



# Internationaler Workshop 2005 „Fahrsimulatoren in der Binnenschifffahrt“

## Spezielle Aspekte bei der Modellierung und Simulation von Schiffsbewegungen auf Binnenwasserstraßen

**PD Dr.-Ing. T. Jiang**  
**Dr.-Ing. A. Gronarz**

**Entwicklungszentrum für Schiffstechnik  
und Transportsysteme e.V. Duisburg**



## Gliederung des Vortrags

- **Problemstellung**
- **Einführung in die mathematische Modellierung**
- **Erörterung der Identifikationsmöglichkeiten**
- **Besondere Aspekte für die Schiffssimulation auf Binnenwasserstraßen**
- **Stand der Technik zur Behandlung einiger Sonderfälle für die Fahrt auf Binnenwasserstraßen**
- **Zukunftsprospektiven und Herausforderungen**



# Anwendung der Simulatortechnik und Besonderheit der Flachwassersimulation

**Die Simulatortechnik ist zunehmend eingesetzt:**

- **Aus- und Weiterbildung von Schiffsführern und Hafenlotsen**
- **Entwicklung von Schiffen sowie Steuer- und Manövrierorganen**
- **Planung und Projektierung hafen- und wasserbaulicher Maßnahmen**
- **Analyse von Schiffsunfällen**

**Besondere Aspekte auf Binnenwasserstraßen:**

- **Extrem nah zu Hindernissen (Bank, Brückenpfeiler)**
- **Veränderliche Bodentopographie (Fahrrinne, Buhnen)**
- **Vorherrschende Strömung (Vertikale Profile, inhomogen)**
- **Begegnen und Überholen mit extrem geringem Abstand**



# Mathematische Modellierung der horizontalen Bewegungen

## Polynomansatz

(basierend auf Taylorentwicklung um den Betriebspunkt  $u=u_0$ ; vertreten durch Abkowitz-Modell)

$$X, Y, N = f(u, v, r, d)$$

mit

X = Längskraft  
Y = Seitenkraft  
N = Drehmoment

$u_0$  = Dienstgeschwindigkeit  
u = Längsgeschwindigkeit  
v = Quergeschwindigkeit  
r = Drehgeschwindigkeit  
d = Kontrollgröße (Ruderwinkel)

**Vorteil:** Einheitliche und konzeptuell einfache Formulierung

**Nachteil:**

- große Anzahl der Koeffizienten für komplexe Situationen
- starke Abhängigkeit der Koeffizienten bei wechselseitigen Einflüssen
- Annahme der geschwindigkeitsunabhängigen Koeffizienten



# Modulare mathematische Modellierung (weiter verbreitet)

Modulare Darstellung der drei wesentlichen Komponenten von Schiffen

Gesamt		Schiffsrumpf		Propeller		Ruder
$X$	=	$X_H$	+	$X_P$	+	$X_R$
$Y$	=	$Y_H$	+	$(Y_P)$	+	$Y_R$
$N$	=	$N_H$	+	$(N_P)$	+	$N_R$

**Rumpfeinfluss:** weitergehend Polynomansatz, d.h. Taylorentwicklung um die Dienstgeschwindigkeit  $u_0$

**Propeller:** Propellercharakteristiken als Funktion der Drehzahl und des Schubbelastungsgrades

**Ruder:** lokale Anströmgeschwindigkeit

**Vorteil:** relativ leicht identifizierbar und teilweise physikalisch interpretierbar

**Nachteil:** - zu viele Koeffizienten für komplexe Situationen

- geringe Abhängigkeit der Koeffizienten bei wechselseitigen Einflüssen

- Annahme der geschwindigkeitsunabhängigen Koeffizienten



# Physikalisch motivierte Modellierung

## 4-Quadranten-Modell

(Vertreten durch Oltmann & Sharma)

$$\begin{aligned} X &= X_I + X_{HL} - R_T + X_P + X_R \\ Y &= Y_I + Y_{HL} + Y_{HC} + Y_P + Y_R \\ N &= N_I + N_{HL} + N_{HC} + N_P + N_R \end{aligned}$$

### Ähnlich wie bei der modularen Darstellung

- Physikalische Unterteilung der Rumpfkkräfte in Trägheitseffekt (ideale Strömung), Tragflügeleffekt (Lift) und Widerstand/Cross-Flow
- Einbeziehung der Wechselwirkung zwischen Rumpf, Propeller und Ruder

**Besonderheit: gültig für alle 4 Quadranten ( $\pm u$ ,  $\pm n$ )**

**Vorteil:** - physikalisch interpretierbar und übersichtliche Formulierung  
- besonders geeignet für slow-speed advance-reverse Simulationen

