

## Die Simulation atmosphärischer Grenzschichten in Windkanälen

**Gromke, C., Ruck, B.**

Laboratorium für Gebäude- und Umweltaerodynamik, Institut für Hydromechanik,  
Universität Karlsruhe, Kaiserstr. 12, 76128 Karlsruhe, Germany

### Zusammenfassung

Ergebnisse von LDA-Messungen, durchgeführt in einem Grenzschichtwindkanal des Laboratoriums für Gebäude- und Umweltaerodynamik (LGU) am Institut für Hydromechanik der Universität Karlsruhe, werden vorgestellt. In Diagrammen werden die für das Windfeld der Anströmung charakteristischen Größen dargestellt und mit den Naturvorgaben verglichen um die Ähnlichkeit beurteilen zu können.

### Einleitung

Um in der Gebäude- und Umweltaerodynamik im Windkanal an physikalischen Modellen gewonnene Messergebnisse auf den Naturmaßstab übertragen zu können, müssen Ähnlichkeitskriterien beachtet werden. Diese lassen sich in Ähnlichkeitskriterien für die zu untersuchenden Modelle an sich und in Ähnlichkeitskriterien für die Anströmung einteilen. Im Folgenden wird auf Ähnlichkeitskriterien der zweiten Kategorie, die für die Simulation atmosphärischer Grenzschichten mit Beschränkung auf neutrale Schichtung von Bedeutung sind, eingegangen. Hierbei wiederum ist die Abbildung des unteren Teils der atmosphärischen Grenzschicht, der sogenannten Prandtl-Schicht mit einer Höhe von ca. 50-100 m, aufgrund der typischen Bauwerkshöhen von besonderer Relevanz.

Als die wichtigsten Kriterien für die Sicherstellung der Ähnlichkeit in der Anströmung von Windkanal und Natur sind die vertikalen Profile der zeitgemittelten Windgeschwindigkeit, der Turbulenzintensität, des integralen Längenmaßes und der spektralen Verteilung der Energie zu nennen. Die hierzu entsprechenden Ähnlichkeitsparameter werden im ersten Teil kurz vorgestellt. Für Windkanaluntersuchungen muss das Grenzschichtprofil durch Einbauten in der Anlaufstrecke an das angestrebte Profil der Naturanströmung unter Beachtung des geometrischen Maßstabes des physikalischen Modells angepasst werden. Die Möglichkeiten zur Grenzschichtbeeinflussung mittels verschiedener Einbauten, wie Stolperkante (Sägezahn-schwelle), Wirbelgeneratoren und auf der Bodenplatte angebrachten Rauigkeitselementen, werden erläutert.

Die Windgeschwindigkeitsmessungen im Kanal werden mit einem Zweikomponenten LDA-System durchgeführt. Dabei werden dem Fluid feinste Nebeltröpfchen, die der Strömung in guter Näherung ideal folgen, als Streupartikel zugegeben. Dieses System erlaubt einerseits störungsfreie Messungen und andererseits die zeitgleiche Messung zweier zueinander senkrechter Komponenten und somit eine anschließende Korrelation dieser Größen. Eine solche Korrelation findet beispielsweise bei der Bestimmung der turbulenten Schubspannungen Anwendung. Zudem ist bei LDA-Systemen mit frequenzverschiebenden optoakustischen Modulatoren (Braggzellen) im Gegensatz zu anderen gängigen nichtoptischen Messtechniken eine Erfassung von Rückströmungen möglich. In Verbindung mit hoher zeitlicher Auflösung eignet sich ein solches LDA-System somit für Geschwindigkeitsmessungen in turbulenten Strömungen mit Rezirkulationsgebieten, wie sie in der Gebäude- und Umweltaerodynamik vorliegen.

