

EXPERIMENTELLE UND NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN AN TURBULENTEN HÜGELÜBERSTRÖMUNGEN

José Fernández Puga, Manfred Fallen*, Fritz Ebert

Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik

*Lehrstuhl für Strömungsmaschinen und Strömungsmechanik

Technische Universität Kaiserslautern

Postfach 3049

D-67663 Kaiserslautern

fernandez@mv.uni-kl.de

Tel.: +49-631-205-3035

Fax: +49-631-205-3055

Zusammenfassung

Im Windkanal der Technischen Universität Kaiserslautern wurde die atmosphärische Strömung über komplexem Gelände am Beispiel der Hügelüberströmung mit Hilfe der Laser-Doppler-Anemometrie untersucht. Aufgrund der kurzen Messstrecke wurde besonderes Augenmerk auf die Erzeugung des atmosphärischen Grenzschichtprofils gerichtet. Eine aus mehreren Spires bestehende Anordnung am Anfang der Messstrecke liefert ein für mäßig raues Gelände typisches Geschwindigkeitsprofil. Die Anforderungen der VDI-Richtlinie 3783 werden dabei weitestgehend eingehalten. Nach der Überströmung eines zweidimensionalen Hügels wurde nun das Strömungsfeld über einem dreidimensionalen Hügel untersucht. Numerische Untersuchungen zeigen, dass vor allem das RNG Modell die Messung zufriedenstellend wiedergibt.

Einleitung

Atmosphärische Strömungen spielen eine wichtige Rolle und haben erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt und den Menschen selbst. Städteplaner müssen auf die Ausbreitung der Industrieschadstoffe achten, während für Gebäudedesigner die Bauwerksbelastungen entscheidend sind. Hohe mittlere Windgeschwindigkeiten sind besonders für die Windenergie von Interesse und müssen zur Erstellung einer Ertragsprognose vor Errichtung einer Anlage vorausgesagt werden. Unter Umständen können aber auch irreparable Waldschäden entstehen.

Die Modellierung der atmosphärischen Strömung erfordert die Generierung einer Grenzschicht. 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 zweier steiler Einzelhügel untersucht. Der zweidimensionale Hügel verläuft über die gesamte Breite der Messstrecke; der dreidimensionale Hügel entsteht durch Rotation der zweidimensionalen Kontur. Dabei entspricht die Kontur der Hügel 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.

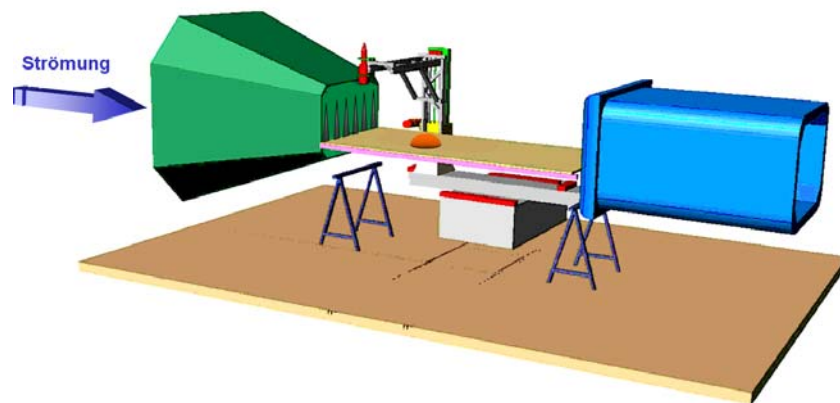


Abb. 1: Aufbau des Windkanals mit Messstrecke und Hügel

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 Hügel besitzen den gleichen Konturverlauf 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 α beträgt hierbei 0,16, wodurch ein mäßig raues Gelände beschrieben wird. Die Grenzschichtdicke beträgt ca. 300mm.

