

## ERZEUGUNG EINES ATMOSPHERISCHEN GRENZSCHICHT- PROFILS IM WINDKANAL UND LDA-MESSUNG DER STRÖMUNG ÜBER EINEM STEILEN EINZELHÜGEL

**José Fernández Puga, Martin Mahrla, Manfred Fallen, Fritz Ebert**

Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik und Strömungsmechanik  
Technische Universität Kaiserslautern

Postfach 3049

D-67663 Kaiserslautern

[fernandez@mv.uni-kl.de](mailto:fernandez@mv.uni-kl.de)

Tel.: +49-631-205-3035

Fax: +49-631-205-3055

### Abstract

Die Überströmung von Geländestrukturen wird am Beispiel eines Einzelhügels experimentell und numerisch untersucht. Dabei ist die Nachbildung der natürlichen Grenzschicht im Windkanal von großer Bedeutung. Die Modellierung der atmosphärischen Grenzschicht wird durch die kurze Messstrecke des Windkanals der Technischen Universität Kaiserslautern erschwert. Die Erzeugung der Grenzschicht muss somit durch spezielle, in die Messstrecke eingebrachte Grenzschichtgeneratoren erfolgen. Hierfür werden verschiedene Konfigurationen bestehend aus Stangen und Spires getestet. Das Geschwindigkeitsfeld der Hügelüberströmung wird mit Hilfe der Laser-Doppler-Anemometrie vermessen und mit numerischen Berechnungen verglichen.

### Einleitung

In der Atmosphäre ist die Grenzschichtbildung vor allem dadurch charakterisiert, dass in direkter Bodennähe aufgrund der Haftbedingung kleine Strömungsgeschwindigkeiten existieren und mit zunehmender Höhe  $z$  die Geschwindigkeit der Windströmung bis zur Windgeschwindigkeit des freien geostrophischen Windes anwächst. Dabei erfährt die Strömung in der Prandtl-Schicht die stärkste Geschwindigkeitszunahme, während in der Ekman-Schicht die Geschwindigkeitszunahme moderat verläuft, bis schließlich die Geschwindigkeit der freien Atmosphärenströmung erreicht wird.

In gleicher Weise kann sich im Windkanal eine Grenzschicht und die für sie typische Turbulenz auf natürliche Art entwickeln, wenn die Anlaufstrecke im Windkanal über die maßstäblich verkleinerte Rauigkeitslänge  $z_0$  hinreichend lang ist. Davenport und Cermak haben im Jahre 1966 eine natürliche Entwicklung einer Grenzschicht in einem Windkanal beschrieben, in welchem sich die Grenzschicht innerhalb einer Strecke von ca. 30m mit einer Mächtigkeit von 90cm bis 120cm je nach Rauigkeit der Messstrecke aufgebaut hat. Da die meisten Windkanäle nicht solche Abmessungen aufweisen, müssen zusätzliche Einbauten, an denen die Strömung vorbeigeführt wird, dafür sorgen, dass die Grenzschichtbildung unterstützt wird.

Eine Methode, die Scherströmung des Windes im Windkanal zu modellieren, geht auf Owen und Zienkiewicz zurück, welche 1957 ein Gitter aus Stangen in die Strömung eingesetzt haben. Der Einbau von Gittern und Sieben in den Einlaufkanal erzeugt in der Strömung die erwünschte Turbulenz. Die Maschengröße und Bauweise des Gitters beeinflusst dabei die

Größe der Turbulenzballen. Im Allgemeinen erzeugen solche Gitter isotrope Turbulenz hinter der Einlaufdüse.

Counihan verfolgte das Ziel der Grenzschichterzeugung durch vertikal angebrachte, dreiecksförmige Einbauten. In späteren Arbeiten verbesserte Counihan seine Ergebnisse durch Veränderung der Form seiner Einbauten. So verwendete er im Folgenden beispielsweise spitzbogenförmige Generatoren und schließlich elliptisch geformte Einbauten.

Die Grenzschichterzeugung im Windkanal der Technischen Universität Kaiserslautern wird durch die kurze Messstrecke erschwert. Die Nachlauferscheinungen der eingesetzten Generatoren dürfen im interessierenden Messbereich nicht zu messen sein. Hierzu werden verschiedene Konfigurationen experimentell untersucht.

Die atmosphärische Geländeüberströmung wird anhand eines steilen zweidimensionalen Einzelhügels untersucht. Dabei entspricht die Kontur des Hügels derjenigen des Rushil-Experiments des Jahres 1981. LDA-Messungen geben das Geschwindigkeitsfeld der Hügelüberströmung wieder, welches zur Validierung verschiedener Turbulenzmodelle dient.