## Das Windfeld in der Atmosphäre

Das Windfeld der atmosphärischen Grenzschicht ist aus einer mittleren Windgeschwindigkeit und einer überlagerten Schwankung, der Turbulenz, aufgebaut. Der Verlauf der mittleren Horizontalgeschwindigkeit über die Höhe kann mit einem Potenzgesetz dargestellt werden:

$$\frac{\bar{u}_z}{\bar{u}_{ref}} = \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^a \quad (1)$$

Zur Beschreibung des unteren Teils der Grenzschicht, der Prandtl-Schicht, wird häufig auch das logarithmische Wandgesetz herangezogen:

$$\frac{\bar{u}_z}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left( \frac{z - d_0}{z_0} \right) \quad (2)$$

Die Struktur der Turbulenz einer Strömung kann durch das integrale Längenmaß und die Energieverteilung im Spektralbereich erfasst werden. Daneben weist die Turbulenzintensität einen mit der Höhe über Grund variierenden Wert auf. Das Profil der Turbulenzintensität in horizontaler Richtung wird gut durch folgendes Potenzgesetz abgebildet:

$$\frac{I_{u,z}}{I_{u,ref}} = \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^{-a} \quad (3)$$

Für die Prandtl-Schicht lässt sich mit dem empirischen Faktum  $\sigma_u/u_* \sim 2,5$  auch hier ein logarithmisches Gesetz herleiten:

$$I_{u,z} = \left[ \ln \left( \frac{z - d_0}{z_0} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

Im Merkblatt der Windtechnologischen Gesellschaft, siehe WTG 1995, ist folgender Potenzansatz für die Höhenabhängigkeit des (horizontalen) integralen Längenmaßes zu finden:

$$\frac{L_{ux,z}}{L_{ux,ref}} = \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^a \quad (5)$$

Die Verteilung der Windenergie im mikrometeorologischen Frequenzbereich wird beispielsweise mit den Leistungsdichtespektren nach Kaimal oder Kármán wiedergegeben. Das normierte Kármán-Spektrum lautet:

$$\frac{f S_{uu}(f)}{s_u^2} = \frac{4 f_n}{(1 + 70,78 f_n^2)^{5/6}} \quad (6)$$

## Ähnlichkeitsparameter der Anströmung

Die Ähnlichkeit der mittleren Anströmung im Windkanal (Modell) zur atmosphärischen in der Natur ist gegeben, wenn bezüglich der Profile der mittleren Windgeschwindigkeiten nach dem Potenzansatz gilt:

$$\mathbf{a}_{Modell} = \mathbf{a}_{Natur} \quad (7)$$

Wird das logarithmische Wandgesetz als Orientierung für die höhenabhängige Verteilung der mittleren Windgeschwindigkeit herangezogen, so muss das Verhältnis der Rauigkeitslängen dem geometrischen Modellmaßstab (M) entsprechen, d.h.:

$$\frac{z_{0,Modell}}{z_{0,Natur}} = M \quad (8)$$

Hinsichtlich der Turbulenz ist neben der Ähnlichkeit der Profile auch eine Ähnlichkeit in deren räumlicher Struktur, ausgedrückt durch das integrale Längenmaß, sowie eine starke Kongruenz der Spektren gefordert:

$$I_{u,z,Modell} = I_{u,z,Natur} \quad (9)$$

$$\left( \frac{L_{ux,z}}{l_{ref}} \right)_{Modell} = \left( \frac{L_{ux,z}}{l_{ref}} \right)_{Natur} \quad (10)$$

$$\left( \frac{f S_{uu}(f)}{s_u^2} \right)_{Modell} = \left( \frac{f S_{uu}(f)}{s_u^2} \right)_{Natur} \quad (11)$$

Desweiteren muss sichergestellt sein, dass eine vollturbulente, reynoldszahlunabhängige Prandtl-Schicht simuliert wird. Als Kriterium hierfür wird die Rauigkeitsreynoldszahl herangezogen:

$$Re_{R,Modell} = \frac{u_* z_{0,Modell}}{\nu} > 5 \quad (12)$$

## Die Simulation der atmosphärischen Grenzschicht im Windkanal

Der typische Aufbau eines in der Gebäude- und Umweltaerodynamik eingesetzten Windkanals ist in Abb. 1 dargestellt.

