

Walter Scheuermann, Fritz Schmidt und Christoph Krass

# Modellierung des Windfeldes als Antriebskraft für die interne Strömung im Bodensee

Der Wind ist eine der treibenden Kräfte für die Ausbildung von Strömungen in Seen. Im Rahmen der Simulation der hydrodynamischen Verhältnisse in BodenseeOnline sind daher Windgeschwindigkeit und Windrichtung wesentliche Randbedingungen. Im vorliegenden Artikel wird das Modell zur Berechnung von 3-D-Windfeldern über dem Bodensee, sowie die Ergebnisse zur Untersuchung der Tauglichkeit des Modells vorgestellt.

## 1 Einleitung

Die interne Seeströmung wird durch den Eintrag der Windenergie in die Seeoberfläche angetrieben. Daher ist es wichtig, die Verteilung des Windes auf der Seeoberfläche möglichst detailliert zu kennen.

Hierzu wird im Rahmen von BodenseeOnline das Modell MCF (MassConsistent-Flowmodel) zur Berechnung der Windverhältnisse eingesetzt [1]. Die hiermit berechneten 3-D-Windfelder bilden eine Randbedingung für die Simulation der hydrodynamischen Verhältnisse im Bodensee.

Die Bestimmung dieser Windfelder erfolgt zum einen auf Basis der vorhandenen Messwerte, zum anderen auf der Basis der Prognosedaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) [2]. Damit lassen sich sowohl

aktuelle und in der Vergangenheit liegende Situationen analysieren als auch Prognosen für die nahe Zukunft erstellen.

## 2 Das Windfeldmodell

### 2.1 Das Modell MCF

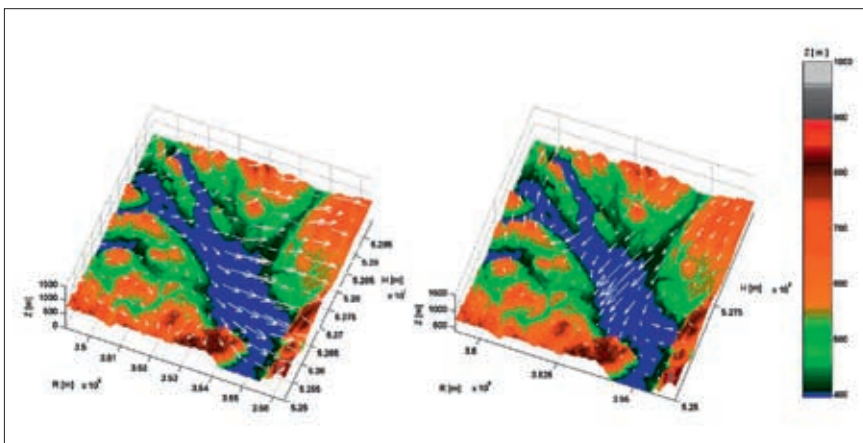
Im Rahmen von BodenseeOnline wird für die Windfeldberechnung das massenkonsistente, divergenzfreie diagnostische Strömungsmodell MCF eingesetzt. Die Lösung der für die Berechnung der Windverhältnisse verwendeten numerischen Verfahren erfolgt in horizontaler Richtung in einem kartesischen, in vertikaler Richtung in einem geländefolgenden Gitter. Ein solches, dem Gelände angepasstes Gitter mit variablen Maschenweiten ermög-

licht eine hohe Auflösung vor allem in der Nähe der Oberfläche und somit eine detaillierte Berechnung der Windverhältnisse in den für die hydrodynamischen Berechnungen wesentlichen oberflächennahen Schichten.

