

# Computational Fluid Dynamics zur Ermittlung von Winddrücken

Dr.-Ing. Casimir Katz, SOFiSTiK AG

Zusammenfassung:

Prof. Bathe stellte unlängst auf der Baustatik-Baupraxis Tagung in Dresden eine Liste der „Schlüsselherausforderungen“ auf, die in den nächsten Jahren bearbeitet werden sollten. Eines davon nannte er „Effektive Methoden für Strömungsprobleme“. Der Praktiker möchte nämlich auch auf einem groben Netz für hohe Reynoldszahlen brauchbare Lösungen erhalten, die natürlich nicht alle Details wiedergeben können, diese sollten aber bei einer Verfeinerung des Netzes erkennbar werden. Dieser Gedanke, der im Bereich der Strukturmechanik weit verbreitet ist, hat für klassische Strömungsmechaniker etwas von Häresie. Wie weit wir heute sind, soll in diesem Beitrag erläutert werden, wo Ergebnisse des Multiphysic-Programms PHYSICA mit Messungen verglichen werden..

## 1 EINFÜHRUNG

### *1.1 Situation der CFD bei Windberechnungen*

Der Wind ist eine ausgesprochen komplexe dynamische Belastung. Die strömende Luft überträgt durch den Staudruck (auch: Geschwindigkeitsdruck) Kräfte auf das Bauwerk. Neben vielen anderen Effekten, die den normalen Bauingenieur nicht so interessieren, ist die Kernfrage bei allen Windproblemen die nach den aerodynamischen Kraft bzw. Druck-Beiwerten.

Einige Fälle kann man in der Literatur finden, die neue DIN 1055 Teil 4 gibt da ja zahlreiche Beiwerte an. Aber schon eine Anströmung über Eck, ganz zu schweigen von den Standardkonstruktionen moderner Architektur stellt so viele Fragen, dass der normale Weg der zu einem Windkanal mit entsprechend aufwändigen Messungen ist. Da die Betreiber der Windkanäle entsprechend hohe Erfahrungen haben, werden die so ermittelten Werte für eine Bemessung als Regelfall herangezogen, zumal die Berücksichtigung der komplexen Umgebung auch für numerische Methoden nicht einfach ist. Hoffnungen, dass numerische Simulationen anstelle des Windkanals treten könnten haben sich bisher nicht erfüllt. Aber die Frage ist doch sehr berechtigt in wie weit man numerische Berechnungen als Ergänzung zum Versuch in der Entwurfsphase nicht doch heranziehen sollte. Hier soll es also nur um die Frage gehen, welchen Wert Druckverteilungen aus einer CFD-Berechnung haben können.

## 2 THEORIE

### 2.1 Grundbeziehungen

Die Physik einer Strömung gehorcht einfachen Material- und Erhaltungssätzen (Masse, Energie, Impuls). So ergibt sich z.B. aus der Kontinuitätsgleichung, dass bei einer Einschnürung des Strömungsquerschnitts durch ein Hindernis sich die Strömungsgeschwindigkeit erhöhen muss. Mit dem Gesetz von Bernoulli folgt daraus ein Druckabfall, da die Gesamtenergie sich aus geodätischer Höhe, Druck, Geschwindigkeit und einem instationären Beschleunigungsterm zusammensetzt:

$$p + \frac{\rho}{2} \cdot u^2 + \rho \cdot g \cdot z = const$$
$$\Delta \left[ p + \frac{\rho}{2} \cdot u^2 + \rho \cdot g \cdot z \right] = \int \frac{\partial u(s,t)}{\partial t} ds$$

Einige physikalische Effekte wie z.B. die Kompressibilität können für baupraktische Verhältnisse vernachlässigt werden, dennoch stellt die numerische Behandlung der Strömungen im allgemeinen und der Windströmung im besonderen ein außerordentlich schwieriges Problem dar.

Der Grund liegt vor allem darin begründet, dass wichtige Effekte sich in einem sehr kleinen Maßstab abspielen. Große Wirbelstrukturen der Meteorologie von mehreren 100 km Ausdehnung wechselwirken mit kleineren Strukturen hinab bis zu sehr kleinen Skalen.

Eine ganz wesentliche Kenngröße für die Übertragbarkeit von Kennwerten unter unterschiedlichen Maßstäben ist die sogenannte **Reynoldszahl**:

$$Re = \frac{d \cdot u}{\nu} = \frac{d \cdot \rho \cdot u}{\mu} \quad \begin{array}{l} \nu = \text{kinematische Zähigkeit} \\ \mu = \text{dynamische Zähigkeit} \end{array}$$
$$\text{Luft} \quad \nu = 15 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{sec} \quad ; \quad \text{Wasser} \quad \nu = 1.31 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{sec}$$

Damit sind die zwei Materialkonstanten Dichte und Viskosität bereits eingeführt, die in den sogenannten Navier-Stokes-Gleichungen ausreichen um sehr viele Strömungen zu beschreiben. Während sich aber für eine Grundwasserströmung mit einer Geschwindigkeit von cm/sec und einem wirksamen Durchmesser von 1 mm Reynoldszahlen von etwa 10 ergeben, erhält man für Bauwerke mit einer Abmessung von z.B. d=10 m, einer Windgeschwindigkeit von 15 m/sec erhält man hingegen eine Reynoldszahl von 10 Millionen! Strömungen mit kleinen Reynoldszahlen sind laminar, d.h. alle Stromfäden laufen parallel und einfache Differentialgleichungen reichen aus um ein sogenanntes Potentialproblem zu lösen. Ab einer bestimmten Reynoldszahl beginnt ein chaotisches Verhalten einzelner Strömungsteilchen, die durcheinander wirbeln, die Strömung wird turbulent. Dadurch erfolgt ein zusätzlicher Energieaustausch.

Um alle Effekte in einer numerischen Simulation mit den einfachen Gleichungen richtig erfassen zu können bräuchte man ein derartig feines Berechnungs-Netz, dass auch die Rechenleistung zukünftiger Höchstleistungsrechner dafür nicht ausreichend wären.

Somit müssen für jede Behandlung eines Windproblems mehr oder minder starke Vereinfachungen des Systems eingeführt werden, die einen instationären 3-dimensionalen Vorgang soweit vereinfachen, dass im extremen Fall nur noch eine statische Belastung übrig bleibt.

Für eine numerische Berechnung mit CFD-Programmen bei hohen Reynoldszahlen wird die Windgeschwindigkeit  $u$  in einen Mittelwert und einen zeitlich variablen Verlauf aufgespalten:

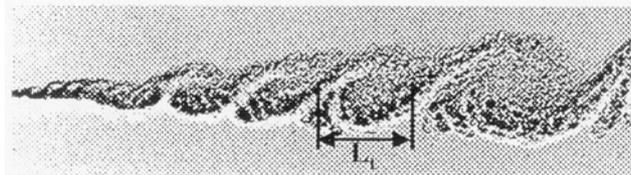
$$u(t) = \overline{u}_i + u'_x(t)$$

Die Turbulenz wird dann am häufigsten als zusätzliche Viskosität in die Rechnung eingefügt. Dafür gibt es drei Parameter:

Der kinetischen Energie der Turbulenzen  $k$  [ $\text{m}^2/\text{sec}^2$ ], ermittelt aus den Mittelwerten der turbulenten Schwankungen

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \frac{1}{2} \left( \overline{u'_x u'_x} + \overline{u'_y u'_y} + \overline{u'_z u'_z} \right)$$

Einem Längenmaß  $L_t$



Der Dissipationsrate  $\varepsilon$  [ $\text{m}^2/\text{sec}^3$ ], quasi als Energieumwandlung pro Zeiteinheit oder eine Art Frequenz  $\omega$ ; in einer turbulenten Strömung im Gleichgewicht gilt:

$$\varepsilon \approx \frac{k^{3/2}}{L_t} \quad \text{oder} \quad \omega \approx \frac{k^{1/2}}{L_t}$$

Im aller einfachsten Fall definiert sich die Viskosität als konstanter Wert aus einem sogenannten 0-Gleichungsmodell. In der Praxis hingegen ist eine Modellierung als Zwei-Gleichungs-Modell mit zwei zusätzlichen Parametern die Regel, am häufigsten ist das  $k$ - $\varepsilon$  Modell, es gibt aber auch ein sogenanntes  $k$ - $\omega$  Modell.

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{bzw.} \quad \mu_t \approx \rho \frac{k}{\omega}$$

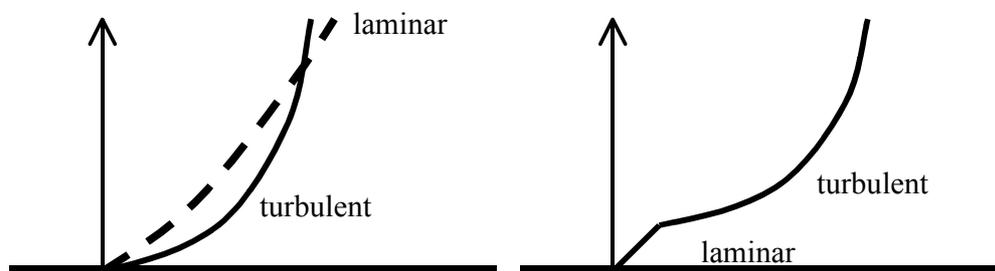
## 2.2 Randbedingungen

Relativ einfach sind die Ränder zu beschreiben, bei denen eine Einströmung erfolgt oder eine glatte Begrenzung entlang der die Strömung sich ausrichtet.

Wenn die Strömung nicht reibungsfrei ist, so haften an einer Wand die Strömungsteilchen, d.h. sie haben die Geschwindigkeit Null. Angrenzende Strömungsteilchen werden über eine Schubspannung abgebremst. Für Newtonsche Flüssigkeiten gilt eine lineare Beziehung für den Geschwindigkeitsgradienten:

$$\frac{du}{dz} = \frac{\tau}{\mu} = \frac{\tau}{\nu \cdot \rho} = \frac{\text{Schubspannung}}{\text{Zähigkeit}}$$

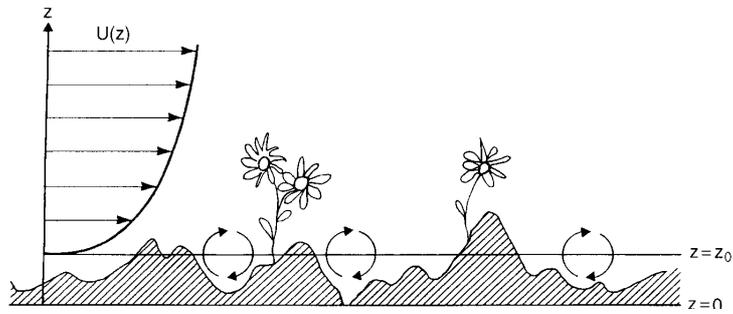
Den Bereich in der Nähe der Wand, in dem die Geschwindigkeit auf z.B. 99 % der asymptotischen Geschwindigkeit im unendlichen anwächst, nennt man **Grenzschicht**. In einer laminaren Grenzschicht erfolgt der Energietransport nur über die Scherspannung nach obiger Gleichung. Die Dicke dieser Schicht hängt unter anderem auch von der Lauflänge der Strömung ab. Mit einer gewissen Lauflänge schlägt die Grenzschicht in eine turbulente Grenzschicht um. Es entsteht ein zusätzlicher Energieaustausch und die Schubspannung erhöht sich scheinbar, so dass eine größere Völligkeit des Geschwindigkeitsprofils entsteht.



