Daten	WK-Daten
V_μ	0.14	0.1	0.14	0.14	0.15

7.2 Abschätzung des Sicherheitsniveaus der Windlastannahmen nach ENV 1991-2-4 (1994)

Aus den Ergebnissen der Windkanalversuche an den Einzelgebäuden und den spezifizierten Windlasten nach ENV 1991-2-4 (1994) kann das vorhandene Sicherheitsniveau abgeschätzt werden, welches einer Bemessung der gewählten Testgebäude nach der ENV 1991-2-4 (1994) zugrunde liegen würde. Dieser Sicherheitsindex wird dann auch bei der Berechnung der Druckbeiwerte nach der SMR-Methode für Gebäude in bebauten Gebieten verwendet, um Windlasten auf dem gleichen Sicherheitsniveau zu erhalten.

Setzt man die rechte Seite von Gl. 2.48 mit der in der ENV 1991-2-4 spezifizierten Last w_s , welche mit dem partiellen Sicherheitsfaktor τ_p multipliziert wurde, gleich, so ergibt sich für den Sicherheitsindex β :

Gl. 7.6

$$W_s \tau_p = \bar{W} e^{0.75\beta V_w} \Rightarrow \beta = \frac{\ln \tau_p - \ln \frac{\bar{W}}{W_s}}{0.75 V_w}$$

Die Gleichungen zur Bestimmung von w_s , \bar{w} und V_w sind durch Gl. 2.37 und Gl. 2.49 gegeben.

Die mit Hilfe von Gl. 7.6 berechneten Sicherheitsindizes β für lokale Lasten sind für die in der ENV 1991-2-4 definierten Lastzonen für Flachdächer in Tab. 7.2 enthalten. Hierbei wurde jeweils der für die entsprechende Lastzone zur höchsten Belastung führende Druckbeiwert $c_{p,min}$ bzw. $c_{p,max}$ zugrunde gelegt. Die höchsten Sogbeiwerte wurden für die Dachflächen der Modellserie K (quadratischer Grundriß) ermittelt (siehe Abb. 4.15). Aufgrund der dichten Meßpunktanordnung, des geringen Abstandes zum Rand sowie der in Abb. 4.15 dargestellten Gradienten der Druckverteilung kann davon ausgegangen werden, daß an den untersuchten Dachflächen dieser Modellserie mit großer Wahrscheinlichkeit die innerhalb der jeweiligen Lastzonen auftretenden lokalen Maximallasten erfaßt wurden.

Für Zone F, G und H wurden für das kleinste Gebäude die niedrigsten Sicherheitsindizes ermittelt (Tab. 7.2). Im vorliegenden Fall steigen die Sicherheitsindizes bei zunehmender Gebäudehöhe an. Aus Abb. 4.15 wird bereits ersichtlich, daß die $c_{p,min}$ -Werte am kleinsten Gebäude nahe an die in der ENV 1991-2-4 vorgegebenen Werte heranreichen, jedoch mit zunehmender Höhe die im Windkanalversuch ermittelten Werte stärker abnehmen als die Bemessungswerte der ENV 1991-2-4.

Tab. 7.2 Vorhandener Sicherheitsindex β für die Lastzonen der Dachflächen

Gebäudehöhe	Zone F	Zone G	Zone H	Zone I Minima	Zone I Maxima
16 m	2.89	3.64	2.17	-2.89	2.72
32 m	3.69	4.32	2.64	-3.71	2.32
64 m	3.58	4.56	3.01	-4.05	3.65

Für Zone I wurde bereits angemerkt, daß im Hinblick auf die extremen Sogbeiwerte $c_{p,min}$ die Werte der ENV 1991-2-4 für die Gebäude der vorliegenden Studie aufgrund der Geometrie nicht für die Bemessung von lokalen Lasten am Dach in Betracht kommen. Hierfür muß der Bemessungswind für alle Richtungen angenommen werden und somit werden höhere Werte anderer Lastzonen maßgeblich. Lediglich bei entsprechend niedrigen Gebäuden mit langen Seiten gleicher Länge (wenn gilt $2H \ll B$) kann diese Zone jedoch maßgebend werden.

Bezüglich der Druckmaxima $c_{p,max}$, welche nur für diese Zone definiert werden, wird ein Sicherheitsniveau ähnlich den anderen Lastzonen ermittelt.

Insgesamt betrachtet, werden für die Zonen F, G und H am Dach Sicherheitsindizes zwischen 2.2 und 4.6 erreicht.

Für die Wandflächen sind die ermittelten Sicherheitsindizes in Tab. 7.3 enthalten. Für die Zonen A,A* und B,B*, für die vergleichsweise hohe Soglasten definiert sind, werden, Sicherheitsindizes in einem Bereich von 2.5 bis 3 erreicht. Ausgenommen hiervon ist die Zone B,B* am 64 m hohen Gebäude mit einem Wert von 1.72. Die Ursache hierfür liegt, wie bereits in Abschnitt 4.3.2 erläutert wurde, im diagonalen Verlauf der Isolinien der extremen Sogbeiwerte $c_{p,min}$, wodurch ähnlich hohe Werte wie in Zone A* auch in Zone B* auftreten. Für die eher niedrigen Indizes der Zone C liegt die Ursache, wie ebenfalls in Abschnitt 4.3.2 erläutert wurde, an den hohen Beiwerten bei schräger Anströmung auf der windabgewandten Seite in der Nähe der Dachkante.

Für die Zone D, welche die Druckmaxima $c_{p,max}$ bei frontaler Anströmung beinhaltet, werden Sicherheitsindizes deutlich höher als 3 erreicht.

Tab. 7.3 Vorhandener Sicherheitsindex β für die Lastzonen der Wandflächen

Gebäudehöhe	Zone A, A*	Zone B, B*	Zone C	Zone D
16 m	2.51	2.91	1.57	3.29
32 m	2.42	2.93	0.05	3.34
64 m	2.56	1.73	1.31	4.19

Aus der Betrachtung der Sicherheitsindizes an Wand und Dachflächen wird deutlich, daß ein Sicherheitsindex β in der Größenordnung 2.5 bis 3 in der Regel erreicht wird, zumindest gilt dies für die Zonen hoher lokaler Lasten. Dies bedeutet, die Versagenswahrscheinlichkeit beträgt für diese Bereiche $6.2 \cdot 10^{-3}$ bis $1.3 \cdot 10^{-3}$. Ein Sicherheitsindex von $\beta = 3$ wird für die Bestimmung von Windlasten insgesamt als ausreichend betrachtet (siehe z. B. WACKER 1994). Auch die DIN 1055-100 (2001) gibt für einen Bezugszeitraum von 50 Jahren für β einen Wert von 3.8 an. Dieser kann noch mit dem Faktor 0.7 abgemindert werden, wenn nur die Belastungsseite betrachtet wird. Den nachfolgenden Berechnungen von Lastbeiwerten nach der SMR-Methode für Gebäude in bebauten Gebieten wird daher ein Sicherheitsindex von $\beta = 3$ zugrunde gelegt.

7.3 Globale Windlasten in bebauten Gebieten

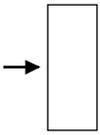
Bei der Bestimmung der $C_{D,smr}$ -Werte des Einzelgebäudes wurde der Variationskoeffizient V_{CD} gleich Null gesetzt, da die Variabilität der zeitlich gemittelten Widerstandsbeiwerte am Einzelgebäude nicht bekannt ist. Im bebauten Gebiet ergibt sich V_{CD} durch die Variabilität infolge der untersuchten Bebauungssituationen. Hierdurch werden im Verhältnis die $C_{D,smr}$ -

Werte des Einzelgebäudes zu niedrig abgeschätzt. Das Ziel der vorliegenden Arbeit liegt im wesentlichen darin, die Abweichung der windinduzierten Kräfte in bebauten Gebieten vom Referenzfall des Einzelgebäudes festzustellen bzw. das Verhältnis der auftretenden Kräfte zu ermitteln. Die Annahmen sind daher eher konservativ bzw. gehen bei der Berechnung beider Fälle ein.

Basierend auf den in Abschnitt 7.1 erläuterten Eingangsdaten wurden die Widerstandsbeiwerte $C_{D,SMR}$ mit Hilfe der SMR-Methode für einen Sicherheitsindex $\beta = 3$ berechnet. In Tab. 7.4 werden die Ergebnisse für die Windrichtungen frontal zur langen bzw. kurzen Seitenwand in bebauten Gebieten mit den Daten für das entsprechende Einzelgebäude verglichen. Ebenfalls enthalten in Tab. 7.4 sind die in bebauten Gebieten zu erwartenden Widerstandsbeiwerte $\overline{C_D}$ sowie die damit verbundene Standardabweichung σ_{CD} .

Die $C_{D,smr}$ -Werte am Einzelgebäude sind aus den o. g. Gründen ($V_{CD} = 0$) nur geringfügig größer als die in Tab. 4.4 angegebenen Werte, welche direkt aus den räumlichen Verteilungen der $c_{p,mean}$ -Werte berechnet wurden. Es wird deutlich, dass die zu erwartenden Widerstandsbeiwerte $\overline{C_D}$ in bebauten Gebieten vor allem für die beiden niedrigen Gebäude ($H/H_{Beb}=1$ und $H/H_{Beb}=2$) entsprechend Abb. 5.11 und Abb. 5.12 erheblich unter den $C_{D,smr}$ -Werten am Einzelgebäude liegen. Da die zu erwartenden Widerstandsbeiwerte $\overline{C_D}$ im Vergleich zur Standardabweichung σ_{CD} sehr niedrig sind, ergeben sich jedoch sehr hohe Variationskoeffizienten. Für das niedrige Gebäude bei 0° -Anströmrichtung wird beispielsweise der Variationskoeffizient größer als 1 und bewirkt daher einen enorm großen $C_{D,smr}$ -Wert, da der Variationskoeffizient in den Exponenten von Gl. 2.51 eingeht. Ein geringfügig höherer $\overline{C_D}$ -Wert würde in diesem Fall bereits eine starke Abminderung des $C_{D,smr}$ -Wertes hervorrufen.

Tab. 7.4 Widerstandsbeiwerte C_D in bebauten Gebieten basierend auf der SMR-Methode ($\beta = 3$)

Windrichtung	H/H_{Beb}	$\overline{C_D}$	σ_{CD}	$C_{D,smr,mit\ Beb.}$	$C_{D,smr,Einzelgeb}$	$\frac{C_{D,smr,mit\ Beb.}}{C_{D,smr,Einzelgeb.}}$
90° 	1	0.19	0.14	0.65	0.85	0.76
	2	0.32	0.16	0.69	1.06	0.65
	4	0.79	0.06	0.84	1.15	0.73
0° 	1	0.06	0.11	2.91	0.75	3.88
	2	0.35	0.18	0.67	0.81	0.82
	4	0.53	0.11	0.65	0.79	0.82

Insgesamt betrachtet, kann anhand der Ergebnisse in Tab. 7.4 festgestellt werden, daß die $C_{D,smr}$ -Werte in bebauten Gebieten, abgesehen von der oben erläuterten Ausnahme, für alle untersuchten Gebäude kleiner sind als die entsprechenden Werte am Einzelgebäude. Dies gilt auch für das hohe Gebäude ($H/H_{Beb} = 4$). Die Ursache hierfür liegt vor allem bei der Windrichtung 90° (Wind senkrecht zur langen Seite) darin, daß einerseits die Turbulenzintensität im bebauten Fall weitaus höher liegt als im simulierten Fall des Einzelgebäudes und somit der Sog auf der Gebäuderückseite herabgesetzt wird, andererseits auch die Last an der Vorderseite durch ein verändertes Windprofil vermindert wird (siehe auch Abb. 5.10 und Abb. 5.3).

Das Verhältnis der $C_{D,smr}$ -Werte mit und ohne Umgebungsbebauung wird für den Fall des niedrigen Gebäudes ($H/H_{Beb} = 1$) aufgrund der erläuterten Problematik der hohen Variationskoeffizienten zu hoch abgeschätzt. Dies zeigt auch ein Vergleich mit den gemessenen Werten in Abb. 5.11, wodurch deutlich wird, daß der in Tab. 7.4 für die Windrichtung 90° ermittelte Wert von ca. 0.76 weit außerhalb des in Abb. 5.11 dargestellten Streubereiches von -0.05 bis 0.45 für die Industriebebauung liegt. Dieses Ergebnis spiegelt somit nicht die wirklich vorhandene Variabilität wieder, sondern beruht vielmehr auf der Tatsache, daß generell durch Gl. 2.51 sehr hohe Lastbeiwerte ermittelt werden, wenn bei einer der Eingangsgrößen der Mittelwert gegen null geht. In Abb. 7.2 ist die Abhängigkeit des $C_{D,smr}$ -Wertes unter Beibehaltung von $\sigma_{CD} = 0.14$ vom Mittelwert $\overline{C_D}$ dargestellt. Es ergibt sich bei $\overline{C_D} = 0.3$ ein Minimum mit $C_{D,smr} = 0.57$. Mit weiter anwachsendem $\overline{C_D}$ -Wert werden auch die $C_{D,smr}$ -Werte wieder größer. Für $C_{D,smr} = 0.57$ gilt:

$$C_{D,smr} \approx \overline{C_D} \text{ (aus Tab. 7.4)} + 3\sigma_{CD}.$$

Das Verhältnis $C_{D,smr,mit\text{Beb}}/C_{D,smr,Einzelgeb}$ für diesen Wert beträgt 0.67.

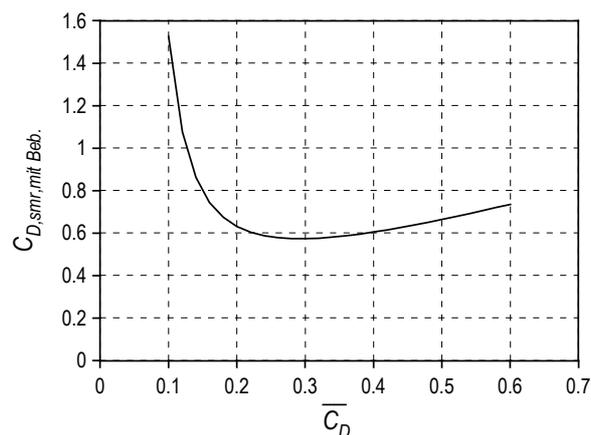


Abb. 7.2 Abhängigkeit des $C_{D,smr}$ -Wertes des niedrigen Gebäudes in der Bebauung vom mittleren Wert $\overline{C_D}$ für $\sigma_{CD} = 0.14$

Mit Hilfe der SMR-Methode in der Form, wie sie bei der Anwendung auf winderzeugte Lasten üblich ist, läßt sich somit für den Fall $H/H_{Beb} = 1$ kein plausibler Wert für das Verhältnis der $C_{D,smr}$ -Werte mit Bebauung und am Einzelgebäude festlegen. In Anbetracht der in Abb. 5.11 dargestellten Variabilität der Daten in der Bebauung und der Tatsache, daß sich

für die beiden höheren Gebäude, welche eindeutig zu höheren Lasten tendieren, Werte für das Verhältnis der $C_{D,smr}$ -Werte zwischen 0.65 und 0.82 einstellen, erscheint der mit Hilfe von Abb. 7.2 ermittelte Wert von 0.67 durchaus angemessen, die Abminderung der globalen Lasten für den Fall $H/H_{Beb}=1$ zu beschreiben.