Die Turbulenzintensitäten in Strömungsrichtung, in lateraler und in vertikaler Richtung sind in Abb. 3 dargestellt. Der Verlauf der drei Kurven zeigt, dass im unteren Bereich der Grenz-

schicht ein mäßig raues Gebiet abgebildet wird. Im oberen Bereich ist die generierte Turbulenz allerdings zu gering.

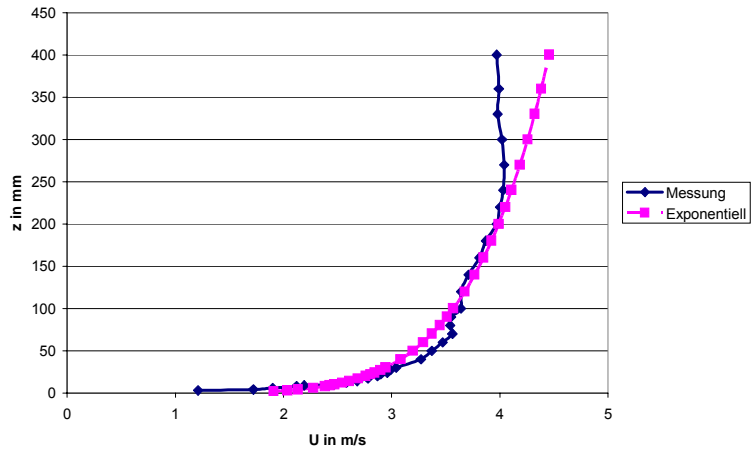


Abb. 2: Geschwindigkeitsprofil (Messung und Näherung durch Potenzansatz)