## Messaufbau

Im Windkanal der Technischen Universität Kaiserslautern beträgt die Gesamtstrecke, die zur Messung zur Verfügung steht, ca. 3m (siehe Abb. 1). Auf dieser Strecke wird die Strömung über eine aus Holzplatten bestehende Fläche geführt, welche mit einem Kunststoffgranulat irregulärer Form und einer durchschnittlichen Korngröße von 4mm als Rauigkeitselemente bedeckt ist.

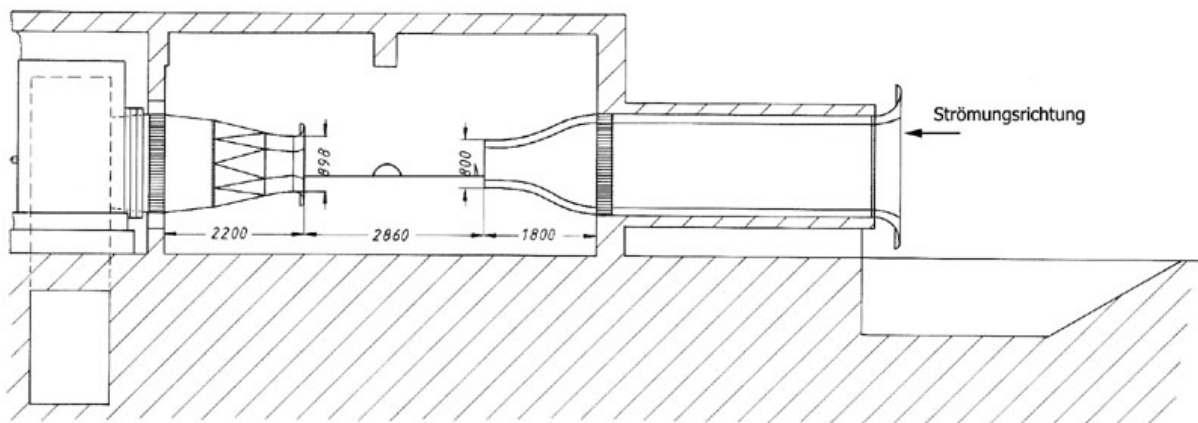


Abb. 1: Aufbau des Windkanals mit Messstrecke und Hügel

Es handelt sich bei dem Windkanal um einen offenen Windkanal nach Eiffel (Saugbetrieb). Die maximale Leistung des Gebläses beträgt 110kW, mit der Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 60m/s erreicht werden können. Die Länge der Einlaufstrecke beträgt vom Einlass, wo Luft aus der Atmosphäre angesaugt wird, bis zur Düse im Windkanal 5m. In der Einlaufstrecke befindet sich ein Wabengitter, welches als Gleichrichter für die Strömung wirkt und zur Beruhigung und Vergleichmäßigung der Strömung beiträgt.

Der Hügel besitzt die gleiche Geometrie wie der Hügel in den Windkanalversuchen nach Rushil. Allerdings beträgt die Höhe  $h=100\text{mm}$  und die Tiefe  $t=500\text{mm}$ . Der charakteristische Kennwert, gebildet aus halber Tiefe zu Höhe, beträgt 2,5 und steht somit für einen steilen Hügel.

Die LDA-Messungen werden mit einem dreikanaligen Ar-Ionen Laser durchgeführt, welcher nach dem Zweistrahl-Verfahren arbeitet. Die zur Messung notwendigen Tracerteilchen werden aus einem Wasser-Glyzerin-Gemisch generiert und haben eine Größe von ca.  $2\mu\text{m}$ .

## Anforderungen an die Windkanalmodellierung

Die Vermessung der Hügelüberströmung im Windkanal erfordert die Modellierung der atmosphärischen Grenzschicht und ein adäquates Versuchsmodell. Die VDI-Richtlinie 3783 gibt hierzu Hinweise und Einhaltungskriterien zur Modellierung einer gut durchmischten Schichtung.

Das mit Hilfe der Spires erzeugte Geschwindigkeitsprofil lässt sich durch den Potenzansatz sehr gut darstellen (siehe Abb. 2). Der Profilexponent  $\alpha$  beträgt hierbei 0,16, wodurch ein mäßig rauhes Gelände beschrieben wird. Die Grenzschichtdicke beträgt ca. 300mm.