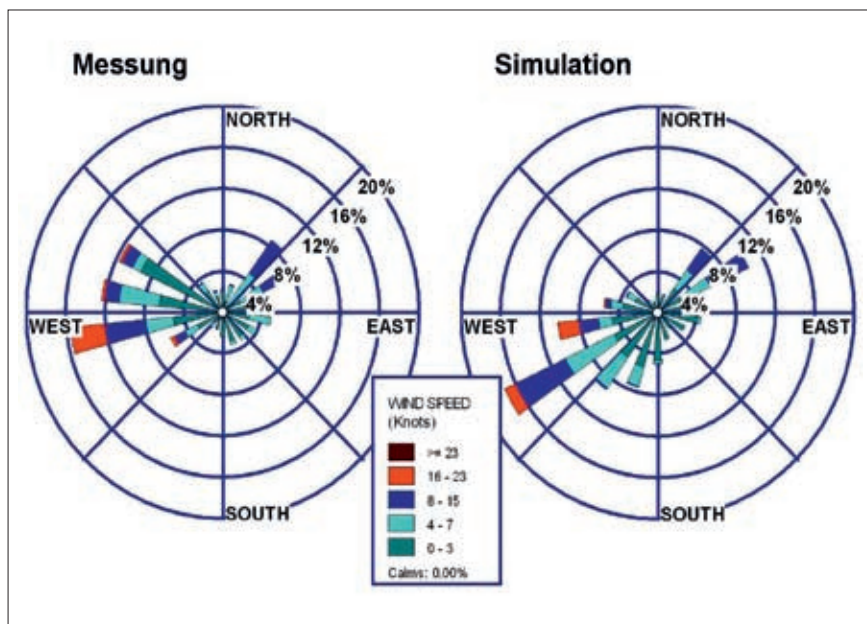
### 2.2 Anfangsbedingungen und wesentliche Einflussfaktoren

Als Startwerte für die Windfeldberechnung können sowohl Windmesswerte der um den See verteilten meteorologischen Stationen [3] als auch die prognostizierten meteorologischen Daten des DWD verwendet werden. Da die Messstationen vertikal nur einen Messpunkt in Bodennähe haben, ist es für die Qualität der berechneten Windfelder entscheidend, welches Windprofil sich in vertikaler Richtung ausbildet. Für den Bodensee konnten durch Vergleichsrechnungen mit vorliegenden Messdaten die entsprechenden Parameter ermittelt werden.

Ein weiterer wesentlicher Faktor für die Berechnung der Windfelder ist die Topografie. Benötigt wird dazu ein Orographiemodell, das in seiner horizontalen Auflösung den Anforderungen an die Genauigkeit des hydrodynamischen Modells genügt. Um den Einfluss der Umgebung des Sees auf die Windfeldberechnung zu erfassen, wird das Umfeld des Bodensees mit eingeschlossen. Bestimmend sind hier der angrenzende Bregenzer Wald, der Bodanrück, der Sipplinger Berg sowie der südlich liegende Rorschacher Berg. Ebenso werden das Rheintal und das von Norden her kommende Schussental mit einbezogen.



**Bild 1:** Hauptwindrichtungen über dem Bodensee des Windfeldes in ca 10 m Höhe über Grund: links: Westwindlage mit max. Windgeschwindigkeit von 6 m/s; rechts: Nord-Ost-Windlage mit max. Windgeschwindigkeit von 3 m/s (Koordinaten im Gauß-Krüger-System)



**Bild 2:** Häufigkeitsverteilung der Windverhältnisse bzgl. der Windrichtung an einer See-Messstation im Konstanzer Trichter während der Bodensee-Messkampagne 2001 im Zeitraum vom 15.10. bis 11.11.2001 (links) und Simulation dieses Zeitraumes (rechts)

Die Unterscheidung zwischen Land- und Seeoberfläche wird durch Rauheitsfaktoren modelliert. So wurde die Rauheit der Seeoberfläche auf den bei den meisten Windstärken charakteristischen Wert von 0,001 m gesetzt, diejenige der Landoberfläche wurde einheitlich mit 0,5 m angenommen.

### 2.3 Mess- und Prognosedaten

In BodenseeOnline werden die aktuellen Messwerte zur Hydrologie, Meteorologie sowie ausgewählte Wasserwerksparemeter erfasst und als Eingangsdaten für die Online-Simulation verwendet. Für die Windfeldberechnungen sind dabei Windgeschwindigkeit und Windrichtung wesentlich. Die zeitliche Auflösung der Messdaten beträgt im Normalfall 10 Minuten. Im Falle des Bodensees liegen die Messstationen an Land, meist in unmittelbarer Umgebung des Sees.

