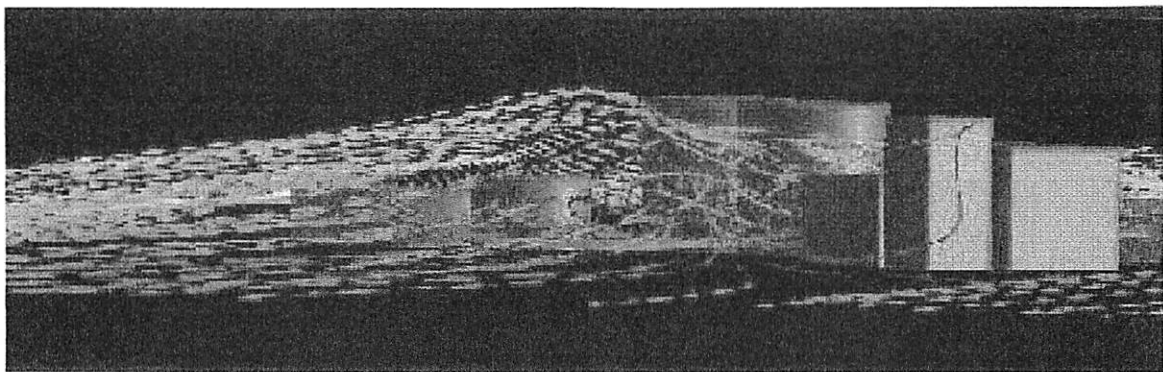


CFD-Simulation zur Umströmung einer Biogasanlage



Erstellt im Auftrag für

Biokraft Hennstedt/Dithmarschen
GmbH & Co. KG
Julianka
25779 Hennstedt

Revision 0

Hamburg, September 2002



Die Ausarbeitung erfolgte durch

Dr.-Ing. Thomas Hahn
TÜV Nord INDUSTRIEBERATUNG

TÜV-Auftragsnummer: 8000134615

1. Eingereichte Unterlagen

- Biogasanlage Hennstedt, Lageplan und Übersicht; farmatic biotech energy ag, Zeichnungs-Nr. 2002:01 HE 00 C.
- Biogasanlage Gemeinde Hennstedt, Lageplan Bestand; Ingenieurgesellschaft SASS & KUHRT, Zeichnungs-Nr. L1, Mai 2002.
- Biogasanlage Gemeinde Hennstedt, Funktionsplan; Ingenieurgesellschaft SASS & KUHRT, Zeichnungs-Nr. F3, Juli 2002.

2. Aufgabenstellung und Einleitung

Der Auftraggeber plant in der Gemeinde Hennstedt, Schleswig-Holstein, den Bau einer Biogasanlage und eines südlich davon gelegenen Gewächshauskomplexes. In nördlicher Richtung befindet sich in etwa 170 m Entfernung der Standort einer Windenergieanlage (WEA) mit ca. 70 m Nabenhöhe und 60 m Rotordurchmesser.

Der TÜV Nord ist beauftragt worden, zu prüfen, inwieweit die geplanten Bauwerke das Windfeld am Standort der Windenergieanlage beeinflussen. Hierzu wird ein dreidimensionales Rechenmodell erstellt und die Umströmung der Gebäude simuliert. Aussagen zur Turbulenz im Nachlauf der Gebäude werden qualitativ auf Grundlage von Literaturdaten getroffen.

Auf der Grundlage eigener Berechnungen an verschiedenen Windenergieanlagen werden weiterhin qualitative Aussagen zu einer Gefährdung der Biogasanlage und der Gewächshäuser durch Rotorbruchstücke im Falle eines Blattbruches an der Windenergieanlage getroffen.