7.4 Lokale Windlasten in bebauten Gebieten

Die lokalen Extremwerte $c_{p,min}$ und $c_{p,max}$ bezogen auf eine Fläche von 1 m² werden für Einzelgebäude und bebauten Gebiete in Abb. 7.3 und Abb. 7.4 miteinander verglichen. Die Angaben der Beiwerte in der ENV 1991-2-4 für die unterschiedlichen Lastzonen an der Gebäudeoberfläche beziehen sich immer auf einen Windrichtungssektor von $\pm 45^\circ$. Entsprechend der Vorgehensweise in Abschnitt 4.3.2 wurden daher die maßgeblichen Minima und Maxima für jeden der Meßpunkten aus den Ergebnissen für den entsprechenden Richtungssektor ausgewählt und in Abb. 7.3 und Abb. 7.4 einander gegenübergestellt.

Die in Abb. 7.3 eingetragenen Regressionsgeraden zeigen, daß die lokalen Soglasten in dem untersuchten bebauten Gebiet geringer ausfallen, wobei für die beiden höheren Gebäude ($H/H_{Beb}=2$ und $H/H_{Beb}=4$) an einzelnen Punkten jedoch durchaus auch die hohen Sogkräfte des Einzelgebäudes erreicht werden. Am niedrigen Gebäude ($H/H_{Beb}=1$) wird deutlich, daß hier für die Lastzonen A, A* und B, B* der Seitenwände sowie für die Zonen F, G und H am Dach der lokale Sog stärker verringert wird als bei den höheren Gebäuden. Eine Gerade mit der Steigung 0.8 kann sowohl am Dach als auch an der Seitenwand als Einhüllende der ermittelten Werte betrachtet werden.

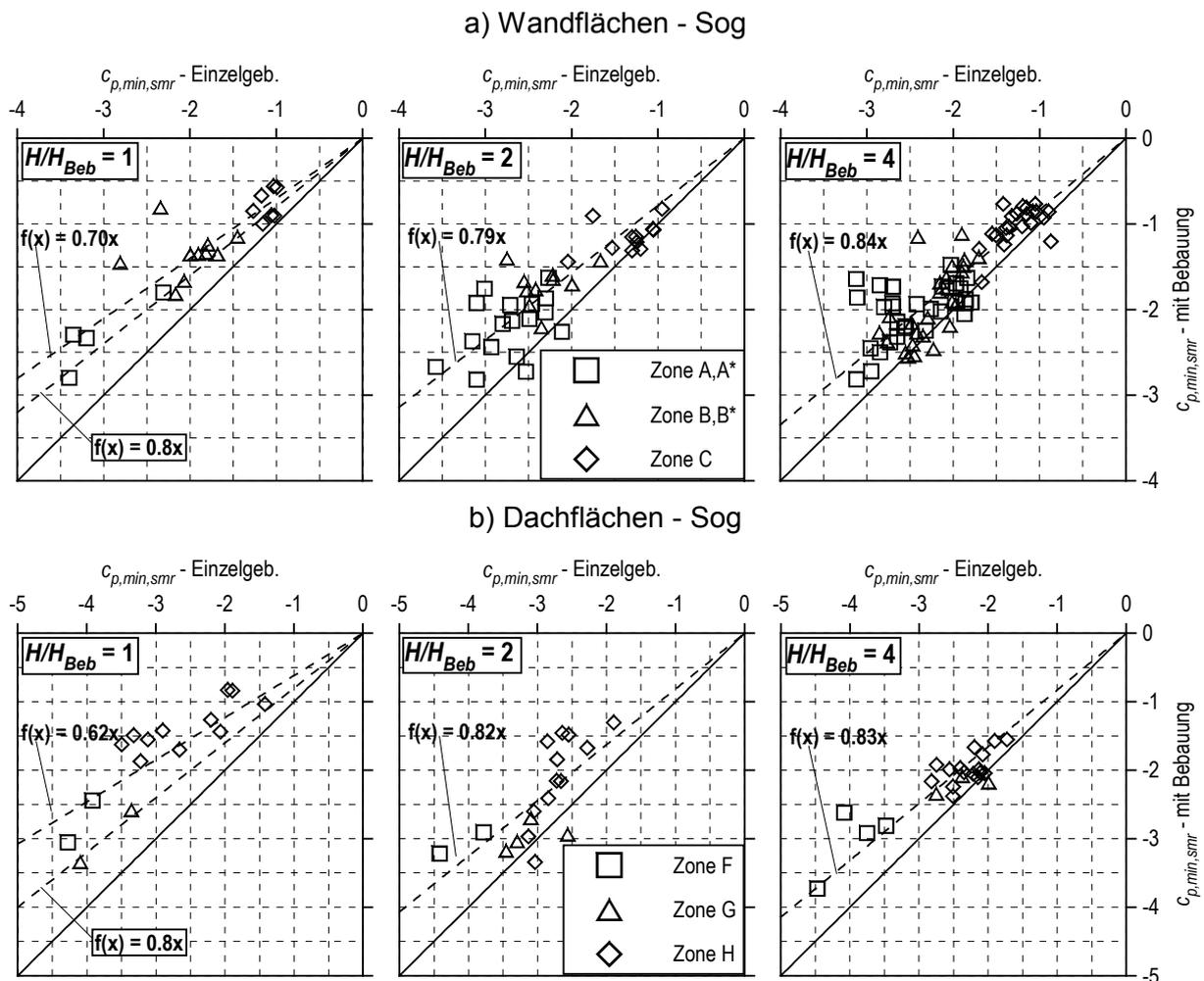


Abb. 7.3 Vergleich der lokalen Soglasten bezogen auf 1 m² berechnet nach der SMR-Methode am Einzelgebäude und in bebauten Gebieten

Die Ergebnisse der lokalen Druckmaxima $c_{p,max}$ an Wand- und Dachflächen sind in Abb. 7.4 enthalten. An den Wandflächen zeigt sich im Gegensatz zu den Sogkräften in Abb. 7.3 ein Verhalten, welches zumindest für die Fälle $H/H_{Beb} = 1$ und $H/H_{Beb} = 2$ deutlich von den eingezeichneten Regressionsgeraden abweicht. Die Ursache hierfür ist, wie in Kapitel 5 erläutert wurde, die vom Einzelgebäude stark abweichende Druckverteilung infolge der Abschattung durch benachbarte Gebäude. Hierdurch werden die größten $c_{p,max}$ -Werte häufig auch im Randbereich und nicht mehr im Staupunktbereich ermittelt (siehe Abb. 5.16). Generell ist festzustellen, daß der am Einzelgebäude auf der gesamten Fläche auftretende Höchstwert im bebauten Gebiet zwar erreicht, jedoch nicht überschritten wird. Die Ausweisung eines über die Fläche konstanten Lastbeiwertes in der ENV 1991-2-4 ist daher für die Bemessung der lokalen Druckkräfte angemessen.

Hinsichtlich der lokalen Druckkräfte am Dach (Abb. 7.4b) zeigt sich einerseits, daß diese in ihrer räumlichen Verteilung sehr stark von den Werten am Einzelgebäude abweichen, andererseits am niedrigen Gebäude ($H/H_{Beb} = 1$) in der Bebauung die Werte des Einzelgebäudes an einigen Meßpunkten um bis zu Faktor 2 überschritten werden.

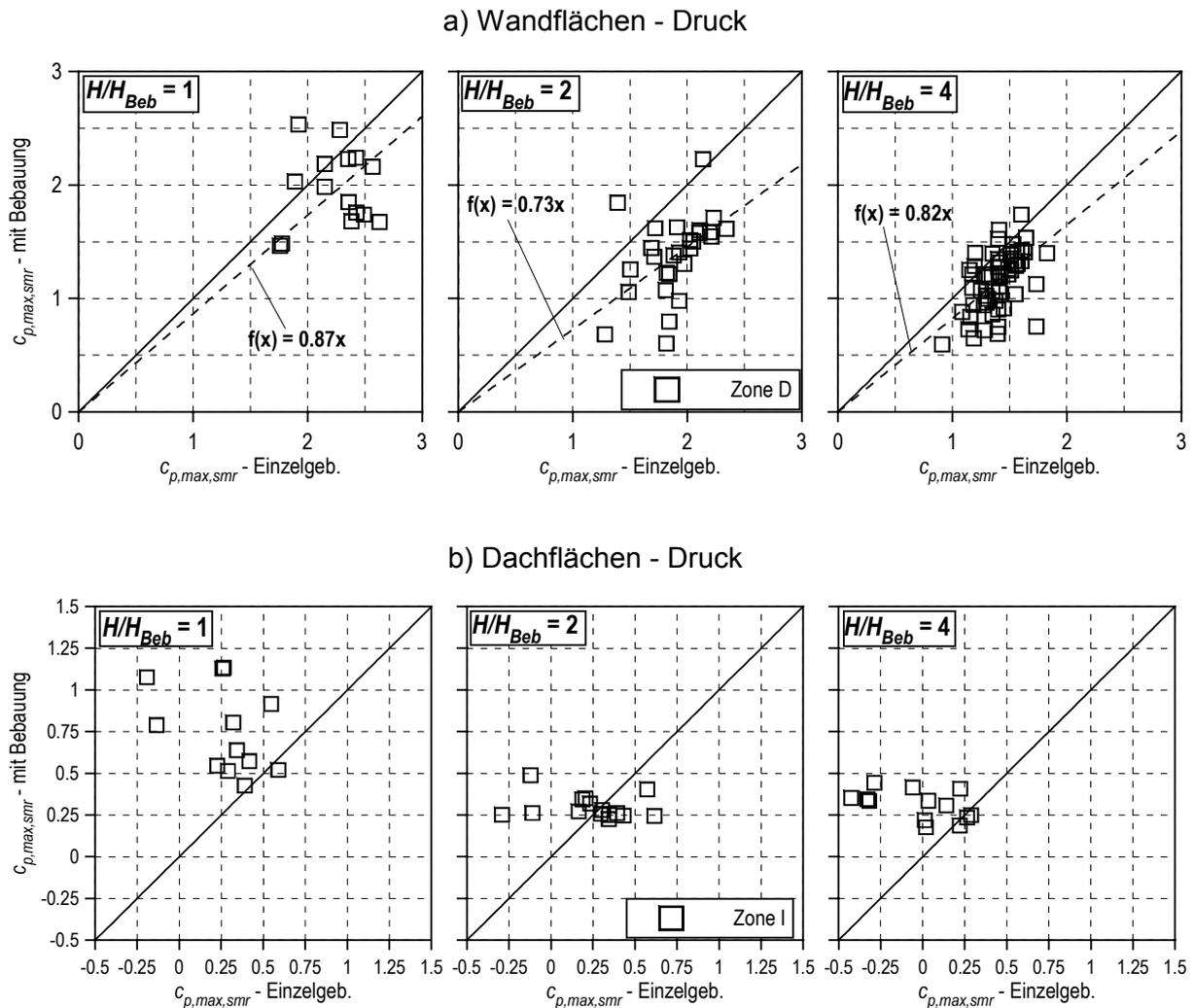


Abb. 7.4 Vergleich der lokalen Drucklasten bezogen auf 1 m² berechnet nach der SMR-Methode am Einzelgebäude und in bebauten Gebieten

Die Ursache für die höheren lokalen Druckkräfte am Dach liegt einerseits in der direkten Wirkung von höheren benachbarten Gebäude, wodurch abwärts gerichtete Strömungsmuster entstehen können, andererseits bewirkt die erhöhte Turbulenz eine stärkere Fluktuation auch im Druckbereich. Dies wurde bereits in Abb. 5.18a am Beispiel der Reihenbebauung deutlich, die ebenfalls erhöhte lokale Druckkräfte aufweist, ohne daß sich jedoch höhere Gebäude in der Umgebung befinden.

7.5 Schlußfolgerungen im Hinblick auf die ENV 1991-2-4 (1994)

Den vorliegenden Ergebnissen der Windkanalstudie liegt eine ungestörte Anströmung zugrunde, welche einem Gelände der Kategorie III der ENV 1991-2-4 (1994) entspricht. Die Beiwerte werden auf den Staudruck dieses Anströmprofils in der entsprechenden Gebäudehöhe bezogen (siehe Abb. 3.2).

In Abschnitt 5.4 wurde deutlich, daß sich das Windfeld durch die Überströmung der bebauten Gebieten an diese neue Rauigkeit anpaßt und vom Profil der ungestörten Anströmung abweicht. Aufgrund der Länge des vorgelagerten Umgebungsmodells ist davon auszugehen,

daß sich in der Ebene der Testgebäude die interne Grenzschicht soweit ausgebildet hat, daß auch die hohen Meßgebäude größtenteils innerhalb dieser Schicht liegen. Dies bedeutet, daß die Meßgebäude in den bebauten Gebieten einer Anströmung ausgesetzt waren, welche auch der Rauigkeitsstruktur der Bebauung entsprechend angepaßt war, wobei als Bezugsgröße für alle untersuchten Gebiete die Geländekategorie III – Vorstadt, Industriegebiet – zugrunde gelegt wurde.

Für bebauten Gebiete werden in der ENV 1991-2-4 (1994) zwei Geländekategorien unterschieden (siehe Tab. 2.2). Während Kategorie III als Vorstadt und Industriegebiet ausgewiesen wird, gilt Kategorie IV für urbane Gebiet mit einem Bebauungsgrad $\lambda_{ib} > 0.15$ und einer mittleren Bebauungshöhe $H_{Beb} > 15$ m. Für die untersuchten bebauten Gebiete gilt somit die in Tab. 7.5 enthaltene Einstufung der Geländekategorien nach ENV 1991-2-4 (1994).

Tab. 7.5 Einstufung der Geländekategorie nach ENV 1991-2-4 (1994)

	Einstufung nach ENV 1991-2-4
Industriegebiet	III
Reihenbeb. $s/H_{Beb} = 7$	III
Reihenbeb. $s/H_{Beb} = 3$	IV
Reihenbeb. $s/H_{Beb} = 1$	IV
Blockrandbebauung	IV

Aus der Auftragung der “Exposure“-Koeffizienten c_e der ENV 1991-2-4 über die Höhe in Abb. 2.15 wird ersichtlich, daß sich diese zwischen der Kategorie III und IV in der Größenordnung erheblich unterscheiden. Der “Exposure“-Koeffizient c_e paßt den Referenzstaudruck an den Geländetyp, die Bauwerkshöhe und die Böigkeit des Windes an. Er geht direkt in die Bestimmung der Lasten ein (Gl. 2.37) und daher ist das Verhältnis der beiden Werte für Kategorie IV und III ein Maß für die Laständerung zwischen den beiden Geländetypen.

Der Einfluß der Bebauung wird in der ENV 1991-2-4 durch die Variation des Bemessungsstaudrucks ausgedrückt. Diese ist nicht unerheblich im Hinblick auf die Reduktion des Staudrucks vom Standardfall Geländekategorie II auf die Geländekategorien III und IV. Der c_e -Faktor für $z = 16$ m für Geländekategorie II beträgt 2.66 und reduziert sich für Kategorie III auf 2.11 und für Kategorie IV auf 1.56. Die Bemessungslast beträgt damit für ein Gebiet der Kategorie IV nur ca. 60% des Wertes für offenes ländliches Gebiet (Kategorie II).

Im Hinblick auf die Einstufung des untersuchten Industriegebietes ist anzumerken, daß dieses nur sehr knapp die Kriterien für ein Gebiet der Kategorie IV nicht erreicht. Die Bebauungsdichte liegt mit $\lambda_{ib} = 0.25$ über der Grenze von 0.15, allerdings ist die mittlere

Bebauungshöhe H_{Beb} geringfügig kleiner als 15 m. Das untersuchte Industriegebiet kann daher auch als repräsentativ für ein Gebiet der Kategorie IV angesehen werden.