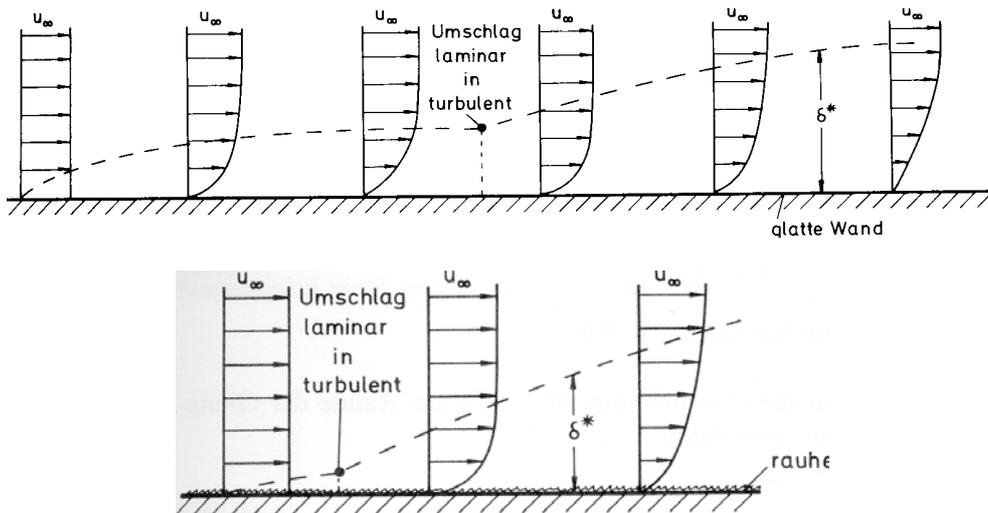
Für den unteren Bereich der Grenzschicht (ca 15 % der Höhe) verwendet man üblicherweise ein anderes logarithmisches Wand-Gesetz:

$$\frac{u(z)}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \frac{z}{z_0} = \frac{1}{k} \ln(E \cdot y^+)$$
$$u^* = \sqrt{\tau / \rho}$$

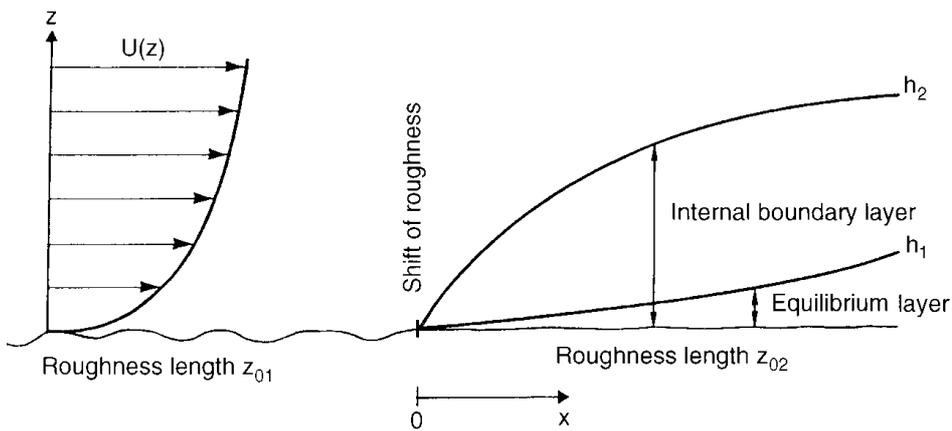
In der  $u^*$  die Schubspannungsgeschwindigkeit,  $k$  die Karman-Konstante mit dem Wert 0.4 und  $z_0$  die sogenannte Rauigkeitshöhe darstellt.  $z_0$  kann als die Größe eines charakteristischen Wirbels verstanden werden, der durch die Reibung erzeugt wird.



Trifft eine laminare Strömung auf ein Hindernis, so braucht es eine gewisse Länge bis sich die Grenzschicht voll ausgebildet hat.



Bei einem Wechsel der Rauigkeiten, bilden sich zwei überlagernde Grenzschichten aus:

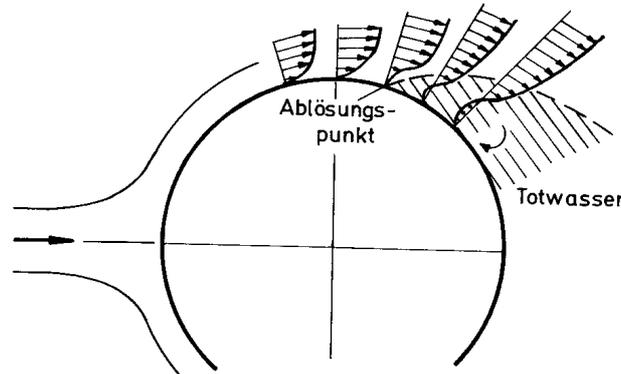


Oberhalb der Höhe  $h_2$  gilt das Profil der alten Schicht, unterhalb der Höhe  $h_1$  gilt nur die neue Grenzschichtbedingung, dazwischen gelten beide in einer Übergangsform.

Dies ist auch die Grundlage der sogenannten Mischprofile der neuen DIN 1055, die ja bei 50 m Höhe einen Wechsel der Höhenentwicklung vorsehen.

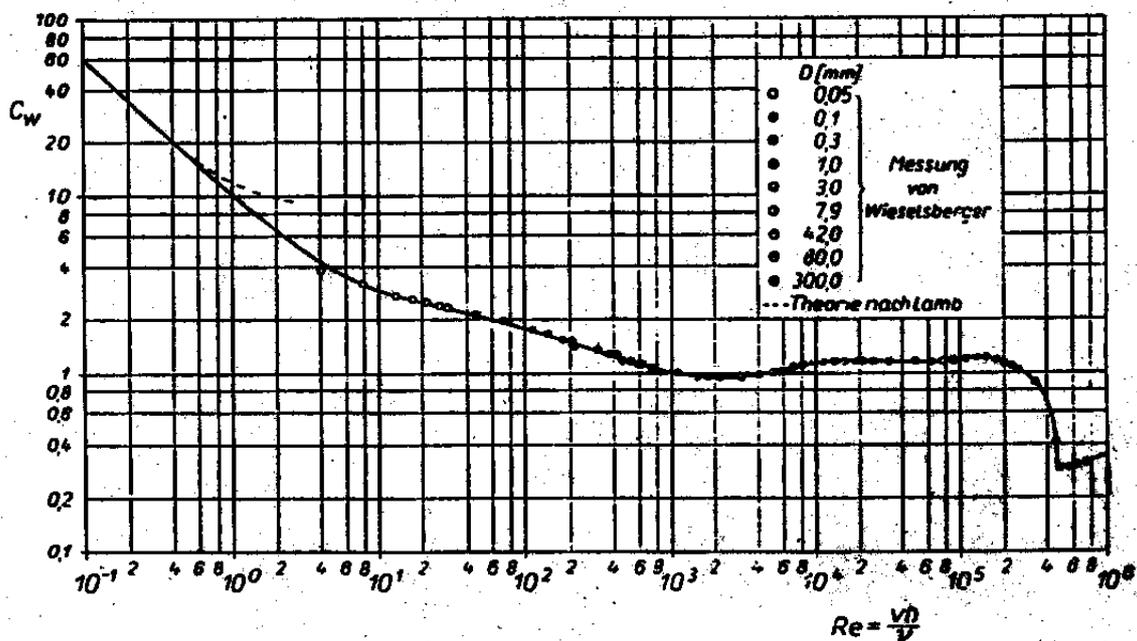
### 2.3 Ablösung

Wenn die Strömung längs einer Wand in ein Gebiet strömt wo der Druck ansteigt, so werden alle Teilchen abgebremst. Da der Druck aber nicht so stark schwankt wie die Strömungsgeschwindigkeit, ergibt sich am Rand der Effekt, dass die Strömung dort bis zum Stillstand abgebremst wird. Die Strömung wird dann von der Wand abgelenkt, und löst sich ab. Nach diesem Ablösepunkt ergibt sich ein Totwasserbereich in dem die Strömung zurück läuft:



Diese Ablösung kann man noch einigermaßen gut erfassen, bei höheren Geschwindigkeiten verschiebt sich der Ablösepunkt jedoch nach vorne und es kommt zu einem Wideranlegen der Strömung, das alle numerischen Methoden vor nahezu unlösbare Probleme stellt.

Erkennbar wird die komplexe Strömungsmechanik an den Kraftbeiwerten:

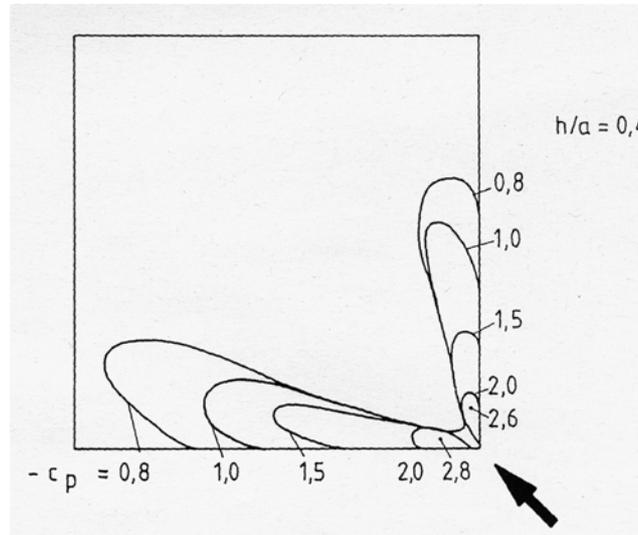


Für den Bereich der Reynoldszahlen 20 und 100 wurde von der DFG ein Benchmark durchgeführt, bei dem teilweise Berechnungen mit mehreren Millionen Elementen angesetzt wurden. Schon dieser Bereich ist kritisch, bei hohen Reynoldszahlen gibt es meines Wissens noch keine befriedigende Lösungen. Nähere Informationen hierzu im PHYSICA-Handbuch.