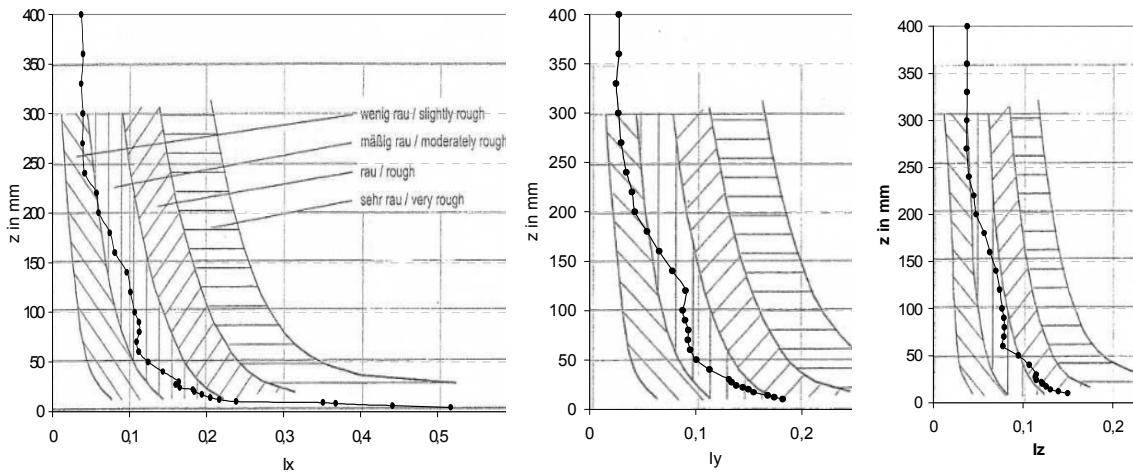


Abb. 3: Turbulenzintensitäten in x-, y- und z-Richtung

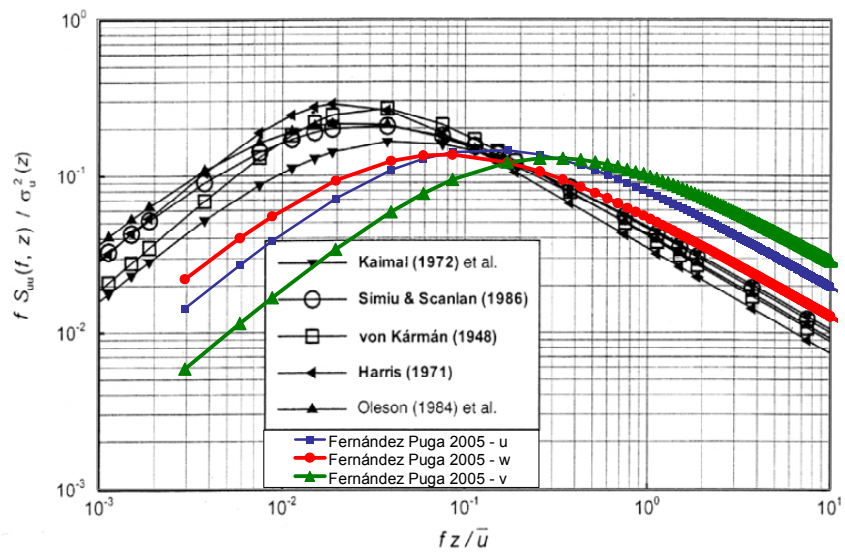


Abb. 4: Spektrale Dichteverteilung der kinetischen Energie der Turbulenz

Die spektrale Dichteverteilung der turbulenten kinetischen Energie in Abb. 4 zeigt, dass in Bereichen kleiner Frequenz, die Energie zu gering ist. Der Verlauf jedoch stimmt mit den in der Literatur angegebenen Kurven gut überein.

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 Hügeltiefe gebildete Reynoldszahl beträgt ca. 140.000. Mit der Rauiglängte von $z_0=0,08\text{m}$ und der Schubspannungsgeschwindigkeit $u_*=0,4\text{m/s}$ berechnet sich die Rauiglängte-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 numerischen Berechnungen werden mit einem Finite-Volumina CFD-Code durchgeführt. Die eingesetzten Turbulenzmodelle gehören hauptsächlich der Klasse der Zweigleichungsmodelle an.

Für das $k-\varepsilon$ bzw. das $k-\omega$ Turbulenzmodell werden die Standardformulierungen nach Launder und Spalding 1974 bzw. nach Wilcox 1998 verwendet.

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 ω basierende Formulierung überführt. Die transformierte Gleichung unterscheidet sich von der originalen ω -Transportgleichung lediglich durch einen zusätzlichen Kreuzdiffusionsterm D_ω . Den Übergang zwischen wandnahen und wandfernen Bereich regeln zwei Funktionen F_1 und F_2 .

Das RNG basierte $k-\varepsilon$ Modell wurde mit Hilfe der Renormalisierungsgruppentheorie aus den instationären Navier-Stokes Gleichungen von Yakhot und Orszag 1986 hergeleitet. Die Gleichungen für k und ε entsprechen den Gleichungen des Standard $k-\varepsilon$ Modells, allerdings wird die turbulente Viskosität durch eine effektive Viskosität berechnet. Diese ermöglicht die Beschreibung des effektiven turbulenten Transports in Abhängigkeit der effektiven Reynoldszahl, so dass wandnahe Strömungen besser modelliert werden. Die Konstante C_μ besitzt allerdings den Wert 0,0845. Die Herleitung mittels der RNG Methode liefert zusätzlich noch eine veränderte Konstante $C_{\varepsilon 2}$. In den Regionen hoher Scherraten ist der Koeffizient $C_{\varepsilon 2}$ des RNG Modells kleiner als der des Standard $k-\varepsilon$ Modells, wodurch die Dissipationsrate größer und die turbulente kinetische Energie größer ist. Dies bewirkt eine kleinere turbulente Viskosität, so dass das RNG Modell sensibler hinsichtlich hoher Scherraten und Stromlinienkrümmung ist.

Bei der Large Eddy Simulation kommt das Feinstrukturmodell von Smagorinsky und Lilly zum Einsatz. Es handelt sich dabei um ein Wirbelviskositätsmodell, das berücksichtigt, dass die Spannungen erhöhten Transport und Dissipation verursachen.