Das Verhältnis $c_{e,IV}/c_{e,III}$ quantifiziert die Änderung der Lasten bei der Übertragung vom für die Normierung der Windkanalergebnisse gewählten Referenzfall (Kategorie III) auf ein Gebiet der Kategorie IV. Die Werte für das Verhältnis $c_{e,IV}/c_{e,III}$ sind in Tab. 7.6 für die unterschiedlichen Gebäudehöhen gegeben und können direkt mit den Ergebnissen von Tab. 7.4, Abb. 7.3 und Abb. 7.4 verglichen werden.

Tab. 7.6 Verhältnis $c_{e,IV}/c_{e,III}$ zur Umrechnung der Windkanalergebnisse auf Kategorie IV

	ENV $c_{e,IV}/c_{e,III}$
$H/H_{Beb}=1$	0.74
$H/H_{Beb}=2$	0.79
$H/H_{Beb}=4$	0.83

Während durch den “Exposure“-Koeffizient c_e der ENV 1991-2-4 (1994) pauschal alle Lasten (global und lokal) für alle Lastzonen in bebauten Gebieten gesenkt werden, sollte anhand der Ergebnisse der vorliegenden Studie eher eine differenziertere Betrachtung hinsichtlich der Lastzonen, der Gebäudehöhen und der Bebauungsstruktur durchgeführt werden.

Globale Lasten:

Die in Abschnitt 7.3 festgestellte Abminderung der globalen Lasten in der Bebauung beim Übergang vom Referenzfall (Kategorie III) zu dicht bebauten Gebieten stimmt gut mit der Reduktion des Staudrucks für Geländekategorie IV in Tab. 7.6 überein. Dies gilt sowohl für das niedrige Gebäude, als auch für die beiden höheren Gebäude. Ebenso liegen die Werte aus Tab. 7.6 in einer Größenordnung, die sehr gut mit der Reduktion der Widerstandsbeiwerte in Abb. 5.11, Abb. 5.12 und Abb. 5.13 übereinstimmt.

Für die Anwendung in der Natur muß jedoch für den Fall $H > H_{Beb}$ sichergestellt sein, daß das Gebäude soweit vom Rand der Bebauung entfernt ist, daß die interne Grenzschicht auch über die gesamte Gebäudehöhe entwickelt ist. Die vorliegenden Versuche eignen sich nicht dazu, diese Entwicklung näher zu untersuchen, da die Anströmung vor dem Modell des bebauten Gebietes bereits durch die Windkanaleinbauten zu einem Vorstadt-typischen Profil vorgeformt wurde.

Bei der Anwendung der ENV 1991-2-4 wird für alle Gebäude unabhängig von Höhe und Geometrie dem C_D -Wert ein konservativer Wert von 1.1 zugrunde gelegt. Dieser ist jedoch nur für die hohen Gebäude bei einer Anströmung senkrecht zur langen Seite typisch. Der Sicherheitsindex β bei der Bemessung nach ENV 1991-2-4 liegt somit für den Fall $H > H_{Beb}$ und ausreichendem Abstand zum Rand des Siedlungsgebietes in einer Größenordnung von 3 und nimmt für den Fall eines niedrigen Gebäudes $H \leq H_{Beb}$ vor allem aufgrund der Reduktion des C_D -Wertes durch die höhere Turbulenzintensität zu. Eine wirtschaftlichere Bemessung für

den Fall $H \leq H_{Beb}$, welcher für eine Vielzahl der Gebäude in bebauter Umgebung gültig ist, wäre am sinnvollsten durch C_D -Werte zu erreichen, die sich nicht an den maximal möglichen Werten orientieren, sondern entsprechend der Gebäudegeometrie angepaßt werden können.

Lokale Lasten:

Die Werte aus Tab. 7.6 zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Regressionskoeffizienten für die lokale Sogbelastung an den Seitenwänden und am Dach in Abb. 7.3. Dies bedeutet, daß für ein Großteil der untersuchten Meßstellen ein Sicherheitsniveau von $\beta = 3$ erreicht wird. Es ist jedoch offensichtlich, daß für das niedrige Gebäude generell ein Verhältnis von 0.8 nicht überschritten wird, während an den beiden höheren Gebäuden durchaus lokal Werte wie am Einzelgebäude bzw. wie für die Geländekategorie III ermittelt wurden. Für das Sicherheitsniveau an den hohen Gebäuden bedeutet dies, daß hier an manchen Stellen nur ein Sicherheitsindex β von maximal 2 erreicht wird.

Weiterhin ist hierzu anzumerken, daß die lokalen extremen Sogbeiwerte $c_{p,min}$ an der Seitenwand in der Reihenbebauung sowohl für den Fall $H/H_{Beb} = 2$, als auch für $H/H_{Beb} = 4$ teilweise deutlich über den Werten des Einzelgebäudes bzw. Kategorie III liegen (Abb. 5.15). Die Bauungsstrukturen $s/H_{Beb} = 1$ und $s/H_{Beb} = 3$ erfüllen jedoch die Voraussetzungen für die Anwendung der Geländekategorie IV. Insgesamt betrachtet, ist jedoch davon auszugehen, daß im Fall des Bauungstyps I (Reihenbebauung) durch die absolut konstante Höhe der umgebenden Bebauung (keinerlei Höhenvariabilität), sozusagen der "worst case" simuliert wurde. Die ermittelten Lasten in der Reihenbebauung werden für den Fall $H > H_{Beb}$ von der Bemessung nach Kategorie III abgedeckt.

Die lokalen extremen Druckbeiwerte $c_{p,max}$ an der Wand weisen für alle 3 untersuchten Gebäudehöhen in der Bebauung Werte auf, die genauso hoch sind wie am Einzelgebäude bzw. wie für die Kategorie III. Die Staudruckabminderung von Kategorie III nach IV zur Berechnung der lokalen Druckkräfte erscheint daher nicht sinnvoll. Auch die Naturmessungen (FZU, Meßpunkt W10, siehe Abb. 6.16 und Tab. 6.1) ergaben, daß lokal mit hohen Drucklasten zu rechnen, auch wenn durch die Bebauung die globalen Lasten und die Soglasten verringert werden.

Für die lokalen extremen Druckbeiwerte $c_{p,max}$ am Dach wurden am niedrigen Gebäude Werte ermittelt, die doppelt so hoch sind wie am Einzelgebäude. Für die beiden höheren Gebäude liegen die Werte in der Größenordnung der Bemessungswerte nach ENV 1991-2-4 (1994).

Fazit:

Zusammenfassend können folgende Schlußfolgerungen für die Anwendung der ENV 1991-2-4 auf bebaute Gebiete getroffen werden:

- Durch die Variation des Bemessungsstaudrucks werden die globalen Lasten sowohl an niedrigen ($H \leq H_{Beb}$) als auch an hohen Gebäuden ($H > H_{Beb}$) in bebauten Gebieten mit einem Sicherheitsindex von mindestens $\beta = 3$ erfaßt, vorausgesetzt, daß die Gebäudehöhe die Höhe der internen Grenzschicht nicht überschreitet.

- Die lokalen Soglasten sollten nur für den Fall ($H \leq H_{Beb}$) mit dem Staudruck nach Geländekategorie IV berechnet werden, um einen Sicherheitsindex von 3 zu gewährleisten. Für die Anwendung bei höheren Gebäude reduziert sich das Sicherheitsniveau auf $\beta = 2$.
- Die lokalen Drucklasten sollten generell auf der Basis von Geländekategorie III berechnet werden, da in den Modellversuchen keine Reduktion vom simulierten Referenzfall (Geländekategorie III) durch die Bebauung ermittelt wurde. Für den Fall ($H \leq H_{Beb}$) sollten die positiven Druckbeiwerte der Zone I am Dach um Faktor 2 erhöht werden, da für diesen Fall ein Erhöhung in dieser Größenordnung festgestellt wurde.
- Generell gelten die gemachten Aussagen für die lokalen Lastbeiwerte sowohl für die Teilflächengröße 1 m^2 als auch für 10 m^2 , da der Zusammenhang zwischen Teilflächengröße und Lastbeiwert, welcher in der ENV 1991-2-4 (1994) verankert ist, im wesentlichen sowohl durch die Windkanalversuche, als auch durch die Naturmessungen bestätigt werden konnte.

Insgesamt betrachtet kann anhand der ENV 1991-2-4 (1994) eine weitgehend wirtschaftliche Bemessung auf einem ausreichenden Sicherheitsniveau vorgenommen werden. Die o. g. Vorschläge sollten beachtet werden, da ansonsten das angestrebte Sicherheitsniveau von $\beta = 2.5 - 3$ unterschritten wird.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit vergleicht die winderzeugten Lasten in bebauten Gebieten anhand von Windkanaluntersuchungen und Naturmessungen mit den Bemessungsvorgaben der ENV 1991-2-4 (1994). Die Wirkung bebauter Gebiete wird in dieser Bemessungsvorschrift im Windprofil berücksichtigt, die Lastbeiwerte basieren jedoch auf Windkanalversuchen an Einzelbaukörpern. Hierbei stellt sich die Frage sowohl nach der Sicherheit als auch der Wirtschaftlichkeit dieses Ansatzes.

Durch systematische Untersuchungen im Windkanal an Einzelgebäuden und an Gebäuden eingebunden in unterschiedliche Bebauungsstrukturen wurde der Einfluß der Umgebungsbebauung auf die Lastbeiwerte bestimmt. Parallel hierzu wurden Messungen der winderzeugten Drücke an zwei Meßgebäuden in bebauter Umgebung in der Natur und am skalierten Modell dieser Gebäude im Windkanal durchgeführt, um die Übertragbarkeit der im Modell ermittelten Daten auf die Verhältnisse in Natur zu überprüfen. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen können wie folgt zusammengefaßt werden:

Die ausgewählten Meßgebäude der Windkanaluntersuchungen wurden zuerst als Einzelgebäude einer Anströmung ausgesetzt, welche in der ENV 1991-2-4 (1994) als typisch für eine Vorstadt bzw. Industriebebauung klassifiziert ist, ausgesetzt. Der Vergleich der Ergebnisse der globalen und lokalen Lasten zeigt hierbei gute Übereinstimmung mit Daten aus der Literatur und mit den Lastbeiwerten nach ENV 1991-2-4 (1994), wie sie sich für ein Gebiet dieser Rauigkeit ergeben. Im besonderen konnten die lokalen Kräfte durch die verwendete Druckmeßtechnik für Teilflächen unterschiedlicher Größe ermittelt werden. Auch diese zeigten eine gute Übereinstimmung mit den in der ENV 1991-2-4 (1994) gegebenen Beziehungen zwischen der Größe des Lastbeiwertes und der Größe der betrachteten Teilfläche. Die vereinfachte Methode nach COOK und MAYNE (1980) wurde modifiziert, um die lokalen Lastbeiwerte kompatibel für die Anwendung mit dem in der Bemessungsvorschrift vorgegebenen Staudruck zur Bestimmung 50-jährlicher Lasten berechnen zu können.

Stellvertretend für die Vielzahl möglicher Bebauungsstrukturen wurden 3 verschiedene Bebauungstypen untersucht, die als weitgehend repräsentativ für bebauten Gebiete angesehen werden können. Die Ergebnisse an den unterschiedlichen Meßgebäuden wurden den Ergebnissen der Einzelgebäude gegenübergestellt, um die Wirkung der Bebauung deutlich zu machen. Die Ergebnisse zeigen, daß nur bei geometrisch sehr einfachen Bebauungsstrukturen die Beziehung zwischen Lastgrößen und geometrischen Parametern wie beispielsweise dem Gebäudeabstand offenbar wird. Reale Strukturen, welche mehr oder weniger variable Gebäudeabstände und Gebäudehöhen aufweisen, verursachen eine hohe Variabilität der winderzeugten Lasten aufgrund vielfältiger Situationen im Nahbereich des Meßgebäudes, welche die Abhängigkeit von den geometrischen Kenngrößen der Gesamtstruktur überlagert. Eine Beschreibung der in bebauten Gebieten zu erwartenden Lasten ist daher nur auf der Basis stochastischer Sicherheitskonzepte, welche die Variabilität aller Eingangsgrößen berücksichtigen, sinnvoll.

Der Vergleich der winderzeugten Lasten in Natur und Modell an den untersuchten Testgebäuden zeigt, daß nicht nur bei den globalen Lasten, sondern auch bei den lokalen Extremwerten eine gute Übereinstimmung besteht, wenn die Betrachtung anhand statistischer Kenngrößen und der Zuweisung von Teilflächengrößen durchgeführt wird. Insgesamt wurde festgestellt, daß die globalen Lasten im Windkanal eher geringfügig überschätzt, während die lokalen Lasten eher geringfügig unterschätzt werden. Die Abweichungen wurden mit Hilfe eines Modellunsicherheitsfaktors bei der Zuverlässigkeitsanalyse berücksichtigt.

Stochastische Sicherheitskonzepte ermöglichen es Windlasten auf einem festgelegten Sicherheitsniveau zu spezifizieren. Diese Vorgehensweise bietet den Vorteil, daß sowohl dem Sicherheitsaspekt, als auch der Wirtschaftlichkeit Rechnung getragen wird. Mit Hilfe der Methode der zweiten Momente wurde zunächst bestimmt, welches Sicherheitsniveau im Fall der untersuchten Einzelgebäude einer Bemessung nach der ENV 1991-2-4 (1994) zugrunde liegen würde. Die Berechnungen ergaben in den meisten Fällen einen Sicherheitsindex β zwischen 2.5 und 3. Dies ist ein ausreichendes Sicherheitsniveau für Windlasten. Für das gleiche Sicherheitsniveau ($\beta = 3$) wurden die Lastbeiwerte für die bebauten Gebiete bestimmt. Aus der Abweichung zwischen dem Lastbeiwert am Einzelgebäude und am Gebäude im bebauten Gebiet auf dem gleichen Sicherheitsniveau ergibt sich dann der Einfluß der Bebauung, welcher direkt auf die Bemessungsvorschrift übertragen werden kann.

Die ENV 1991-2-4 (1994) spezifiziert für bebaute Gebiete zwei Kategorien (Kategorie III und IV) mit unterschiedlichen Bemessungsstaudrücken. Diese sind zum Teil erheblich kleiner als diejenigen der DIN 1055 Teil 4 (1986). Die Lastbeiwerte aus den Windkanalversuchen wurden kompatibel für die Verwendung in Verbindung mit dem Bemessungsstaudruck der Kategorie III bestimmt. Die untersuchten Gebiete entsprechen der Kategorie III und IV.

Für die globalen Lasten ergab sich, daß diese anhand der Vorgaben der ENV 1991-2-4 (1994) auf einem Sicherheitsniveau von mindestens $\beta = 3$ bemessen werden. Allerdings muß für den Fall $H > H_{Beb}$ gewährleistet sein, daß sich das Gebäude komplett innerhalb der internen Grenzschicht befindet.

Für die lokalen Lasten ergeben sich teilweise Unterschiede im Hinblick auf das Sicherheitsniveau. Es erscheint hier nicht ratsam, den Bebauungseinfluß durch eine pauschale Herabsetzung des Staudrucks für alle Gebäudeteilflächen und Lastarten einzubeziehen. Vorschläge zur Berücksichtigung der erzielten Ergebnisse, um für alle Flächen und Lastbeiwerte eine annähernd konstantes Sicherheitsniveau bei der Bemessung zu gewährleisten, wurden ausgearbeitet.