3. Modellierung

Die Biogasanlage besteht aus mehreren größeren Einzelbauwerken von maximal etwa 20 m Höhe. Der Gewächshauskomplex besitzt eine Bauhöhe von etwa 5,5 m. Die Bauwerke können entweder durch Rechtecke oder Zylinder dargestellt werden, die so gewählt werden, dass vorhandene Schrägen durch die Form mit abgedeckt werden. Die in der Strömung stehende Querschnittsfläche ist damit in konservativer Näherung größer bzw. gleich der real existierenden Fläche. Abbildung 1 zeigt die Geometrie des Rechenmodells in der Draufsicht.

Die Anströmung erfolgt entlang der x-Achse über die Gebäude in Richtung zum Standort der WEA. Das Geschwindigkeitsprofil der anströmenden Luft wird entsprechend der vertikalen Verteilung einer stabilen Atmosphäre mit der am Standort herrschenden mittleren Jahreswindgeschwindigkeit angenommen.

Es wurde das Programmsystem Fluent (Version 6.0) der Firma Fluent Inc. eingesetzt. Fluent gehört zur Gruppe der Computational Fluid Dynamics (CFD) Software. CFD-Software wird zur Berechnung dreidimensionaler Strömungsprozesse unter Berücksichtigung des Wärmetransports durch Leitung, Konvektion und Strahlung sowie chemischer Reaktionen eingesetzt. Die Programmentwicklung und -auslieferung von Fluent ist nach BSI (British Standard Institution) qualitätsgesichert /1/.

Das Programm löst die Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls (Navier-Stokes) sowie der Enthalpie im Falle von Wärmetransport und der chemischen Komponenten.

ten im Falle chemischer Reaktionen oder Mischungsvorgängen. Die Verwendung reynoldsgemittelter Navier-Stokes-Gleichungen zur Beschreibung turbulenter Strömungen erfordert je nach verwendetem Turbulenzmodell bis zu sieben weitere Erhaltungsgleichungen. Als Turbulenzmodell kommt im vorliegenden Fall ein RNG-k- ϵ -Modell zum Einsatz.

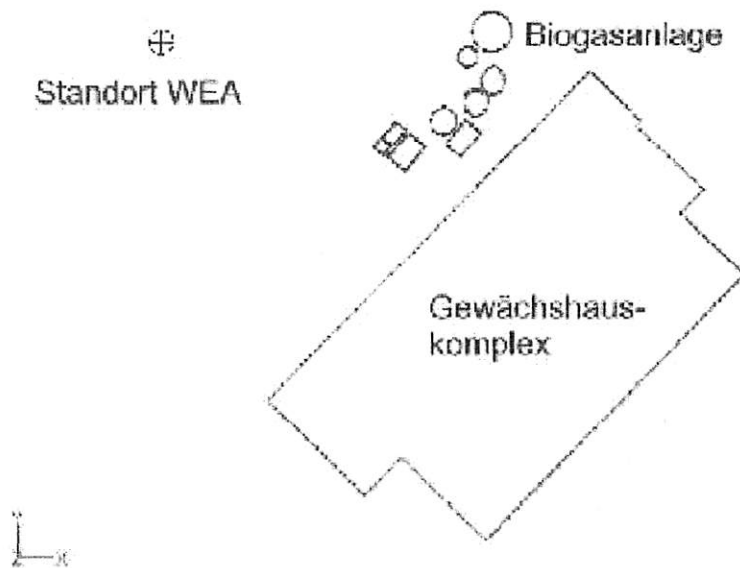


Abbildung 1: Modell der Biogasanlage und des Gewächshauses (Draufsicht).

Die zu Grunde liegenden Gleichungen werden auf Grundlage einer Finite-Volumen-Technik diskretisiert. Die Zellgleichungen können letztlich auf beliebigen, unstrukturiert angeordneten Polyedern gelöst werden. In der Praxis sind dies Drei- und Vierecke im 2D-Fall bzw. Hexaeder, Tetraeder und Prismen mit dreieckiger Grundfläche im 3D-Fall. Das gesamte Rechengebiet ist hier mit numerisch besonders stabilen Hexaeder-Zellen vernetzt, die im Bereich der Gebäude verdicht sind. Die Berechnung erfolgt stationär bis zum Erreichen entsprechender Konvergenzkriterien.