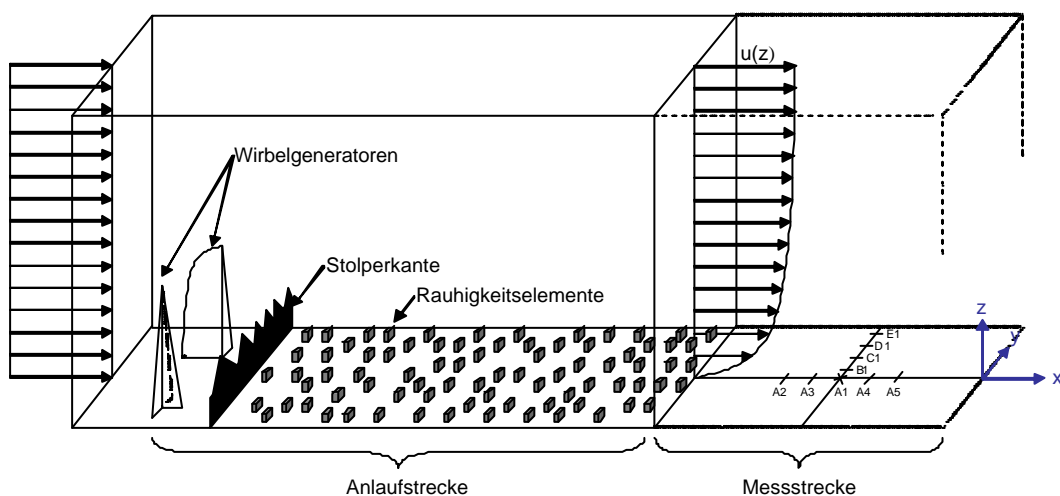


Abb.1: Aufbau eines Windkanals und Lage der Messpunkte

Die Einbauten zur Grenzschichtgenerierung können in drei Gruppen eingeteilt werden, die Wirbelgeneratoren, die Stolperkante und die Rauigkeitselemente. Während die Rauigkeitselemente starken Einfluss auf die Form des Geschwindigkeitsprofils haben, dient die Anordnung von Wirbelgeneratoren und Stolperkante dazu, die, bis zur Ausbildung einer mit der Lauflänge nicht mehr veränderlichen Grenzschicht, erforderliche Anlaufstrecke wesentlich zu verkürzen. In Plate 1982 ist für eine nur durch Rauigkeitselemente erzeugte Grenzschicht eine Länge der Anlaufstrecke von 25 m bis zum Erreichen einer ausgebildeten 80cm dicken Gleichgewichtsgrenzschicht angegeben. Counihan 1971 gibt hierfür allgemein eine erforderliche Anlaufstreckenlänge vom 1000-fachen der Höhe der Rauigkeitselemente an. Durch den Einbau senkrecht stehender, elliptisch geformter Wirbelgeneratoren kann die Anlaufstrecke auf das 5-fache der Generatorhöhe bis zur Ausbildung eines Gleichgewichtszustandes im mittleren Windprofil und auf das 9-fache der Generatorhöhe bis zur Ausbildung eines Gleichgewichtszustandes im Turbulenzprofil reduziert werden. Mit der Anordnung einer Stolperkante wird Einfluss auf die Grenzschichtdicke und das integrale Längenmaß genommen. Eine höhere Stolperkante bewirkt ein Anwachsen des integralen Längenmaßes und der Grenzschichtdicke bei gleichzeitiger Zunahme der Turbulenzintensität, siehe Kemper 2004. Ein Anwachsen des integralen Längenmaßes bei höherer Stolperkante ist damit zu erklären, dass die abgelösten Wirbelstrukturen von der gleichen Größenordnung sind wie die sie verursachenden Hindernisse.

### Beispielsergebnisse einer Windkanalvermessung

In dem vermessenen Grenzschichtkanal am LGU sind 60 cm hohe dreieckförmige Wirbelgeneratoren im Abstand von 30 cm eingebaut. Die unmittelbar darauf folgende 10 cm hohe Stolperkante ist als Sägezahnschwelle ausgebildet. Der Boden der Anlaufstrecke ist mit 2 cm hohen Lego-Steinen zu 2 % der Fläche besetzt. Die Gesamtlänge der Anlaufstrecke bis zum Zentrum der Messstrecke (Punkt A1) beträgt 5,90 m, der Abstand der Messpunkte untereinander beträgt 20 cm in Längs- sowie Querrichtung.