Insgesamt betrachtet, kann anhand der durchgeführten Untersuchungen die Schlußfolgerung getroffen werden, daß mit Hilfe der ENV 1991-2-4 (1994) eine weitgehend wirtschaftliche Bemessung auf einem ausreichenden Sicherheitsniveau vorgenommen werden kann. Die am Ende von Kapitel 7 zusammengefaßten Vorschläge sollten hierbei beachtet werden. Auf dieser Basis wird ein Sicherheitsniveau von $\beta = 2.5 - 3$ nicht unterschritten.

Die Anwendung eines Windprofils der Kategorie III und IV für Gebäude die höher sind als die Umgebung ($H > H_{Beb}$) wirft zwangsläufig die Frage nach der Entwicklung der internen Grenzschicht auf. Dies ist auch einer der Gründe für den Ansatz des Entwurfs zur neuen DIN 1055-4 (2001). Die Entwicklung der internen Grenzschicht hängt sowohl von der Rauigkeit vor dem bebauten Gebiet, als auch von der Rauigkeit des bebauten Gebietes selbst ab.

Hierzu besteht weiterer Untersuchungsbedarf, um beispielsweise ein maximale Anwendungshöhe der verminderten Bemessungsstaudrücke abhängig vom Abstand zum bebauten Gebiet festlegen zu können. Hierzu kommen jedoch nur Windkanäle mit ausreichender Länge der Meßstrecke und großem Querschnitt für eine ungestörte Entwicklung der Grenzschicht in Frage.

In diesem Zusammenhang sollte auch erwähnt werden, daß die durchgeführten Untersuchungen streng genommen auch vom Verhältnis der mittleren Bebauungshöhe H_{Beb} zur Grenzschicht der Anströmung vor dem modellierten bebauten Gebiet abhängig sind. HO (1992) stellte jedoch fest, daß die Windlasten in bebauten Gebieten nur geringfügig mit der Anströmung außerhalb des bebauten Gebiets variieren. Die gewählte Bebauungshöhe H_{Beb} kann als typisch für eine Vielzahl existierender Gebiete angesehen werden (siehe z. B. BADDE (1994), THEURER (1993)). Dennoch sollte im Zuge weiterer Untersuchungen überprüft werden in welchen Grenzen die vorliegenden Ergebnisse Gültigkeit besitzen.

Mit Hilfe des Druckmeßsystems, welches die fluktuierenden Drücke an 15 Punkten simultan erfassen kann, wurden die Lasten als Funktion der Fläche ermittelt. Für die globalen Lasten zur Bemessung der Tragstruktur konnten jedoch lediglich die zeitlich gemittelten Widerstandsbeiwerte C_D ermittelt werden, da die Anzahl der Druckaufnehmer für die simultane Erfassung der Druckverteilung am Gesamtgebäude nicht ausreicht. Um präzisere Aussagen hinsichtlich der fluktuierenden globalen Kräfte machen zu können, empfiehlt es sich ein System bestehend aus einer Vielzahl einzelner Druckaufnehmer verbunden mit einer A/D-Karte mit entsprechenden Eingangskapazitäten zu verwenden, um momentane effektive Druckverteilungen ermitteln zu können. Für die Maximalwerte einzelner Schnittgrößen können abhängig vom vorhandenen statischen System der Tragstruktur unterschiedliche momentane Druckverteilungen verantwortlich sein. Diese lassen sich nur mit Hilfe eines solchen Systems ermitteln.

Literaturverzeichnis

- Akins, R.E. und Peterka, J.A., (1977):** "Mean force and moment coefficients for buildings in turbulent boundary layers", Journal of Industrial Aerodynamics, Vol. 2, 195-209
- Bächlin, W. (1985):** "Belastung von Gebäuden durch den windinduzierten Innendruck", Dissertation, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, Heft Nr. 26
- Badde, O. und Plate, E. J. (1994):** "Einfluß verschiedener Bebauungsmuster auf die Parameter der Grenzschicht und die windinduzierte Gebäudebelastung", Abschlußkolloquium SFB 210, Universität Karlsruhe
- Bendat, J. und Piersol, A. G. (1980):** "Engineering applications of correlation and spectral analysis", John Wiley and Sons
- Bottema, M. (1993):** "Wind climate and urban geometry", Ph.D. Thesis, Eindhoven University of Technology, Niederlande
- Castro, I.P. und Robins, A.G., (1977):** "The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams" Journal of Fluid Mechanics, Vol. 79, Part 2, 307-335
- Cermak, J. E. (1982):** "Physical modelling of the atmospheric boundary layer (ABL) in long boundary layer wind tunnels (BLWT)", Proc. Int. Workshop of Wind Tunnel Modelling for Wind Engineering Applications, Gaithersburg, Maryland, USA
- Cook, N. J., (1985):** "The designer's guide to wind loading of building structures", Part 1, BRE, London, Butterworths
- Cook, N. J., (1990):** "The designer's guide to wind loading of building structures", Part 2, BRE, London, Butterworths
- Cook, N.J. und Mayne J.R. (1980):** "A refined working approach to the assessment of wind loads for equivalent static design", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 6, 125-137
- Corke, T.C. und Nagib, H.M. (1979):** "Wind loads on a building model in a family of surface layers", Journal of Industrial Aerodynamics, Vol. 5, 159-177
- Counihan, J. (1975):** "Adiabatic Atmospheric Boundary Layers: A review and analysis of data from the period 1880-1972", Atmospheric Environment, Vol. 9, S. 871-905
- Counihan, J., (1971):** "Wind tunnel determination of the roughness length as a function of the fetch and the roughness density of three-dimensional roughness elements", Atmospheric Environment, Vol. 5, 637-642

- Davenport, A. G. (1982):** "The interaction of wind and structures", in: Engineering meteorology - Chapter 12, pp 527-572, Editor E. J. Plate, Elsevier Scientific Publishing Company
- Davenport, A. G. (1983):** "On the assessment of the reliability of wind loading on low buildings", J. of Wind Eng. and Ind. Aerodyn., 11, pp 21-37
- DIN 1055 Teil 4 (1986):** "Lastannahmen für Bauten – Verkehrslasten, Windlasten bei nicht schwingungsanfälligen Bauwerken", Deutsche Norm, Normenausschuß Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V. , Beuth Verlag, Berlin
- DIN 1055 Teil 4 Entwurf (2001):** "Einwirkungen auf Tragwerke Teil 4 Windlasten", Deutsche Norm, Normenausschuß Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN 1055 Teil 100 (2001):** "Einwirkungen auf Tragwerke Teil 100 Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln", Deutsche Norm, Normenausschuß Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- Dyrbye, C. und Hansen, S. O. (1996):** "Wind loads on structures", John Wiley & Sons
- ENV 1991-2-4 (1994):** "Eurocode 1: Basis of design and actions on structures, Part 2-4: Wind actions", CEN, European Committee for Standardization
- ESDU 80003 (1980):** "Mean fluid forces and moments on rectangular prisms: surface-mounted structures in turbulent shear flow", Engineering Science Data Unit, London
- ESDU 85020 (1985):** "Characteristics of atmospheric turbulence near the ground; Part 2: Single point data for strong winds (neutral atmosphere)", Engineering Science Data Unit, London
- Friedrich, R., Plate, E.J. und Emeis, S. (1989):** "Gestörte atmosphärische Grenzschichten", Berichtsheft zum Kolloquium des SFB 210, SFB 210, Universität Karlsruhe
- Fürniß, J. (1991):** "Extreme Winddrücke auf quaderförmige Gebäude und exemplarische Abschätzung des Sicherheitsniveaus der entsprechenden Eurocode-Windlastspezifikationen", Diplomarbeit, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe
- Geurts C., Blackmore, P., Hansen, S. O., Hortmanns, M., Sedlacek, G., Spehl, P., van Staalduinen, P. und Zimmerli, B. (2001):** „Transparency of pressure and force coefficients“, „, Proceedings of the 3rd EACWE, Eindhoven University of Technology, 165-172

- Geurts, C. (1997):** "Wind-induced pressure fluctuations on building facades", Dissertation, Technische Universität Eindhoven, Niederlande
- Ho, T. C. E. (1992):** "Variability of low building wind loads", Dissertation, University of Western Ontario, London, Ontario
- Holmes, J. D. (1982):** "Comparison of model and full-scale tests of the Aylesbury House", Proc. Int. Workshop of Wind Tunnel Modelling for Wind Engineering Applications, Gaithersburg, Maryland, USA
- Holmes, J. D. (2001):** "Effective static wind loads –simplified code models and theoretical distributions", Proceedings of the 3rd EACWE, Eindhoven University of Technology, 5 -19
- Hosoya, N., Cermak, J. E. und Dodge, S. M. (1999):** "Area-averaged pressure fluctuations on surfaces at roof corners an gable peaks", Proceedings of the 10th International Conference on Wind Engineering, Copenhagen , Denmark, 1779-1785
- Hunt, A. (1982):** "Wind tunnel measurements of surface pressure on cubical building models at several scales", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 10, 137-163
- Hussain, M. und Lee, B. E.(1980):** "An investigation of wind forces on three dimensional roughness elements in a simulated atmospheric boudary layer flow", Part I - III, BS 55, BS 56, BS 57, Department of Building Science, Faculty of Architectural Studies, University of Sheffield
- Kareem, A. (1997):** "Correlation structure of random pressure fields", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 69-71, 507-516
- Kasperski, M. (2000):** "Festlegung und Normung von Entwurfswindlasten", Habilitationsschrift, Universität Bochum
- Kastner-Klein, P. (1999):** "Experimentelle Untersuchung der strömungsmechanischen Transportvorgänge in Straßenschluchten", Dissertation, Institut für Hydromechanik, Karlsruhe
- Kiefer, H. und Fuchs, P. (1998):** "Ein Interview mit Turbulenzen – Windkräfte an Bauwerken sicher erfassen, übertragen, auswerten und visualisieren", Elektronik Industrie, 4/98, Hüthig GmbH, Heidelberg/München
- Kiefer, H. und Plate, E. J., (1996):** Modellierung von Windkräften auf Bauwerke in bebautem Gelände, Forschungsbericht an die DFG, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe

- Lawson, T., V. (1980):** „Wind effects on buildings“, Applied Science Publishers
- Lieblein, J. (1974):** "Efficient methods of extreme-value methodology", Final Report, Statistik Extremwertanalyse, 1-24
- Lin, J.-X., Surry, D. und Tieleman, H.W. (1995):** "The distribution of pressure near roof corners of flat roof low buildings", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 56, 235-265
- Morris, H. (1955):** "Flow in rough conduits", ASCE, Transactions, Vol. 120, pp.373-398
- Newberry, C. W., Eaton, K. J, und Mayne, J. R. (1973):** “Wind loading on tall buildings – further results from Royex House“, Industrial Aerodynamics Abstracts, Vol. 4, pp 1-16
- Panofsky, H. A. und Dutton, J. A. (1984):** “Atmospheric turbulence - Models and methods for engineering applications“, John Wiley & Sons
- Pernpeintner, A. (1989):** “Windlasten an prismatischen Gebäuden – Ergebnisse aus einem Feldversuch“, in: Windlasten auf Bauwerke, Berichtsheft zum Kolloquium des SFB 210 am 7.Oktober 1988, Universität Karlsruhe
- Plate, E. J. (1982):** “Engineering meteorology - Chapter 13: Wind tunnel modelling of wind effects on structures in engineering“, S.573-639 Elsevier Scientific Publishing Comapany
- Plate, E. J. (1993):** “Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure“, Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- Robins, A.G. (1979):** "Development and structure of simulated neutrally stable atmospheric boundary layers", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 4, 71-100
- Robins, A.G. (1979):** "Development and structure of simulated neutrally stable atmospheric boundary layers", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 4, 71-100
- Röckle, R. (1990):** "Bestimmung der Strömungsverhältnisse im Bereich komplexer Bebauungsstrukturen", Dissertation, Fachbereich Mechanik, D17, TH Darmstadt
- Rodi, W. (1997):** “Comparison of LES and RANS calculations of the flow around bluff bodies“, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 69-71, 55-75
- Rotach, M. W. (1995):** “Profiles of turbulence statistics in and above an urban street canyon“, Atmospheric environment, Vol. 29, 1473-1486

- Ruscheweyh, H. (1982):** "Dynamische Windwirkung an Bauwerken", Bauverlag GmbH
- Schueller, G. I. (1981):** "Einführung in die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Tragwerken", Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- Simiu, E. und Scanlan, R.H. (1985):** "Wind effects on structures: An introduction to wind engineering", John Wiley & Sons
- Smith, D. A. (1993):** "Stochastic analysis of wind data; dissertation in civil engineering, Graduate Faculty", Texas Tech University
- Socket, H. (1984):** "Aerodynamik der Bauwerke", Vieweg Verlagsgemeinschaft, Braunschweig
- Stathopoulos, T., Surry, D. und Davenport, A. G. (1980):** "A simplified Model of wind pressure coefficients for low-rise buildings", 4th Colloquium on Industrial Aerodynamics, Part1, Aachen, 17-31
- Stathopoulos, T., Surry, D. und Davenport, A. G. (1981):** "Effective wind loads on flat roofs", Journal of Structural Division, 281-298
- Surry, D., Djakovich (1995):** Fluctuating pressures on models of tall buildings, J. of Wind Eng. and Ind. Aerodyn., 58, pp 81-112
- Theurer, W. (1993):** "Ausbreitung bodennaher Emissionen in komplexen Bebauungen", Dissertation, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Heft 45, Universität Karlsruhe, Karlsruhe
- Wacker, J (1994):** "Towards reliability-based local design wind pressures for simple rectangularly-shaped ", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 53, 157-175
- Wacker, J. (1991):** Datensammlung der in Windkanalversuchen gemessenen Windaußendrucke auf quaderförmige Gebäude in naturähnlichen Grenzschichtströmungen, Sonderforschungsbereich 210, Universität Karlsruhe, Karlsruhe
- Wacker, J. und Plate, E.J. (1992):** "Correlation structure of wind pressure buffeting on cuboidal buildings and corresponding effective area wind loads", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 41-44, 1865-1876
- Wacker, J., Bächlin, W. und Plate, E.J. (1989):** "Aerodynamische Untersuchung komplexer Bauformen im Windkanal zur Ermittlung der Windlasten in: Windlasten auf Bauwerke, Berichtsheft zum Kolloquium des SFB 210 am 7.Oktober 1988, Universität Karlsruhe

- Wacker, J., Friedrich, R., Plate und E.J., Dorsch, F. (1988):** "Drag and lift on rectangular bluff bodies immersed in deep boundary layer flow over rough surfaces", Journal of Wind Engineering, Vol. 37, 371-380
- Walker, G. und Roy, R. (1985):** "Wind loads on houses in an urban environment", Proceedings of the Asia Pacific Symposium on Wind Engineering, Roorkee, Indien, 189-195
- Wieringa, J. (1991):** "Updating the Davenport roughness classification", 8th Int. Conf. on Wind Engineering, London; Ontario; Canada; July 1991
- WTG (1993):** "Windkanalversuche in der Gebäudeaerodynamik" Merkblatt der Windtechnologischen Gesellschaft (WTG), Entwurf, Aachen
- Zierep, J. (1990):** "Grundzüge der Strömungslehre"; Braun (Wissenschaft und Technik: Taschenausgaben)
- Zuranski, Z. A. (1978):** "Windbelastung von Bauwerken und Konstruktionen", Verlagsgesellschaft Rudolf Möller, Köln-Braunsfeld