Bei der Simulation der Windverhältnisse ist zu beachten, dass es sich bei den Messdaten um zeitlich gemittelte Punktmessungen an Messstationen mit einer festen Messhöhe handelt. Die für die Bestimmung der vertikalen Windprofile notwendigen Werte in verschiedenen Messhöhen werden auf Basis logarithmischer Funktionen berechnet.

Die Prognosen des deutschen Wetterdienstes umfassen einen Vorhersagezeitraum von 78 Stunden und werden zweimal täglich zur Verfügung gestellt. Der für

die Windfeldberechnungen relevante Bereich des Bodensees und seiner Umgebung umfasst dabei 15 x 7 Gitterpunkte mit einer Auflösung von ungefähr 4,5 x 7 km sowie 10 vertikalen Ebenen von 10 bis 600 m Höhe. Die zeitliche Auflösung beträgt eine Stunde. Da die Prognosedaten eine vertikale Verteilung enthalten, kann diese direkt verwendet werden. Die Bestimmung des logarithmischen Profils kann hierbei entfallen.

Das vertikale Profil ergibt sich hierbei aus den vertikal vorliegenden Werten des 3-D-Gitters.

Zu beachten ist, dass die Prognosedaten nur in einer für BodenseeOnline relativ groben räumlichen Auflösung vorliegen, bei der lokale Besonderheiten, wie die komplexe Orografie des Bodensees, nicht detailliert erfasst werden.

### 3 Vergleich Messwerte zu Rechnung

Zur Validierung des Windfeldmodells konnten die Daten von zwei Messkampagnen, die vom Institut für Wasserbau (IWS), Universität Stuttgart, und dem Centre for Water Research (CWR), University of Western Australia, 2001 und 2003 [4], [5] auf dem Bodensee durchgeführt wurden, herangezogen werden.

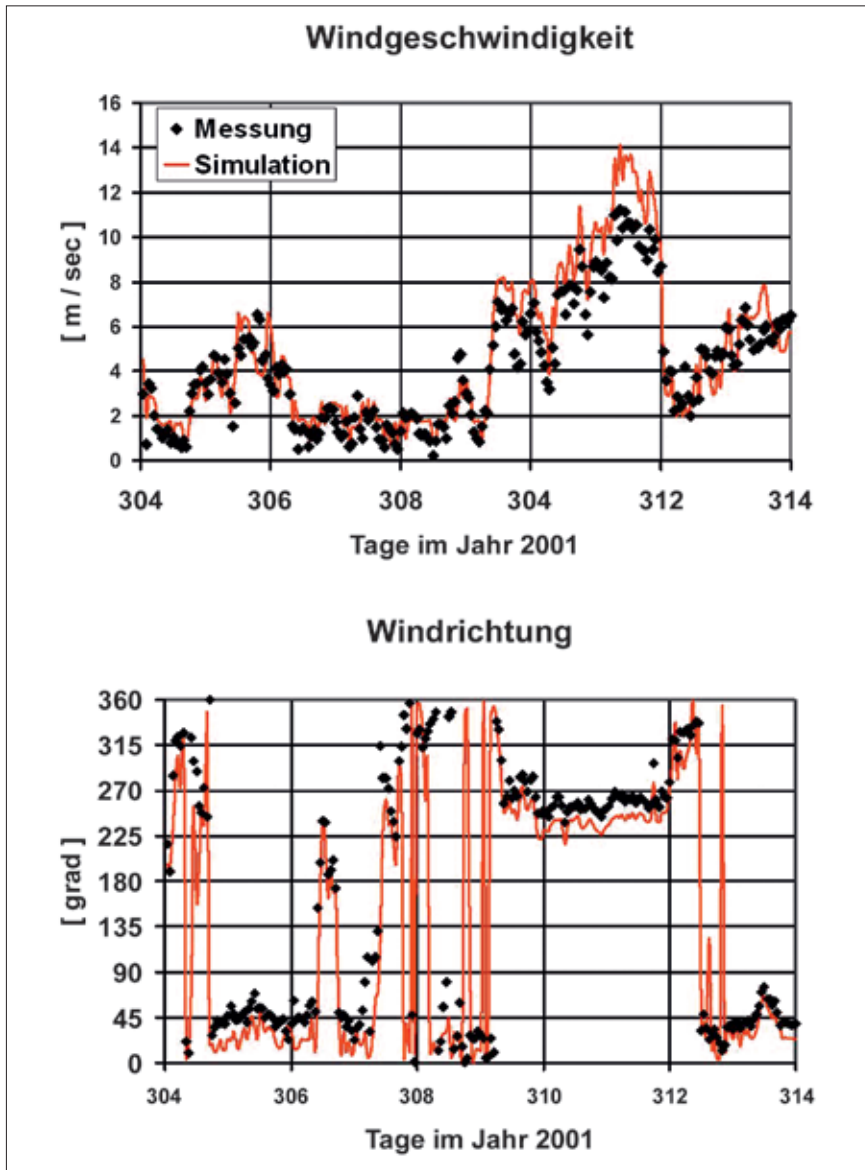
Dabei wurden über einen längeren Zeitraum auch Messungen von Windge-