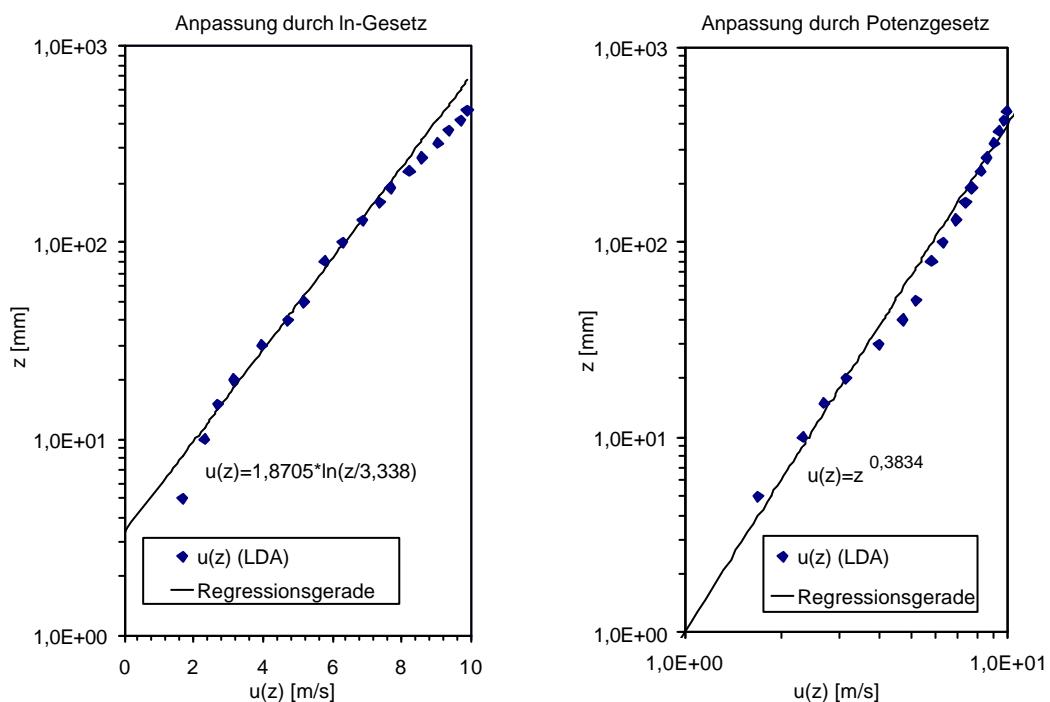


Abb.2: Anpassung des gemessenen Windprofils durch logarithmisches und Potenzgesetz

Die Auswertung des zeitgemittelten Geschwindigkeitsprofils für den Punkt A1 ergab, sowohl nach der graphischen als auch nach der implizit analytischen Methode (siehe Stull 1988), den Wert  $d_0 = 0$  mm für die Versatzhöhe und ist wohl auf die geringe Besetzungsdichte der Bodenplatte mit Rauigkeitselementen zurückzuführen. Die Anpassung des logarithmischen Wandgesetzes (s. Abb. 2) mittels Regressionsanalyse für  $u$  als abhängige und  $z$  als unabhängige Variable liefert für die Rauigkeitslänge  $z_0 = 3,3$  mm und für die Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_* = 0,75$  m/s. Für diese Regressionsanalyse wurden nur Punkte der Prandtl-Schicht mit  $250 < z^* < 5000$  herangezogen, siehe Frank 2005. Eine entsprechende Analyse für die Anpassung des Potenzgesetzes ergibt für den Profilparameter  $a = 0,38$ , einen Wert, der nach dem WTG-Merkblatt charakteristisch für Windprofile in Innenstadtbereichen ist. Die Vorteile einer Darstellung der Windprofile in Diagrammen mit einfach bzw. doppelt logarithmischer Skalierung sind, dass im Falle des log. Wandgesetzes der Parameter  $u_*$  aus der Steigung,  $z_0$  aus dem Schnittpunkt der Geraden mit der Ordinate und im Falle des Potenzgesetzes der Profilparameter  $a$  aus der Steigung abgelesen werden kann.