Symbolverzeichnis

\bar{x}	Mittelwert der Größe x
x'	Fluktuierender, zeitlich veränderlicher Anteil der Größe x : $x'(t) = x(t) - \bar{x}$
$1/a$	Dispersion der FT1-Verteilung
A	Fläche [m ²]
a	Regressionskoeffizient zwischen Lastbeiwert ohne und mit Bebauung
B	Gebäudebreite [m]
c_e	Ausgesetztheitsgrad (Exposure coefficient)
c_f	Kraftbeiwert einer Teilfläche
c_p	Druckbeiwert
$c_{p,min}$	lokaler extremer Sogbeiwert berechnet nach der Cook-Mayne-Methode
$c_{p,mean}$	Mittelwert des Druckbeiwertes
$c_{p,max}$	lokaler extremer Druckbeiwert berechnet nach der Cook-Mayne-Methode
$c_{p,rms}$	Standardabweichung des Druckbeiwertes
C_D	Widerstandsbeiwert eines gesamten Baukörpers in Hauptströmungsrichtung
C_F	Kraftbeiwert eines gesamten Baukörpers bezogen auf ein körperfestes Koordinatensystem
C_M	Momentenbeiwert eines gesamten Baukörpers
d_0	Nullhöhenversatz [m]
f	Frequenz [Hz]
F	Kraft [kN]
G	Böenfaktor
H	Gebäudehöhe [m]
H_{Beb}	mittlere Gebäudehöhe der Bebauung [m]
I_u	Turbulenzintensität der Geschwindigkeitskomponente u
k	Spitzenfaktor
K	Abnahmekonstante der Kohärenzfunktion ("Equivalent steady gust model")
l	Prandtl'scher Mischungsweg (in Kapitel 2)
l	Bauteilgröße im Zusammenhang mit der TVL-Formel [m]
L	Belastung (Load) im Zusammenhang mit der Zuverlässigkeitstheorie
L	Gebäudelänge [m]
L_{ux}	Integrales Längenmaß der Geschwindigkeitskomponente u in Hauptströmungsrichtung x [m]
m	Maßstab
M	Moment [kNm]
M	Rang eines Wertes (Extremwertstatistik)
N	Werteanzahl (Extremwertstatistik)
p	Druck [kN/m ²]
P	Wahrscheinlichkeit
q	Staudruck [kN/m ²]

r	Korrelationskoeffizient
R	Belastbarkeit (Resistance) im Zusammenhang mit der Zuverlässigkeitstheorie
Re	Reynoldszahl
R_{uu}	Autokorrelationskoeffizient der Geschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung
s	Abstand zwischen Nachbargebäuden in Strömungsrichtung [m]
S	Sicherheitsabstand im Zusammenhang mit der Zuverlässigkeitstheorie
S_{cp}	Spektrale Dichte des Druckbeiwertes c_p
S_u	Spektrale Dichte der Geschwindigkeitskomponente u
t	Zeit [s]
T	Zeitabschnitt [s]
u	Geschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung x [m/s]
U	Mode-Wert der FT1-Verteilung
u_*	Schubspannungsgeschwindigkeit [m/s]
u'	Schwankungsanteil der Geschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung [m/s]
v	Geschwindigkeit in lateraler Richtung y [m/s]
V	Variationskoeffizient im Zusammenhang mit der Zuverlässigkeitstheorie
V	Geschwindigkeitsvektor
w	Geschwindigkeit in vertikaler Richtung z [m/s]
W	Windlast [kN/m ²]
x	dimensionslose Last im Zusammenhang mit der Cook-Mayne-Methode
x	Koordinate in Hauptströmungsrichtung [m]
y	“Reduced variate“ der FT1-Verteilung im Zusammenhang mit der Cook-Mayne-Methode
y	Koordinate in lateraler Richtung [m]
z	Koordinate in vertikaler Richtung [m]
z_0	Rauhigkeitslänge [m]
α	Profilexponent
β	Sicherheitsindex
Δa	Verhältnis von größerem zu kleinerem Abstand zwischen den Gebäuden [m]
Δx	Abstand in Hauptströmungsrichtung [m]
δ	Grenzschichtdicke [m]
ϕ_B	Versperr- bzw. Verbaugrad
γ	Kohärenz
κ	Karman-Konstante ~ 0.4
λ_{ob}	Bebauungsgrad (Verhältnis der überbauten Fläche zur Gesamtfläche)
λ_{ff}	Frontflächenzahl (Verhältnis der zur Anströmung senkrechten Fläche zur gesamten betrachteten Fläche)
μ	Modellunsicherheitsfaktor

ν	kinematische Zähigkeit der Luft ($1.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ bei 20°C , Atmosphärendruck)
ρ	Dichte der Luft [kg/m^3]
σ_x	Standardabweichung der Größe x bzw. RMS-Wert (vom englischen Root-Mean-Square) der Größe x'
σ_x^2	Varianz der Größe x
τ	Schubspannung
τ_p	partieller Sicherheitsbeiwert im Zusammenhang mit der Zuverlässigkeitstheorie

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Windlastkette nach Davenport	1
Abb. 2.1	Aufbau der atmosphärischen Grenzschicht über bebautem Gebiet	6
Abb. 2.2	Typisches Turbulenzspektrum	10
Abb. 2.3	Longitudinales Geschwindigkeitsspektrum nach van der Hooft (aus RUSCHEWEYH (1982))	11
Abb. 2.4	Umströmung eines Baukörpers (aus ZURANSKI (1978))	12
Abb. 2.5	Verteilung der $c_{p,mean}$ -Werte an der Frontseite und dem Dach eines kubischen Körpers (aus COOK (1985)), (a) gleichförmige Strömung, (b) Grenzschichtströmung	13
Abb. 2.6	Strömung und $c_{p,mean}$ -Werte am Dach bei Schräganströmung (COOK (1985)).	14
Abb. 2.7	Typischer Meßschrieb der Windgeschwindigkeit und des Drucks am Meßgebäude (Eckbereich Flachdach) in Natur.	15
Abb. 2.8	Geometrische Ähnlichkeit in Natur und Modell	16
Abb. 2.9	Windlastprozess (aus ZURANSKI (1978))	20
Abb. 2.10	Aerodynamische Admittanz für verschiedene Platten	20
Abb. 2.11	Kohärenz der Druckschwankungen am Royex-Gebäude (NEWBERRY ET AL (1973))	24
Abb. 2.12	a) Zweidimensionale Häufigkeitsverteilung der extremen Windgeschwindigkeiten und Lastbeiwerte der jährlich stärksten Sturmstunden, hier $\bar{u} = v$, b) Zweidimensionale Häufigkeitsverteilung der extremen Windgeschwindigkeiten und Lastbeiwerte der jährlich stärksten und zweitstärksten Sturmstunden	27
Abb. 2.13	Abhängigkeit der Last x von der Anzahl der einbezogenen stärksten Sturmstunden (a) und von den Parametern aU_c und aU_v (b).	30
Abb. 2.14	Dynamischer Beiwert c_d für Beton- und Mauerwerksgebäude	31
Abb. 2.15	“Exposure coefficient“ c_e als Funktion der Höhe und der Geländekategorie	33
Abb. 2.16	Definition der Bezugshöhe z	34
Abb. 2.17	Definition der Lastzonen an vertikalen Seitenwänden	34
Abb. 2.18	Definition der Lastzonen an Flachdächern	35
Abb. 2.19	Strömungszustände in bebauten Gebieten	38
Abb. 2.20	Abhängigkeit der $c_{p,mean}$ - und C_D -Werte vom Gebäudeabstand (hier: x/H) und der überbauten Fläche $\lambda_{üb}$ (hier: plan area density a) und Abgrenzung der Strömungsregime nach Hussain und Lee (aus COOK (1990))	40
Abb. 2.21	Zur Definition des Sicherheitsabstandes und seiner Verteilung	43
Abb. 2.22	Statistische Größen der Windlastbestimmung	45
Abb. 3.1	Grenzschichtwindkanal (Windwellengerät des ehemaligen IHW)	47
Abb. 3.2	Modellierte Anströmung im Windkanal	48
Abb. 3.3	Verlauf des integralen Längenmaßes L_{ux} über die Höhe	48
Abb. 3.4	Vergleich des Geschwindigkeitsspektrums der modellierten Anströmung mit dem Karman-Spektrum	49
Abb. 3.5	Versuchsaufbau im Windkanal	50
Abb. 3.6	Untersuchte Bebauungsstrukturen im Windkanalmodell	54
Abb. 3.7	Lage der Testgebäude am nördlichen Stadtrand von Karlsruhe	56

Abb. 3.8	Nähere Umgebung der Testgebäude	57
Abb. 3.9	Grundriß der Meßgebäude	57
Abb. 3.10	Ansicht AVG Westseite	58
Abb. 3.11	Windrose der Station Karlsruhe Nordwest (1992-1998), LFU BADEN WÜRTTEMBERG (2001)	58
Abb. 3.12	Meßpunkte an den Testgebäuden für die Naturmessungen, Draufsicht, Seitenwände "hochgeklappt"	60
Abb. 3.13	Aufbau einer Druckmeßstelle für die Naturmessungen	61
Abb. 3.14	Definition der Referenzgeschwindigkeit für die Berechnung der Druckbeiwerte c_p	62
Abb. 3.15	Anpassung der FT1-Verteilung an die Bemessungsgeschwindigkeiten des Eurocode	63
Abb. 3.16	Variationsbreite der FT-1-Parameter für die Druckbeiwerte an den Einzelgebäuden	64
Abb. 3.17	Simulationsergebnisse für $aU_v = 12$	65
Abb. 3.18	a) Relative Häufigkeit der charakteristischen Produkte aU_c b) Summenhäufigkeit der charakteristischen Produkte aU_c sowie $y_c = f(aU_c)$ für $aU_v = 12$ und $y_v = 3.9$	65
Abb. 4.1	Definition der Anströmrichtungen für Isolinien Darstellungen	69
Abb. 4.2:	$c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ - Werte, Seitenwände, Modellserie K ($B, L = 16$ m) (a) $H = 16$ m und (b) $H = 64$ m	70
Abb. 4.3:	$c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ - Werte, kurze Seitenwände, Modellserie P ($B = 16$ m, $L = 53$ m) a) $H = 16$ m und (b) $H = 64$ m	72
Abb. 4.4:	$c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ - Werte, lange Seitenwände, Modellserie P ($B = 16$ m, $L = 53$ m) (a) $H = 16$ m und (b) $H = 64$ m	73
Abb. 4.5	$c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ - Werte an den Dachflächen der Modellserie K; $L = B = 16$ m	74
Abb. 4.6	$c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ - Werte an den Dachflächen der Modellserie P; $B = 16$ m, $L = 53$ m	75
Abb. 4.7	Vergleich der $c_{p,mean}$ -Werte von Modell K1 entlang charakteristischer Vertikal- und Horizontalschnitte mit Daten aus der Literatur	78
Abb. 4.8	Definition der Windrichtungen, Kräfte und Momente	80
Abb. 4.9	Vergleich der Kraftbeiwerte C_F in Richtung der Körperachsen (bezogen auf \bar{u}_a) mit den Ergebnissen von Akins et al. (1977); a) $B/L = 1$, b) $B/L = 0.25$	82
Abb. 4.10:	Abhängigkeit der $c_{p,min}$ -Werte von der betrachteten Bauwerksfläche	88
Abb. 4.11:	Abhängigkeit der $c_{p,min}$ -Werte von der Größe der Teilfläche am Dach	89
Abb. 4.12:	Vergleich der $c_{p,min}$ -Werte mit den Bemessungswerten nach ENV 1991-2-4 (1994), Seitenwände P1-, P2-, P3-Gebäude, parallele Anströmung $\pm 45^\circ$	92
Abb. 4.13	Vergleich der $c_{p,max}$ -Werte mit den Bemessungswerten nach ENV 1991-2-4 (1994), Seitenwände P1-, P2-, P3-Gebäude, frontale Anströmung und schräge Anströmung	94
Abb. 4.14:	Vergleich der $c_{p,min}$ -Werte mit den Bemessungswerten nach ENV 1991-2-4 (1994), Dachflächen aller Meßgebäude	96
Abb. 4.15:	Vergleich der $c_{p,min}$ -Werte an der Dachfläche von Gebäude P1 ($H = 16$ m) für die Windrichtung 0° mit den Bemessungswerten nach ENV 1991-2-4 (1994)	97
Abb. 4.16	Vergleich der lokalen Druckmaxima ($c_{p,max}$ -Werte) an den Dachflächen mit den Bemessungswerten nach ENV 1991-2-4 (1994)	98
Abb. 4.17:	Abhängigkeit der $c_{p,min}$ -Werte von der Fläche für Wandflächen im Sogbereich (parallele Anströmung)	99
Abb. 4.18	Abhängigkeit der $c_{p,max}$ -Werte von der Fläche für Wandflächen im Druckbereich (frontale Anströmung)	100

Abb. 4.19	Abhängigkeit der $c_{p,min}$ -Werte von der Fläche für Dachflächen, für Zone F, G und H	101
Abb. 4.20	Abhängigkeit der $c_{p,max}$ -Werte von der Fläche für Dachflächen im Bereich der Zone I, Windrichtung 0°	101
Abb. 5.1	Verlauf der $c_{p,mean}$ -Werte an Vorder- und Rückseite des Testgebäudes P1 in reihenförmiger Bebauung, $H/H_{Beb} = 1$	104
Abb. 5.2	Verlauf der $c_{p,mean}$ -Werte an Vorder- und Rückseite des Testgebäudes P2 in reihenförmiger Bebauung, $H/H_{Beb} = 2$	105
Abb. 5.3	Verlauf der $c_{p,mean}$ -Werte an Vorder- und Rückseite des Testgebäudes P3 in reihenförmiger Bebauung, $H/H_{Beb} = 4$	105
Abb. 5.4	Vergleich der $c_{p,mean}$ -Werte an der langen Seitenwand bei frontaler Anströmung für unterschiedliche Bebauungsstrukturen	107
Abb. 5.5	Vergleich der $c_{p,rms}$ -Werte an der langen Seitenwand bei frontaler Anströmung 0° , (Luvseite)	109
Abb. 5.6	Vergleich der $c_{p,mean}$ -Werte an der kurzen Seitenwand bei paralleler Ausrichtung zum Wind (Windrichtung 90°)	112
Abb. 5.7	Vergleich der $c_{p,rms}$ -Werte an der kurzen Seitenwand bei paralleler Ausrichtung zum Wind (Windrichtung 90°)	114
Abb. 5.8	Vergleich der $c_{p,mean}$ -Werte an der Dachfläche bei Schräganströmung (45°)	117
Abb. 5.9	Vergleich der $c_{p,rms}$ -Werte an der Dachfläche bei Schräganströmung (45°)	118
Abb. 5.10	Flächengemittelte $c_{p,mean}$ -Werte für unterschiedliche Anströmrichtungen, bei den Seitenwänden entspricht 0° einer Anströmrichtung senkrecht von vorne (Luvseite), bei den Dachflächen wird bei 0° die kurze Seite senkrecht angeströmt.	120
Abb. 5.11	Verhältnis der Widerstandsbeiwerte C_D (definiert nach Gl. 4.6) am Testgebäude P1 ($H=16$ m) in bebautem Gebiet zum Wert am Einzelgebäude für die Anströmrichtung 90° (senkrecht auf lange Seitenwand), $H/H_{Beb} = 1$	122
Abb. 5.12	Verhältnis der Widerstandsbeiwerte C_D (definiert nach Gl. 4.6) am Testgebäude P2 ($H=32$ m) in bebautem Gebiet zum Wert am Einzelgebäude für die Anströmrichtung 90° (senkrecht auf lange Seitenwand), $H/H_{Beb} = 2$	123
Abb. 5.13	Verhältnis der Widerstandsbeiwerte C_D (definiert nach Gl. 4.6) am Testgebäude P3 ($H = 64$ m) in bebautem Gebiet zum Wert am Einzelgebäude für die Anströmrichtung 90° (senkrecht auf lange Seitenwand), $H/H_{Beb} = 4$	123
Abb. 5.14	Momentenbeiwerte ohne und mit Umgebungsbebauung	125
Abb. 5.15	Vergleich der $c_{p,min}$ -Werte an der kurzen Seitenwand bei paralleler Ausrichtung zum Wind (90°)	127
Abb. 5.16	Vergleich der $c_{p,max}$ -Werte an der langen Seitenwand bei frontaler Anströmung (0°)	129
Abb. 5.17	Vergleich der $c_{p,min}$ -Werte an der Dachfläche bei schräger Anströmung (45°)	132
Abb. 5.18	Vergleich der $c_{p,max}$ -Werte an der Dachfläche bei einer Anströmung senkrecht zur kurzen Seite (0°)	133
Abb. 5.19	Abhängigkeit der $c_{p,min}$ -Werte von der Flächengröße für Lastzonen A* und B* an Seitenwänden	135
Abb. 5.20	Abhängigkeit der $c_{p,max}$ -Werte von der Flächengröße für Lastzonen D an Seitenwänden	136
Abb. 5.21	Abhängigkeit der $c_{p,min}$ -Werte von der Flächengröße für Lastzonen F, G und H an Flachdächern	137
Abb. 5.22	Abhängigkeit der $c_{p,max}$ -Werte von der Flächengröße für Lastzonen I an Flachdächern	137
Abb. 5.23	Profile der mittleren Geschwindigkeit \bar{u} in den untersuchten Bebauungsstrukturen, Symbole stellen die Meßwerte dar, Linien entsprechen dem angepaßten Logarithmischen Profil	140
Abb. 5.24	Vertikalprofile der Turbulenzintensität I_u innerhalb der bebauten Gebiete	142