schwindigkeit und Windrichtung auf dem Überlinger See und Obersee vorgenommen. Bei diesen Messkampagnen liegen somit neben den Messwerten der umliegenden Landstationen auch Messwerte auf dem See vor.

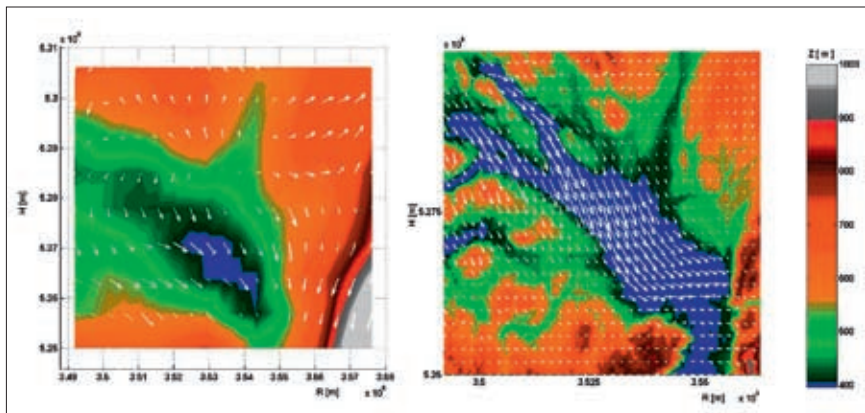
Bei der Validierung wurden unterschiedliche Situationen untersucht. Zum einen wurde ein Vergleich der Resultate von Berechnungen auf Basis aller verfügbaren Messstationen (See und Land) als auch nur der Landstationen mit den auf dem See gemessenen Werten vorgenommen. Zum anderen wurde durch Hinzufügen bzw. Weglassen von Landstationen der lokale Einfluss der Lage von Messstationen untersucht. Anhand eines statistischen Vergleichs für einzelne Stationen in unterschiedlichen Wettersituationen (Stark- und Schwachwind) sowie der zeitlichen Entwicklung konnten Einzeleffekte untersucht werden.

