

**Zeitschrift:** Regio Basiliensis : Basler Zeitschrift für Geographie  
**Herausgeber:** Geographisch-Ethnologische Gesellschaft Basel ; Geographisches Institut der Universität Basel  
**Band:** 52 (2011)  
**Heft:** 1

**Artikel:** Dynamik der urbanen CO2-Verteilung. Teil 2 : CFD-Simulationen in einer Strassenschlucht  
**Autor:** Gartmann, Andres  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1088233>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 15.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Dynamik der urbanen CO<sub>2</sub>-Verteilung

## Teil 2: CFD-Simulationen in einer Strassenschlucht

Andres Gartmann

### *Zusammenfassung*

*In städtischen Gebieten bilden sich heterogene Strömungsmuster aus, welche den Schadstofftransport in der Stadt, speziell in den Strassenschluchten, stark beeinflussen. Numerische Strömungssimulationen (CFD) haben den Vorteil, räumliche Strukturen mit guter Genauigkeit zu modellieren. Durch die Verifikation mit Messungen kann anhand der numerischen Resultate die Windverteilung wie auch die Schadstoffverbreitung analysiert werden. Der Artikel beschreibt in einem ersten Teil die wichtigsten Grundlagen von CFD-Simulationen und zeigt die erreichbare Genauigkeit durch den Vergleich mit Messungen in Basel. In einem zweiten Teil wird das Vorgehen bei der Modellierung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationsverteilungen an der Klingelbergstrasse für verschiedene meteorologische Bedingungen beschrieben. Durch die Analyse der räumlichen Strömung und der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Strassenschlucht kann die starke Abhängigkeit zwischen der Windrichtung und der CO<sub>2</sub>-Verteilung räumlich ausgewertet werden.*

## 1 Einleitung

Die heterogenen Strömungsmuster in urbanen Gebieten sind dominierende Einflussgrössen in der Ausbreitung von Gasen und Partikeln in Städten (Li et al. 2006). Bei der Untersuchung von Strömungs- und Transporteigenschaften der Luft in urbanen Gebieten können numerische Methoden hilfreich sein, da sie die Möglichkeit geben, sowohl die räumliche als auch die zeitliche Entwicklung realitätsnah zu modellieren (Parra et al. 2010). Messungen sind im Gegensatz zu numerischen Methoden meist zeit- und kostenintensiv und geben je nach Methode nur eine geringe räumliche Aussage. Die auf physikalischen Grundgesetzen aufgebauten Methoden der numerischen Strömungsmechanik werden unter dem Begriff “Computational Fluid Dynamics” (CFD) zusammengefasst. Mitte der 1960er-Jahre wurden die Methoden in der High-Tech-Industrie erstmals eingesetzt (Versteeg & Malalasekera 1995). Heute sind sie sowohl in der industriellen als auch der akademischen Forschung weit verbreitet, und die steigenden Computerressourcen ermöglichen immer höher aufgelöste Berechnungen.

---

Adresse des Autors: Dipl. Masch.-Ing. Andres Gartmann, Institut für Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung, Departement Umweltwissenschaften, Universität Basel, Klingelbergstrasse 27, CH-4056 Basel; E-Mail: andres.gartmann@unibas.ch

Es ist nicht so, dass numerische Methoden eine Alternative zu Messungen darstellen, vielmehr können numerische Methoden in Kombination mit Messungen das Verständnis über städtische mikro-meteorologische Phänomene verbessern.

## 2 Methoden

### 2.1 Grundlagen der numerischen Strömungsmechanik

CFD-Simulationen basieren auf der Diskretisierung und Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen (NSG). Die NSG basieren auf dem Newton'schen Gesetz der Impulserhaltung (*Kundu & Cohen* 2002). Durch die Annahme einer inkompressiblen Strömung vereinfachen und reduzieren sich die allgemeinen NSG zu:

$$\frac{DU_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + f_i \cdot \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i^2} \quad (1)$$

wobei mit  $U_i$  die räumlichen Geschwindigkeitskomponenten, mit  $\rho$  die Dichte und mit  $f_i$  die angreifenden Kräfte bezeichnet sind. In der Fluidmechanik werden Strömungen mit tiefen Mach-Nummern (vereinfacht: Verhältnis von Geschwindigkeit zur Schallgeschwindigkeit) als inkompressibel zusammengefasst, wobei sich die Inkompressibilität auf die Strömung und weniger auf das Fluid bezieht (*Wilcox* 2000). Neben den NSG gilt für die Strömungen noch die (inkompressible) Massenerhaltungsgleichung:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

Strömungen in städtischen Gebieten können als inkompressibel betrachtet werden. In städtischen Gebieten überwiegt meist die durch die Gebäude induzierte mechanische Turbulenz, wodurch in der Modellierung die Stabilitätseinflüsse vernachlässigt werden können (*Lundquist & Chan* 2006).