Abb. 5.25:	Zusammenhang zwischen Frontflächenzahl λ_{ff} und Rauigkeitslänge z_0 nach Theurer (1993), ergänzt durch weitere Literaturdaten und eigene Windkanalmessungen	143
Abb. 6.1	Windgeschwindigkeiten Januar/2000 bis März/2001 (Meßstation Physik-Hochhaus Universität Karlsruhe)	151
Abb. 6.2	Selektion der Meßreihen	152
Abb. 6.3	Vergleich der zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten am Physik- und FZU-Gebäude für alle Meßreihen für a) 230° und b) 220°	154
Abb. 6.4	Profil der mittleren Geschwindigkeit und der Turbulenzintensität über die Höhe, Windrichtung 230°	154
Abb. 6.5	Spektrale Dichte der Geschwindigkeitsfluktuationen in Modell und Natur	155
Abb. 6.6	Vergleich $c_{p,mean}$ -Werte Natur –Modell, Korrektur des Referenzdruckes bei den Naturmessungen	156
Abb. 6.7	Lage der ausgewählten Druckmeßpunkte	157
Abb. 6.8	Vergleich der mittleren Druckbeiwerte $c_{p,mean}$ in Natur und Modell	158
Abb. 6.9	Vergleich der fluktuierenden Druckbeiwerte $c_{p,rms}$ in Natur und Modell	160
Abb. 6.10	$c_{p,mean}$ -Werte gemittelt über die Höhe, Richtungssektor 230° ± 5°	161
Abb. 6.11	Spektrale Dichte der Druckfluktuationen in Natur und Modell, Windrichtung 230° ± 5°	163
Abb. 6.12	Position der Druckmeßstellen im Eckbereich des FZU-Daches	166
Abb. 6.13	Lokale Sogmaxima $c_{p,min}$ als Funktion der Größe der betrachteten Teilfläche am Dach des FZU-Gebäudes in Natur und Modell	167
Abb. 6.14	Lokale Sogmaxima $c_{p,min}$ am Meßpunkt D1 in Natur für unterschiedliche Mittelungszeiten	168
Abb. 6.15	Lokale Druckmaxima $c_{p,max}$ für unterschiedliche Flächengrößen an der Westfassade des AVG-Gebäude, ausgehend von Meßpunkt W12, Windrichtung 230° ± 5°	169
Abb. 6.16	Extremwertverteilungen der Druckbeiwerte für einige Meßpunkte in Natur und Modell bezogen auf eine Fläche von 1 m ² , Windrichtung 230° ± 5°	171
Abb. 6.17	Vergleich der $c_{p,min}$ - und $c_{p,max}$ -Werte bezogen auf 1 m ² in Natur und Modell für unterschiedliche Windrichtungen	173
Abb. 7.1	Statistische Verteilung der Bemessungswindgeschwindigkeit (Davenport (1983))	178
Abb. 7.2	Abhängigkeit des $C_{D,smr}$ -Wertes des niedrigen Gebäudes in der Bebauung vom mittleren Wert $\overline{C_D}$ für $\sigma_{CD} = 0.14$	186
Abb. 7.3	Vergleich der lokalen Soglasten bezogen auf 1 m ² berechnet nach der SMR-Methode am Einzelgebäude und in bebauten Gebieten	188
Abb. 7.5	Vergleich der lokalen Drucklasten bezogen auf 1 m ² berechnet nach der SMR-Methode am Einzelgebäude und in bebauten Gebieten	189

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Abnahmekonstanten K der horizontalen und vertikalen Druckkohärenzen am Royex-Gebäude (NEWBERRY ET AL (1973))	24
Tab. 2.2:	Geländekategorien mit entsprechenden Rauigkeitsparametern	33
Tab. 2.3	Externe Druckbeiwerte für vertikale Wände von Gebäuden mit rechteckigem Grundriß (nach EC1 (1994))	35
Tab. 2.4	Externe Druckbeiwerte für Flachdächer (nach EC1 (1994))	35
Tab. 2.5	Rauigkeitslänge z_0 in bebauten Gebieten, Angaben in [m]	37
Tab. 2.6	Definitionen der Stömungsregime (aus BADDE (1994))	39
Tab. 2.7	Charakteristische Stadtstrukturen und ihre zugehörigen geometrischen Kenngrößen (nach BADDE (1994))	42
Tab. 3.1	Meßgebäude der Windkanaluntersuchungen (Angaben in Naturmaßen)	52
Tab. 3.2	Geometrische Kenngrößen der untersuchten Bebauungsstrukturen	54
Tab. 4.1	Grenzschichtparameter der verglichenen Untersuchungen	77
Tab. 4.2:	Vergleich lokaler Sogmaxima am Dach würfelförmiger Gebäude	78
Tab. 4.3	Vergleich der Momentenbeiwerte C_M (bezogen auf \bar{u}_a) mit den Ergebnissen von Akins et al (1977)	83
Tab. 4.4	Vergleich der Widerstandsbeiwerte C_D (bezogen auf \bar{u}_H) mit Daten aus der Literatur	84
Tab. 4.5	Verhältnis der Hebelarme zur Gebäudehöhe z_f/H – Vergleich mit Literaturdaten	85
Tab. 4.6:	Böenfaktoren nach ENV 1991-2-4 (1994)	86
Tab. 5.1	Vergleich der aus den Messungen ermittelten Widerstandsbeiwerte $C_{D,Beb.}/C_{D,Einzelgeb}$ mit $(H-d_0)/H$	124
Tab. 5.2	Parameter des logarithmischen Geschwindigkeitsprofils der untersuchten bebauten Gebiete, Dimensionen im Naturmaßstab, u_{ref} (im Sinne der ENV 1991-2-4) = 28 m/s; $\bar{u}_{natur} / \bar{u}_{modell} = 3.54$	140
Tab. 5.3	Verhältnis der Geschwindigkeiten in Bebauung und der ungestörten Anströmung $(\bar{u}_{mitBeb.}(H) / \bar{u}_{ohneBeb}(H))^2$	144
Tab. 5.4	Regressionskoeffizient a und Korrelationskoeffizient r der $c_{p,mean}$ - und $c_{p,rms}$ -Werte an der Luvseite zwischen dem Einzelgebäude und dem selben Gebäude in bebautem Gebiet	144
Tab. 5.5	Verhältnis des Geschwindigkeitsfaktors zum Faktor a der Druckmessungen $(\bar{u}_{mitBeb.}(H) / \bar{u}_{ohneBeb}(H))^2/a$	145
Tab. 5.6	Mittelwert \bar{c}_p und Standardabweichung σ_{cp} aus den Untersuchungen im Industriegebiet, Maxima bzw. Minima für die jeweilige Teilfläche	147
Tab. 5.7	Mittelwert \bar{c}_D und Standardabweichung σ_{CD} aus den Untersuchungen im Industriegebiet	148
Tab. 6.1	Verhältnis der extremen lokalen Druckbeiwerte in Natur und Modell, statistische Kenngrößen	175

Tab. 7.1	Eingangsgrößen für die Zuverlässigkeitsanalyse und Vergleich mit Werten aus der Literatur	182
Tab. 7.2	Vorhandener Sicherheitsindex β für die Lastzonen der Dachflächen	183
Tab. 7.3	Vorhandener Sicherheitsindex β für die Lastzonen der Wandflächen	184
Tab. 7.4	Widerstandsbeiwerte C_D in bebauten Gebieten basierend auf der SMR-Methode ($\beta=3$)	185
Tab. 7.5	Einstufung der Geländekategorie nach ENV 1991-2-4 (1994)	190
Tab. 7.6	Verhältnis $c_{e,IV}/c_{e,III}$ zur Umrechnung der Windkanalergebnisse auf Kategorie IV	191

Anhang

1. Testgebäude

Abb. A.1 Modellserie K, Lage der Meßpunkte

Abb. A.2 Modellserie P, Gebäude P1 (H = 16 m) Lage der Meßpunkte

Abb. A.3 Modellserie P, Gebäude P2 (H = 32 m) Lage der Meßpunkte

Abb. A.4 Modellserie P, Gebäude P3 (H = 64 m) Lage der Meßpunkte

2. Umgebungsmodelle

Typ I – Reihenbebauung:

Abb. A.5 Typ I – Reihenbebauung (nur Ausrichtung 90°, lange Seite frontal zum Wind dargestellt)

Typ II – Industriebebauung:

Abb. A.6 Typ II – Industriebebauung

Abb. A.7 Typ II – Industriebebauung BASF45° - Ausrichtung Kernmodell 0°

Abb. A.8 Typ II – Industriebebauung BASF45° - Ausrichtung Kernmodell 45°

Abb. A.9 Typ II – Industriebebauung BASF45° - Ausrichtung Kernmodell 90°

Abb. A.10 Typ II – Industriebebauung BASF45° - Ausrichtung Kernmodell 135°

Abb. A.11 Typ II – Industriebebauung BASF45° - Ausrichtung Kernmodell 180°

Abb. A.12 Typ II – Industriebebauung BASF45° - Ausrichtung Kernmodell 225°

Abb. A.13 Typ II – Industriebebauung BASF45° - Ausrichtung Kernmodell 270°

Abb. A.14 Typ II – Industriebebauung BASF45° - Ausrichtung Kernmodell 315°

Typ III – Blockrandbebauung:

Abb. A.15 Typ III – Blockrandbebauung

1. Testgebäude

Modellserie K (M 1:400)

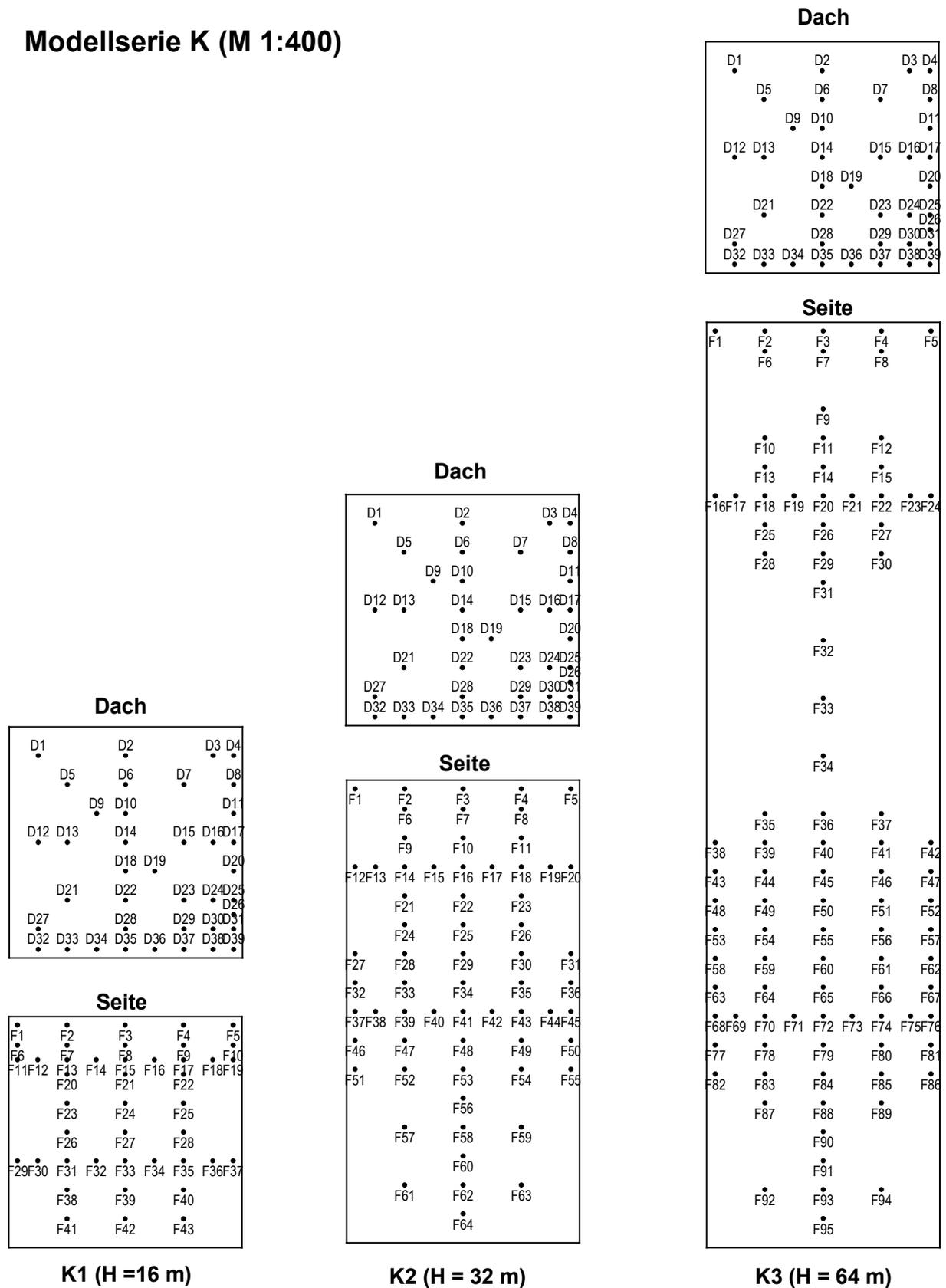


Abb. A.1 Modellserie K, Lage der Meßpunkte

Modellserie P - Geb. P1, H = 16 m (M 1:600)