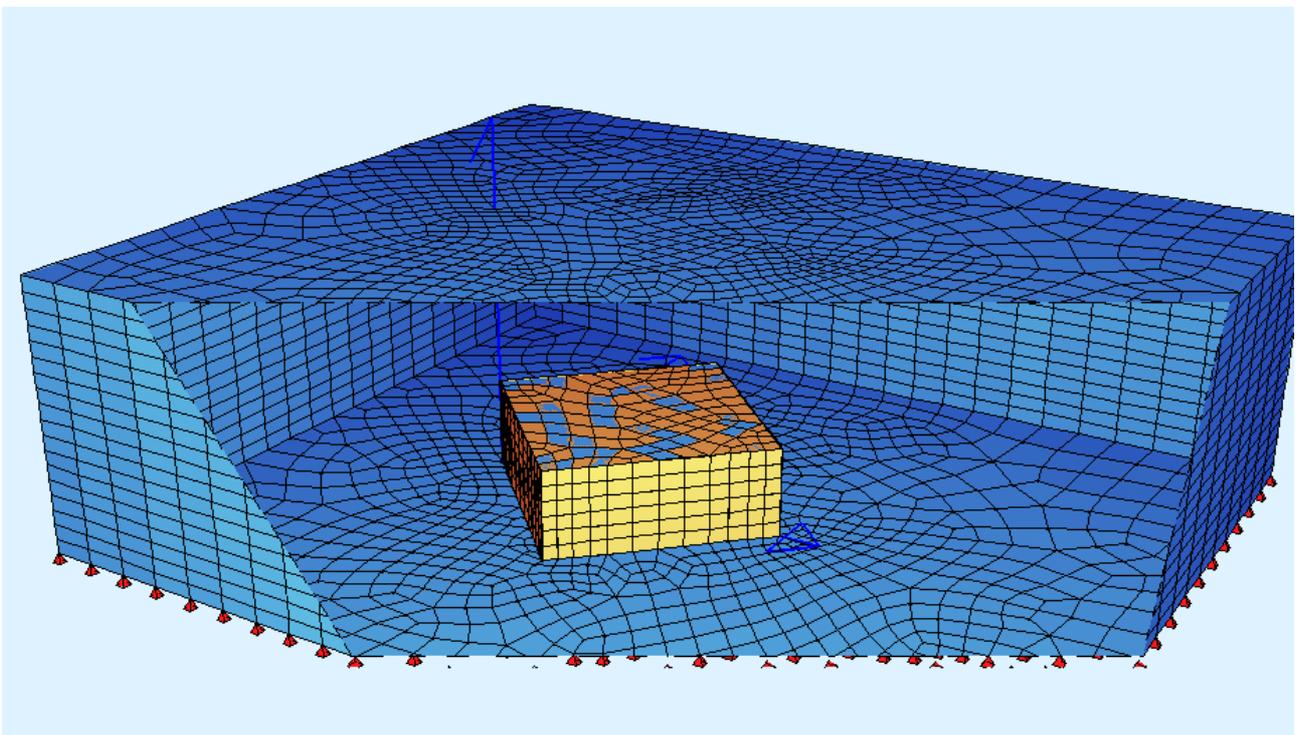
### 3 BEISPIELE

#### 3.1 Flachdach

Von Prof. Gerhardt stammen Versuche aus dem Jahre 1991 zu den Windlasten auf Flachdächern großer Industriehallen. Es ging damals vor allem darum die Größe und Audehnungen der Sogbereiche zu begründen. Aus dieser Veröffentlichung stammt das folgende Bild der Druckverteilung auf dem Dach mit einer Abmessung von  $a/h = 0.4$ :

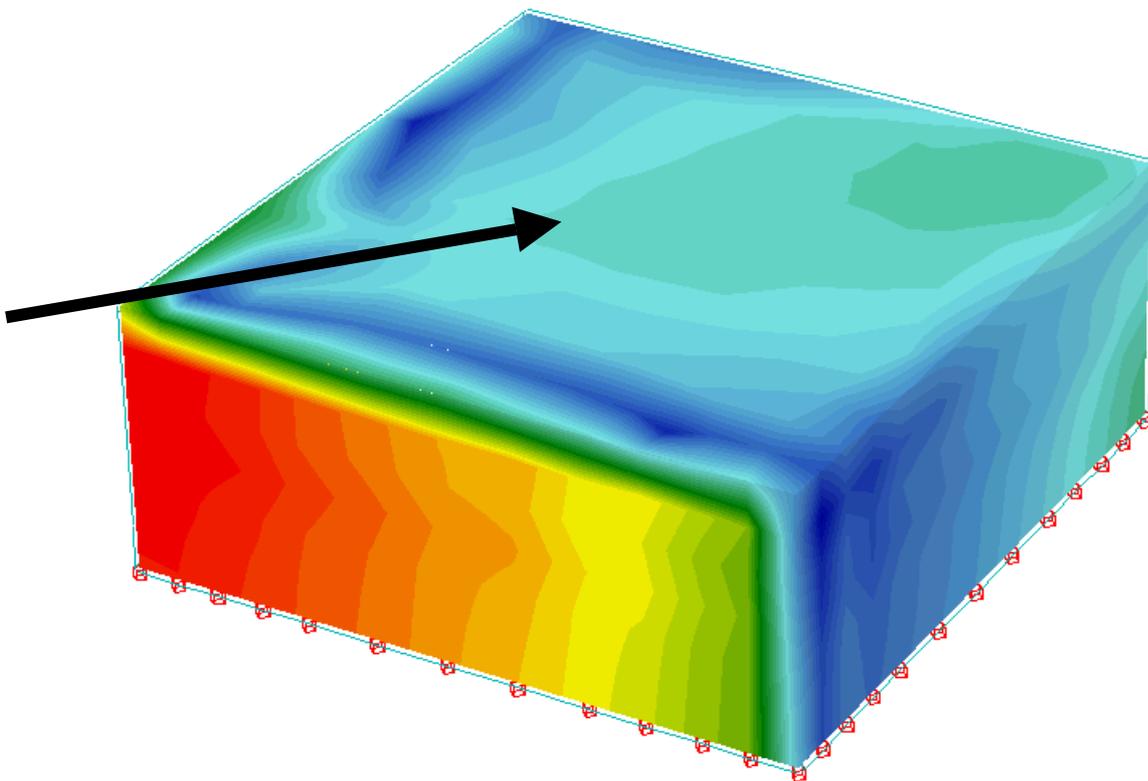


Um dieses mit dem CFD-Programm PHYSICA nachrechnen zu können wurde im Prinzip eine Netzstruktur wie in dem folgenden Bild gewählt, die sich aus einer Extrusion eines 2D-Netzes mit SOFIMSHB und SOFIMSHA ergibt:



Die Randbedingungen sind an der einströmenden Fläche durch das Mischprofil Binnenland der DIN 1055 nach Anhang B gegeben. Damit hat man eine gewisse Schwankungsbreite auf die man den Strömungsdruck beziehen kann, um zu Druckbeiwerten zu kommen. In Firsthöhe des Gebäudes (11.2 m) hat man eine mittlere Windgeschwindigkeit von 22.5 m/sec und somit einen Referenzdruck von  $316 \text{ N/m}^2$ . Auch die Turbulenzintensität sowie das Integralmaß sind in der DIN inzwischen geregelt, so dass auch die Einströmparameter der Turbulenz bekannt sind. Für alle Wände wie auch das Dach und den Boden wird ein logarithmisches Wandgesetz für völlig raue Verhältnisse angesetzt, jedoch sind die Grenzwerte der Anwendung natürlich nicht überall erfüllt.

Das abgebildete Netz mit 18000 Volumenelementen ist natürlich sehr grob, das Strömungsbild lässt denn auch nur einen Wirbel hinter dem Gebäude erkennen, jedoch zeigt sich eine Druckverteilung, die schon mal eine gewisse Tendenz aufzeigt:



Die Luv-Flächen stehen wie erwartet unter Druck, der an der Spitze am höchsten ist. Die hintere Wandfläche wie auch das Dach stehen unter Sog, Der maximale Sog taucht im Eckbereich bzw. entlang des Dachrandes auf. Unter Strömungsmechanikern wird der Druck gerne als unkritisch eingestuft, es ist jedoch auf zwei Dinge zu achten:

- Die Bernoulli-Gleichung gilt nicht für viskose Flüssigkeiten
- Wenn keine Konvergenz erreicht wurde, sind die Drücke meist unbrauchbar

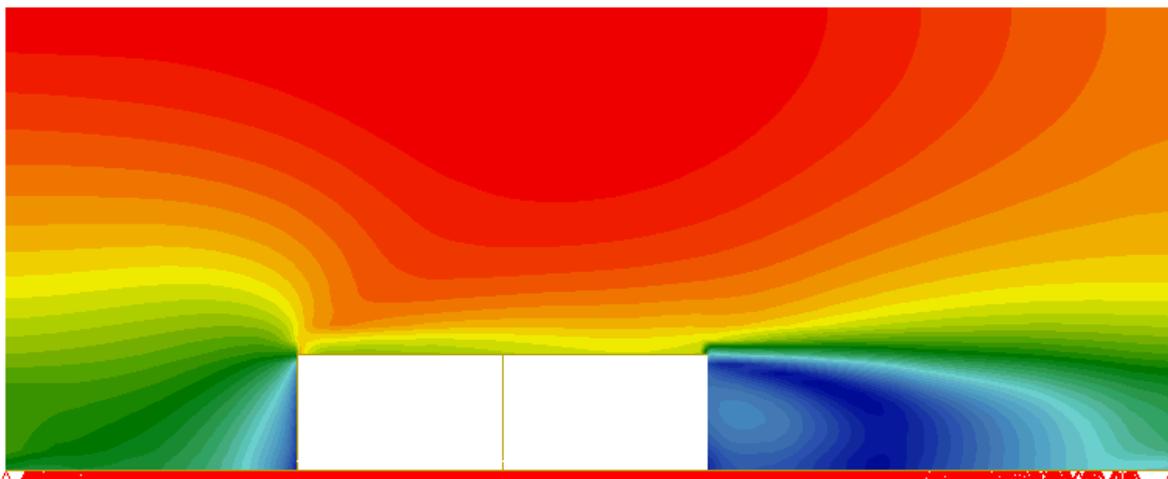
Stellt man nun die Druckbeiwerte gegenüber, so erhält man folgende Tabelle:

|                              | cp-d<br>(Spitzenwert) | cp-d<br>(mittelwert) | cp-s<br>(Spitzenwert) | cp-s<br>(mitte/hinten) |
|------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| Messergebnisse               | -                     |                      | -2.8                  | -0.6 ?                 |
| Grobes Netz ohne Turbulenz   | +0.81                 | +0.56                | -1.06                 | -0.45                  |
| Grobes Netz mit Turbulenz    | +1.06                 | +0.66                | -1.25                 | -0.35                  |
| Mittleres Netz mit Turbulenz | +1.35                 | +0.60                | -1.06                 | -0.27                  |
| Feines Netz mit Turbulenz    | +1.63                 | +0.71                | -1.55                 | -0.50                  |
| Feines Netz II mit Turbulenz | +1.73                 | +0.69                | -2.20                 | -0.35                  |
| Werte nach DIN 1055          | -                     | +0.70                | -1.80                 | -0.70/+0.20            |

Die Netzgrößen zeichneten sich durch 18000, 40000 und 150000 Volumenelementen aus, die kleinste Elementgröße beim feinen Netz betrug immer noch 20 cm, bei Gesamtabmessungen von 112 x 95 x 45 m Die Rechenzeit betrug auf einem 1 Ghz-Pentium-4 195 Minuten.

Derzeit ist eine gute Abstufung des Netzes im Grundriss machbar, für die dritte Dimension erlaubt die Technik der Extrusion nur relativ gleichmäßige Unterteilungen. Die hier verwendeten Netze sind deshalb in der Höhe alle etwas gröber, was natürlich die Bildung von kleineren Wirbeln herausfiltert. Die zweite Variante des feinen Netzes hat bei einer etwas gröberen Einteilung in der Fläche eine bessere Abstufung in der Höhe erhalten.