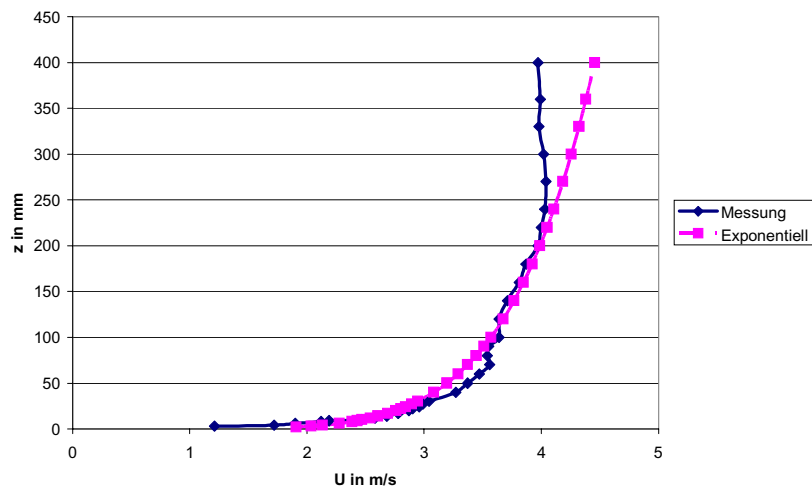


Abb. 2: Geschwindigkeitsprofil (Messung und Näherung durch Potenzansatz)

Die Turbulenzintensitäten in Strömungsrichtung, in lateraler und in vertikaler Richtung sind in Abb. 3 dargestellt. Sie beschreiben ebenfalls ein mäßig rauhes Gelände.

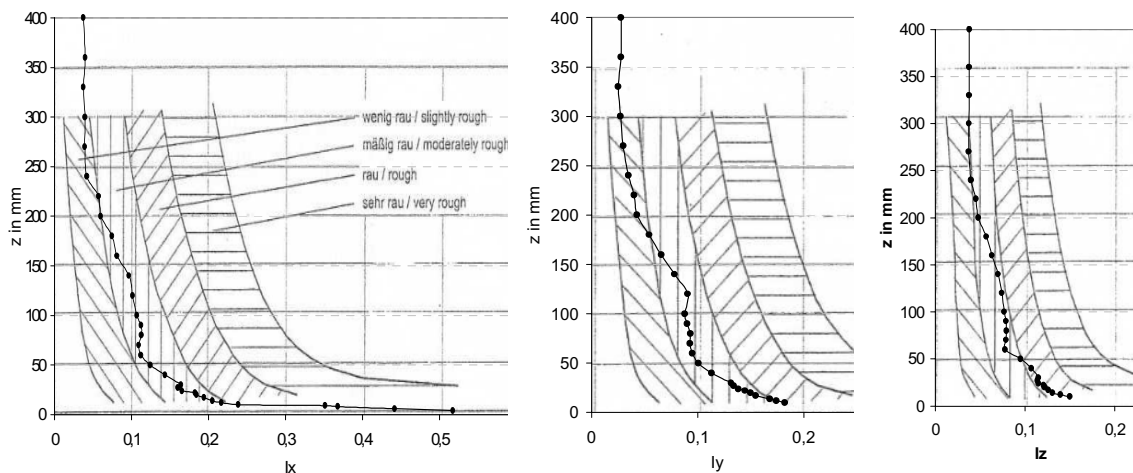


Abb. 3: Turbulenzintensitäten in x-, y- und z-Richtung

Damit die Messung nicht durch den Strahlrand des Windkanals beeinflusst wird, ist auf ausreichenden Abstand des Messgebiets von der Berandung zu achten. Der Versperrungsgrad liegt bei ca. 13% und befindet sich unterhalb des Grenzwertes von 15%. Die mit der Hügelhöhe gebildete Reynoldszahl beträgt ca. 140.000. Mit der Rauigkeitslänge von  $z_0=0,08\text{m}$  und der Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_* = 0,4\text{m/s}$  berechnet sich die Rauigkeits-Reynoldszahl zu  $Re_* = 2200$ .

Die Anforderungen der VDI-Richtlinie werden insgesamt eingehalten. Der Messaufbau im Windkanal stellt somit eine atmosphärische Strömung über mäßig rauem Gelände dar.

### Numerische Simulation

Die numerische Simulation wird mit einem Finite-Volumina CFD-Code durchgeführt. Die eingesetzten Turbulenzmodelle gehören der Klasse der Zweigleichungsmodelle an. Für das  $k - \omega$  Turbulenzmodell wird die Standardformulierung nach Wilcox 1998 verwendet. Die Konstanten sind in Tab. 1 angegeben.