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.

Das Geschwindigkeitsfeld wurde bereits von Fernandez Puga et al. 2004 in Form eines Vektorplots dargestellt. Die numerischen Berechnungen der zweidimensionalen Hügelüberströmung zeigen die deutlichen Unterschiede der Turbulenzmodelle auf.

Der Verlauf der Geschwindigkeitskomponente in Strömungsrichtung über der Hügelspitze ist in Abb. 5 dargestellt. Alle Modelle berechnen die Geschwindigkeitsüberhöhung in Bodennähe. Diese liegt bei den Messungen jedoch höher und findet in einem breiteren Höhenbereich statt. Vor allem das $k-\omega$ Modell liefert eine zu große Geschwindigkeit in direkter Bodennähe. Das RNG Modell gibt die Messungen am besten wieder. Dies ist auf die im Modell implementierte Sensibilisierung hinsichtlich hoher Scherraten und Stromlinienkrümmung zurückzuführen.

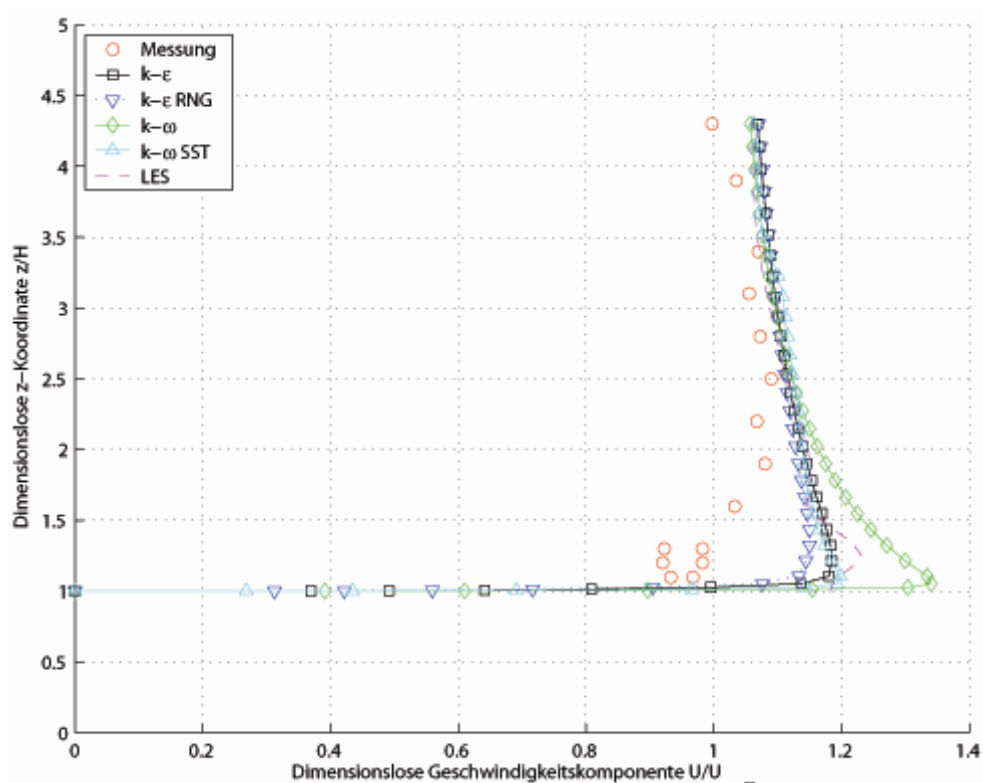


Abb. 5: Verlauf der Longitudinalgeschwindigkeit auf der Hügelspitze

Ein ähnliches Verhalten ist im Verlauf der Vertikalgeschwindigkeit in Abb. 6 zu erkennen. In Bodennähe wird die Geschwindigkeit von allen Modellen zu gering berechnet. Die beste Übereinstimmung mit den Messungen liefern, das SST und das RNG Modell. Vor allem in größeren Höhen stimmen diese Modelle mit den Messungen sehr gut überein.