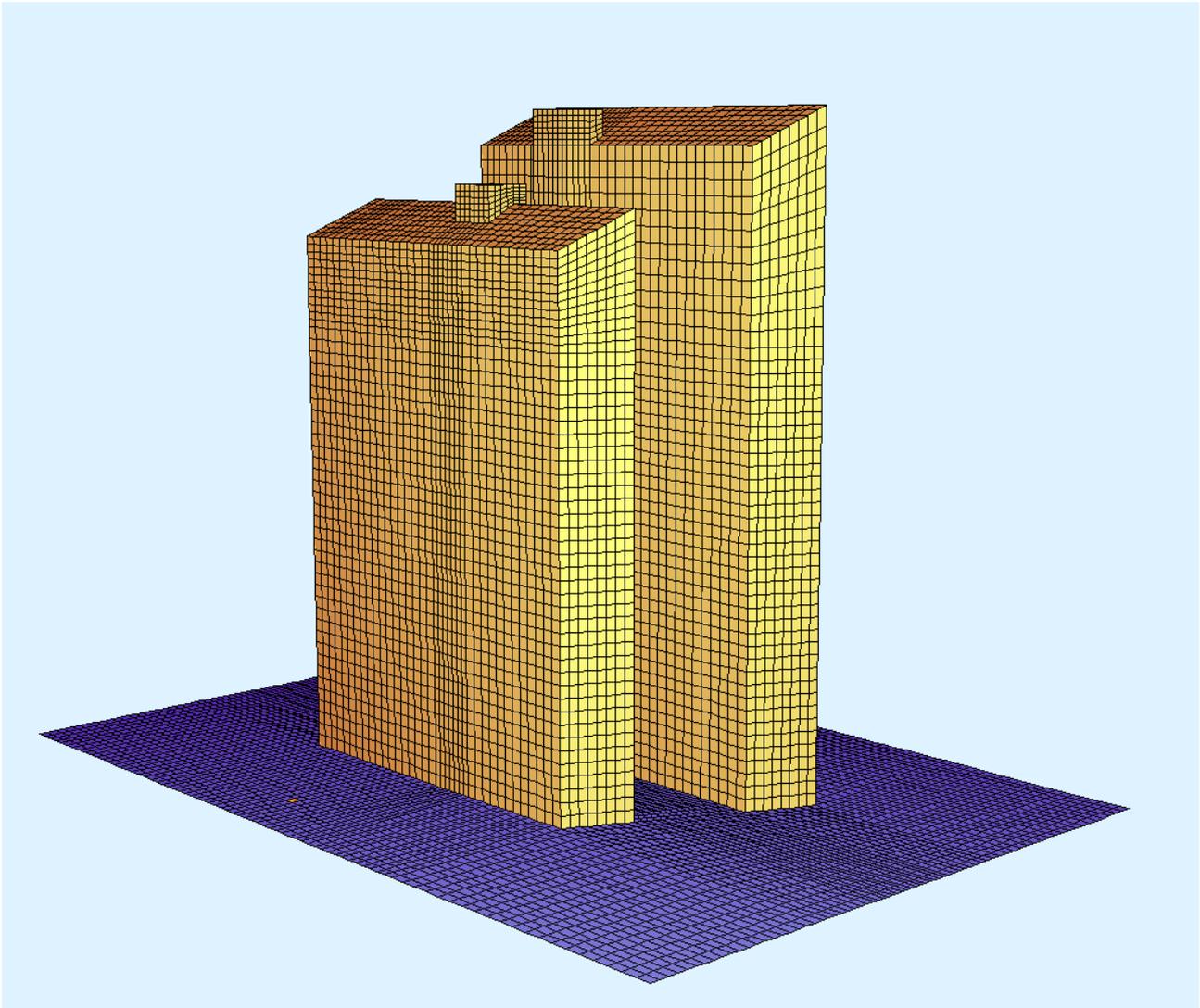
Das nächste Bild zeigt die Geschwindigkeitsverteilung im Schnitt entlang der Windrichtung durch das Gebäude:





### 3.2 Hochhaus-Ensemble

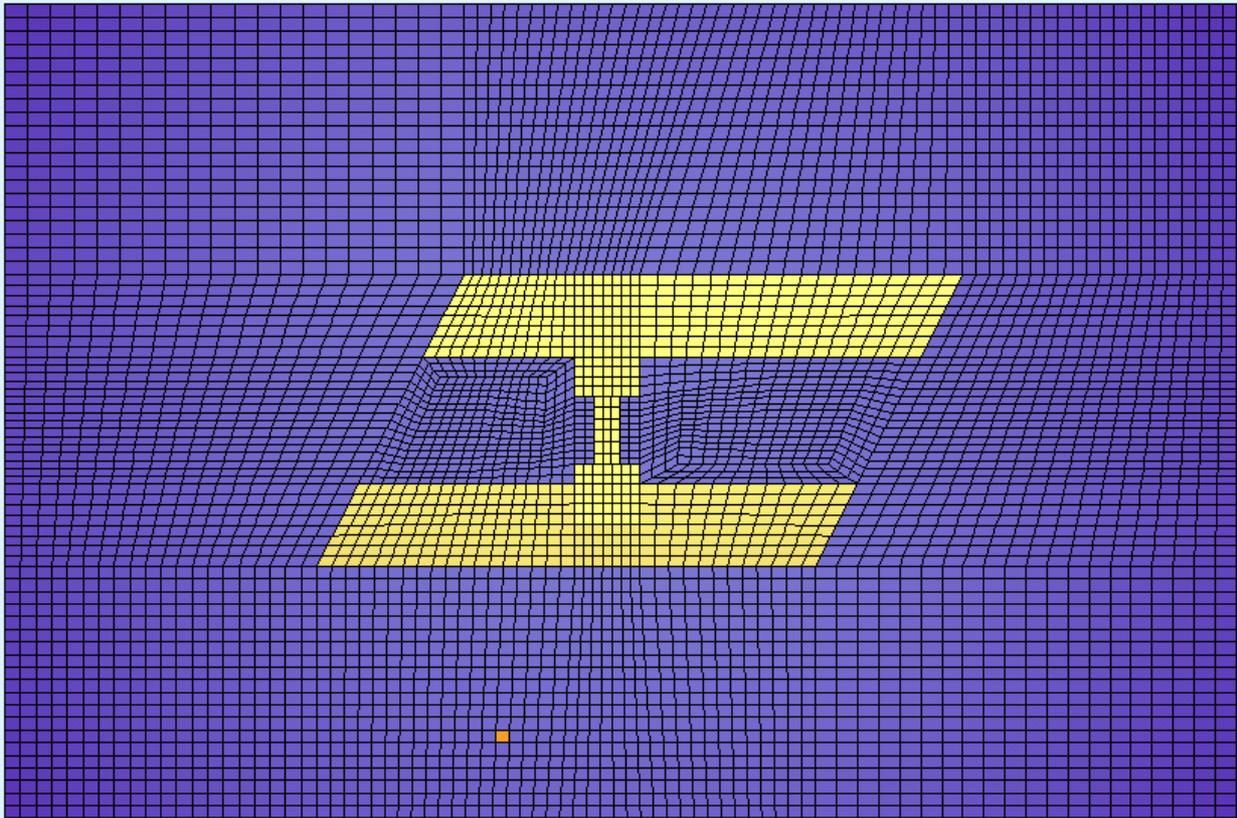
Das folgende Hochhaus der Highlight-Towers in München hat eine Höhe von 126.5 m []. Ist also glücklicherweise vor dem unseligen Bürgerentscheid fertiggestellt worden.



In Frankfurt müssen Hochhäuser als freistehend angenommen werden, in München wurde hingegen die Nachbarbebauung sehr wohl untersucht. Für die Windbelastung muss man natürlich auch annehmen, dass nur einer der beiden Türme steht. Die Türme wurden aber gleichzeitig hochgezogen.

Die Anwendung der DIN ist für die Berechnung des Winddrucks bei diesem System ausgeschlossen. Hingegen sind die Rechengänge für den dynamischen Nachweis nach der neuen DIN von Petersen ausführlich dargestellt worden. []

Im folgenden soll das Ensemble der beiden Türme für den häufigsten Fall des Westwindes untersucht werden. Dazu muss man nicht nur das Hochhaus sondern auch die umgebende Luft modellieren. Grundriß und Seitenriß sind den folgenden Bildern zu entnehmen:

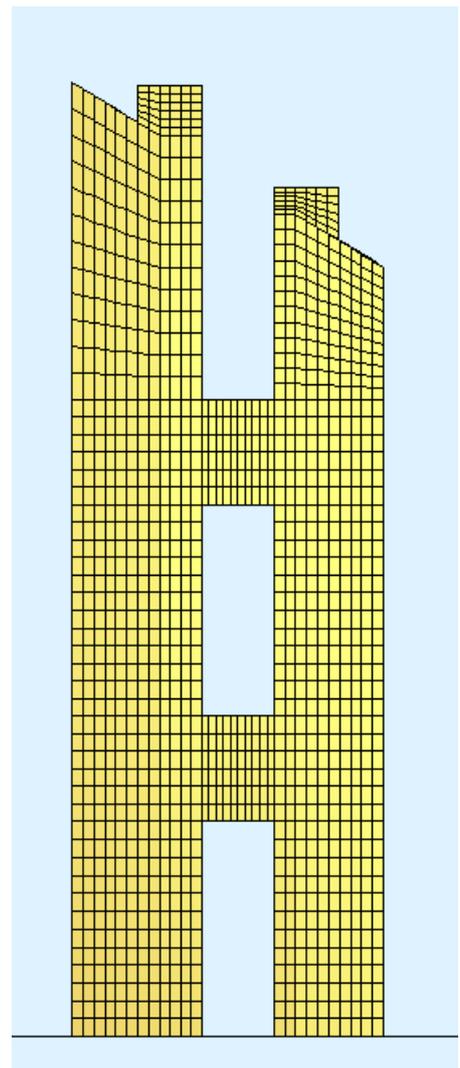


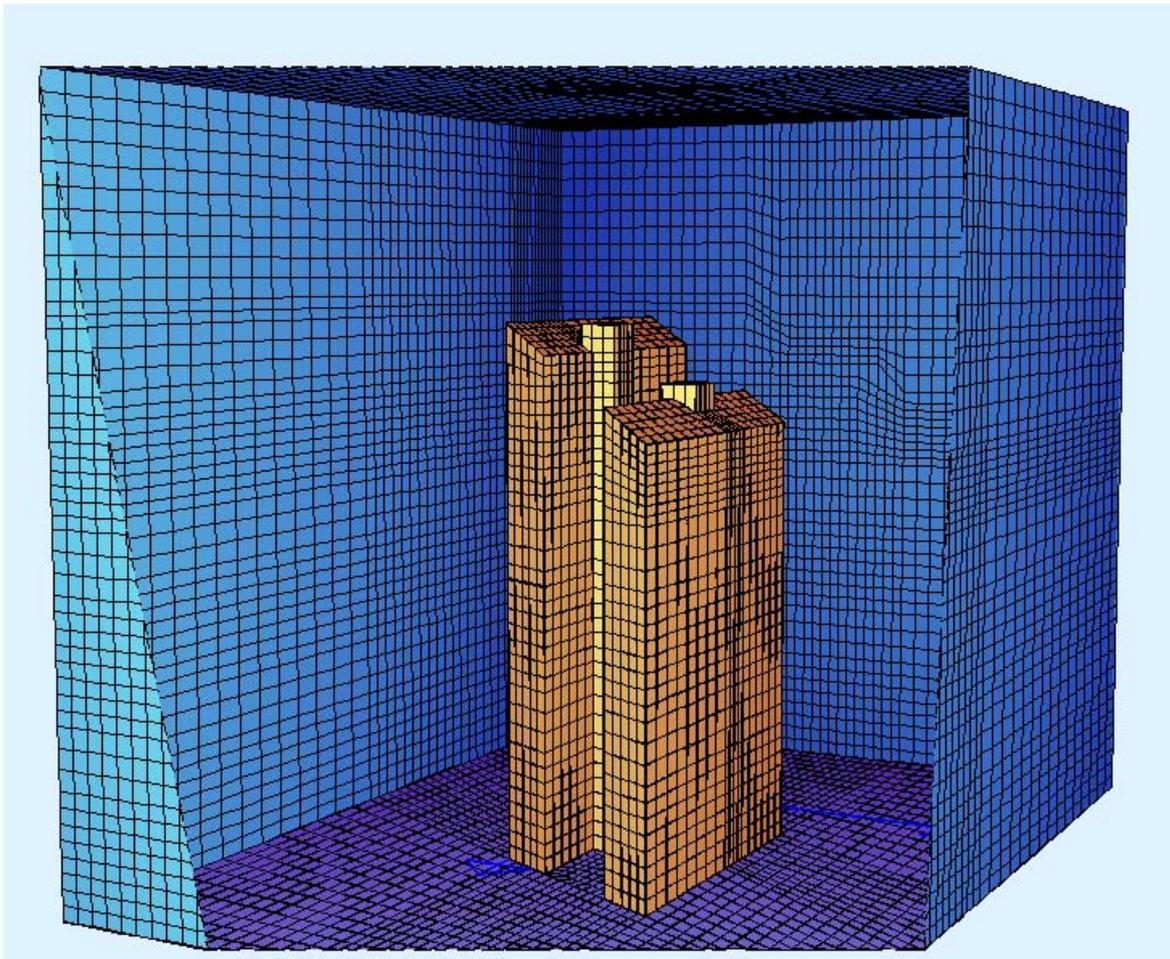
Das System wurde mit SOFIMSHA erzeugt, da es wesentliche geometrische Regelmäßigkeiten enthält. Zuerst werden die Koordinaten aller Knoten auf Geländeneiveau erzeugt. Danach entstehen die Wände durch Extrusion der entsprechenden Kanten mit unterschiedlichen Einteilungen über die Höhe. Das Dach wird durch entsprechende FITs eingefügt.