$\alpha$	$\beta_0$	$Pr_\omega$
0,52	0,072	2

Tab. 1: Konstanten des  $k - \omega$  Modells

Das SST Turbulenzmodell von Menter 1994 verbindet die Stärken des  $k - \varepsilon$  Turbulenzmodells von Launder und Spalding im wandfernen und des  $k - \omega$  Turbulenzmodells von Wilcox im wandnahen Bereich. Dafür wird das  $k - \varepsilon$  Turbulenzmodell in eine auf  $k$  und  $\omega$  basierende Formulierung überführt. Die transformierte Gleichung unterscheidet sich von der originalen  $\omega$ -Transportgleichung lediglich durch einen zusätzlichen Kreuzdiffusionsterm  $D_\omega$ . Den Übergang zwischen wandnahen und wandfernen Bereich regeln zwei Funktionen  $F_1$  und  $F_2$ . Die turbulente Viskosität berechnet sich demnach zu

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{\Omega F_2}{a_1 \omega}\right]} \quad (1)$$

mit der Dichte  $\rho$ , der turbulenten kinetischen Energie  $k$  und der spezifischen Dissipationsrate  $\omega$ . Eine Korrektur für niedrige Reynoldszahlen ist durch  $\alpha^*$  implementiert.  $\Omega$  beinhaltet den Rotationsgeschwindigkeitstensor mit den Komponenten  $\Omega_{ij}$  ( $\Omega = \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}$ ) und  $a_1$  ist eine Konstante (s. Tab. 2). Die Übergangsfunktion  $F_2$  lautet

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) \quad (2)$$

mit

$$\Phi_2 = \max\left[2 \frac{\sqrt{k}}{0,09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}\right] \quad (3)$$

Dabei stellt  $y$  den Wandabstand dar.

$\alpha_{k,1}$	$\alpha_{\omega,1}$	$\alpha_{k,2}$	$\alpha_{\omega,2}$	$\beta_{i,1}$	$\beta_{i,2}$	$a_1$
1,176	2,0	1,0	1,168	0,075	0,0828	0,31

Tab. 2: Konstanten des SST Turbulenzmodells

Das numerische Gitter wird mit Annäherung an den Hügel verfeinert. Die Impulsgleichungen und die Berechnung des Druckterms werden mit einem Diskretisierungsschema bzw. Interpolationsschema zweiter Ordnung berechnet. Die Druck-Geschwindigkeitskopplung erfolgt mit Hilfe des SIMPLE-Algorithmus.

## Ergebnisse

Die Hügelüberströmung erfolgt mit einer freien Anströmgeschwindigkeit von 4m/s oberhalb der Grenzschicht. Das Grenzschichtprofil ist in Abb. 2 dargestellt. Die Messdauer beträgt 60s bzw. 50.000 Bursts pro Messpunkt, so dass von einer zeitlich gemittelten Geschwindigkeit ausgegangen werden kann.

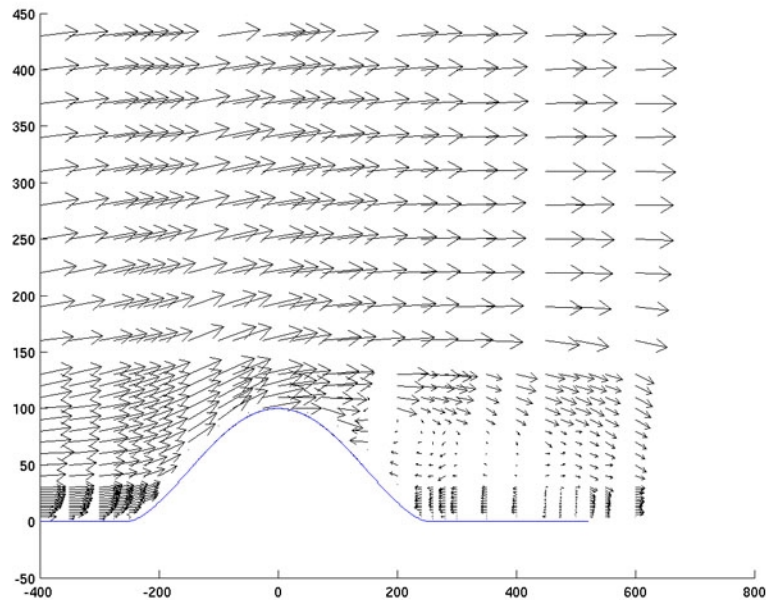


Abb. 4: Geschwindigkeitsvektorplot der Messung

Das Geschwindigkeitsfeld ist in Abb. 4 in Form eines Vektorplots dargestellt. Deutlich zu erkennen ist das Geschwindigkeitsprofil vor dem Hügel anhand der Länge der Vektoren. Die Strömung trifft bei  $x=-250\text{mm}$  auf den Hügel und wird nach oben abgedrängt. Das Auftreffen auf den Hügel ist mit einer Zunahme des statischen Druckes an der Körperkontur verbunden. Zwischen

$x=-250\text{mm}$  und  $x=0\text{mm}$  wird die Strömung in Bodennahе beschleunigt, bis sie dann auf der Hügelspitze ein Geschwindigkeitsmaximum erreicht. Gleichzeitig nimmt der statische Druck ab bis zum Erreichen eines Minimums. Aufgrund der Steilheit des Hügels kann die Strömung der Kontur nicht mehr folgen und löst sich im hinteren Bereich des Hügels ab. Es bildet sich ein Rezirkulationsgebiet aus, dass bis ca.  $x=540\text{mm}$  reicht.