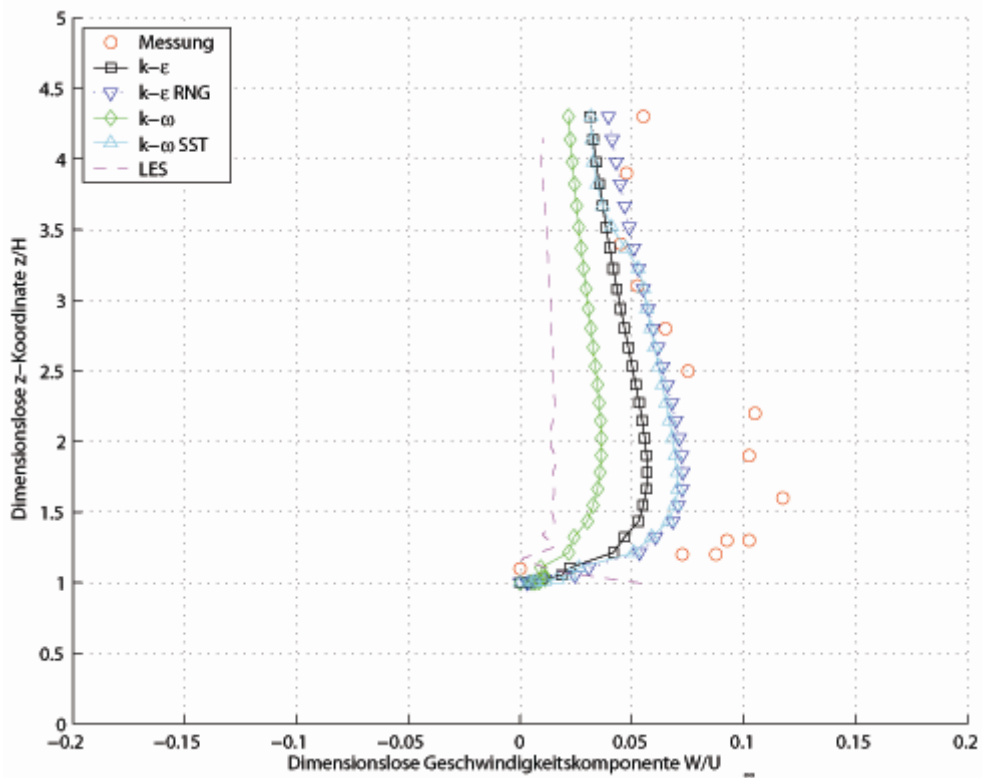


Abb. 6: Verlauf der Vertikalgeschwindigkeit auf der Hügelspitze

Das Rezirkulationsgebiet im Nachlauf des Hügels (siehe Abb. 7) ist in allen Fällen deutlich zu erkennen.