Die gemessenen Wind- und Turbulenzprofile über den Querschnitt sind in Abb. 3 zusammen mit den nach den Potenzgesetzen für  $a = 0,38$  berechneten Verläufen dargestellt. Für die inneren 3 Punkte (A1 - C1) ist bei beiden Profilen eine gute Deckungsgleichheit untereinander vorhanden, für die äußeren Punkte (D1, E1) musste zur Gewährleistung einer ausreichenden LDA-Signalrate die Partikelzuleitung in der Anlaufstrecke durch einen Eingriff angepasst werden. Im rechten Diagramm ist ein Abfall der Turbulenzintensität von innen nach außen oberhalb der Prandtl-Schicht im Bereich zwischen 150 und 400 mm zu erkennen. Dies ist möglicherweise durch den Einfluss der glatten vertikalen Seitenwand, die einen lateralen Impulsaustausch in  $y$ -Richtung einschränkt und über die 3-dimensionale Kopplung des Strömungsfeldes die Turbulenz in  $x$ -Richtung verringert, zu erklären.

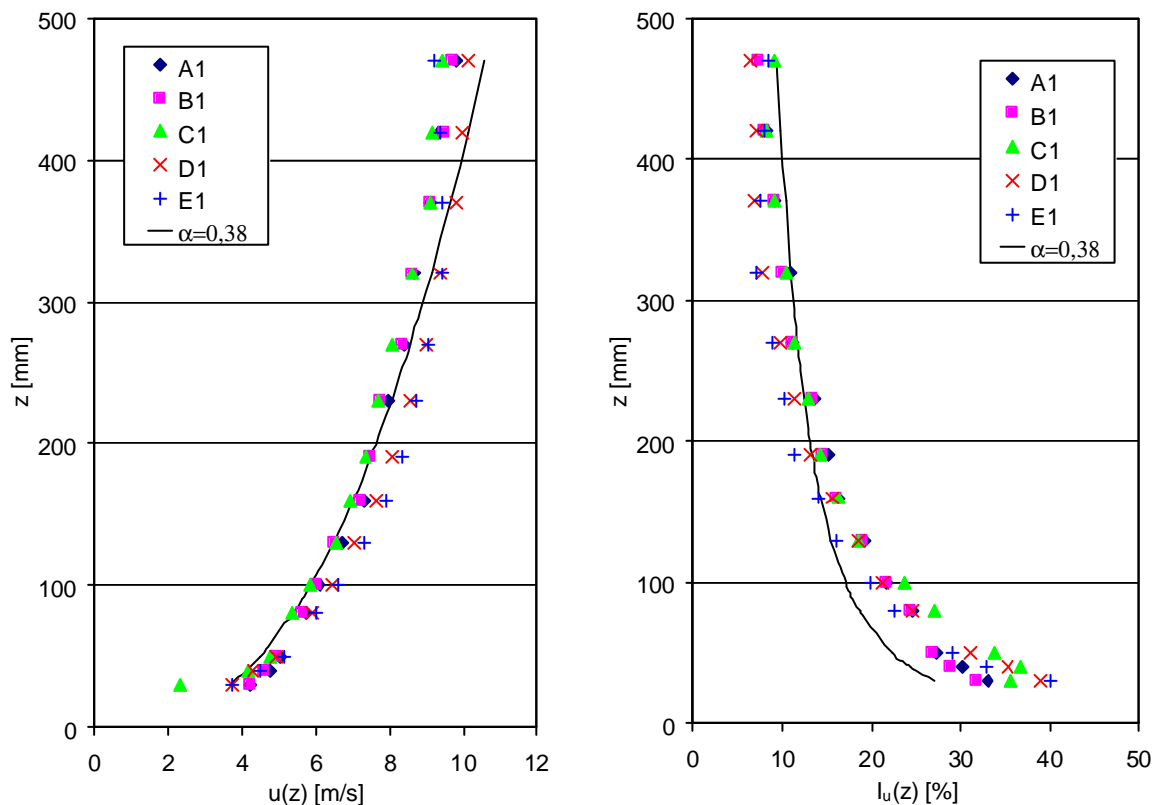


Abb.3: Profile der Windgeschwindigkeiten und Turbulenzintensitäten über den Querschnitt

In Abb. 4 ist die Variabilität der Horizontalgeschwindigkeit in der Mittelebene mit zunehmender Lauflänge aufgetragen. Die Abweichungen liegen, bis auf wenige Ausnahmen, im Bereich kleiner 5 % und stromab des Bezugspunktes A1 ist tendenziell kein Vorzeichenwechsel der Änderung ersichtlich, so dass die Abweichungen durch Messungenauigkeiten und die beschränkte Messzeit zu erklären sind. Die vorhandene Anlaufstrecke ist ausreichend lang und eine stabile Gleichgewichtsgrenzschicht ist in der Messstrecke gegeben. Die entsprechenden Profile der Turbulenzintensität bestätigen dies.