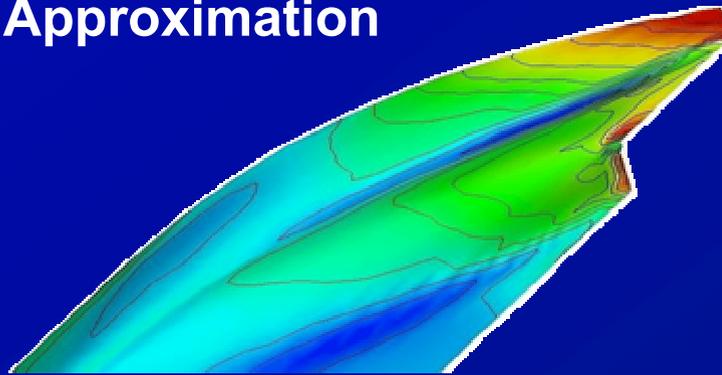
**Nachteil:** - schwer identifizierbar  
- Annahme der geschwindigkeitsunabhängigen Koeffizienten



# Identifikation aus Kraftmessungen

Direkte Identifikation: Bottom → up

- Modellversuch
- CFD-Berechnung
- Empirische Approximation



- Auswahl des mathematischen Modells

$$\text{z.B. } Y = \dot{Y}_v \cdot \dot{v} + Y_v \cdot v + Y_{vv} \cdot v^3 \dots$$

- Validierung anhand Standardmanöver (Drehkreis, Z-Manöver)
- Simulation (zeitliche Integration der Bewegungsgleichungen)





# Identifikation aus Bewegungsmessungen

Indirekte Identifikation: Top → down

## A) Systemidentifikation

Bewegungsmessungen



Auswahl des mathematischen Modells

Bestimmung der Koeffizienten zu den Bahnmessungen durch Kalman-Filter, Neurales Netz, Artificial Intelligence usw.

Validierung

durch gesicherte Messungen

Simulation



## B) Parameter-Anpassung (Online Tuning)

• Bahnmessungen

• Schätzen der Starwerte der Koeffizienten

• Test-Simulationen  
- genauere Messfahrt  
- Expert-Wissen

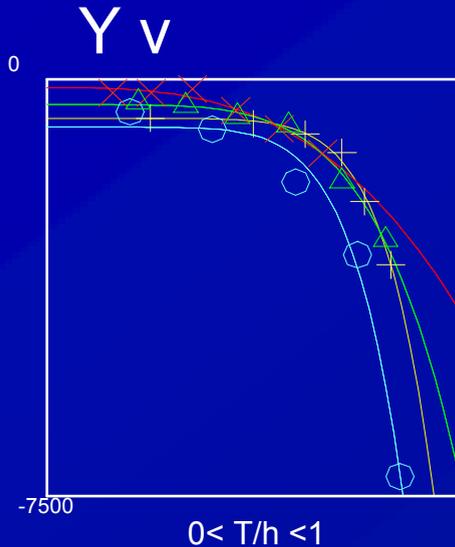


• Anpassung von Koeffizienten

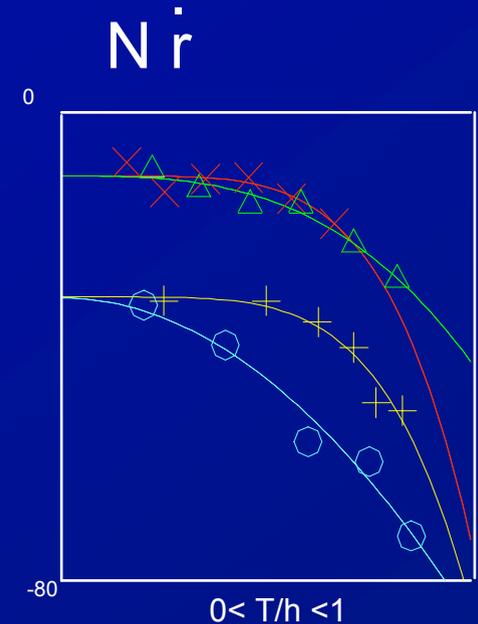
• Demonstration am Simulator



# Einfluss der Wassertiefe (Ebener Boden)



- + Containerschiff
- Gütermotorschiff
- × Kleiner Schubverband
- △ Großer Schubverband



**Veränderung der hydrodynamischen Koeffizienten  
als Funktion der Wassertiefe für 4 Beispielbinnenschiffe**

$T/h = 0 \rightarrow$  unendliche Wassertiefe

$T/h = 1 \rightarrow$  Wassertiefe gleich Tiefgang

**Lösung:**  
**Polynomansatz für  
die Koeffizienten**

$$c = \underbrace{c_0}_{\text{Tiefwasser}} + \underbrace{c_n \cdot (T/h)^n}_{\text{Flachwasserkorrektur (Polynomansatz)}}$$