Im Rahmen der Messkampagnen und auch im Rahmen der Langzeitbeobachtung wurden zwei am Bodensee vorherrschende Windsituationen beobachtet. Zum einen die häufig bei Starkwinderereignissen vorkommende Anströmung des Sees aus westlicher Richtung. Bei dieser Wetterlage hat der Bodanrück eine abschattende Wirkung auf den Überlinger See, was zu einer geringeren Windgeschwindigkeit als im Obersee führt. Zum anderen handelt es sich um die vielfach auftretende Anströmung aus Nord-Ost. Hier wirkt sich der Einfluss des Bregenzer Waldes und die Strömungsbildung im Schussental auf die Windverhältnisse auf dem See aus. Beispiele von Windfeldern für diese beiden Wetterlagen bei mittleren Windgeschwindigkeiten sind in **Bild 1** zu sehen. In diesem Bild ist das Windfeld in einer oberflächennahen Schicht in der auf die maximale Windstärke normierten Vektordarstellung abgebildet. Die topografische Höhendarstellung ist so gewählt, dass alle Höhen unterhalb von 400 m ü. NN einheitlich blau gefärbt sind. Dadurch werden der See mit dem mittleren Seepegel von 395 m ü. NN und die ufernahe Umgebung optisch hervorgehoben. Bei beiden Wetterlagen ist die Zunahme der Windgeschwindigkeit über der freien Seefläche gut zu erkennen. Bei Starkwinderereignissen, meist aus Richtung Westen, setzt sich auf dem ganzen See eine nahezu einheitliche Windrichtung durch.

Die beiden Hauptwindrichtungen lassen sich auch bei der statistischen Be-



**Bild 3:** Vergleich von Messung und Simulation an der See-Messstation vor Friedrichshafen: Windgeschwindigkeit (oben) und -richtung (unten) in der Zeit von Tag 304 bis 314 im Jahr 2001 (1.11. bis 11.11.2001). Die Werte bei 0 und 360 Grad sind in der Darstellung verzerrt dargestellt



**Bild 4:** Vergleich von DWD-Prognosewindfeld (links) mit MCF-Simulation (rechts) (max. Windgeschwindigkeit in beiden Bildern ca. 3 m/s, Koordinaten im Gauß-Krüger-System)

trachtung der Windverteilung im Rahmen der Messkampagnen erkennen. Hier wurden an insgesamt 8 Messstellen auf dem See über einen Zeitraum von bis zu 6 Wochen neben Messdaten auf dem See auch die Messdaten an Land aufgezeichnet. Für diese Messungen wurden Windfelder berechnet und deren Statistik mit den in diesem Zeitraum gemessenen Daten auf dem See verglichen. Das **Bild 2** zeigt den Vergleich für eine Station, die im Bereich des Konstanzer Trichters lag. Das Bild zeigt die prozentuale Häufigkeit des Auftretens einer Windgeschwindigkeit aus einer bestimmten Windrichtung in der Darstellung einer Windrose sowohl für die an der Station gemessenen Winde als auch für die aus den Windfeldern für diese Station berechneten Winde.

Beide Verteilungen zeigen eine gute Übereinstimmung bezüglich der Ausprägung der Hauptwindrichtungen und der Windstärken. Der Unterschied, d. h. ein stärkerer Anteil der Westrichtung in der Messung lässt sich durch die verwendeten Messdaten erklären. Bei der Simulation wurden die an Land gemessenen Winddaten der Station Konstanz, die zwar als separater Datensatz vorlagen, jedoch nicht zum Datensatz der Messkampagne 2001 gehörten, nicht berücksichtigt, außerdem sind aufgrund von Datenausfällen die Messdaten der in diesem Bereich noch wichtigen Station Sipplingen nicht vollständig.

Betrachtet man den zeitlichen Verlauf der berechneten Winde an der Station vor Friedrichshafen über den Zeitraum vor dem Hauptwindereignis während der Messkampagne 2001 (**Bild 3**), so stimmen sowohl Windrichtung als auch Windgeschwindigkeit sehr gut mit den an der Station gemessenen Werten überein. Gut zu erkennen sind die große Variabilität der Windrichtung in der Schwachwindphase (Tage 307 bis 309) und die nahezu konstante Windrichtung während des Windereignisses (Tage 309 bis 313).

#### 4 Prognoserechnungen

In **Bild 4** ist ein vom DWD prognostiziertes Windfeld (7.9.2006 22:00) und seine Topografie zusammen mit dem zugehörigen, vom Windfeldmodell berechneten Windfeld dargestellt. Die Skala der Geländehöhen ist in beiden Bildteilen



Walter Scheuermann, Fritz Schmidt and Christoph Krass

### Modelling of the Windfield as Driving Force of the Internal Flow in Lake Constance

Wind is one of the main driving forces of the hydrodynamics in lakes. To simulate these hydrodynamics appropriately detailed information about wind speed and direction is a necessary boundary condition. This article describes the model used to calculate wind speed and direction in the scope of BodenseeOnline as well as the most important parameters like roughness of the surface and the topography of the area. In comparison with measured values simulation results are shown, which demonstrate the applicability of the model and the need for using a three dimensional model for calculating wind speed and direction.

gleich gewählt. Die Seeoberfläche ist im Windmodell einheitlich mit 395 m belegt, so dass sie in der Darstellung farblich hervortritt.