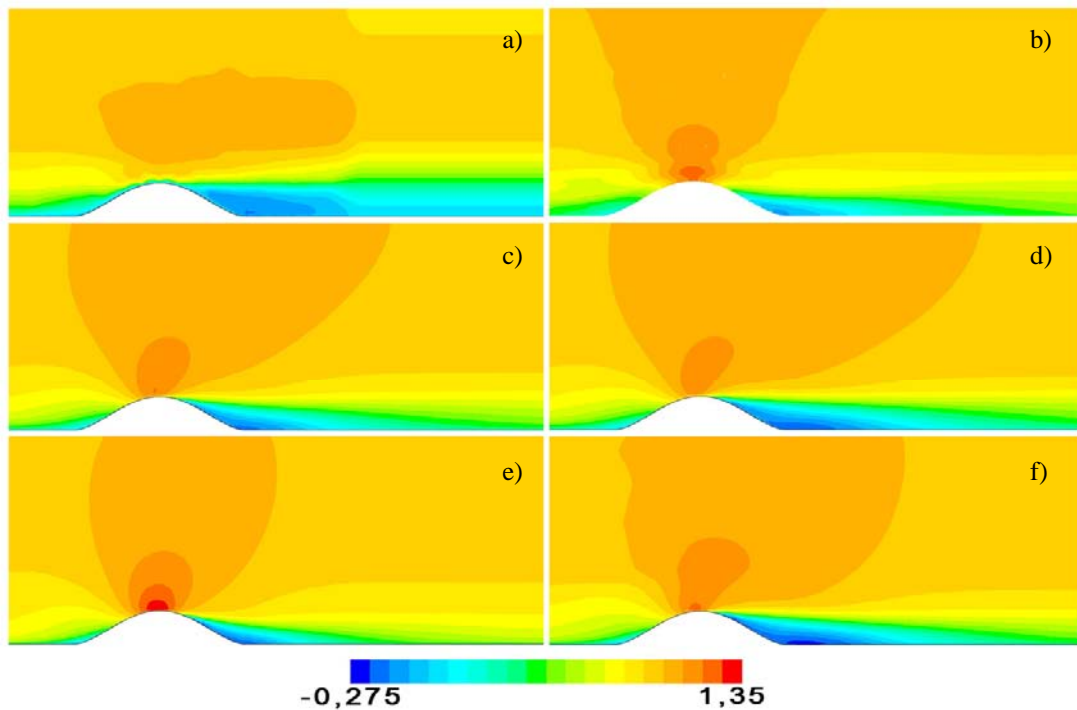


Abb. 7: Konturverlauf der dimensionslosen Longitudinalgeschwindigkeit U/U_∞
 a) Messung, b) LES, c) $k-\varepsilon$, d) RNG, e) $k-\omega$, f) SST

Das gemessene Wirbelgebiet im Nachlauf ist jedoch höher als bei den Rechnungen. Das $k - \omega$ berechnet den größten Geschwindigkeitsbetrag über der Hügelspitze. Die betragsmäßig höchste Rückströmgeschwindigkeit liefert das SST Modell. Die Länge des Rezirkulationsgebietes wird am besten von dem RNG und dem SST Modell berechnet (siehe Tabelle 1). Mit einer dimensionslosen Länge von 5,3 bzw. 5,6 wird die gemessene Länge von 5,4 nur wenig unter- bzw. überschätzt. Das schlechte Abschneiden der Large Eddy Simulation ist auf die hohe Sensibilität bezüglich der Randbedingungen zurückzuführen.

	Messung	$k - \epsilon$	RNG	$k - \omega$	SST	LES
Rezirkulationslänge x/H	5,4	4,1	5,3	3,7	5,6	3,5

Tabelle 1: Gemessene und berechnete Rezirkulationslängen

Die Überströmung des dreidimensionalen Hügels ist in Abb. 8 dargestellt. Das Rezirkulationsgebiet fällt deutlich kleiner aus als das Rezirkulationsgebiet des zweidimensionalen Hügels. Die Rezirkulationslänge beträgt $x/H=3,3$. Die erhöhte turbulente kinetische Energie in der Scherschicht zwischen Rezirkulationsgebiet und freier Strömung ist in Abb. 8 d) deutlich zu erkennen.