Die NSG beschreiben jegliche Strömung von Newton'schen Fluiden vollkommen, inklusiv der auftretenden Turbulenzerscheinungen. Man unterscheidet zwischen *turbulenten Strömungssimulationen*, wobei ein Strömungsfeld für ein möglicherweise auftretendes Geschwindigkeitsfeld berechnet wird, und *Turbulenz-Modellen*, welche für mittlere Geschwindigkeitsgrößen die räumliche und zeitliche Ausbreitung modellieren (*Pope* 2000). Turbulente Strömungssimulationen sind kostenintensiv, da die Gitterauflösung der kleinsten und grössten auftretenden Bewegung entsprechen muss. Die zwei wichtigsten Ansätze bei turbulenten Strömungssimulationen sind die Direct Numerical Simulation (DNS), bei der alle zeit- und räumlichen Skalen aufgelöst werden, und die Large Eddy Simulation (LES), bei welcher ein gefiltertes Geschwindigkeitsfeld, welches die gitterskaligen Bewegungen umfasst, entsprechend der NSG berechnet wird und die subgitterskaligen Bewegungen mit einem Turbulenzmodell modelliert werden. Einer der meist verwendeten Turbulenz-Modell-Ansätze ist die Reynolds-Averaged-Navier-Stokes-Gleichung (RANS), wobei die Reynolds-Zerlegung (Gleichung 3) auf die NSG angewendet wird.

$$U_i = \langle U_i \rangle + u_i \quad (3)$$

wobei mit  $\langle U_i \rangle$  die zeitlich gemittelten Geschwindigkeitskomponenten und mit  $u_i$  der fluktuierende Anteil bezeichnet sind.

Durch die zeitliche Mittelung entsteht in den NSG ein zusätzlicher Term, die so genannten Reynolds-Spannungen (Pope 2000):

$$\frac{\partial \langle u_i u_j \rangle}{\partial x_j} \quad (4)$$

Dieser zusätzliche Term ergibt ein nicht vollständig definiertes Gleichungssystem, welches aus vier Gleichungen und fünf Unbekannten besteht: drei Gleichungen aus den NSG und eine Gleichung aus der Massenerhaltungsgleichung mit den drei Variablen  $U_i$ , dem Druck  $p$  sowie den Reynolds-Spannungen. Dieser Zusammenhang wird als so genanntes *closure problem* bezeichnet (Pope 2000). Unterschiedliche Verfahren zur Modellierung dieses Terms wurden in den letzten 30 Jahren entwickelt, wobei die Zwei-Gleichungs-Modelle, speziell das k- $\epsilon$ -Modell, heute weit verbreitet sind (Menter 1994).

Die NSG sind partielle Differentialgleichungen mit nichtlinearen Termen. Zur numerischen Lösung der Gleichungen wird der Rechnungsraum in Elemente unterteilt. Durch die Diskretisierung der NSG auf die einzelnen Elemente entsteht ein lineares Gleichungssystem (Versteeg & Malalasekera 2000). Zur vollständigen Definition der Gleichungen müssen an den Rändern des Rechnungsraums die Randbedingungen definiert werden. Die Gleichungen zusammen mit den Randbedingungen werden mit iterativen Lösungsverfahren gelöst, z. B. mit der konjugierten Gradienten-Methode (Hestenes & Stiefel 1952). Das Ergebnis kann dann mittels Post-Processor-Software ausgewertet und es können abgeleitete Felder, wie z. B. Kräfte auf Flächen, berechnet werden.

## 2.2 CFD zur Simulation von Windverhältnissen in städtischen Gebieten

Zur Berechnung der Windverhältnisse in einer Stadt wird ein genaues Oberflächenmodell der Stadt benötigt. Von Basel existiert ein hochaufgelöstes Computer Aided Design (CAD) Modell, welches die Stadtgeometrie detailliert darstellt (Abb. 1). Eine im Zusammenhang mit CFD-Simulationen in urbanen Gebieten auftretende Problematik ist, dass zur Erstellung von CFD-Gittern, also der Unterteilung des Rechnungsraums in Elemente, innerhalb welcher die Grundgleichungen gelöst werden können, volumetrisch konsistente CAD-Daten benötigt werden. Vereinfacht kann dann von einem volumenkonsistenten CAD-Modell gesprochen werden, wenn der Fluidraum von einer komplett geschlossenen Fläche umgeben wird. Die meisten heute zur Verfügung stehenden Stadtmodelle sind nicht volumetrisch konsistent (Krischok & Döllner 2006), da die Fassaden, Dächer und das Höhenmodell durch einzelne, nicht zusammenhängende Flächen beschrieben werden. Durch Bereinigung der Volumeninkonsistenzen für den gesamten Rechnungsraum lässt sich die Geometrie vergittern (Abb. 2).

Für die Definition der numerischen Parameter sowie der Randbedingungen existieren Richtlinien (Tominaga et al. 2008, Franke et al. 2004). Um den Einfluss der Gebäude ausserhalb des Rechnungsraums zu berücksichtigen, wird für die Einlass-Randbedingungen das logarithmische Geschwindigkeitsprofil (Gleichung 5) angesetzt (Richards & Hoxey 1993):

$$U(z) = \frac{U_{fric}^*}{\kappa} \cdot \ln \left( \frac{z + z_0}{z_0} \right) \quad (5)$$

wobei mit  $\kappa$  die von-Karman Konstante,  $z$  die Höhe über Grund und  $z_0$  die Rauigkeitslänge bezeichnet wird. Die Schergeschwindigkeit  $U_{fric}^*$  repräsentiert den vertikalen Impulsfluss und lässt sich aus Gleichung 5 ableiten.