Besonders im Bereich des Bodanrücks und vor dem Schweizer Ufer zeigen sich hier Unterschiede im Windfeld, bedingt durch die detailliertere Topografie und die Berücksichtigung der Oberflächenrauheit auf dem See im MCF-Modell, was zu höheren Windgeschwindigkeiten über der Wasserfläche führt.

## 5 Zusammenfassung

Die Arbeiten zur Validierung des Modells haben gezeigt, dass sich mit dem MCF-Modell die Windverhältnisse auf dem See gut simulieren lassen.

Den Einsatz dieser Windfelder als Randbedingungen für die hydrodynamische Simulation zeigt ein Vergleich der errechneten Werte mit den während der Messkampagne gemessenen Temperaturprofilen im See [6]. Hier sieht man, dass durch die Verwendung detaillierter 3-D-Windfelder eine deutliche Verbesserung der Simulationsergebnisse der hydrodynamischen Berechnungen erzielt werden kann. Mit dieser Übereinstimmung werden zugleich die Gültigkeit des Modells im Rahmen der Simulation und die Notwendigkeit des Einsatzes zur Verbesserung der hydrologischen Berechnungen bestätigt.

### Danksagung

Die Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 02WT0551 gefördert. Das Land Baden Württemberg hat uns im Rahmen des Projektes KEWA bei der Beschaffung des Modells MCF unterstützt.

### Autoren

**Dr. Walter Scheuermann**

**Prof. Dr. Fritz Schmidt**

**Dipl.- Phys. Christoph Krass**


Institut für Kernenergetik und Energiesysteme  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart  
scheuermann@ike.uni-stuttgart.de  
fritz.schmidt@ike.uni-stuttgart.de  
krass@ike.uni-stuttgart.de

### Literatur

- [1] Martens, R.: Description of the Atmospheric Flow Model MCF (Mass Consistent Flow). Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit mbH, Köln, 1997.
- [2] Schulz, J. et al.: Kurze Beschreibung des Lokal-Modells LME und seiner Datenbanken. Deutscher Wetterdienst, 2005.
- [3] Mehlhorn, H. et al.: Naturschutz und Ressource Bodensee, eine wasserwirtschaftliche Herausforderung, In: Wasserwirtschaft 98 (2008), Heft 10, S. 12-15.
- [4] Appt, J.: Analysis of Basin-Scale Internal Waves in Upper Lake Constance. In: Mitteilungsheft des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart (2003), Heft 123.
- [5] Mödinger, S.: CWR/IWS Lake Constance Measurement program 2003 – Die Bodenseemesskampagne 2003. Wissenschaftlicher Bericht Nr. 01/2004 (LH2 01), Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 2004.
- [6] Eder, M.; Kobus, H.; Helmig, R.: Dreidimensionale Modellierung der Hydrodynamik im Bodensee. In: Wasserwirtschaft 98 (2008), Heft 10, S. 16-21.

Anzeige


Wasser.  
Energie von Anfang an.



Die Schluchseewerk AG nutzt die natürliche Kraft des Wassers zur umweltfreundlichen Stromerzeugung, um Ihr Leben leichter, angenehmer und sicherer zu machen. Mit umweltfreundlichem Strom für Licht, Wärme und Produktivität.

Für weitere Informationen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung!

Schluchseewerk AG  
Säckinger Straße 67, 79725 Laufenburg (Baden)  
Tel. +49 77 63 92 78 - 0, Fax. +49 77 63 92 78 - 7 02 99  
info@schluchseewerk.de · www.schluchseewerk.de



Schluchseewerk AG