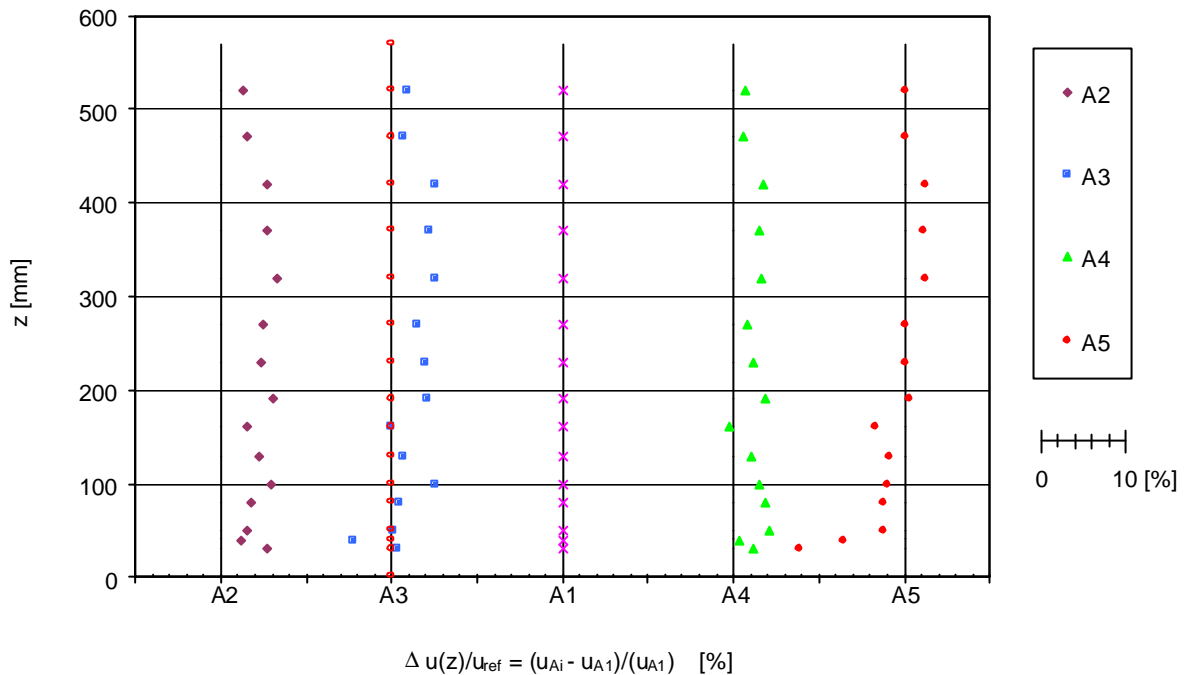


Abb. 4: Normierte Änderung der Horizontalgeschwindigkeit mit der Lauflänge

Der Verlauf der turbulenten Schubspannungsgeschwindigkeit ist in Abb. 5 aufgetragen. Ein weiteres Werkzeug zur Bestimmung der simulierten Prandtl-Schichthöhe ist mit dem Kriterium konstanter turbulenter Schubspannungen innerhalb derselben gegeben. Anhand dieses Kriteriums lässt sich die Prandtl-Schichthöhe hierbei auf 150 mm festlegen. Eine sehr gute Übereinstimmung der normierten Standardabweichungen mit der empirisch ermittelten Vorgabe für die Vertikalkomponente (1,3) ist vorhanden. Beide Komponenten weisen den geforderten konstanten Verlauf innerhalb der Prandtl-Schicht auf.