In einem zweiten Eingabeblock wird dann durch Extrusion der QUAD-Elemente alle Volumenelemente erzeugt, dabei muss man zu einigen Tricks greifen um die schiefen Flächen auf eine gerade zu extrudieren, aber diese Methoden sind inzwischen in SOFIMSHA ausführlich vorhanden.

In zweiten Eingabeblock werden auch die geometrischen Referenzen nachträglich erzeugt, die bei einer Eingabe mit SOFiPLUS automatisch gesetzt werden und für die Formulierung der Randbedingungen in PHYSICA benötigt werden.

Da der volle Datensatz sehr viele Elemente enthält ist eine Parametrisierung der Netzdichte in diesem Falle essentiell.





Für die Randbedingungen, das heißt, die Wahl der Geländekategorie muss man die Umgebung mit heranziehen. Je nach Anströmung wurde hier Kategorie III oder IV angesetzt. Das ist für den Referenzstaudruck ganz entscheidend. Da in der Windzone 2 der Wert  $v_{ref}=25.0$  m beträgt, erhält man:

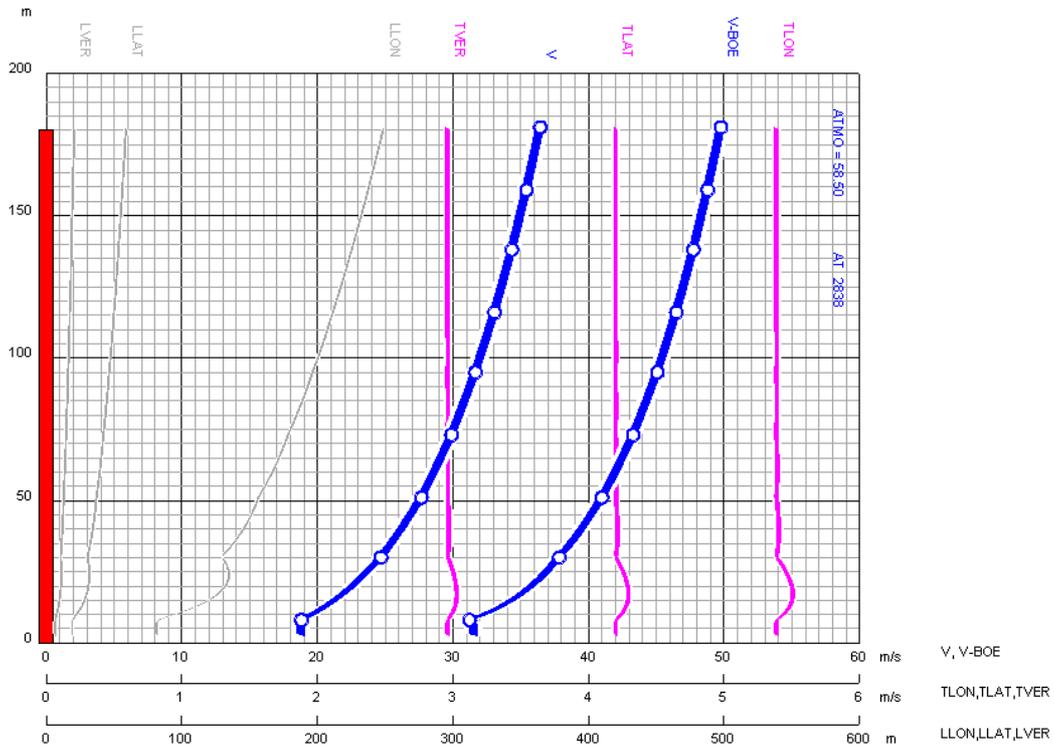
| Windzone WZ 2<br>$v_{ref} = 25$ m/sec | DIN 1055               |                        |                        | Gutachten              |                        |
|---------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                                       | Binnenland             | III                    | IV                     | III                    | IV                     |
| $v_{top}$                             | $1.50 v_{ref}$         | $1.35 v_{ref}$         | $1.20 v_{ref}$         | $1.33 v_{ref}$         | $1.16 v_{ref}$         |
| $q_{ref,top}$                         | $0.880 \text{ kN/m}^2$ | $0.708 \text{ kN/m}^2$ | $0.562 \text{ kN/m}^2$ | $0.691 \text{ kN/m}^2$ | $0.572 \text{ kN/m}^2$ |

Hier wurde also das Standard-Höhenprofil der DIN 1055 für Kategorie III erzeugt, da einerseits das Mischprofil Binnenland mit Sicherheit zu ungünstig ist, andererseits die Windkanalversuche mit einem Profil dieser Form für die Anströmung erfolgten.

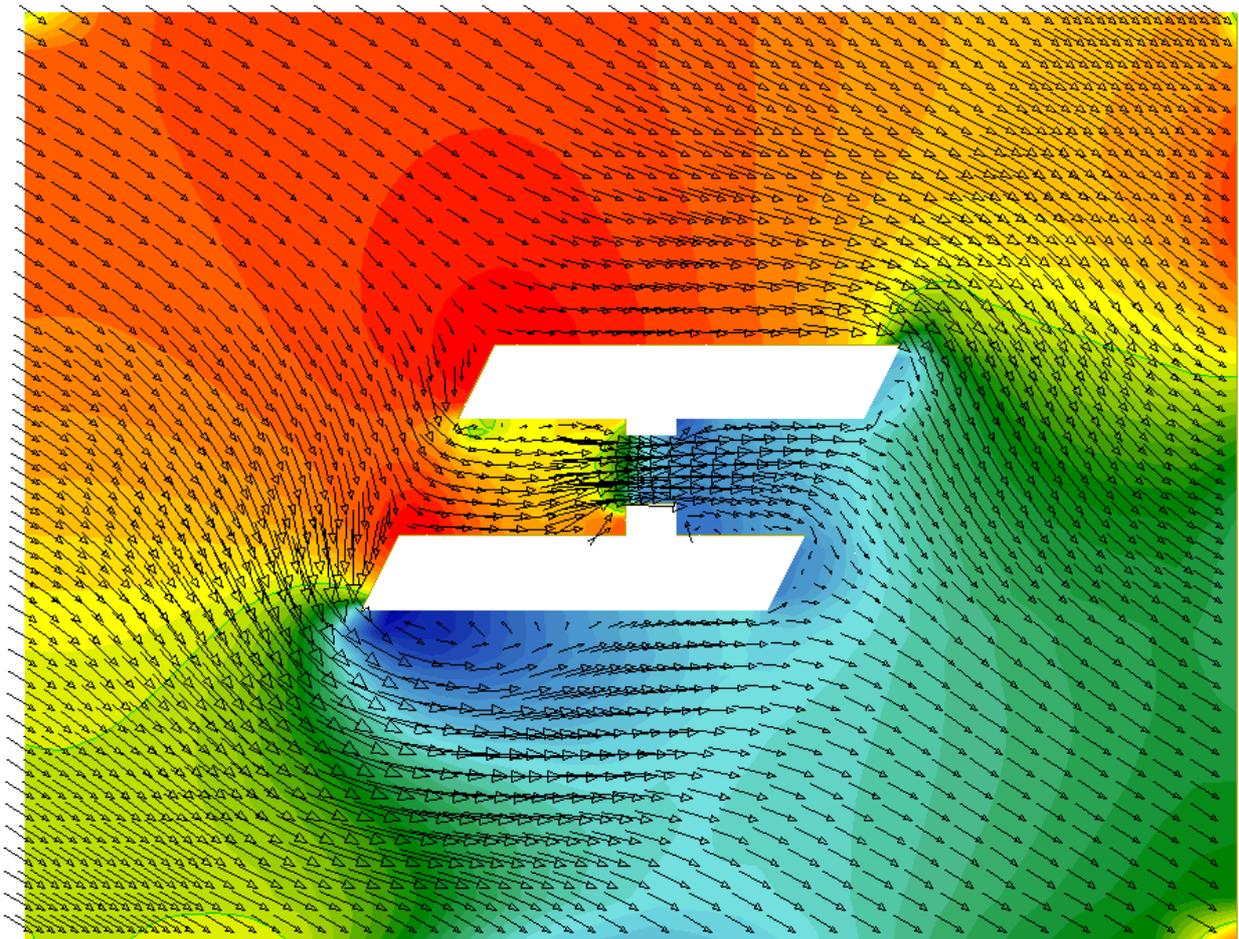
```

PROG SOFILOAD
KOPF WIND PROFIL WESTWIND KLASSE BINNENLAND
LF 90 ; WIND 1055 2 III DX COS(32) DY -SIN(32) $ WESTWIND
ENDE