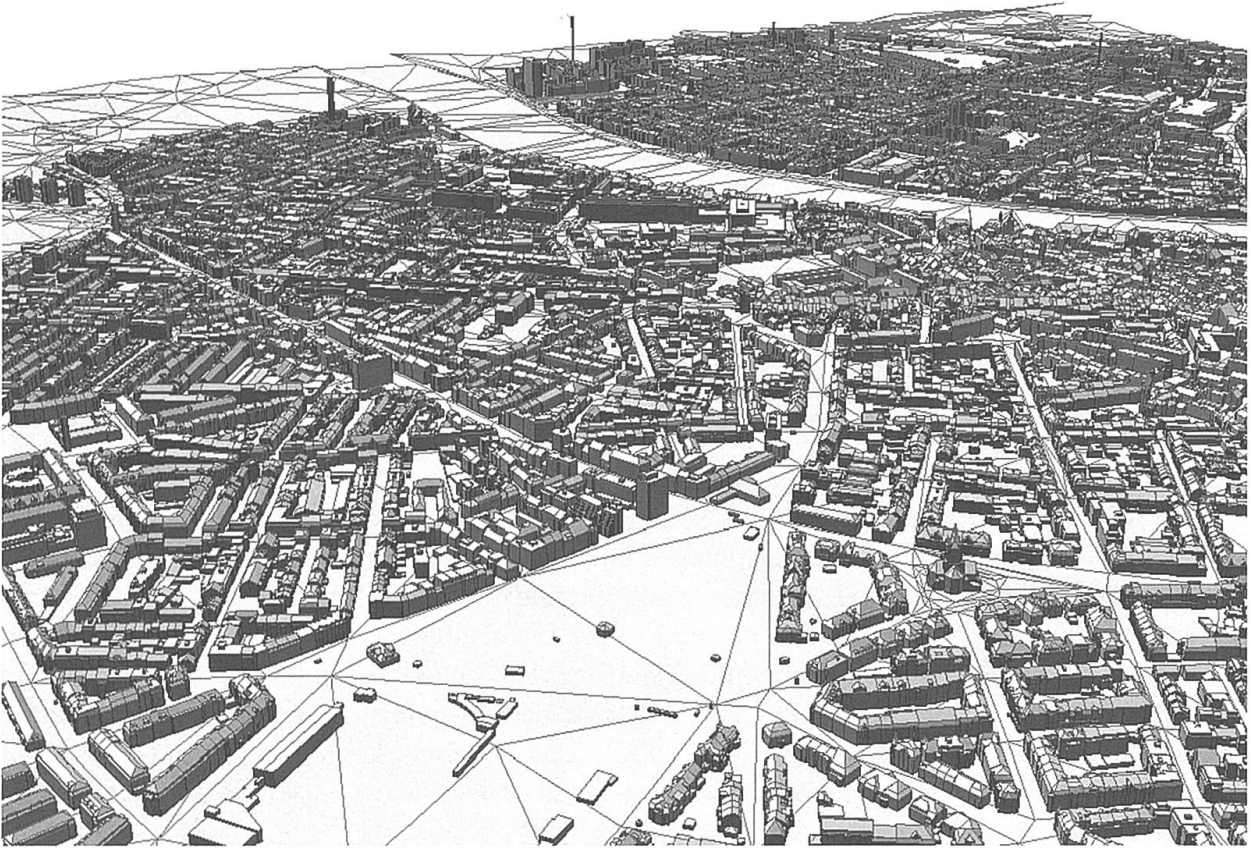


Abb. 1 CAD-Modell von Basel, Sicht Richtung NO.

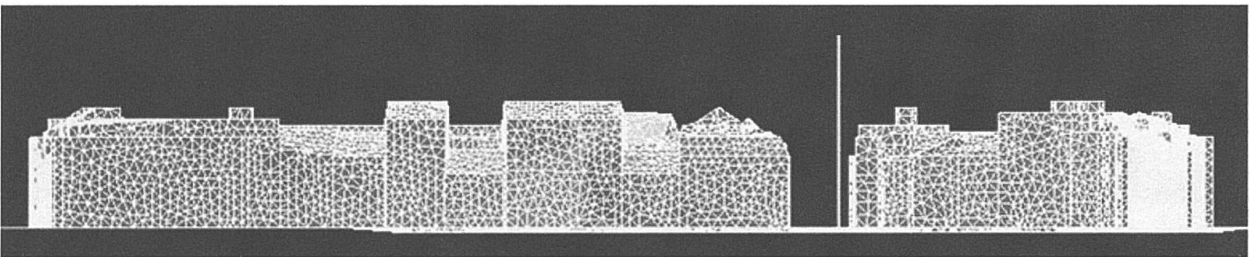


Abb. 2 “Vergitterte” Gebäude an der Sperrstrasse in Basel und virtueller Mast während der BUBBLE-Kampagne (Rotach et al. 2005).

Turbulente Strömungssimulationen in urbanen Gebieten sind aufgrund der begrenzten verfügbaren Computerressourcen bis jetzt nur mit LES möglich, und meist werden Turbulenz-Modelle basierend auf der RANS-Methode verwendet. Bei der Verwendung eines Zwei-Gleichungs-Modells, wie des  $k$ - $\epsilon$ -Modells, müssen für die turbulenten Grössen der turbulent kinetischen Energie ( $k$ ) und für die Dissipation ( $\epsilon$ ) zusätzliche Randbedingungen definiert werden. Eine Möglichkeit ist gemäss Pope (2000):

$$k = \frac{3}{2} (U \cdot I)^2 \quad (6)$$

wobei  $I$  die Turbulenzintensität bezeichnet, für welche Werte zwischen 5 % und 10 % verwendet werden. Für die Dissipation kann folgender Zusammenhang angesetzt werden:

$$\epsilon = \frac{k^{3/2}}{L_t} \quad (7)$$

wobei  $L_t$  eine Längenskala der Turbulenz bezeichnet und entsprechend der vertikalen Rechnungsraumausdehnung gewählt wird.