4. Berechnungsergebnisse

Die höchsten Bauwerke von etwa 20 m Höhe produzieren eine ausgeprägte Nachlaufströmung, die sich jedoch auf die unteren Luftschichten begrenzt. In Abbildung 2 ist die Windgeschwindigkeit in verschiedenen Höhen über dem Boden dargestellt. In Abb.2a sind deutlich die Konturen des Gewächshauses im Geschwindigkeitsfeld wieder zu erkennen. Auf 20 m Höhe (Abb. 2b) lässt sich eine ausgeprägte Nachlaufströmung ausgehend von den zwei etwa 19 m hohen zylindrischen Fermentern erkennen, die bis über den Standort der WEA hinausreicht.

Schon auf 30 m Höhe sind die Einflüsse jedoch gering und verschwinden auf 50 m Höhe vollständig. Das Windfeld am Rotor der WEA wird damit nicht nachweislich beeinflusst. Dies wird auch in Abbildung 3a deutlich, wo die Verteilung der Windgeschwindigkeit in einem Schnitt auf Höhe der WEA und senkrecht zur Strömungsrichtung wiedergegeben ist. Im Vergleich zur ungestörten Strömung, wie sie ganz rechts in Abbildung 3a zu erkennen ist, zeigt sich eine Reduzierung in den unteren Schichten während auf Höhe des Rotors kein Einfluss mehr sichtbar ist. In Abb. 3b ist ein ähnlicher Schnitt, jedoch 150 m hinter den Fermentern dargestellt. Auch hier ist in den oberen Luftschichten kein Einfluss nachweisbar.