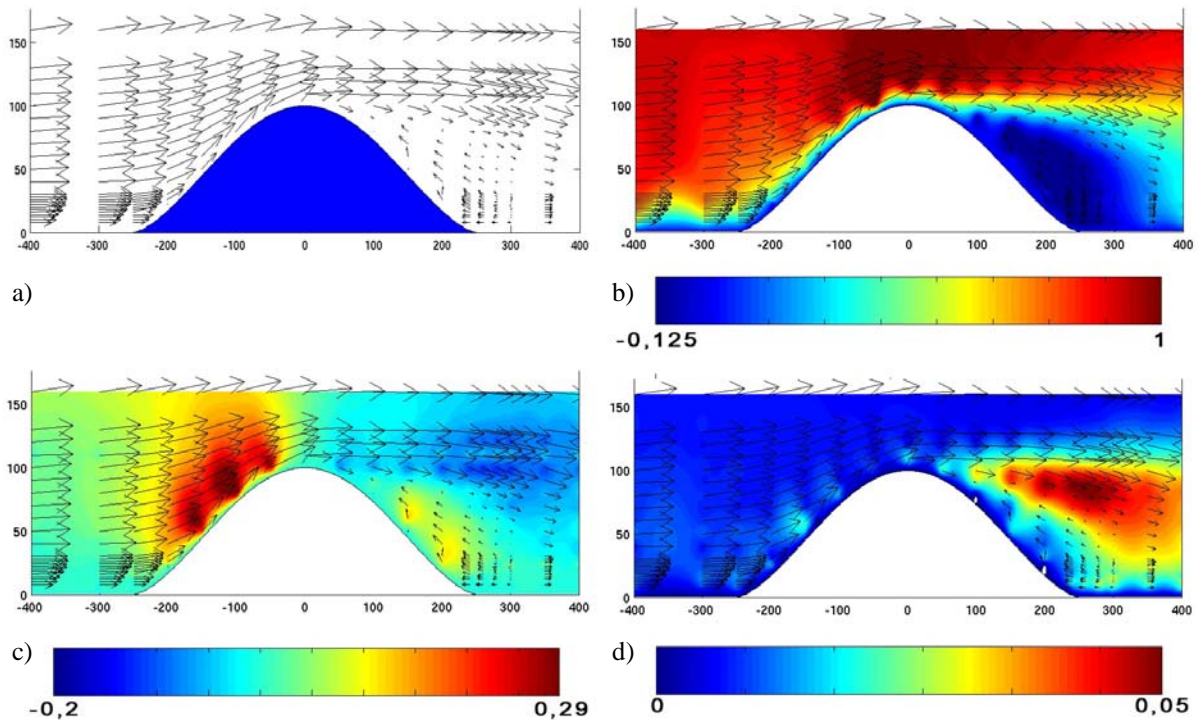


Abb. 8: Strömungsgrößen in der Symmetrieebene der dreidimensionalen Hügelüberströmung:

- a) Gemessener Vektorplot;
- b) Gemessener Konturverlauf der dimensionslosen Longitudinalgeschwindigkeit U / U_∞ ,
- c) Gemessener Konturverlauf der dimensionslosen Vertikalgeschwindigkeit W / U_∞ und
- d) Gemessener Konturverlauf der dimensionslosen turbulenten kinetischen Energie $k / \frac{3}{2} U_\infty^2$

Der instationäre und turbulente Strömungsverlauf wird in Abb. 9 sichtbar. Dargestellt sind Flächen gleicher Wirbelstärke für die Überströmung des zweidimensionalen und des dreidimensionalen Hügels berechnet mit Hilfe der Large Eddy Simulation. Im Nachlauf des Hügels entstehen große Wirbel, die mit der Strömung davongetragen werden. Im Fall des dreidimensionalen Hügels ist der Hufeisenwirbel, welcher seitlich um den Hügel verläuft, gut zu erkennen.