### 3 Resultate

#### 3.1 CFD-Simulation von der Windverteilung in einer Strassenschlucht

Während des umfangreichen Basler Urban Boundary Layer Projekts (BUBBLE) wurden an unterschiedlichen Standorten in der Stadt Basel Strömungsverhältnisse gemessen (Rotach et al. 2005), unter anderem auch an der Sperrstrasse.

Abbildung 3 zeigt das gemessene und simulierte mittlere Strömungsprofil in der Strassenschlucht an der Sperrstrasse sowie das Profil für die turbulent kinetische Energie. Der Vergleich zwischen den Messungen und den numerischen Resultaten zeigt die mittels CFD-Methoden in Strassenschluchten erreichbare Genauigkeit. Die mittleren Strömungsgrößen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messungen. Das turbulent kinetische Energieprofil weist im Dachbereich ( $20 < z < 27$  m) eine Abweichung zwischen den numerischen und den Messdaten auf. Dies kann einerseits daher kommen, dass zu wenige Gebäude im Vorlauf der Strömung in die Berechnung aufgenommen wurden, wodurch die Turbulenzerzeugung unterschätzt wird, oder daher, dass die Turbulenzgenerierung der Dächer im Modell zu wenig gut einfließt.

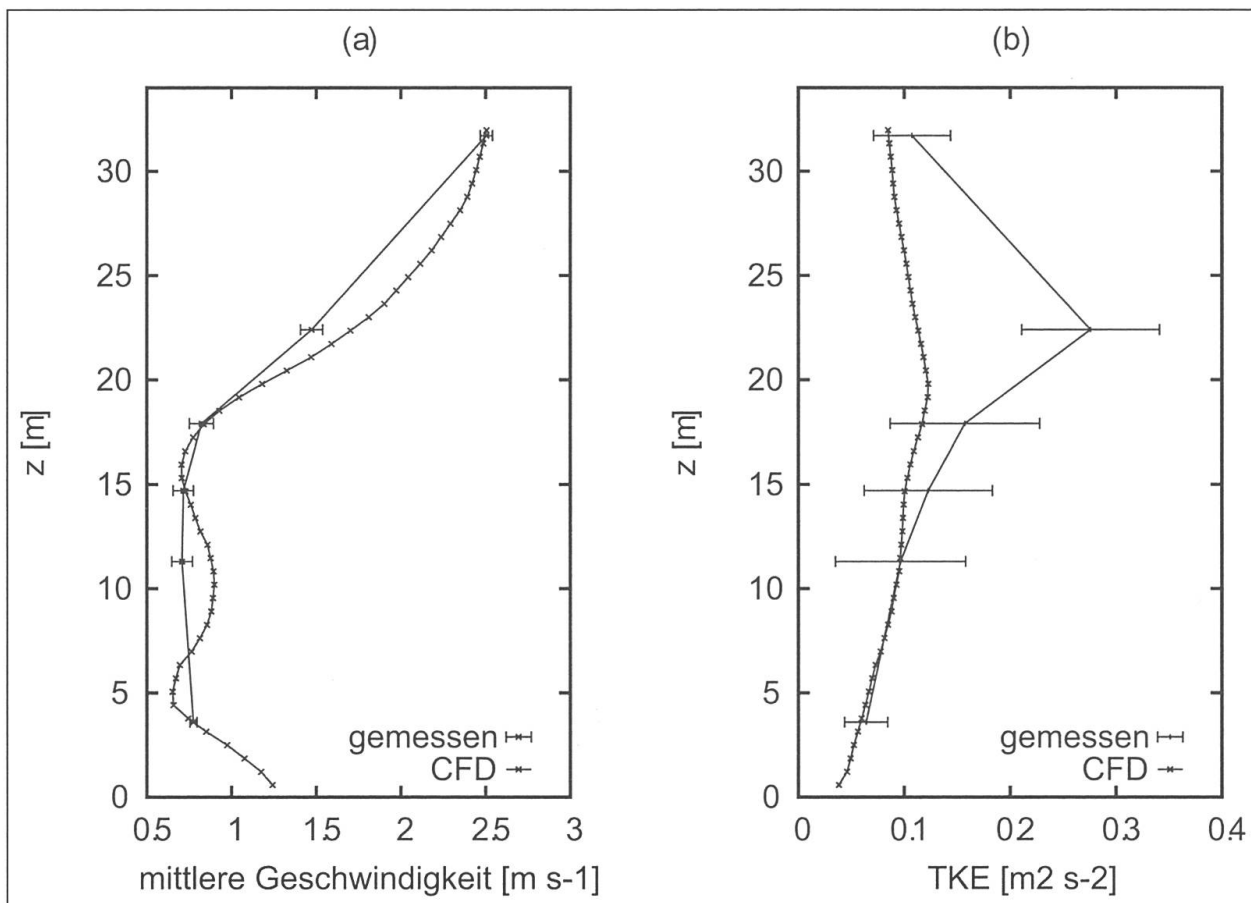


Abb. 3 (a) Geschwindigkeitsprofil und (b) turbulente kinetische Energie (TKE) in der Strassenschlucht an der Sperrstrasse.