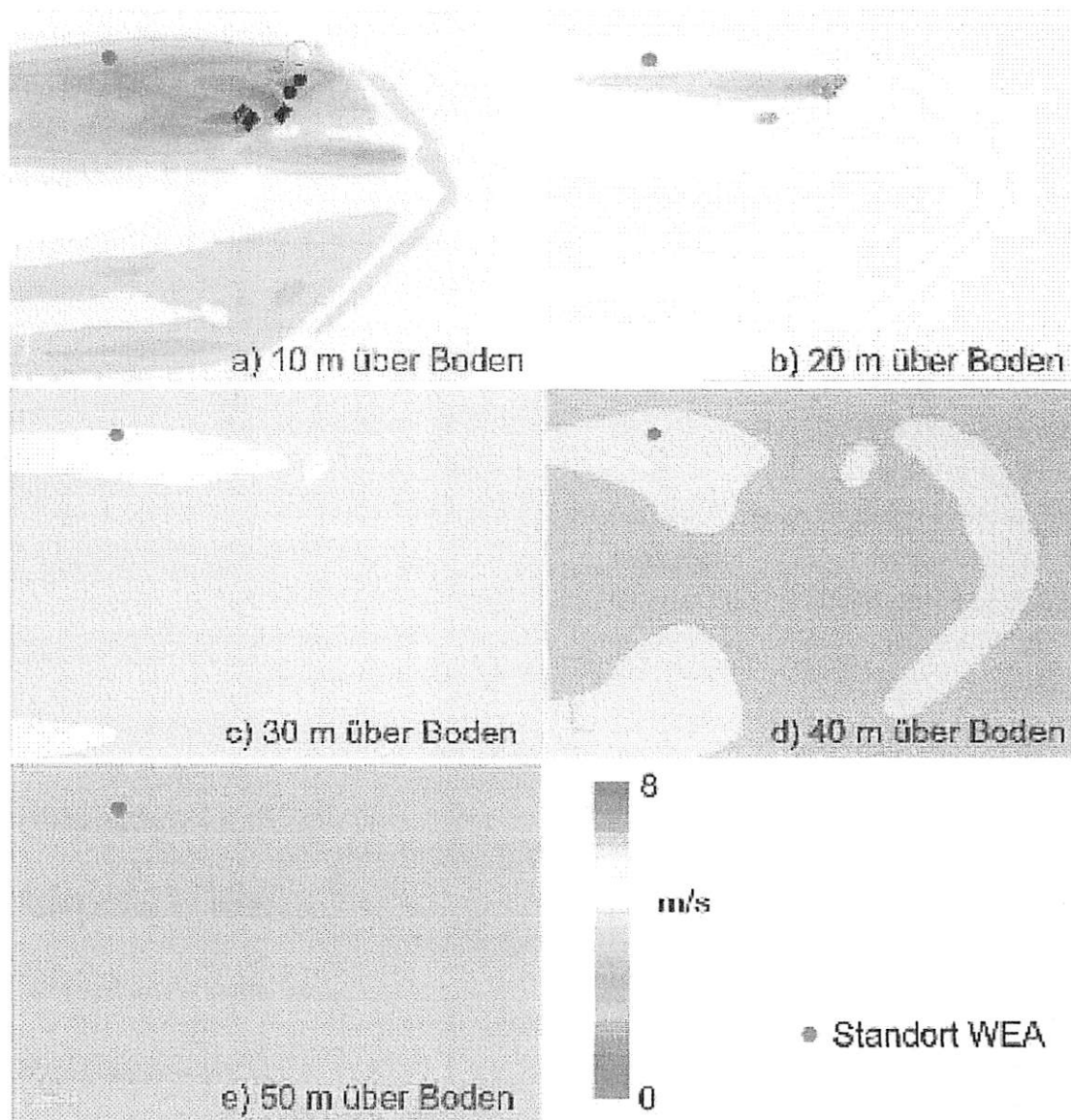


Abbildung 2: Windgeschwindigkeit in verschiedenen Höhen über dem Boden.

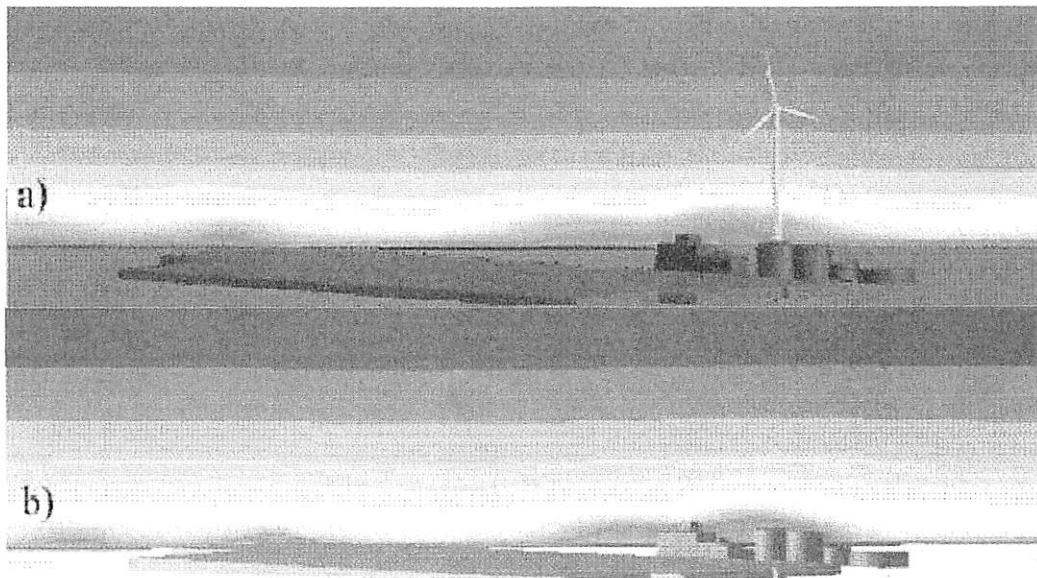


Abbildung 3: a) Strömungsfeld auf Höhe der Windenergieanlage und in Lee der geplanten Gebäude (die eingezeichnete Windenergieanlage entspricht in Lage und Größe der vorhandenen Anlage). b) Strömungsfeld 150 m hinter den Fermentern.