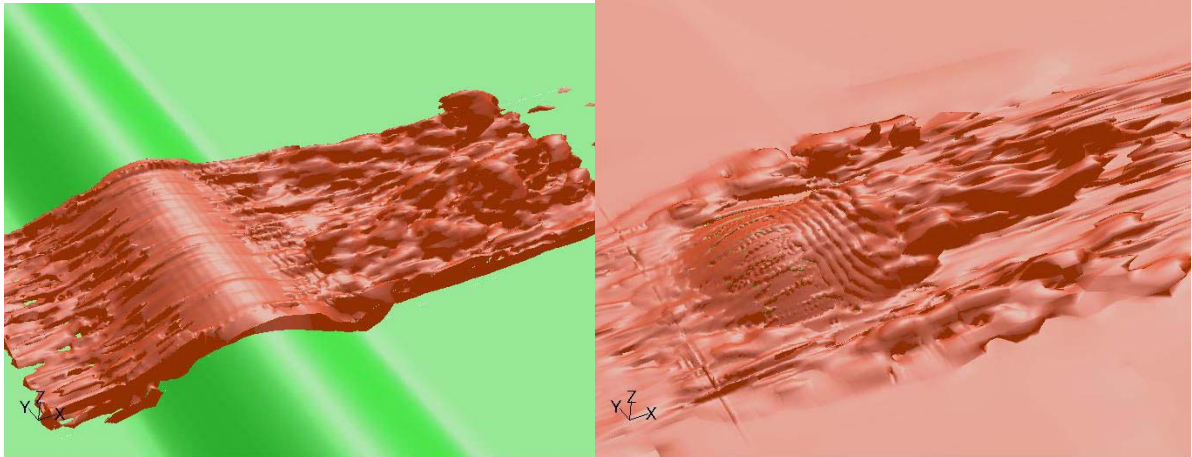


Abb. 9: Momentanaufnahme von Flächen gleicher Wirbelstärke bei der zweidimensionalen (links) und der dreidimensionalen (rechts) Hügelüberströmung (LES-Rechnung)

Zusammenfassung

Im Windkanal der Technischen Universität Kaiserslautern wurde die atmosphärische Strömung über Einzelhügeln untersucht. Dazu wurde nach der VDI-Richtlinie 3783 ein Grenzschichtprofil erzeugt und das Strömungsfeld mit Hilfe der Laser-Doppler-Anemometrie vermessen. Die Rezirkulationszonen stromab der Hügel konnten sehr gut erfasst werden. Die numerischen Berechnungen zeigen deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Turbulenzmodellen. Gute Übereinstimmungen mit der Messung lassen sich mit dem SST und dem RNG Modell erzielen. Die Komplexität der turbulenten Strömung lässt sich mit Hilfe der Large Eddy Simulation gut erfassen. Der Hufeisenwirbel um den dreidimensionalen Hügel ist deutlich zu erkennen.

Literatur

- Cermak, J.E., 1971: Laboratory Simulation of the atmospheric Boundary Layer, AIAA Journal, Vol. 9, No. 9, pp.1743-1754
- Counihan, J., 1969: An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel, Atmospheric Environment, Vol 3, 197-214
- Fernández Puga, J. et al., 2004: Erzeugung eines atmosphärischen Grenzschichtprofils im Windkanal und LDA_Messung der Strömung über einem steilen Einzelhügel, Tagungsbeitrag GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", Karlsruhe, 2004
- Khurshudyan, L., 1981: Flow dispersion of pollutants over two-dimensional hills, EPA-600/4-81-C57
- Launder, B. E. und Spalding, D. B., 1974: The numerical computation of turbulent flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3, 269-289.
- Menter, F., 1994: Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. AIAA Journal 32 (8), 1598-1605
- Owen and Zienkiewicz, 1957: The production of uniform shear flow in a wind tunnel, J. Fluid Mech. 2, 521-531
- Ruck, B., 1987: Laser-Doppler-Anemometrie
- VDI 3783, 2000: Umweltmeteorologie - Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht - Windkanalanwendungen. VDI-Richtlinie 3783 Blatt 12, Verein Deutscher Ingenieure
- Wilcox, D., 1998: Turbulence modeling for CFD
- Yakhot, V. und Orszag, S. A., 1986. Renormalization Group Analysis of Turbulence: I. Basic Theory. Journal of Scientific Computing, 1, 1-51.