### 3.2 Simulation von CO<sub>2</sub>-Transport

Neben den Strömungsverhältnissen kann auch der Transport von (mit-)transportierten Stoffen mittels CFD-Methoden berechnet werden. CO<sub>2</sub>-Stofftransport in urbanen Gebieten kann mittels Mehrkomponenten-Strömung modelliert werden. Dabei wird ein Strömungsfeld für ein zusammengesetztes Fluid entsprechend der RANS berechnet und der Einfluss der einzelnen Komponenten auf die Strömungsgrössen über die Variation der jeweiligen Stoffanteile der Komponenten in einem Element ermittelt. Für die zusätzlichen transportierten Stoffe muss daher jeweils eine Massenerhaltungsgleichung berechnet werden (ANSYS 2006).

Vorgängig zu den in Teil I beschriebenen Messungen (Lietzke 2011) wurden zwischen 2004 und 2005 um das Universitätsgebäude an der Klingelbergstrasse in Basel die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf verschiedenen Höhen auf der Strassen- und der Gebäuderückseite gemessen (Vogt et al. 2006). Bei der Messkampagne 2004 und 2005 wurde ein starker Konzentrationsunterschied zwischen Hinterseite und Vorderseite des Gebäudes ermittelt, welcher durch die Anströmungswindrichtung unabhängig von Wochentagen und Stabilität dominiert war (Vogt et al. 2006). Rein basierend auf den Messdaten konnte keine abschliessende Erklärung für die starke Abhängigkeit von der Anströmungsrichtung gefunden werden. Um die räumlichen Mechanismen erfassen zu können, wurden CFD-Simulationen mit CO<sub>2</sub>-Transport durchgeführt. Als Grundlage für die CFD-Simulation des CO<sub>2</sub>-Transports im Untersuchungsgebiet werden die Strassen als konstante CO<sub>2</sub>-Quellen modelliert. Auf den verkehrsreicheren Hauptstrassen werden stärkere CO<sub>2</sub>-Quellen als auf den Nebenstrassen definiert. Die Geschwindigkeitsmessungen ( $U$ ) und die CO<sub>2</sub>-Konzentrations-Messungen ( $CO_{2Hint}$ ) des stationären Messturms auf dem Gebäude werden zur Definition der seitlichen Randbedingungen verwendet (Abb. 4). Die dominierenden Windanströmrichtungen sind Osten und Westen, die Klingelbergstrasse verläuft in Nord-Süd-Richtung. Zur Erfassung der für eine Woche repräsentativen Situationen werden aus den halbstündlich gemittelten Messdaten jeweils drei Situationen bei Westwind und drei bei Ostwind mit jeweils unterschiedlichen Geschwindigkeitsmagnituden ausgewählt (Tab. 1). Weiter sind in der Tabelle die Konzentrationsdifferenzen aus den Messungen ( $\lambda_{gemessen}$ ) sowie aus den Berechnungen ( $\lambda_{modelliert}$ ) aufgeführt. Die Konzentrationsdifferenz zwischen dem Hinterhof und der Strasse wird gemäss Gleichung 8 berechnet:

$$\lambda = \sum C_{i,Strasse} - \sum C_{i,Hint} \quad (8)$$

wobei mit  $C_i$  die Konzentrationen auf den unterschiedlichen Höhen (Abb. 4) bezeichnet sind.

Tab. 1 Vergleich der ausgewählten Situationen bei West- und Ostwind; Tag in Wochentag (WT) und Wochenende (WE), WA = Windanströmung, U = Geschwindigkeitsmagnitude, CO<sub>2Hint</sub> = Hintergrundkonzentration in ppm,  $\lambda$  = Differenzen zwischen Hinterhof und Strassenseite, relativer Fehler zwischen numerischen und gemessenen Daten.

Tag	WA	U [m/s]	CO <sub>2Hint</sub> [ppm]	$\lambda_{gemessen}$	$\lambda_{modelliert}$	Rel. Fehler [%]
WE	Ost	1.4	408.7	5.4	6.7	24
WE	West	1.9	378.6	32.2	66.7	107
WE	Ost	1.8	401.3	13.3	16.1	21
WE	West	2.4	370.2	51.3	49.3	4
WT	Ost	3.1	383.5	6.9	4.5	34
WT	West	3.6	378.4	52.	66.9	27