```

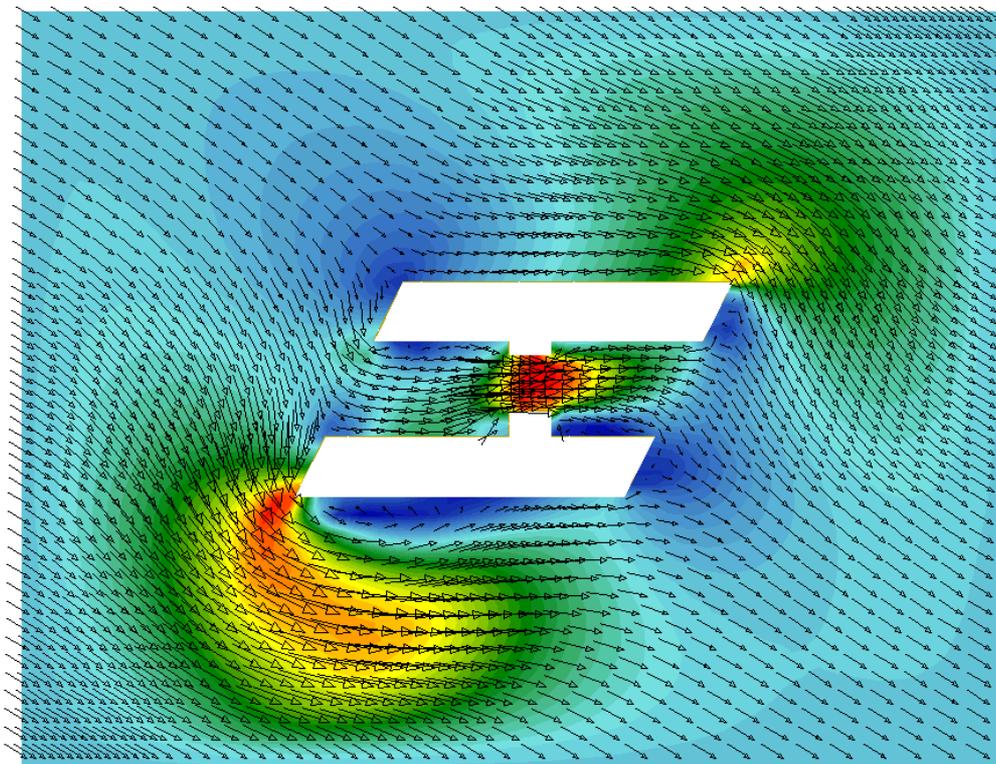


Für die Randbedingungen in PHYSICA werden mittlere Windgeschwindigkeiten, Turbulenz und die integrale Länge verwendet. Erste Ergebnisse für ein „grobes“ Netz mit 100 000 Elementen und einer nicht ausiterierten Lösung als Strömungsvektoren, sowie farbige Drücke (h=40.0 m):



Die Nulllinie des Drucks ist ganz schwach als grüne Linie zusätzlich eingezeichnet. Dieses Bild zeigt aber bereits einige wesentliche Eigenschaften der Strömung. Für viele Betrachter wird sich ein „Aha“-Effekt ergeben, der dieses Bild als plausibel erscheinen lässt. Einen Düseneffekt im mittleren Bereich mit der reduzierten Querschnittsabmessungen, sowie zu erwartende Sogspitzen an den Kanten sind erkennbar. Auch dürfte das hinten liegende Bauwerk eine deutliche Torsion aus dem Winddruck im vorderen Teil und den Sogkräften nach der Verengung erfahren.

Leider wird die CFD trotz dieses schönen Bildes ihrem Ruf als „Colours for Directors“ durchaus gerecht. Die obige Lösung nach 100 Iterationen konvergiert scheinbar brav bis zur 500.sten Iteration, die ermittelten Drücke sind aber um den Faktor 5 zu groß. dann steigen die Residuen bei den Drücken sogar wieder an und die Lösung scheint zu divergieren. Als einen Grund kann man etwas vermuten, wenn man statt der Höhenflächen des Drucks sich die der resultierenden Geschwindigkeit anschaut:



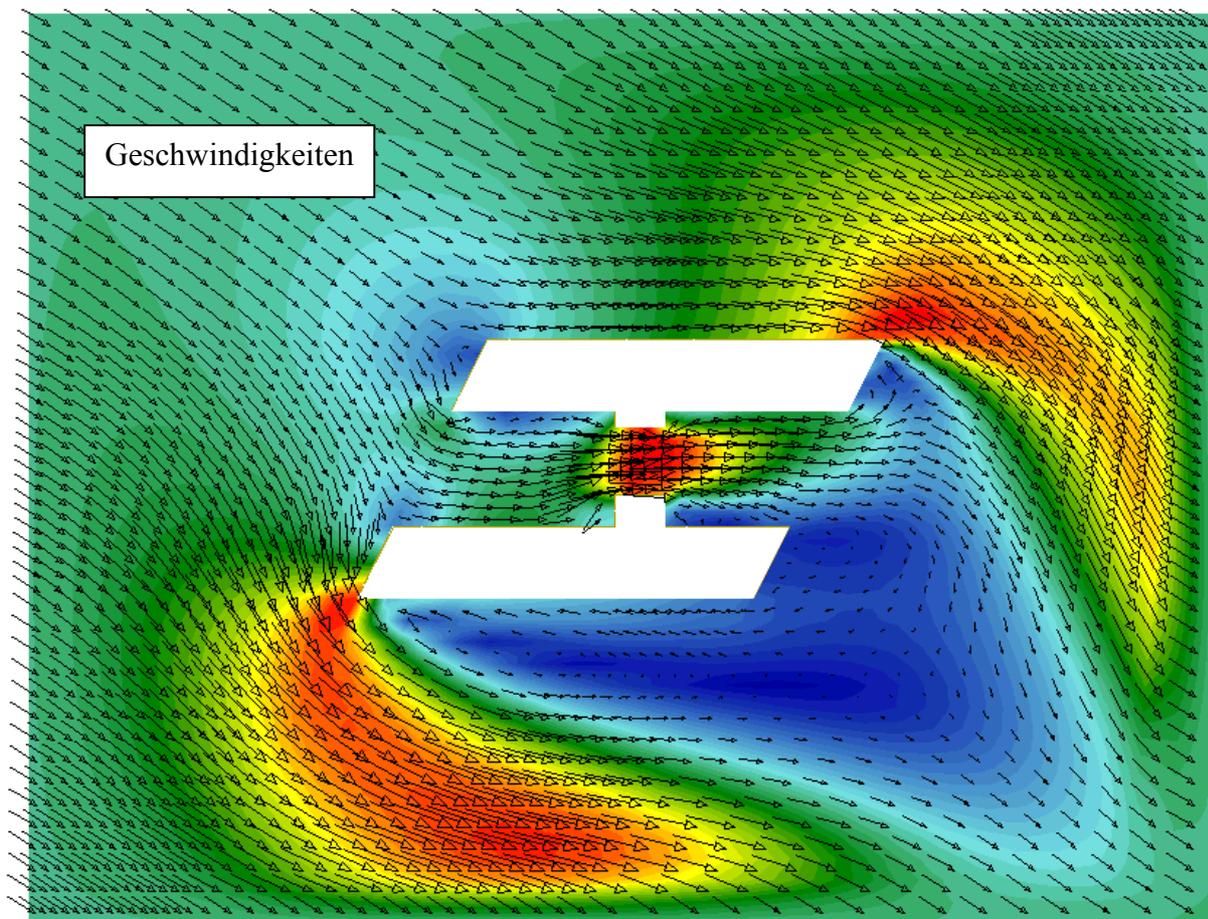
Der Jet links unten wird durch die vorgegebene Austrittsgeschwindigkeit unmittelbar vor der Wand stark abgebremst. Dieser Aufstau erzeugt einen zusätzlichen Druck und damit gerät das Druckfeld völlig aus den Fugen. Nach 2000 Iterationen ist das Geschwindigkeitsfeld deutlich anders, die Druckverteilung aber vollständig unbrauchbar geworden.

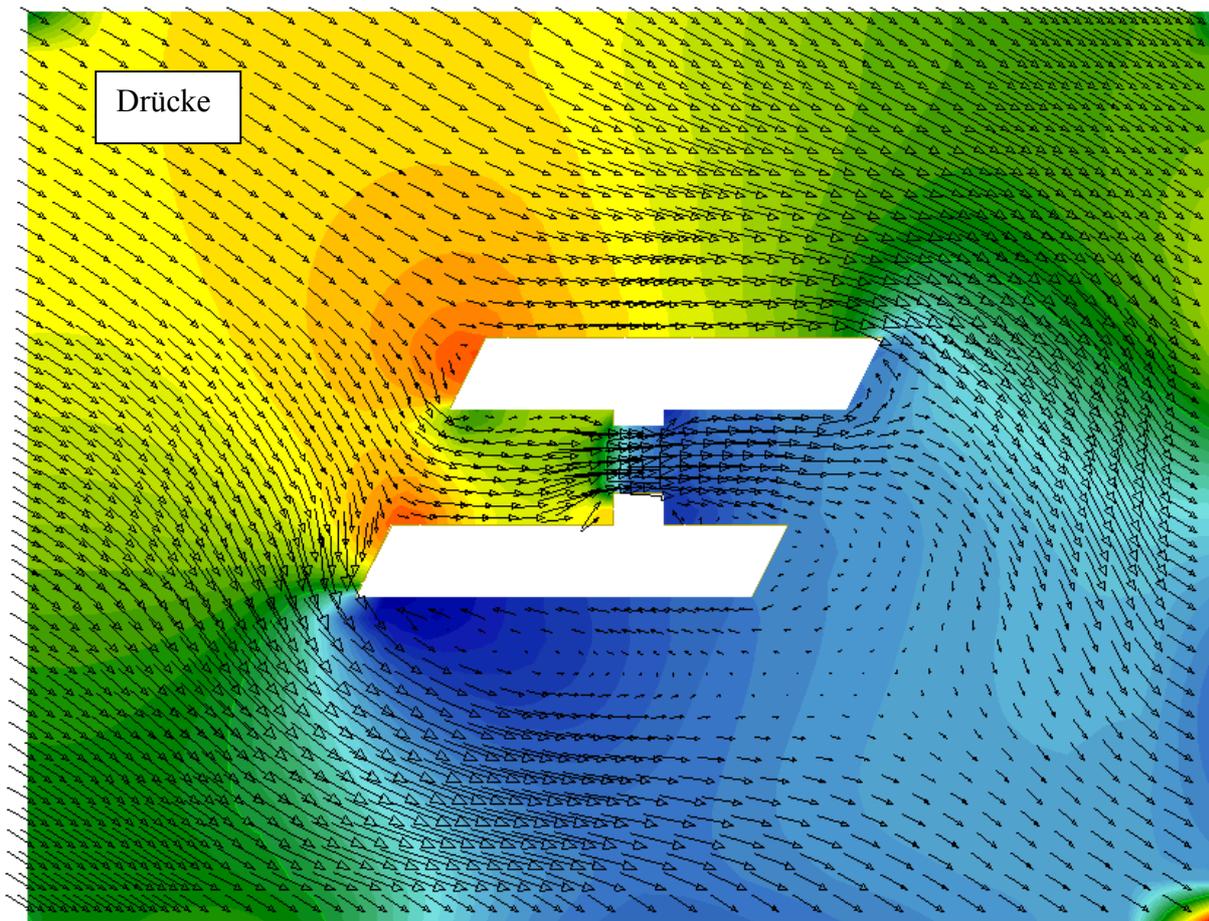
Auch wenn unter manchen Strömungsmechanikern der Druck als eher uninteressante Größe angesehen wird, für uns Bauingenieure ist er doch eher sehr wichtig. Da nur die Ableitungen des Drucks in den Navier-Stokes Gleichungen vorkommen, die absolute Größe also wie bei den

Starrkörperverschiebung in der Mechanik nicht definiert ist, bleibt der Druck in einer gewissen Unbestimmtheit. Wenn die einströmende Menge gleich der ausströmenden Menge ist, ist der absolute Wert auch wirklich egal und man wählt den Druck für die ausströmenden Randflächen zu Null. Da dies aber nur für eine senkrecht angeströmte Randfläche richtig ist, darf man hier nur einen kleinen Abschnitt ganz hinten so behandeln.