5. Turbulenz im Nachlauf

In der Nachlaufströmung von Gebäuden kommt es zu Turbulenzen infolge von Wirbelablösungen. Ausgeprägte Wirbelschleppen wurden hinter zylindrischen Bauten beobachtet und untersucht. Im vorliegenden Fall wird die Geometrie der Fermenter betrachtet, da diese die höchsten zylindrischen Bauten bilden. Die Umströmung lässt sich nach /2, 3, 9/ entsprechend der mit dem Zylinderdurchmesser gebildeten Reynolds-Zahl in mehrere Abschnitte einteilen. Der im vorliegenden Fall relevante Bereich umfasst das kritische und überkritische Regime.

Vom unterkritischen zum überkritischen Regime vollzieht sich dabei der Wechsel von der laminaren Strömung mit Instabilitäten in der Wirbelstraße der Nachlaufströmung hin zur turbulenten Strömung.

Im unterkritischen Regime kommt es zu einer Wirbelablösung, die unabhängig von der Reynolds-Zahl bei einer Strouhal-Zahl Sr von 0,21 liegt. Im kritischen Regime variiert die Ablösefrequenz und liegt im überkritischen Regime abhängig von der Reynolds-Zahl im Bereich $0,25 < Sr < 0,3$. Die Strouhal-Zahl ist definiert als:

$$Sr = \frac{fD}{V}$$

- f = Ablösefrequenz
- D = Zylinderdurchmesser
- V = Fluidgeschwindigkeit

Im Bereich $1 < V < 30$ m/s ergeben sich für $Sr=0,25$ Ablöseintervalle von etwa 2,5 bis 75 sec an den Fermentern.

Untersuchungen zur Stabilität und Zerfall von Wirbel finden sich im Zusammenhang mit den Nachlaufwirbeln von Verkehrsflugzeugen (siehe z.B.: /4, 6, 7, 8/). Der Abbau der Wirbel ist dabei vom Atmosphärenzustand abhängig und wird durch folgende Parametern beeinflusst /4, 6, 7, 8/:

- Turbulenz,
- Schichtung und
- Scherung.

Eine instabile Schichtung beschleunigt den Abbau der Wirbelstraße /4/ und ausgedehnte atmosphärische Wirbelstraßen werden durch stabile Inversionenlagen begünstigt. Mit zunehmender Turbulenz der Atmosphäre beschleunigt sich der Wirbelabbau ebenfalls stark /4/ und geht von einer gaußförmigen Abbaukurve in einen exponentiell abfallenden Verlauf über.

Messungen an Zylindern in Reihe /5/ zeigen weiter, dass die Schubkraft auf einen Zylinder in Lee schon ab einem Abstand von 5 D beginnt nachzulassen. Die wesentlichen Anregungsfrequenzen n sind dabei über die Strouhalzahl zu:

$$n = \frac{Sr \cdot V}{D} \text{ bzw. } n = \frac{2 \cdot Sr \cdot V}{D} \text{ gegeben.}$$

Im vorliegenden Fall ist bei einem Abstand von 10 D nur noch mit einem geringen Einfluss von Wirbeln zu rechnen. Eine ausgedehnte Wirbelschleppe kann sich bei stabilen Atmosphärenverhältnissen nur im unteren Bereich bis etwa 30 m über dem Boden ausbilden. Der Einfluss bleibt in diesem Fall auf den unteren Bereich des Turms beschränkt.