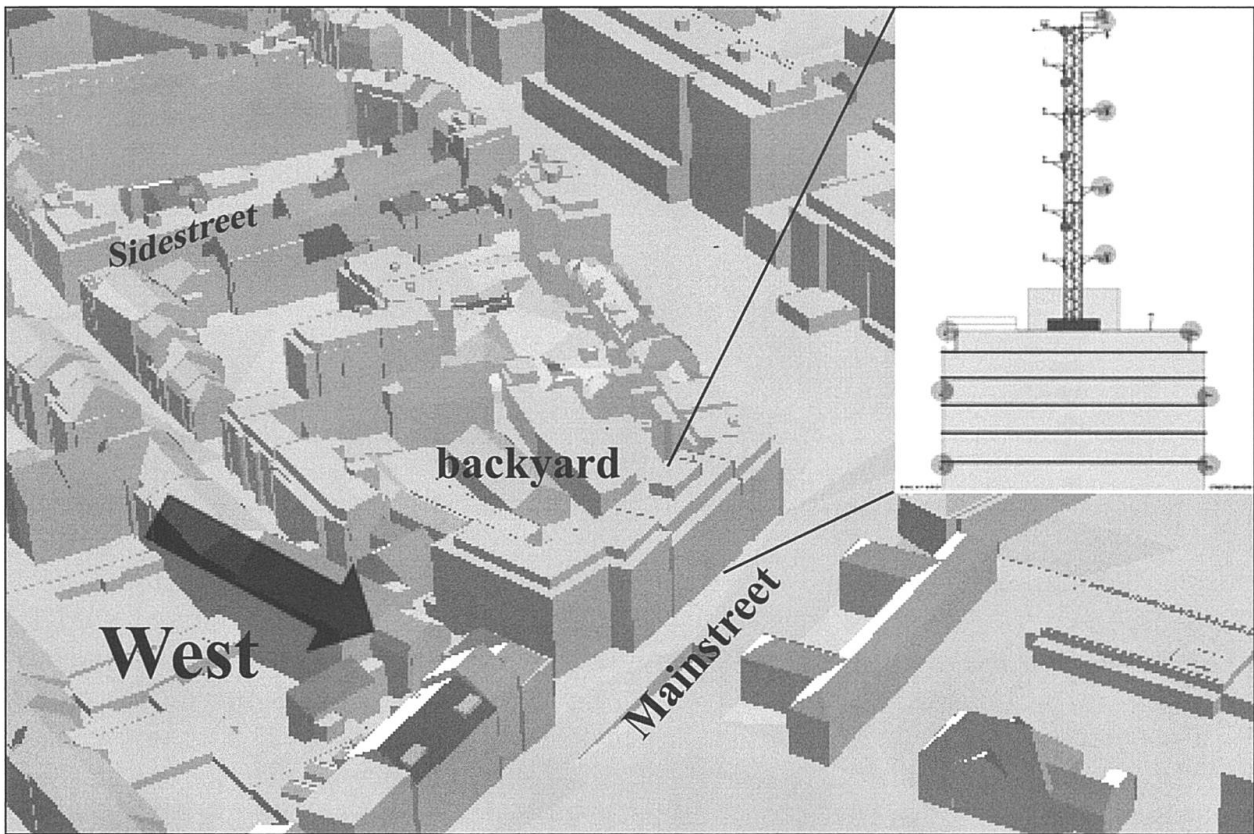


Abb. 4 CAD-Modell des Institutsgebäudes an der Klingelbergstrasse, Basel.

Der Vergleich zwischen den gemessenen und den modellierten  $\text{CO}_2$ -Differenzen zeigt bis auf einen Fall eine gute Übereinstimmung (relativer Fehler  $< 30\%$ ). Die Gründe für den grossen relativen Fehler bei einer Westwindsituation können in einer lokal höheren Emission liegen, wie z. B. ein höheres Verkehrsaufkommen, welche durch die Modellierung nicht erfasst werden kann.

Anhand der numerischen Daten lassen sich zur  $\text{CO}_2$ -Verteilung auch die Strömungsmuster über der Klingelbergstrasse genauer analysieren. Die Abb. 5 und 6 zeigen die  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen bei West-, respektive Ostanströmung. Deutlich sichtbar ist die Ausbildung eines Wirbels im Uhrzeigersinn bei Westanströmung und die Ausbildung von zwei im Gegenuhrzeigersinn rotierenden Wirbeln bei Ostanströmung. Ein weiterer Effekt ist die Strömungsausrichtung in Bodennähe entlang der Klingelbergstrasse (Abb. 7). Somit wird bei Westanströmung das  $\text{CO}_2$  von der

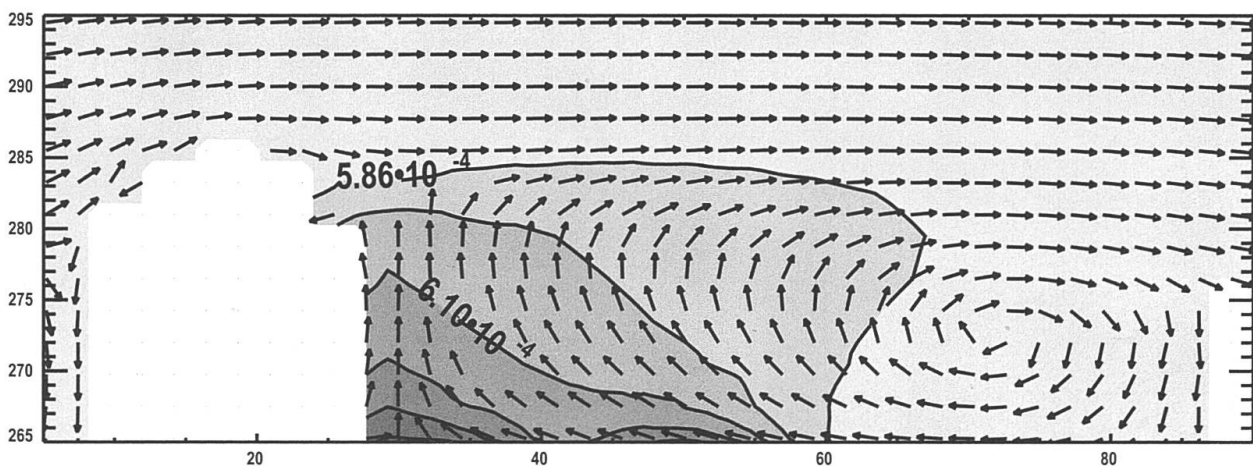


Abb. 5  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen bei Westanströmung im Querschnitt; Vektoren zeigen den Strömungsverlauf.