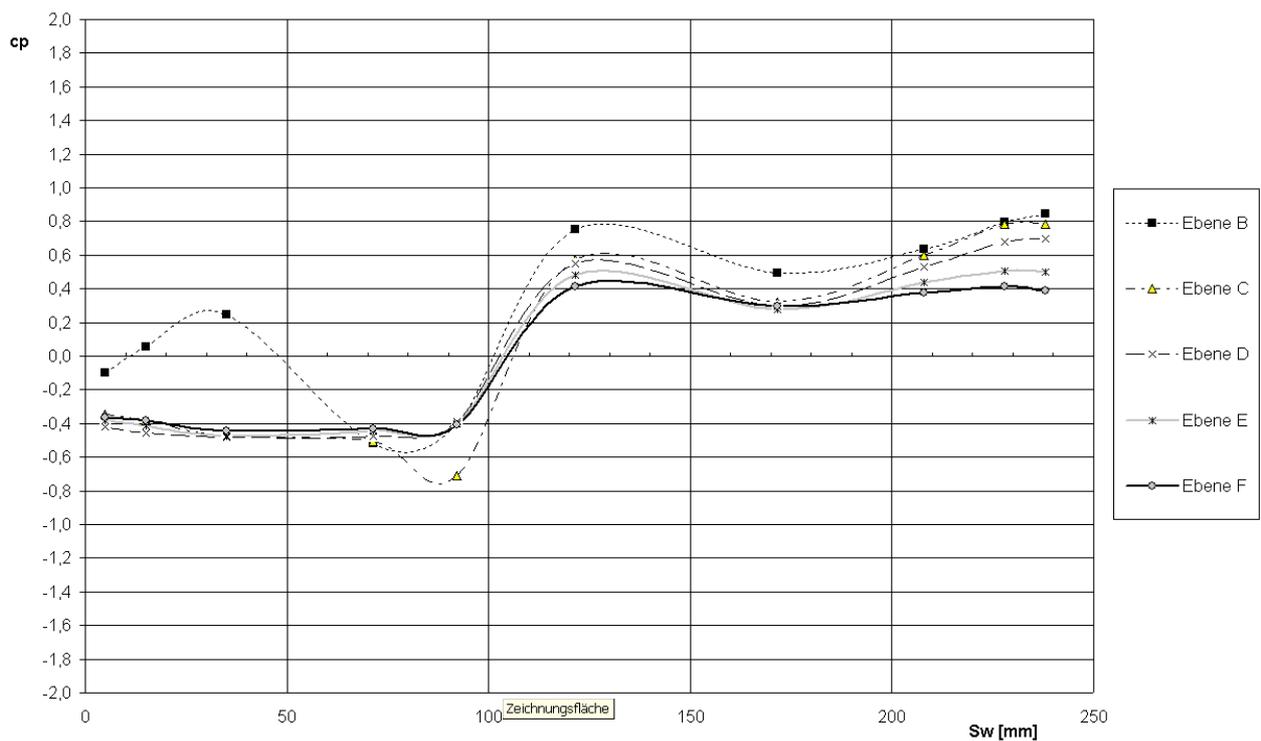
Daraus könnte man folgern, dass eine Vergrößerung des Strömungsgebiets nach Unterstrom dringend erforderlich ist. Eine Alternative könnte darin bestehen, dass man eine geneigte ausströmende Fläche senkrecht zur Windrichtung definiert, aber das verschleiert das Problem nur, denn die falschen Randbedingungen müssen sich zwangsweise auf die Druckverteilung am Gebäude auswirken.

Glücklicherweise kann man aber mit etwas Erfahrung an einigen Parametern der Berechnung etwas drehen (`momentum_false_time_step`) und eine auskonvergierte Lösung auch für das kleine Gebiet erhalten. Das Geschwindigkeitsfeld ist zu dem vorher verworfenen übrigens fast identisch.

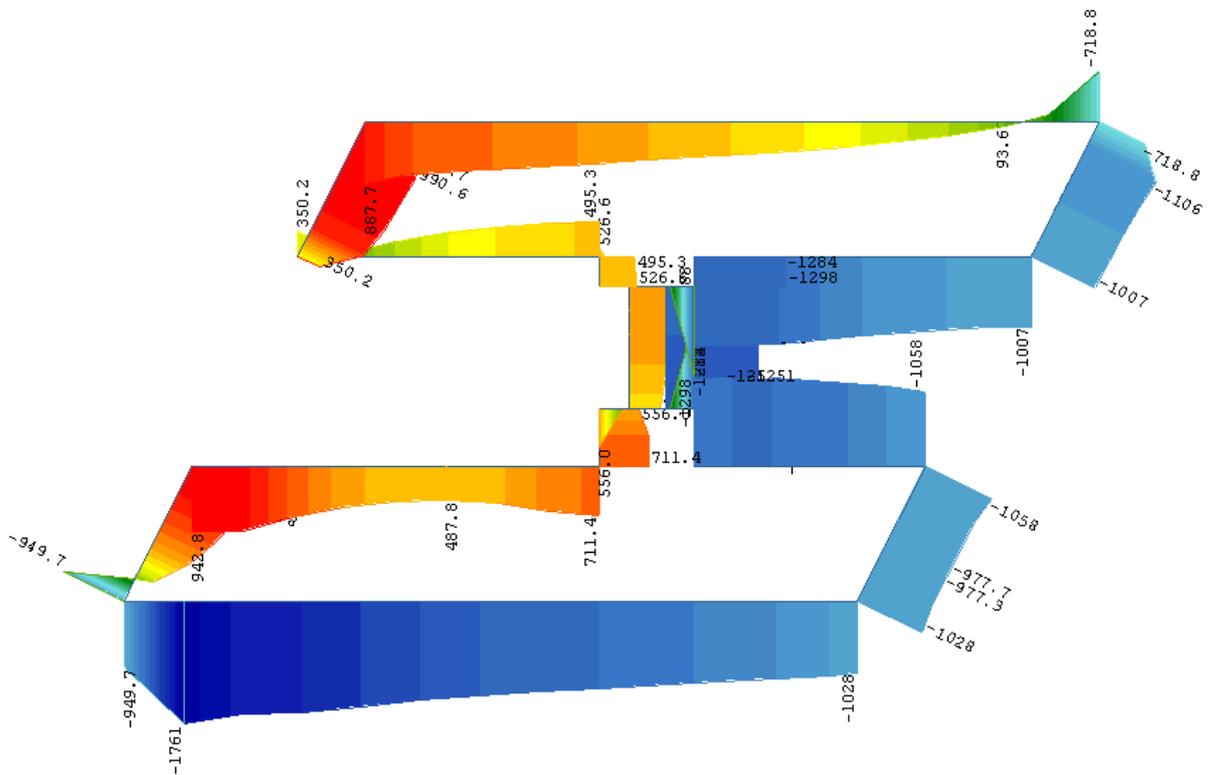




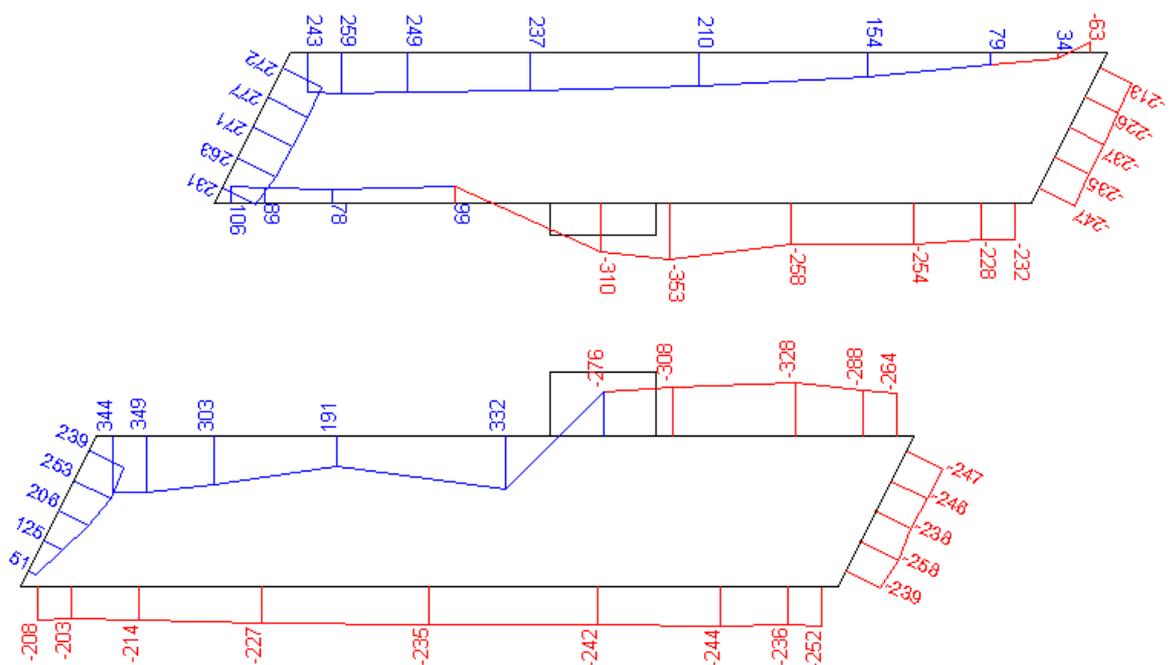
Über die Breite der Westfassade des hinteren Bauwerks wurde bei den Messungen die folgende Verteilung des Druckbeiwertes (bezogen auf den Staudruck in Höhe des obersten Punktes, Sicht von Westen) angegeben:



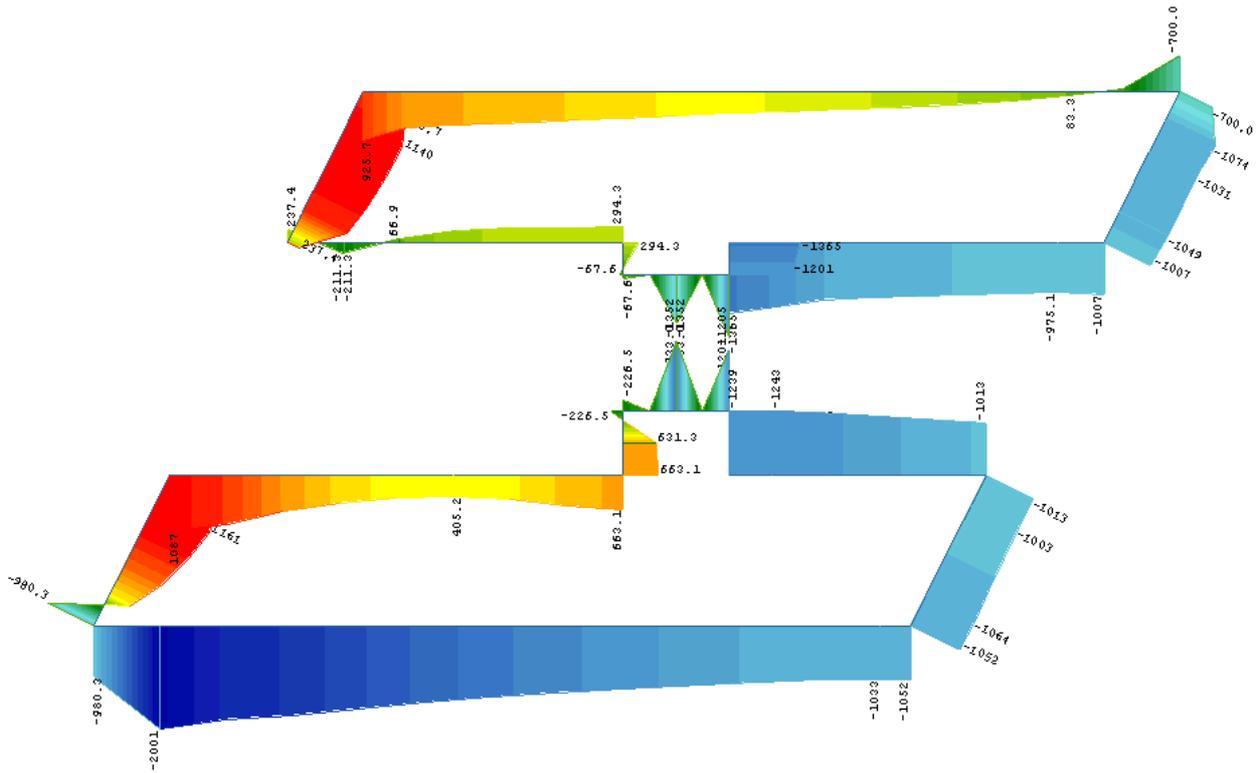
Damit können wir nun die Drücke in einzelnen Schnitten vergleichen. Zuerst unten im Bereich des Durchlasses (h=40.0 m)