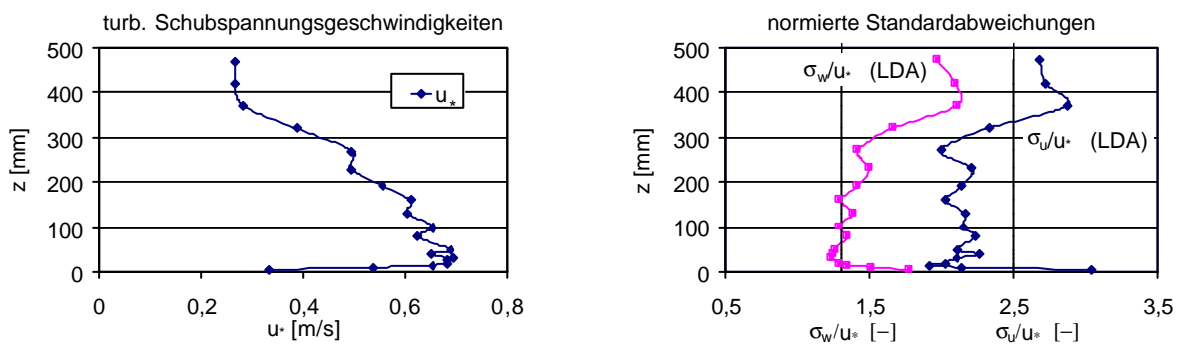


Abb. 5: Verlauf der Korrelationsgrößen Schubspannung und normierte Standardabweichungen

Das integrale Längemaß ist, unter Zuhilfenahme der Taylor-Hypothese, aus dem Integral der zeitlichen Autokorrelationsfunktion der Geschwindigkeitsschwankungen an einem Messpunkt berechnet worden. Das Anwendungskriterium für die Taylor-Hypothese ( $l_{u,z} < 0,5$ ) ist, nach Abb. 3, für alle Messpunkte erfüllt. Die Ergebnisse werden zur Maßstabsfindung genutzt und im nächsten Kapitel vorgestellt.

In Abb. 6 ist das normierte Leistungsdichtespektrum im Messpunkt A1 in 320 mm Höhe über der Bodenplatte dargestellt. Zum Vergleich mit der atmosphärischen Vorgabe sind die Spektren nach Kármán und Kaimal mit eingezeichnet. Eine tendenzielle Kongruenz der Spektren bezüglich Lage und Höhe des Maximums sowie des Abklingverhaltens im höherfrequenten Bereich ist gegeben. Die Spektren in anderen Höhen zeigen einen ähnlichen charakteristischen Verlauf.

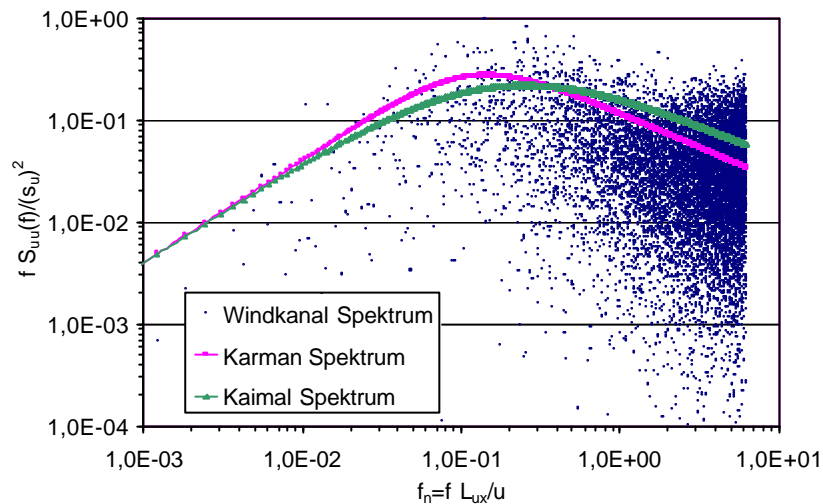


Abb. 6: Normiertes Leistungsdichtespektrum im Punkt A1 in 320 mm Höhe über Bodenplatte

Abschließend wurde noch das Reynolds-Rauhigkeitskriterium untersucht. Mit

$$Re_{R,Modell} = \frac{u_* z_{0,Modell}}{n} = \frac{0,7482 \text{ m/s} \cdot 0,0033 \text{ m}}{1,5 \cdot 10^{-5}} = 164 > 5 \quad (13)$$

ist eine vollturbulente, reynoldszahlunabhängige Prandtl-Schicht in der Anströmung garantiert.