6. Gefährdung durch Blattbruchstücke

Im Falle eines Blattabrisses oder des Abrisses eines Blattbruchstückes kommt es auf Grund der Größe und Masse des Blattes bzw. Bruchstückes zu einer Gefährdung der Umgebung.

Im Rahmen verschiedener Projekte wurden beim TÜV Nord e.V. Berechnungen zur Flugbahn von Blattbruchstücken an verschiedenen WEA durchgeführt. Basierend auf den aerodynamischen Kennwerten, der Geometrie und der Massenverteilung des Blattes wurden die am Blattbruchstück angreifenden Kräfte ermittelt. Neben der Schwerkraft und dem anfänglichen Impuls des Bruchstückes, die die rein ballistische Flugbahn festlegen, wurden so auch die aerodynamischen Kräfte erfasst. Die aktuelle Position und Lage des Bruchstückes konnte damit bis zum Aufschlag am Boden in Zeitschritten von 0,02 Sekunden verfolgt werden. Aus einer Menge von mehreren tausend Flugbahnen, die unter statistischer Variation der Einflussparameter gewonnen wurden, konnten hieraus Wahrscheinlichkeiten für die Flugweiten ermittelt werden.

Entscheidend für die Berechnung der Flugbahn ist die Kenntnis der Blattmassenverteilung und der aerodynamischen Kennwerte des Blattes. Hierzu wurden im Pro-



gramm die aerodynamischen Koeffizienten der verwendeten Blattprofile für alle Anströmrichtungen und die reale Blattmassenverteilung hinterlegt. Die Flugweite schwankt entsprechend für verschiedene Anlagentypen. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein feststehendes Gebäude von einem Bruchstück getroffen wird, fällt je nach Anlage ab einer Entfernung von ca. 2,5 bis 4 Rotordurchmessern auf eine Wahrscheinlichkeit von unter $1 \cdot 10^{-4}$.

In einer vom TÜV Nord in Auftrag gegebenen Studie /10/ wurden 1144 Anlagen hinsichtlich eines Ereignisses mit Blattschäden einschließlich Blattabriss ausgewertet. Hieraus ergibt sich nach konservativer Schätzung eine Eintrittshäufigkeit von 10^{-2} pro Anlage und Jahr. Daraus folgt, dass ab einer Entfernung von ca. 2,5 bis 4D von der WEA die Eintrittshäufigkeit eines Schadens durch ein Blattbruchstück bei einmal in einer Millionen Jahren liegt (10^{-6}) und eine Gefährdung ab dieser Entfernung damit praktisch ausgeschlossen werden kann.

Zum Vergleich sei genannt, dass die minimale endogene Sterblichkeit, d.h. der Tod durch verschiedene technologische Ursachen, in wirtschaftlich gut entwickelten Ländern bei ca. $2 \cdot 10^{-4}$ Todesfälle/Person*Jahr liegt /11/. Hieraus wird in /11/ abgeleitet, dass für ein Ereignis mit Todesfolge infolge eines neu eingeführten Verkehrssystems ein Wert von 10^{-5} Todesfällen/Person*Jahr zu akzeptieren ist.

Im vorliegenden Fall liegt die Entfernung zu den Gebäuden in der Größenordnung von etwa 3 Rotordurchmessern. Die Gefährdung durch Blattbruchstücke kann hier mit etwa einmal in 100 000 Jahren (10^{-5}) abgeschätzt werden. Genauere Zahlen lassen sich nur auf Grundlage der realen Anlagendaten ermitteln.



7. Zusammenfassung

Der Auftraggeber plant in der Gemeinde Hennstedt, Schleswig-Holstein, den Bau einer Biogasanlage und eines südlich davon gelegenen Gewächshauskomplexes. In nördlicher Richtung befindet sich in etwa 170 m Entfernung der Standort einer Windenergieanlage (WEA) mit ca. 70 m Nabenhöhe und 60 m Rotordurchmesser.