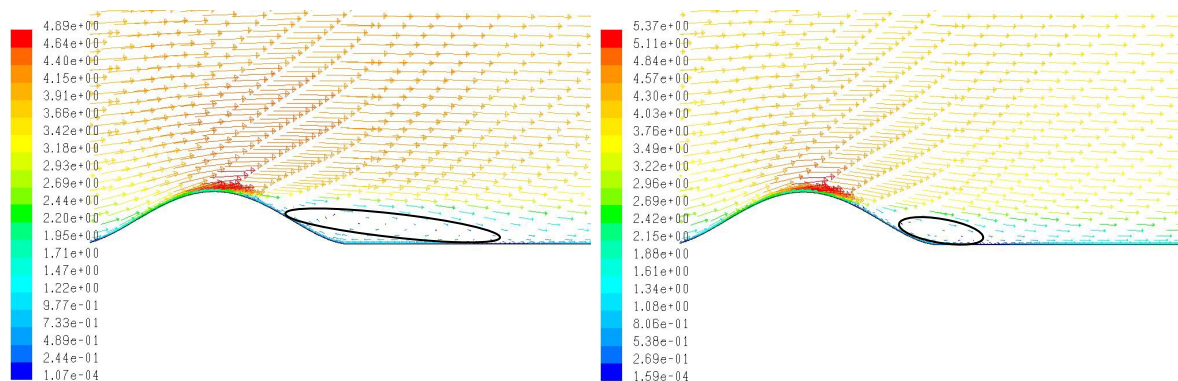


Abb. 5: Geschwindigkeitsvektorplot der SST (links) bzw. der  $k - \omega$  Simulation (rechts)

Die numerischen Berechnungen zeigen das gleiche Verhalten auf wie die Messungen. Es ist jedoch anhand Abb. 5 sichtbar, dass unterschiedliche Turbulenzmodelle für das Nachlaufgebiet zu unterschiedlichen Ergebnissen führen.

Beide Turbulenzmodelle geben das Rezirkulationsgebiet im Nachlauf des Hügels wieder. Das  $k-\omega$  Modell berechnet allerdings ein im Vergleich zur Messung zu kurzes Wirbelgebiet, das bis zu einer Position von ca.  $x=370\text{mm}$  reicht. Das Rezirkulationsgebiet des SST Turbulenzmodells wird zu lang berechnet und reicht bis ca.  $x=560\text{mm}$ . Im Fall des  $k-\omega$  Modells liegt der Ablösepunkt stromab des Hügels weiter hinten.