### Maßstabsfindung

Eine Möglichkeit zur Bestimmung des geometrischen Maßstabes ist über den Vergleich der Rauigkeitslängen  $z_0$  gegeben. Mit dieser Vorgehensweise wird auch gleichzeitig das anfangs aufgeführte Ähnlichkeitskriterium erfüllt. Als Beispiel wird der Wert nach DIN 1055-4 für  $z_0$  der Geländekategorie IV (Stadtgebiete) herangezogen. Hiermit ergibt sich ein Maßstab von:

$$\frac{z_{0,Modell}}{z_{0,Natur}} = \frac{3,3 \text{ mm}}{1000 \text{ mm}} \cong \frac{1}{300} \quad (14)$$

Eine weitere Möglichkeit der Maßstabsbestimmung ist im WTG-Merkblatt aufgeführt. Sie orientiert sich am Vergleich der integralen Längenmaße und führt bei Anwendung automatisch zur Einhaltung des Längenmaß-Ähnlichkeitskriteriums. Ein Vorgehen nach dieser Methode erlaubt somit eine Übertragung der am Modell ermittelten korrelierten Windlasten auf

die Naturdimension. Einsetzen des Potenzansatzes für das integrale Längenmaß (5) in das Längenmaß-Ähnlichkeitskriterium (10) und Auflösen nach  $l_{ref,Natur}$  liefert:

$$l_{ref,N} = \left( \frac{L_{ux,M}}{L_{ux,ref,M}} \frac{z_{ref,N}^a}{l_{ref,M}} \right) \left( \frac{1}{a-1} \right) \quad (15)$$

Aus  $M = l_{ref,M} / l_{ref,N}$  folgt der geometrische Maßstab. Mit  $l_{ref,N} = 10$  m und  $L_{ux,N} = 52,5$  m für Innenstadtbereiche ergibt sich mit  $a = 0,38$  der Modellmaßstab in Abhängigkeit der Höhe zu:

Höhe [mm]	30	50	100	160	230	320
$L_{ux}$ [m]	0,15	0,18	0,25	0,23	0,23	0,23
Maßstab	1:352	1:381	1:331	1:510	1:639	1:790

Tab. 1: Integrale Längenmaße und geometrische Maßstäbe

Im Bereich der Prandtl-Schicht liegt eine annähernde Maßstabskonstanz vor. Der Wert entspricht in guter Näherung dem nach dem Rauigkeitslängenkriterium ermittelten.

## Literatur

- 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, pp. 637-642
- DIN 1055-4 2005: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 4: Windlasten, Beuth Verlag, März 2005
- Frank, C., 2005: Wirksamkeit von dünnen Windschutzstreifen auf Sockelwällen in luv- und leeseitiger Anordnung, Dissertation am Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe
- Kemper, F., 2004: Einfluss der korrelationsbedingten Flächenabhängigkeit von quasistatischen Windersatzlasten auf die Tragwerksreaktionen nicht-schwingungsanfälliger Konstruktionen, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen
- Plate, E. J., 1982: Wind Tunnel Modelling of Wind Effects in Engineering, Engineering Meteorology, pp. 573-640
- Stull, R. B., 1988: An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Kluwer Academic Publishers
- WTG 1995: Windprobleme in dichtbesiedelten Gebieten, WTG-Berichte Nr. 3, Windtechnologische Gesellschaft Deutschland - Österreich - Schweiz

## Symbole

$d_0$	Versatzhöhe	$u_*$	Schubspannungsgeschwindigkeit
$f_n$	dimensionslose Frequenz	$z$	Höhe über Grund
$f_n = f L_{ux,z} / \bar{u}_z$		$z_{ref}$	Referenzhöhe
$I_{u,z}$	Turbulenzintensität in Höhe $z$ ,	$z_0$	Rauigkeitslänge
$I_{u,z} = s_u / \bar{u}_z$		$z^*$	dimensionsloser Wandabstand
$l_{ref}$	Referenzlänge	$z^* = u_* z / \mathbf{n}$	
$L_{ux,z}$	integrales Längenmaß	$\mathbf{a}$	Profilparameter
$\bar{u}_z$	mittlere Horizontalgeschwindigkeit in Höhe $z$	$\mathbf{k}$	Kármán-Konstante ( $\mathbf{k} = 0,4$ )
$\bar{u}_{ref}$	Referenzgeschwindigkeit in Höhe $z_{ref}$	$\mathbf{s}_u$	Standardabweichung
		$\mathbf{n}$	kinematische Viskosität