Der TÜV Nord ist beauftragt worden, zu prüfen, inwieweit die geplanten Bauwerke das Windfeld am Standort der Windenergieanlage beeinflussen. Aussagen zur Turbulenz im Nachlauf der Gebäude und zu einer Gefährdung der Biogasanlage durch Rotorbruchstücke im Falle eines Blattbruches an der Windenergieanlage werden qualitativ getroffen.

Die Verteilung der mittleren Windgeschwindigkeit am Standort der WEA wurde auf Basis einer dreidimensionalen Berechnung der Gebäudeumströmung bestimmt. Es zeigt sich, dass die Windgeschwindigkeit auf Höhe des Rotors nicht beeinflusst wird. Ein vergleichbares Ergebnis ergibt sich auch in einem Schnitt 150 m hinter den Fermentern. Die Berechnungen wurden mit der am Standort herrschenden mittleren Jahreswindgeschwindigkeit durchgeführt. Eine Auswirkung, die bis auf Höhe des Rotors reicht, ist jedoch auch für andere Windgeschwindigkeiten nicht zu erwarten.

Insbesondere hinter den Fermentern kann es zur Ausbildung einer Wirbelschlepe kommen, die sich bis zum Standort der WEA erstreckt. Leicht erhöhte Turbulenzen und Schubkräfte sind allerdings nur bei bestimmten Atmosphärenbedingungen und im unteren Turmbereich zu erwarten.

Auf der Grundlage eigener Berechnungen an verschiedenen anderen Windenergieanlagen wurde die Eintrittswahrscheinlichkeit für das Auftreffen eines Blattbruchstückes auf die geplanten Gebäude mit etwa einmal in 100 000 Jahren (10^{-5}) abgeschätzt. Dieser Wert ist gegebenenfalls durch genauere Rechnungen zu verifizieren.

TÜV Nord INDUSTRIEBERATUNG
Consulting Team Thermo/Fluidodynamik

Der Leiter
Dr.-Ing. Martin Stähle

Dr.-Ing. Thomas Hahm



6. Literatur

- /1/ British Standard Institution America Inc.; Certificate No. FM 55686; Reston VA, 2000.
- /2/ Schlichting; Gersten; Boundary-Layer Theory; 8th Edition, Springer-Verlag 2000.
- /3/ Prandtl; Führer durch die Strömungslehre; 5te Auflage, Vieweg&Sohn, Braunschweig 1960.
- /4/ Han; Lin; Arya; Numerical Study of Wake Vortex Decay and Descent in Homogenous Atmospheric Turbulence; AIAA Journal, Vol.38, No.4 p. 643-656, 2000.
- /5/ Kareem; Kijewski; Lu; Investigation of Interference for a Group of Finite Cylinders; J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 77&78, 503-520, 1998.
- /6/ Camelli; Löhner; Combining the Baldwin-Lomax and Smagorinsky Turbulence Models to Calculate Flows with Separation; AIAA-2002-0426, 2002.
- /7/ Wallin; Girimayi; Evolution of an Isolated Turbulent Trailing Vortex; AIAA Journal, Vol. 38, No.4 p 657-665, 2000.
- /8/ Switzer, Proctor; Numerical Study of Wake Vortex Behavior in Turbulent Domains with Ambient Stratification; AIAA-200-0755.
- /9/ Williamson; Vortex Dynamics in the Cylinder Wake; Ann. Rev. Fluid. Mech., 28 p. 477-539; 1996.
- /10/ Institut für Solare Energieversorgungstechnik; Datenbankrecherche über Schadensfälle mit abgerissenen Rotorblättern aus Datenbeständen des Wissenschaftlichen Mess- und Evaluierungsprogramms (WMEP); Kassel 1996.
- /11/ DIN EN 50126; Bahnanwendungen - Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS); Deutsches Institut für Normung e.V., März 2000.