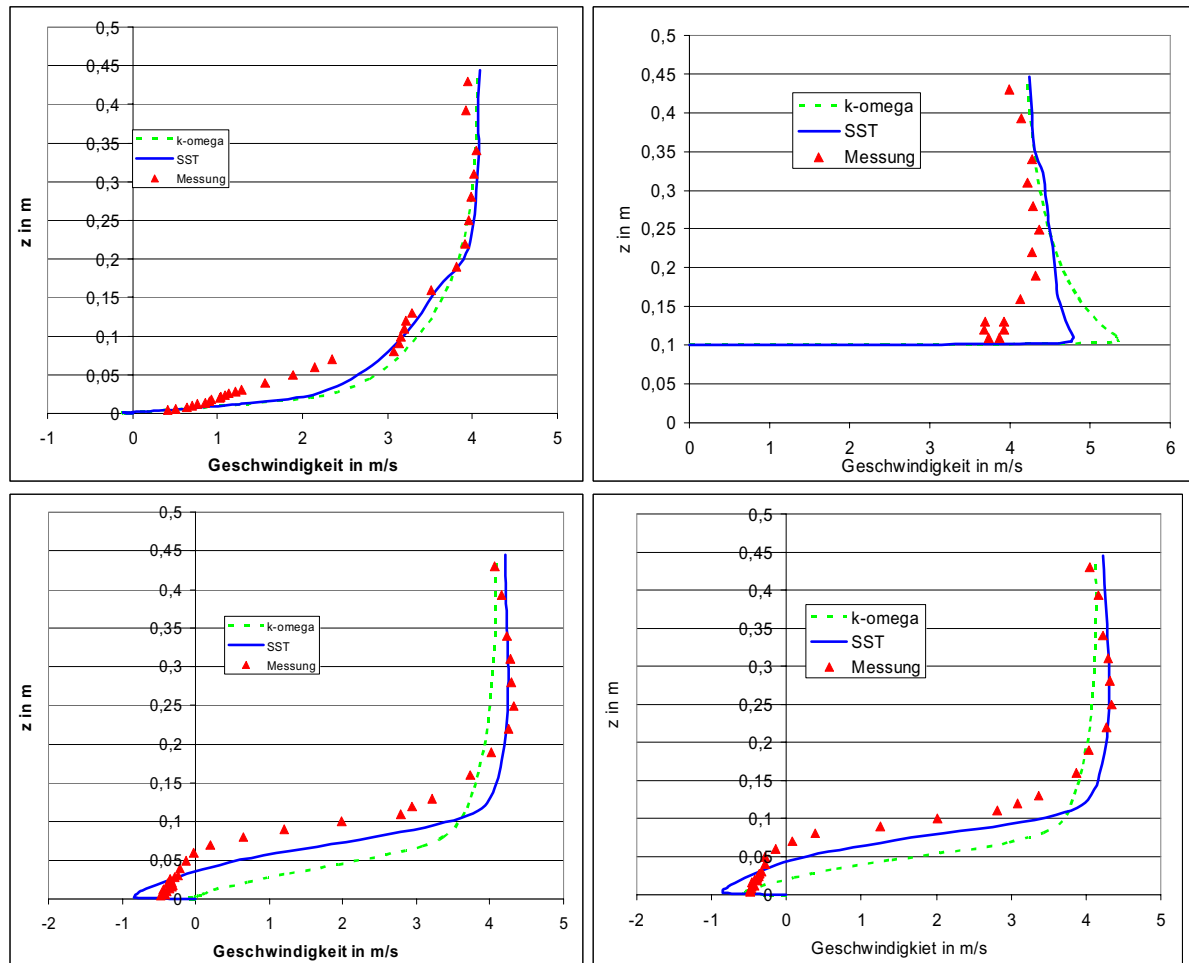


Abb. 6: Profile der Geschwindigkeit in Strömungsrichtung  
 links oben:  $x=-0,25\text{m}$  (vor dem Hügel), rechts oben:  $x=0\text{m}$  (Hügelspitze)  
 links unten:  $x=0,28\text{m}$  (hinter dem Hügel), rechts unten:  $x=0,35\text{m}$  (hinter dem Hügel)

In Abb. 6 bis Abb. 8 sind Profile der Geschwindigkeit in Strömungsrichtung, der Vertikalgeschwindigkeit und der turbulenten kinetischen Energie an verschiedenen Positionen des Strömungsgebietes dargestellt.

Vor dem Hügel wird die Geschwindigkeit in Strömungsrichtung von beiden Turbulenzmodellen mit sehr guter Übereinstimmung zur Messung berechnet. Auf der Hügelspitze unterscheiden sich beide jedoch im bodennahen Bereich. Beide Kurven zeigen Geschwindigkeitsmaxima, die in der Messung nicht zu erkennen sind. Die Rezirkulationsgebiete beider Modelle sind außerdem zu flach.

Die Vertikalströmung wird vor allem vom SST Modell gut wiedergegeben, auch wenn gerade auf der Hügelspitze die Geschwindigkeitsüberhöhung im Vergleich zur Messung zu klein ausfällt. Im Nachlauf des Hügels zeigt die Messung in der Scherzone zwischen Rezirkulationsgebiet und freier Strömung ( $z \approx 200\text{mm}$ ) ein Geschwindigkeitsmaximum, das beide Modelle nicht wiedergeben.