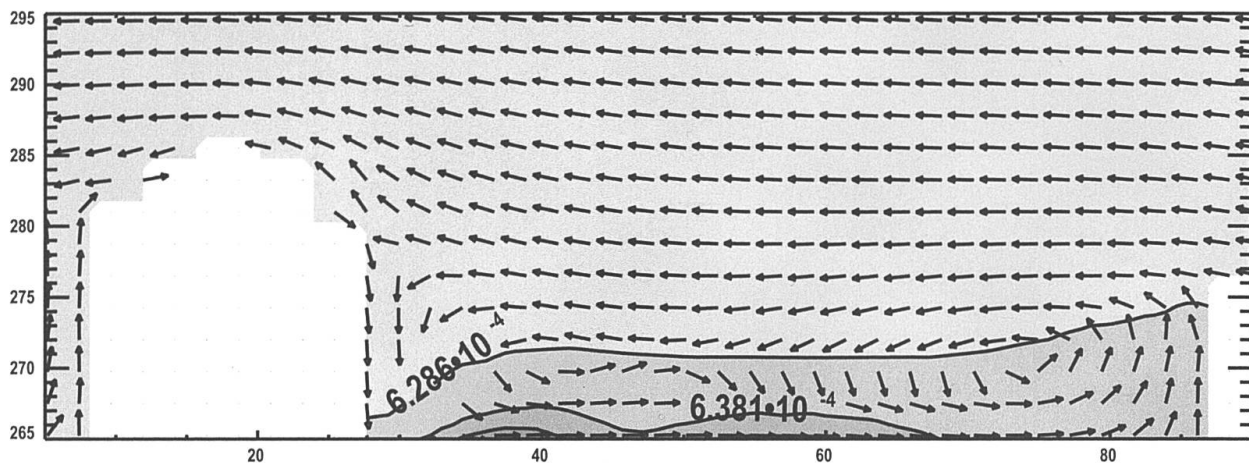


Abb. 6 CO<sub>2</sub>-Konzentration bei Ostanströmung im Querschnitt; Vektoren zeigen den Strömungsverlauf.

Strasse durch die im Uhrzeigersinn rotierende Wirbelstruktur gegen die Gebäudewand des Gebäudes transportiert, an dem die Messungen durchgeführt wurden. Im Falle von Ostwind wird das CO<sub>2</sub> von der Gebäudewand weg transportiert. Anhand der CFD-Resultate lässt sich die starke Abhängigkeit der CO<sub>2</sub>-Konzentrationsdifferenzen zwischen Hinterhof und Strassenseite von der Windrichtung genauer erklären. Einerseits zeigen die Berechnungen, dass sich in Abhängigkeit von der Anströmung deutlich unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der ganzen Strassenschlucht ausbilden. Dies wird auch durch die in *Lietzke* (2011) beschriebenen Messungen bestätigt. Weiter zeigen die starken Konzentrationsunterschiede auf kleinem Raum, wie sensitiv Schadstoffmessungen in der Stadt auf den Ort der Messung sind.