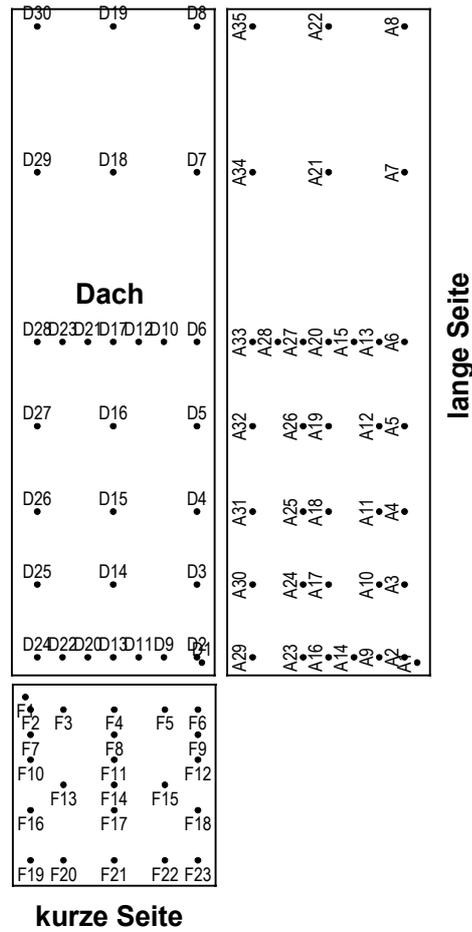


Abb. A.2 Modellserie P, Gebäude P1 (H = 16 m) Lage der Meßpunkte

Modellserie P - Geb. P2, H = 32 m (M 1:600)

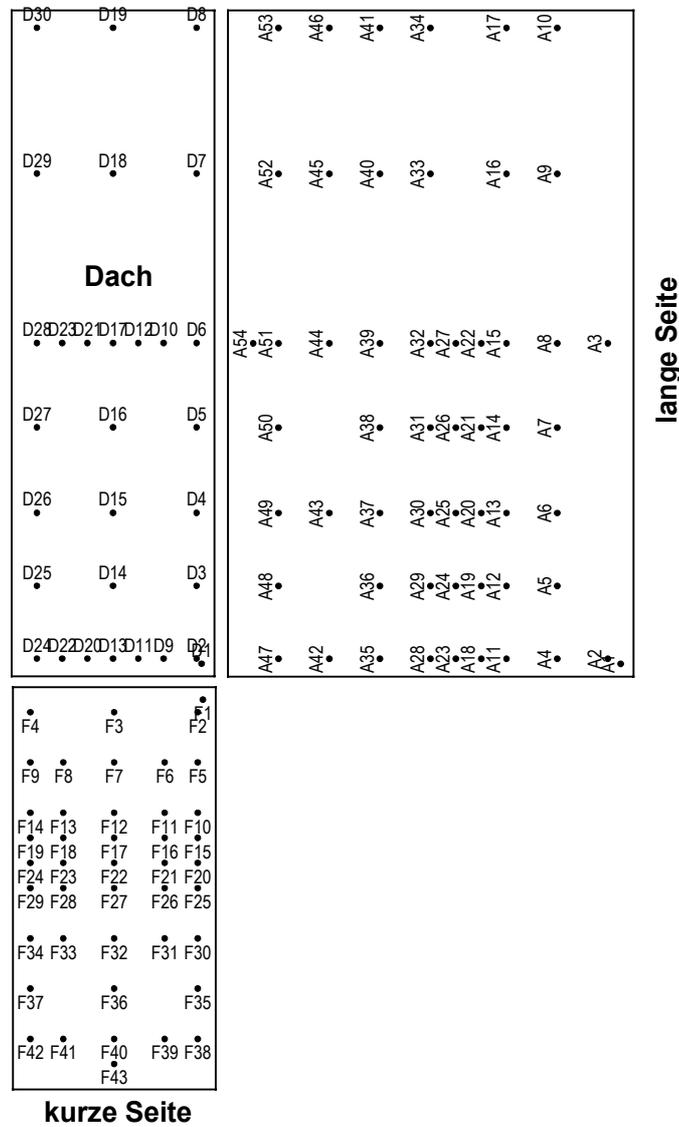


Abb. A.3 Modellserie P, Gebäude P2 (H = 32 m) Lage der Meßpunkte

Modellserie P - Geb. P3, H = 64 m (M 1:600)

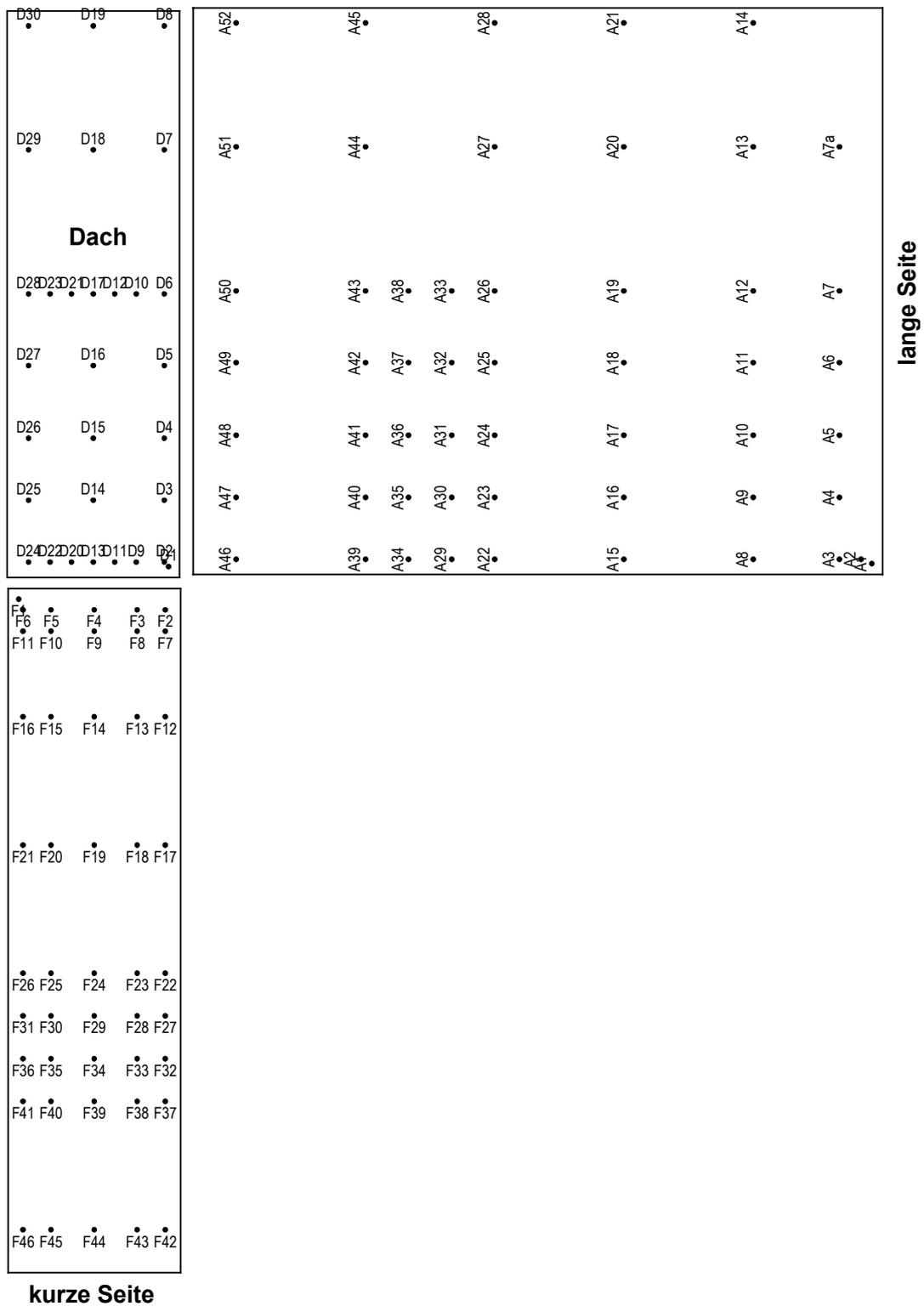


Abb. A.4 Modellserie P, Gebäude P3 (H = 64 m) Lage der Meßpunkte

2. Umgebungsmodelle

Typ I – Reihenbebauung:

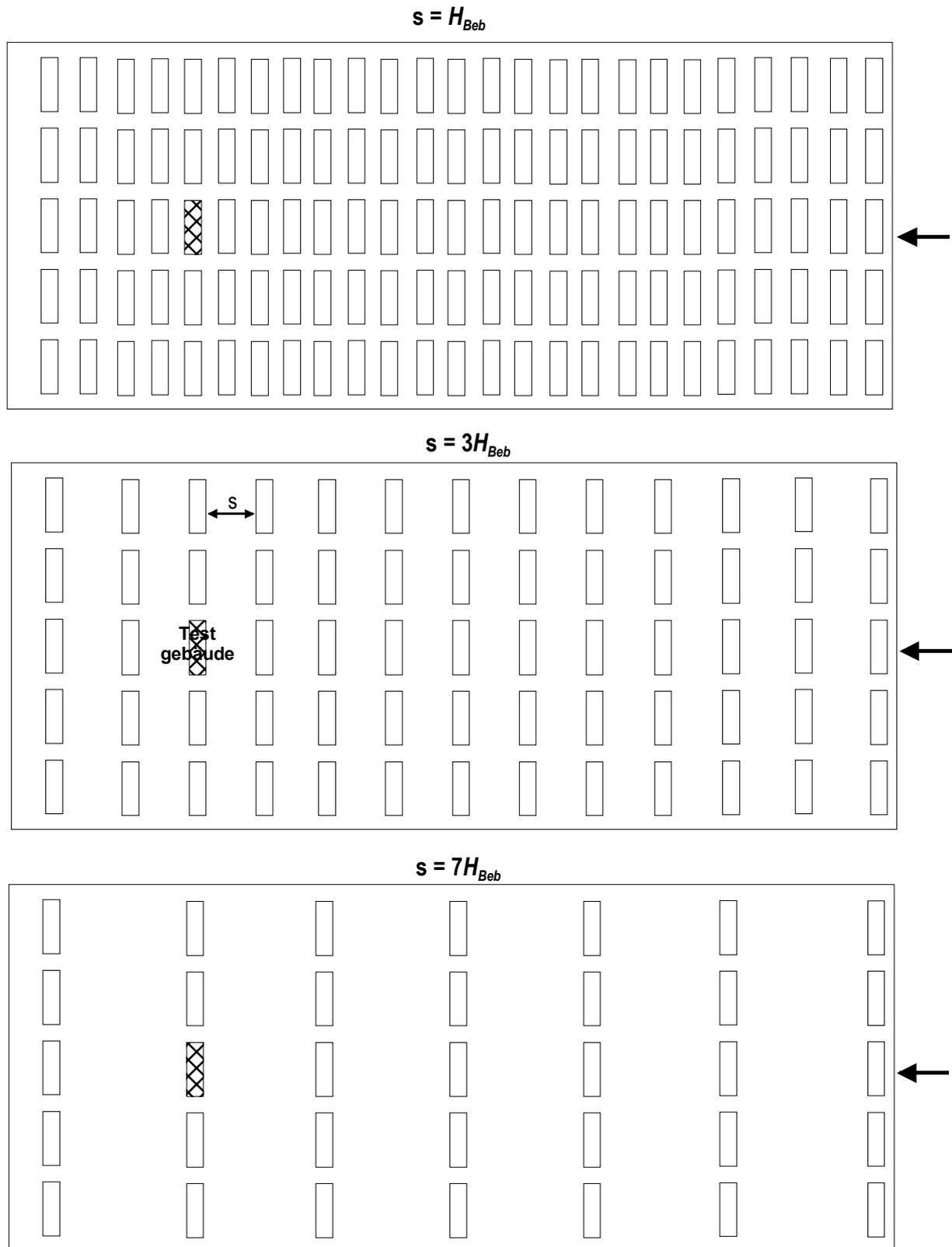


Abb. A.5 Typ I – Reihenbebauung (nur Ausrichtung 90°, lange Seite frontal zum Wind dargestellt)

Typ II – Industriebebauung:

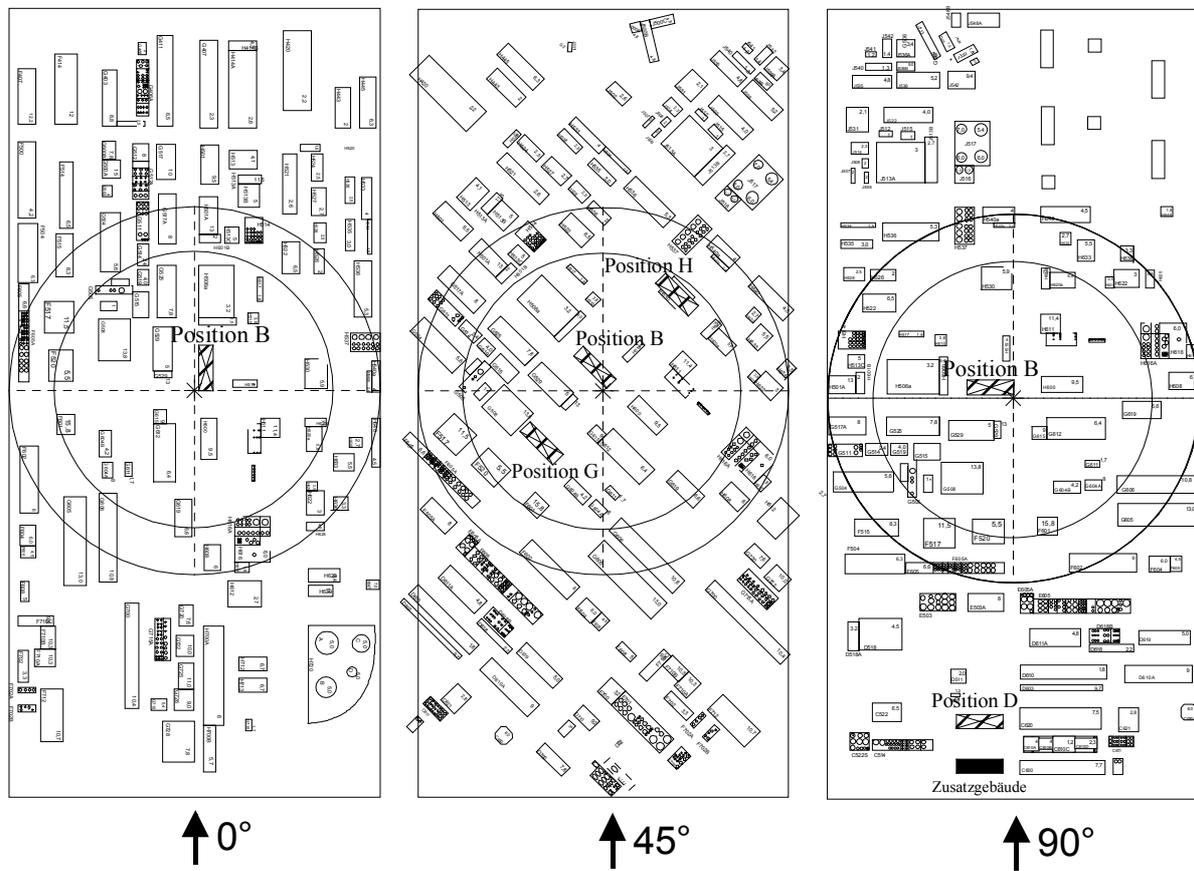


Abb. A.6 Typ II – Industriebebauung

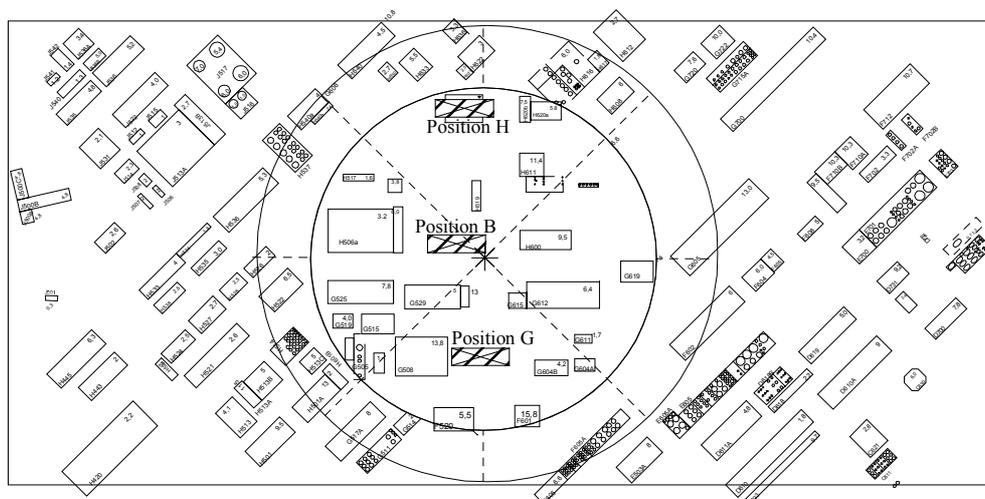


Abb. A.7 Typ II – Industriebebauung BASF45° - Ausrichtung Kernmodell 0°

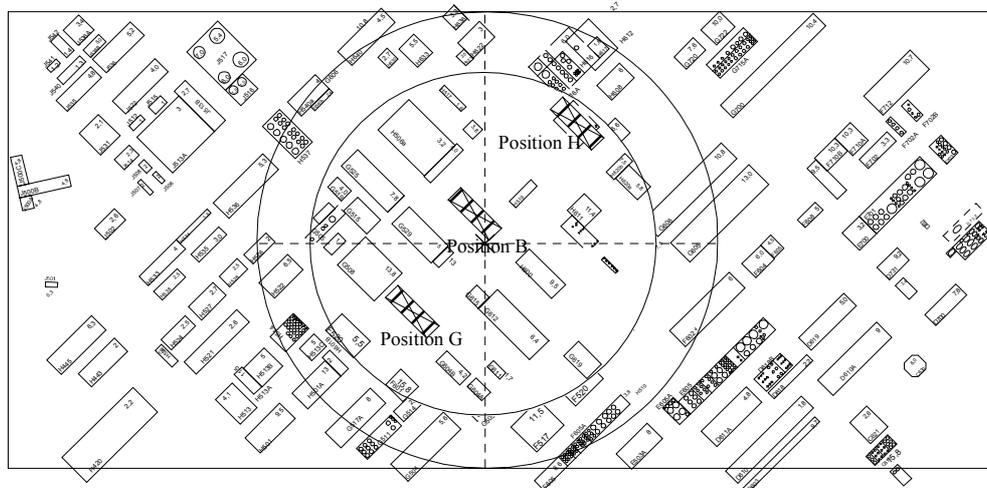


Abb. A.8 Typ II – Industriebebauung BASF45° - Ausrichtung Kernmodell 45°

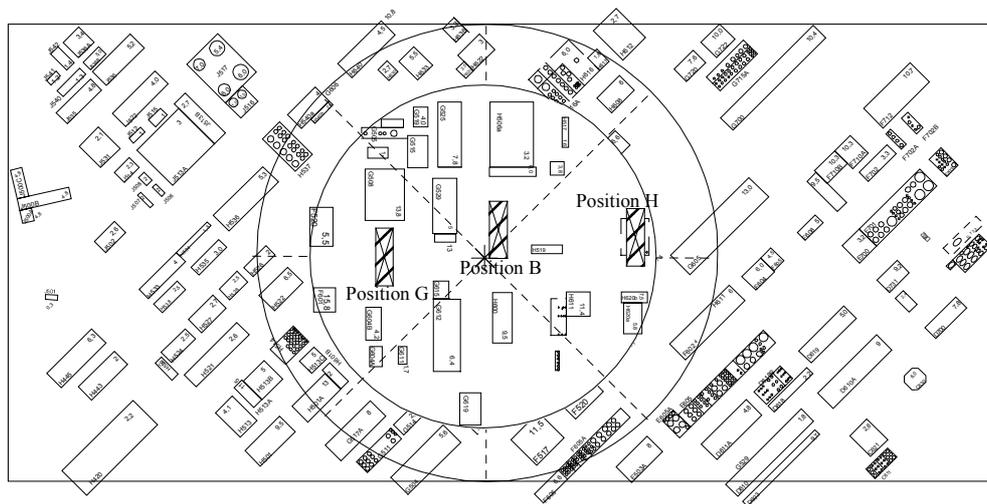


Abb. A.9 Typ II – Industriebebauung BASF45° - Ausrichtung Kernmodell 90°

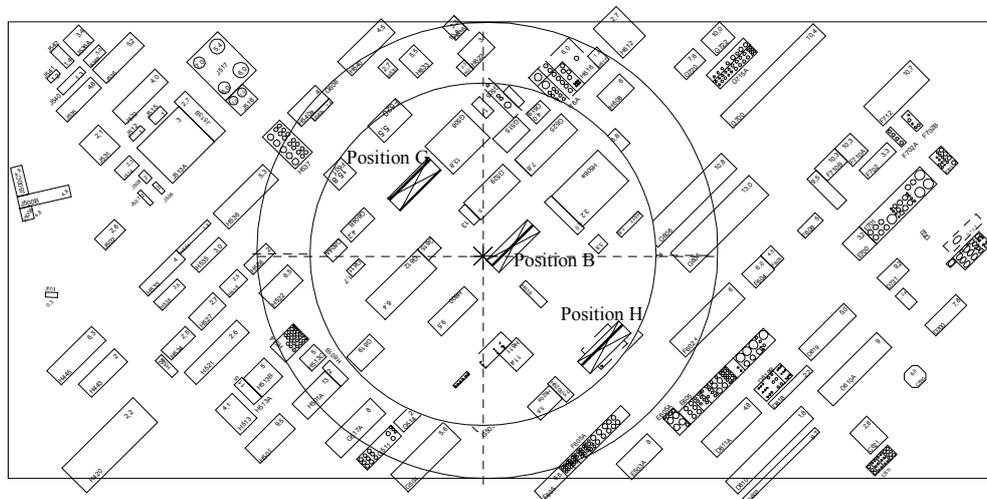


Abb. A.10 Typ II – Industriebebauung BASF45° - Ausrichtung Kernmodell 135°

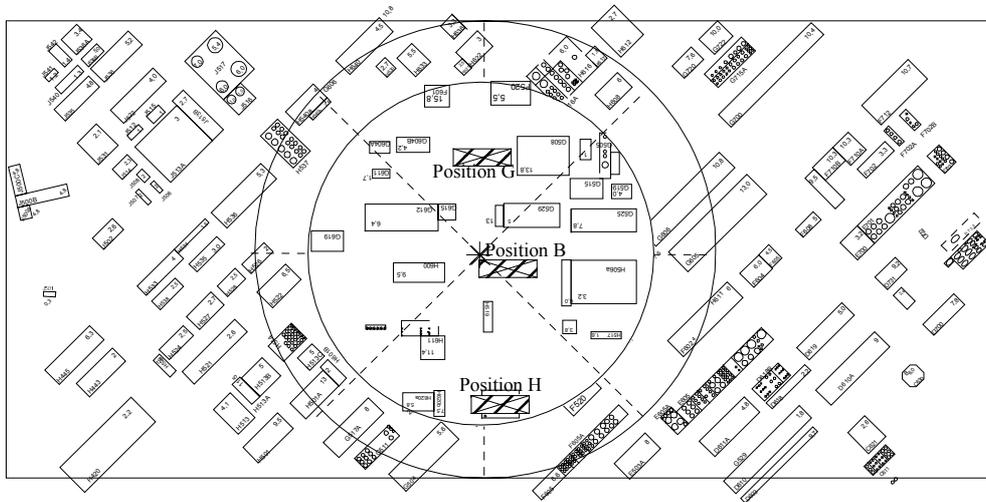


Abb. A.11 Typ II – Industriebebauung BASF45° - Ausrichtung Kernmodell 180°

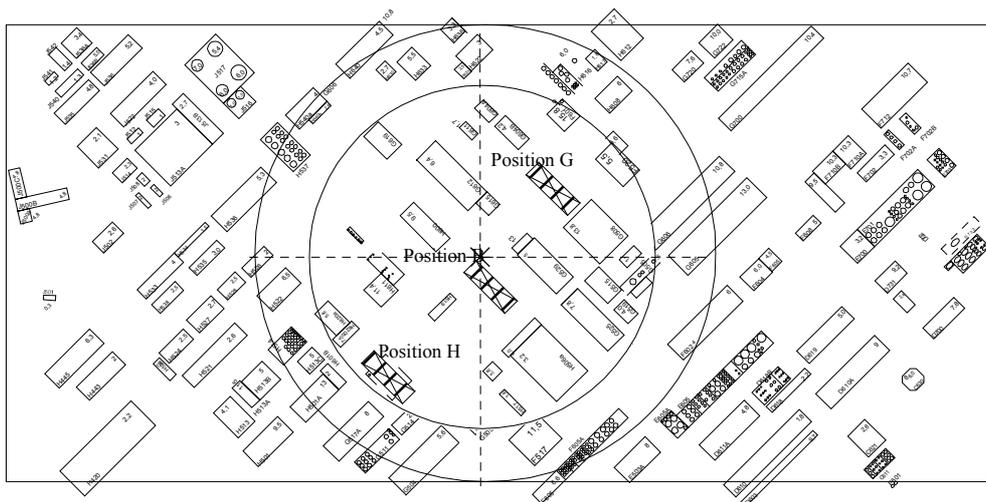


Abb. A.12 Typ II – Industriebebauung BASF45° - Ausrichtung Kernmodell 225°

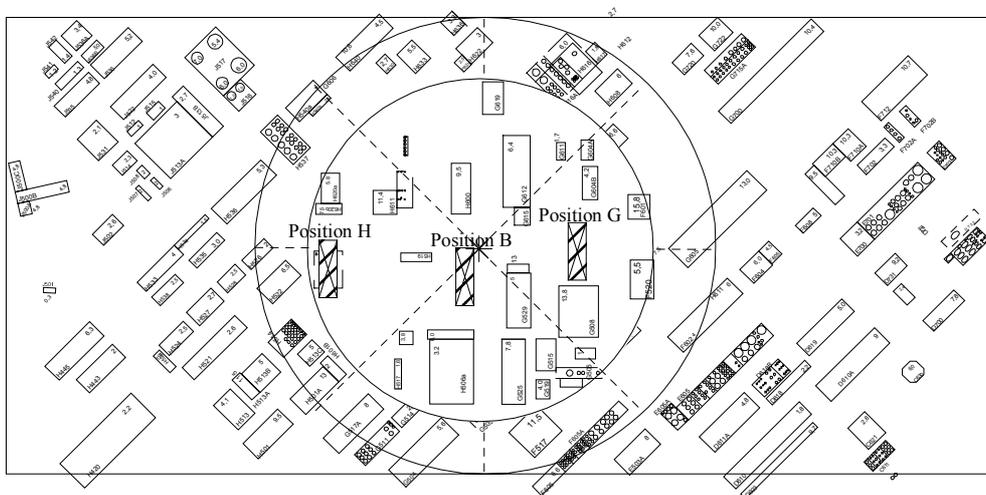


Abb. A.13 Typ II – Industriebebauung BASF45° - Ausrichtung Kernmodell 270°

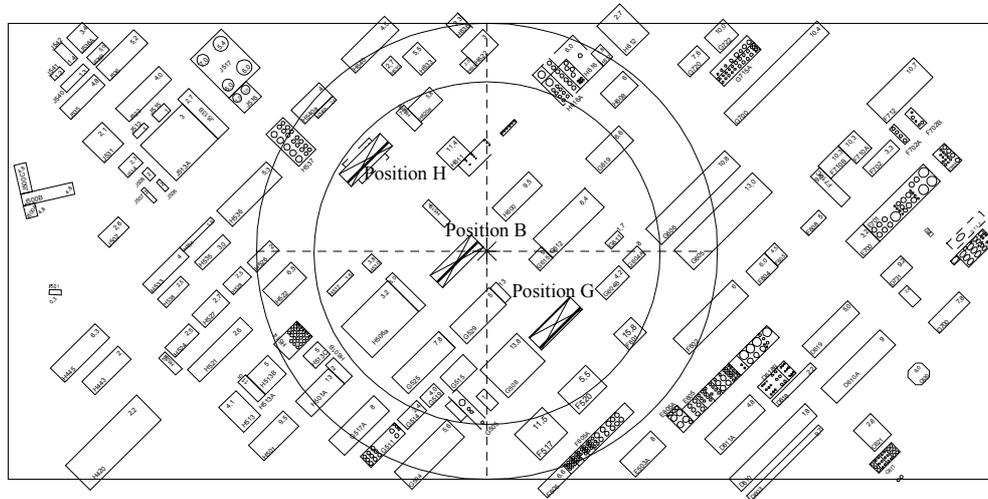


Abb. A.14 Typ II – Industriebebauung BASF45° - Ausrichtung Kernmodell 315°

Typ III – Blockrandbebauung:

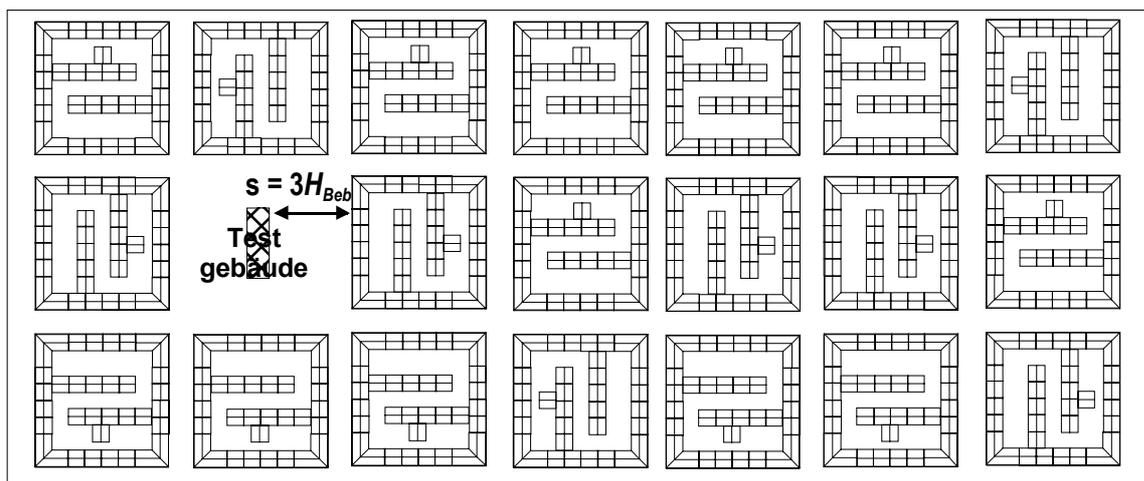


Abb. A.15 Typ III – Blockrandbebauung