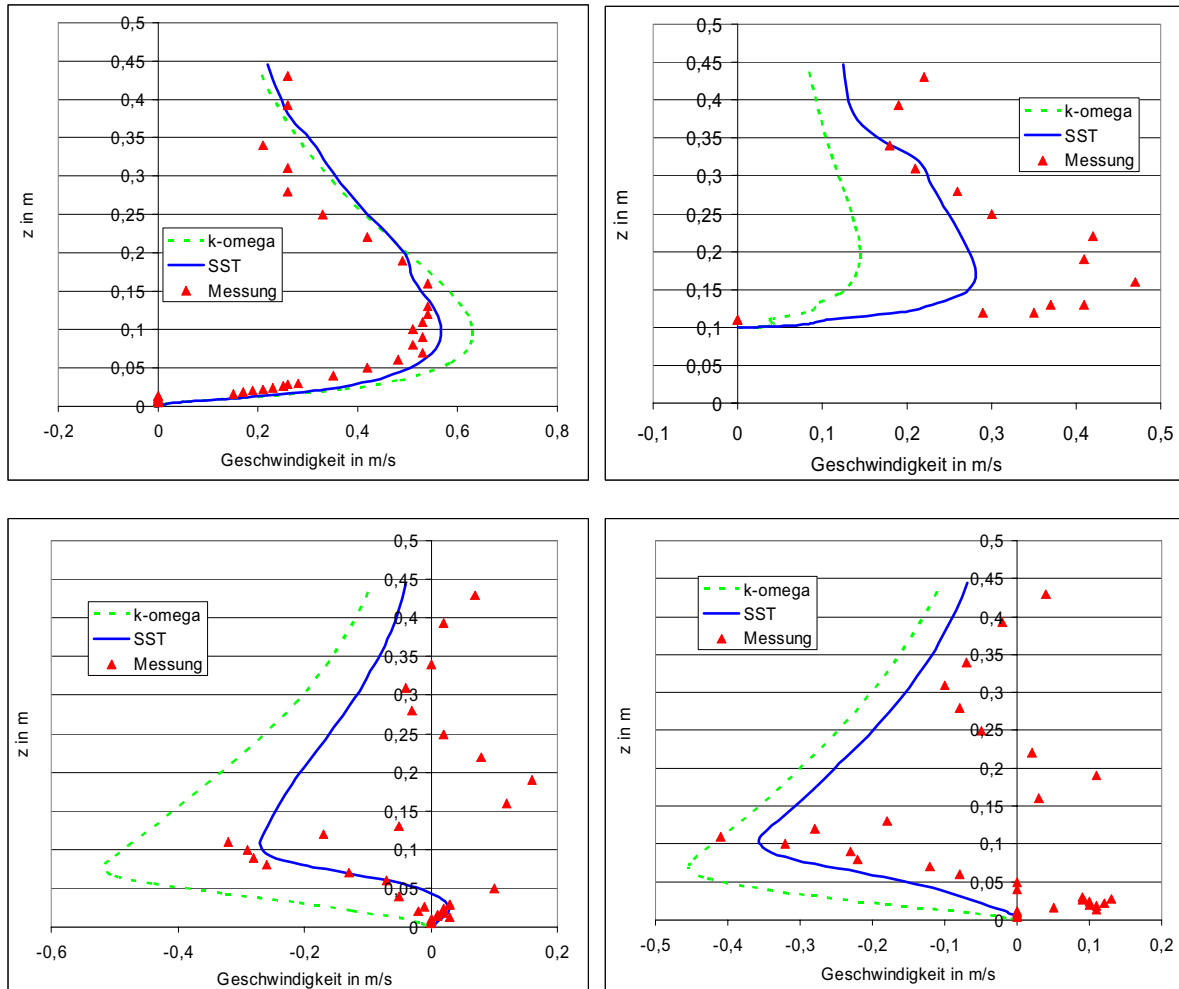


Abb. 7: Profile der Geschwindigkeit in vertikaler Richtung  
 links oben:  $x = -0,25\text{m}$  (vor dem Hügel), rechts oben:  $x = 0\text{m}$  (Hügelspitze)  
 links unten:  $x = 0,28\text{m}$  (hinter dem Hügel), rechts unten:  $x = 0,35\text{m}$  (hinter dem Hügel)

Die turbulente kinetische Energie (siehe Abb. 8) wird im Gegensatz zur Geschwindigkeit von beiden Modellen vor allem stromaufwärts des Hügels und auf der Hügelspitze nicht gut wiedergegeben. Stromauf des Hügels berechnet das SST Modell zwar den Betrag der höchsten turbulenten kinetischen Energie, die Position liegt jedoch etwas zu hoch. Die Abnahme der turbulenten kinetischen Energie erfolgt bei beiden Modellen zu langsam.

## Zusammenfassung

Die atmosphärische Grenzschicht konnte im kurzen Windkanal der technischen Universität Kaiserslautern mit Hilfe von Grenzschichtgeneratoren sehr gut abgebildet werden. Die Kriterien der VDI-Richtlinien wurden weitestgehend eingehalten, worauf die Überströmung eines steilen Hügels mit Hilfe der Laser-Doppler-Anemometrie vermessen wurde. Die Rezirkulati-

onszone stromab des Hügels konnte sehr gut erfasst werden. Die numerischen Berechnungen mit dem SST und dem  $k - \omega$  Turbulenzmodell geben das Rezirkulationsgebiet wieder. Die Ergebnisse der Berechnung mit dem SST Modell stimmen in Betrag und Position allerdings besser mit den Messwerten überein als das  $k - \omega$  Modell.