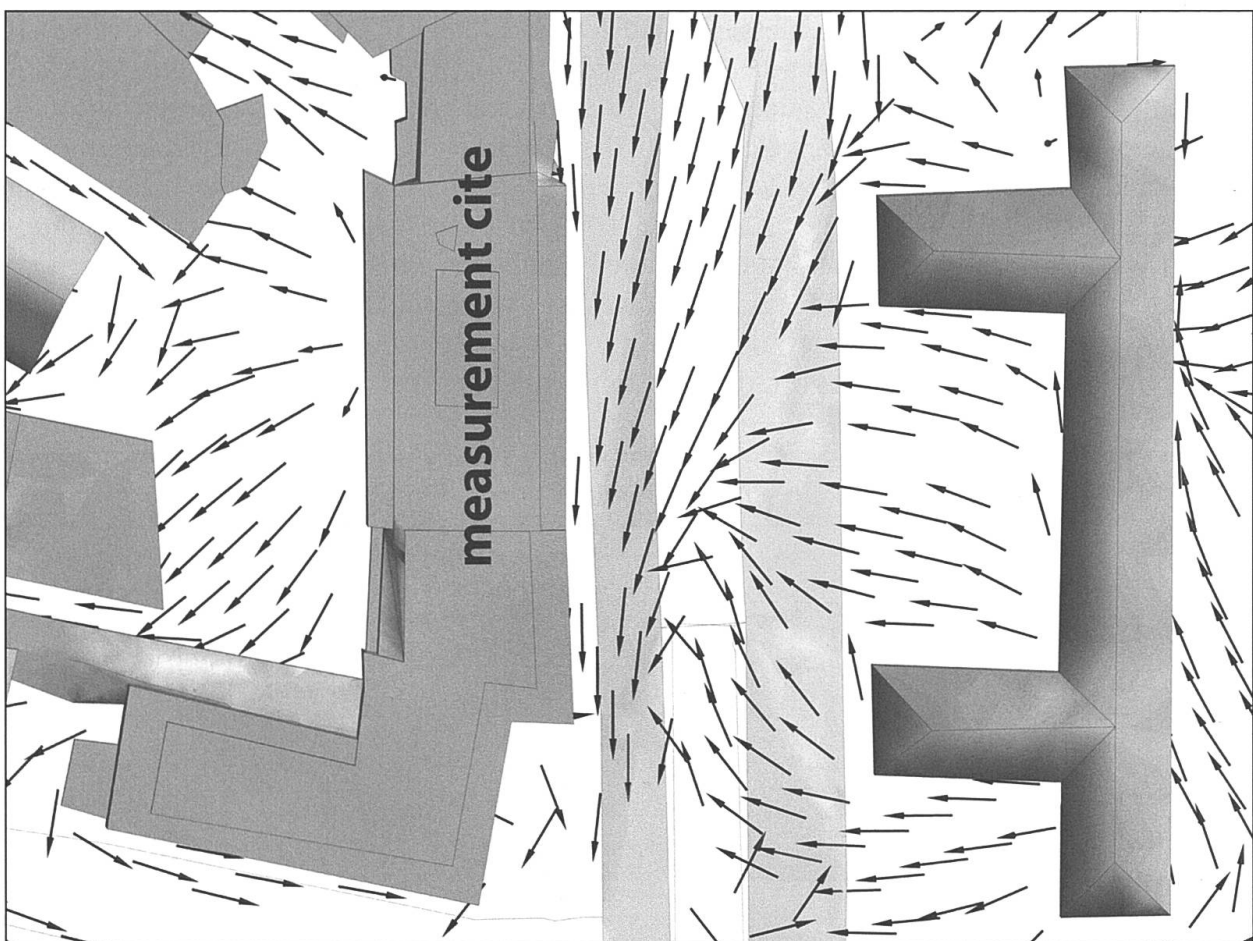


Abb. 7 Vektordarstellung der Strömung ca. 5 m über dem Boden.

## 4 Fazit

Im Vergleich mit den Messdaten in einer tiefen Strassenschlucht an der Sperrstrasse kann gezeigt werden, dass sich mittels CFD-Methoden sehr gut das komplexe urbane Strömungsverhalten modellieren lässt. Durch die Verifikation der CFD-Daten mit den Messungen ergibt sich ein plausibles räumliches Bild der Strömungsmuster, welche in urbanen Gebieten entstehen können. Basierend auf den Resultaten kann der Transport von skalaren Beimengungen wie CO<sub>2</sub> modelliert werden. Auf Basis eines Messaufbaus einer Kampagne aus den Jahren 2004 und 2005 wurde die CO<sub>2</sub>-Konzentrationsverteilung in einem Quartierteil modelliert. Die Erkenntnisse aus den numerisch erhaltenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationsmustern lassen die Ursachen für starke CO<sub>2</sub>-Gradienten zwischen dem Hinterhof und der Vorderseite des Gebäudes finden. Die in Abhängigkeit von der Windrichtung stark unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Konzentrationsverteilungen bestätigen auch die in Lietzke (2011) aufgezeigten Resultate aus der laufenden Messkampagne. Die Kombination von Messungen mit numerischen Simulationen bietet eine gute Möglichkeit, Schadstofftransporte in urbanen Gebieten im Detail zu untersuchen.

## Literatur

- ANSYS 2006. *ANSYS CFD Reference Manual* (11.0 edition). Canonsburg.
- Franke J., Hirsch C., Jensen A.G., Krüs H.W., Schatzmann M., Westbury P.S., Miles S.D., Wisse J.A. & Wright N.G. 2004. Recommendations on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment. In: van Beek J.P.A.J. (Hrsg.): *Proc. Int. Conf. on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics: COST C14 – Impact of Wind and Storm on City life and Built Environment*. Rhode-Saint-Genèse.
- Hestenes M.R. & Stiefel E. 1952. Methods of conjugate gradients for solving linear systems. *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 49: 409–436.
- Krischok D. & Döllner J. 2006. *Kopplung eines 3D-Stadtmodell-Visualisierungssystems mit einem Finite-Elemente-Simulationssystem*. Hasso-Plattner-Institut für Softwaresystemtechnik, Berlin, 1–122.
- Kundu P.K. & Cohen I.M. 2002. *Fluid Mechanics*. San Diego, 1–730.
- Li X., Liu C., Leung D. & Lam K. 2006. Recent progress in cfd modelling of wind field and pollutant transport in street canyons. *Atmospheric Environment* 40: 5640–5658.
- Lietzke B. 2011. Dynamik der urbanen CO<sub>2</sub>-Verteilung. Teil 1: Messungen in einer Strassenschlucht. *Regio Basiliensis* 52(1): 37–44.
- Lundquist J. & Chan S. 2006. Consequences of urban stability conditions for computational fluid dynamics simulations of urban dispersion. *Journal of applied Meteorology and Climatology* 46: 1080–1097.
- Menter F. 1994. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal* 32: 1598–1605.
- Parra M., Santiago J., Martin F., Martilli A. & Santamaria J. 2010. A methodology to urban air quality assessment during large time periods of winter using computational fluid dynamic models. *Atmospheric Environment* 44: 2089–2097.
- Pope S.B. 2000. *Turbulent Flows*. Cambridge, 1–771.
- Richards P.J. & Hoxey R.P. 1993. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-ε turbulence model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 46 & 47: 145–153.
- Rotach M., Vogt R., Bernhofer C., Batchvarova E., Christen A., Clappier A., Feddersen B., Gryning S.E., Martucci G., Mayer H., Miteva V., Oke T., Parlow E., Richner H., Roth M., Roulet Y., Ruffieux D., Salmond J., Schatzmann M. & Voogt J. 2005. BUBBLE – an urban boundary layer meteorology project. *Theoretical and Applied Climatology* 81: 231–261.
- Tominaga Y., Mochida A., Yoshie R., Kataoka H., Nozu T., Yoshikawa M. & Shirasawa T. 2008. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96: 1749–1761.
- Versteeg H. & Malalasekera W. 1995. *An introduction to Computational Fluid Dynamics*. Essex, 1–267.
- Vogt R., Eitel J. & Parlow E. 2006. Coupling of backyard to street canyon CO<sub>2</sub> concentrations. *6th International Conference on Urban Climate ICUC-6*, Sweden.
- Wilcox D.C. 2000. *Basic Fluid Mechanics*. La Cañada, 1–786.