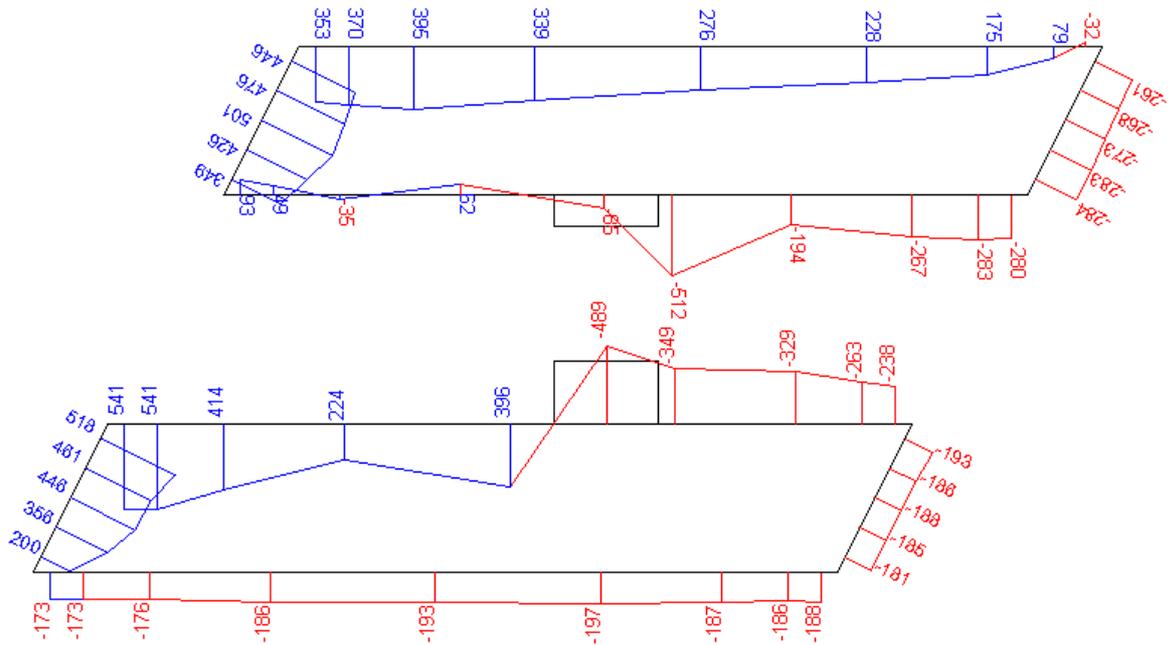
Die Winddrücke aus dem Windkanal sind im folgenden Bild angegeben:



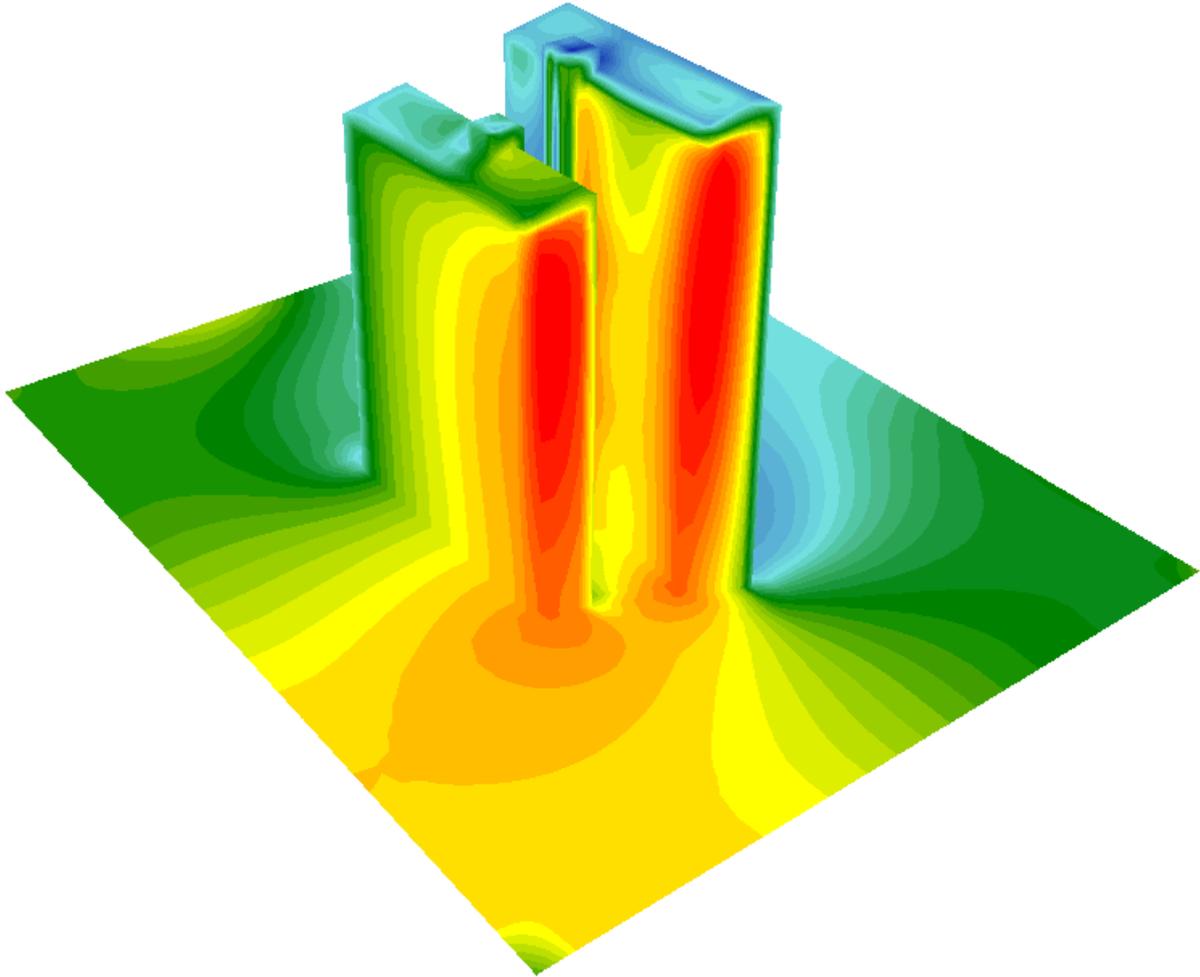
Und dann im oberen Bereich für (h=90.0 m)



Und die Drücke aus der Messung:



Auch wenn die Absolutwerte der Drücke noch zu hoch sind, ist die Verteilung als gut einzustufen. Die Sogspitze links unten ergibt sich nur aus der grafischen Auswertung bei der Mittelwertbildung.



Die Druckverteilung über das gesamte Ensemble zeigt auch, dass insbesondere auf den Dächern die Verteilung der Druck- und Sogwerte ganz gut abgebildet wird.

Die Drücke konvergieren aber nicht richtig. Das liegt zum einen daran, dass die Einströmung über Eck mit nur einem einzigen Druck-Referenzpunkt numerisch nicht sehr stabil ist, zum anderen gibt es offensichtlich Wirbelstrukturen, die eine stationäre Lösung verhindern. Wenn man das Netz verfeinert um diese abbilden zu können, können kleinere Wirbel auftreten, die die Sache nicht wirklich besser machen. Statt dessen empfiehlt es sich, mit einer quasi instationären Berechnung mit relativ großem Zeitschritt einen Zweig der möglichen Lösungen einzufangen. Dadurch kann man die Drücke noch etwa auf den halben Wert kleiner bekommen, während die Sogwerte nur geringfügig abnehmen oder teilweise sogar noch zunehmen.

Auch wenn der Effekt des Umfelds in diesem Falle wohl entscheidend ist, gibt es Stellen wie z.B. die Sogverteilung auf der Rückseite des Gebäudes, wo man die Werte des Windkanals nicht so richtig einschätzen kann.

## 4 BEWERTUNG

Es gibt wohl noch keine Norm, die numerische Berechnungen als einzige Grundlage der Windbemessung erlaubt. Angesichts der Tatsache, dass die Wahl der richtigen Geländekategorie (B oder IV) einen Einfluss vom Faktor 1.56 auf den Referenzstaudruck hat, wird die richtige Modellierung der Umgebung besonders wichtig und hier hat der Windkanal eindeutig Vorteile.

Der Windkanal kommt an seine Grenzen bei der Bestückung der Mess-Sonden in engen Bereichen, vor allem z.B. bei leichten beweglichen Membranen. Hier hat CFD eindeutig Vorteile.

Die derzeit üblichen Turbulenzmodelle haben ihre „bekannten“ Grenzen. Sie können verschiedene Effekte nur ungenau oder gar nicht beschreiben, aber sie können sehr wohl Tendenzen aufzeigen.

Wenn man die Drücke der CFD-Berechnung an bekannten Werten skaliert, so können meiner Meinung nach auch CFD-Werte für eine Bemessung herangezogen werden. Besser als auf die aktuelle Geometrie verbogene Normwerte sind sie allemal.

Wenn der Wind die alles entscheidende Bemessungsgröße ist, wird man um den Windkanal nicht herum kommen. Die CFD könnte aber wichtige Entscheidungen im Vorfeld dazu erleichtern.

## 5 LITERATUR

- [1] Ferziger, Joel H.; Peric, Milovan (1999)  
Computational Methods for Fluid Dynamics  
Springer Verlag, Berlin
- [2] Spurk, J.H. (2003)  
Strömungslehre - Eine Einführung in die Theorie der Strömungen  
Springer Verlag Berlin
- [3] Schlichting, H., Gersten, K. (2000)  
Boundary Layer Theory  
Springer Verlag Berlin
- [4] Ruscheweyh, H. (1982)  
Dynamische Windwirkung an Bauwerken  
Bauverlag Wiesbaden/Berlin.
- [5] Glück, Markus (2002)  
Ein Beitrag zur numerischen Simulation von Fluid-Struktur-Interaktionen  
Grundlagenuntersuchungen und Anwendung auf Membrantragwerke  
Shaker Verlag, Aachen 2002
- [6] Gerhardt, H.J. (1991)  
Windlasten auf Flachdächern großer Industriehallen  
WTG-Berichte Nr. 2 der Windtechnologischen Gesellschaft e.V.
- [7] Ruscheweyh, H. (2001)  
Windgutachten für die Highligh-Towers
- [8] Petersen, Ch. (2005)  
Hochhäuser im Wind, VBI-Fortbildungsseminar, 28. Januar 2005, München