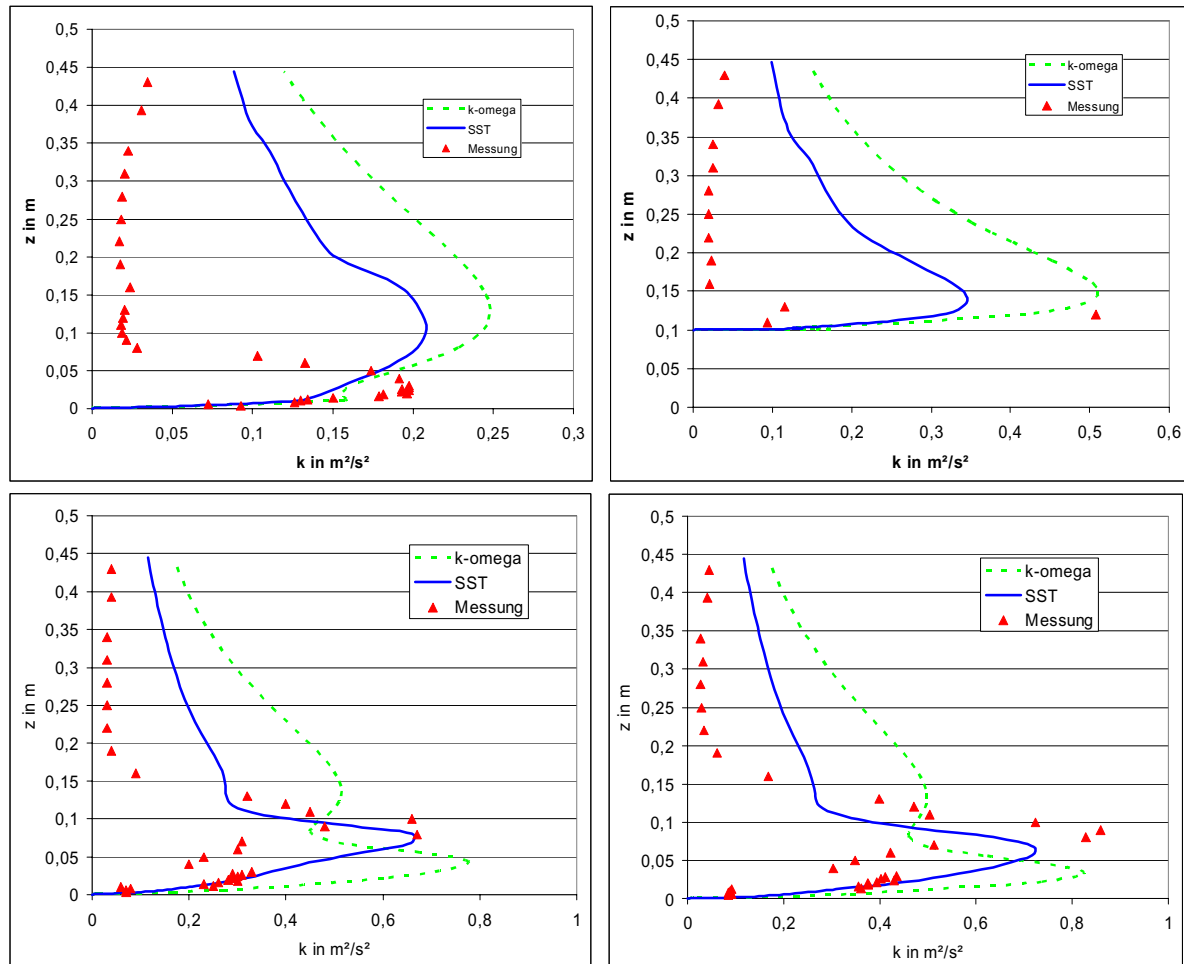


Abb. 8: Profile der turbulenten kinetischen Energie  
 links oben:  $x=-0,25\text{m}$  (vor dem Hügel), rechts oben:  $x=0\text{m}$  (Hügelspitze)  
 links unten:  $x=0,28\text{m}$  (hinter dem Hügel), rechts unten:  $x=0,35\text{m}$  (hinter dem Hügel)

## Literatur

- Cermak, J.E., 1971: Laboratory Simulation of the atmospheric Boundary Layer, AIAA Journal, Vol. 9, No. 9, pp.1743-1754
- Owen and Zienkiewicz, 1957: The production of uniform shear flow in a wind tunnel, J. Fluid Mech. 2, 521-531
- Counihan, J., 1969: An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel, Atmospheric Environment, Vol 3, 197-214
- Khurshudyan, L., 1981: Flow dispersion of pollutants over two-dimensional hills, EPA-600/4-81-C57
- Ruck, B., 1987: Laser-Doppler-Anemometrie
- Wilcox, D., 1998: Turbulence modeling for CFD
- Menter, F., 1994: Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. AIAA Journal 32 (8), 1598-1605
- Stengel, T., 2002: Numerical and experimental evaluation of lift forces in flows around surface-mounted bluff bodies, ASME FEDSM2002-31109