# Identifikation mittels empirischen Formeln und Datenbank

gängige Praxis von Simulatorherstellern und -betreibern

## A) Empirische Approximation

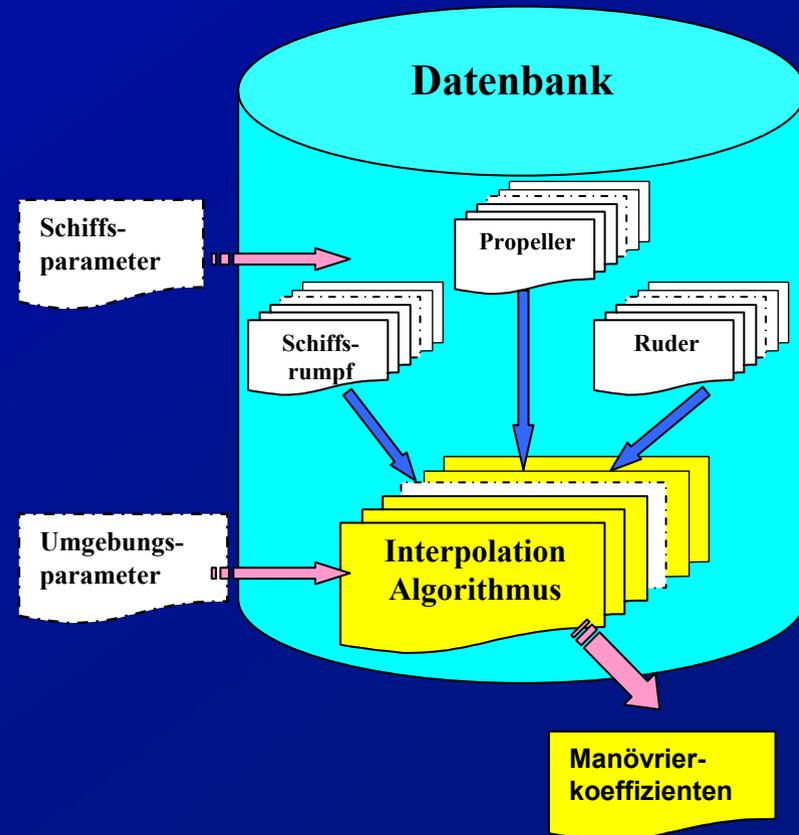
Koeffizienten als Funktion der Hauptabmessungen (nach ITTC)

$$Y'_{\text{voo}} = -\left(\frac{T}{L} + 1.4C_B \frac{B}{L}\right) \frac{T}{L}$$

Empirische Formeln zur Approximation von Flachwassereffekten (nach ITTC)

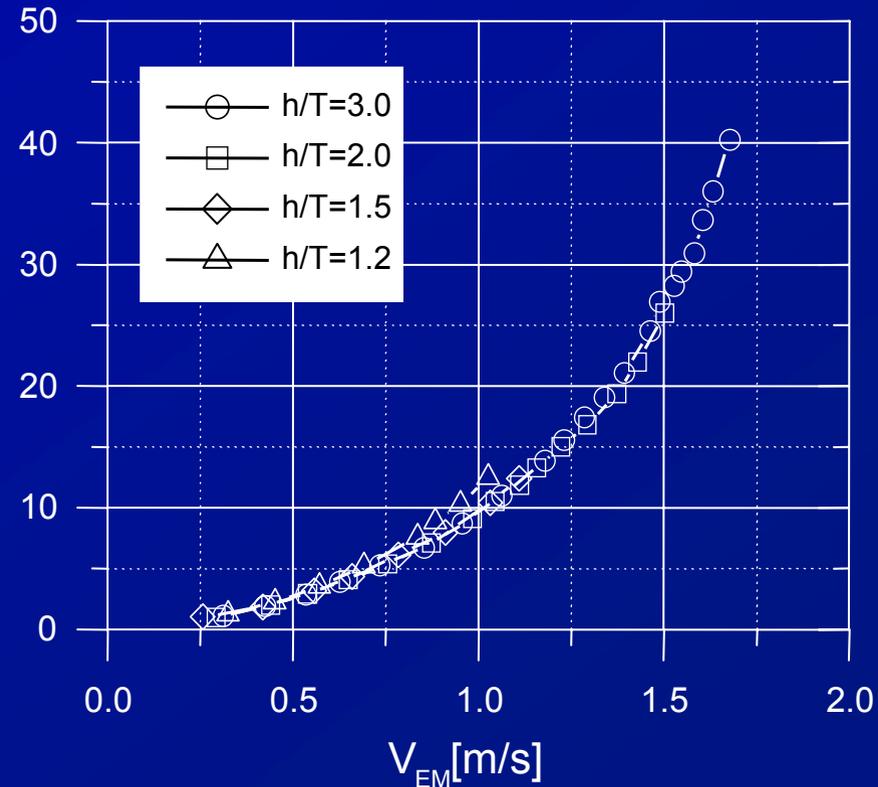
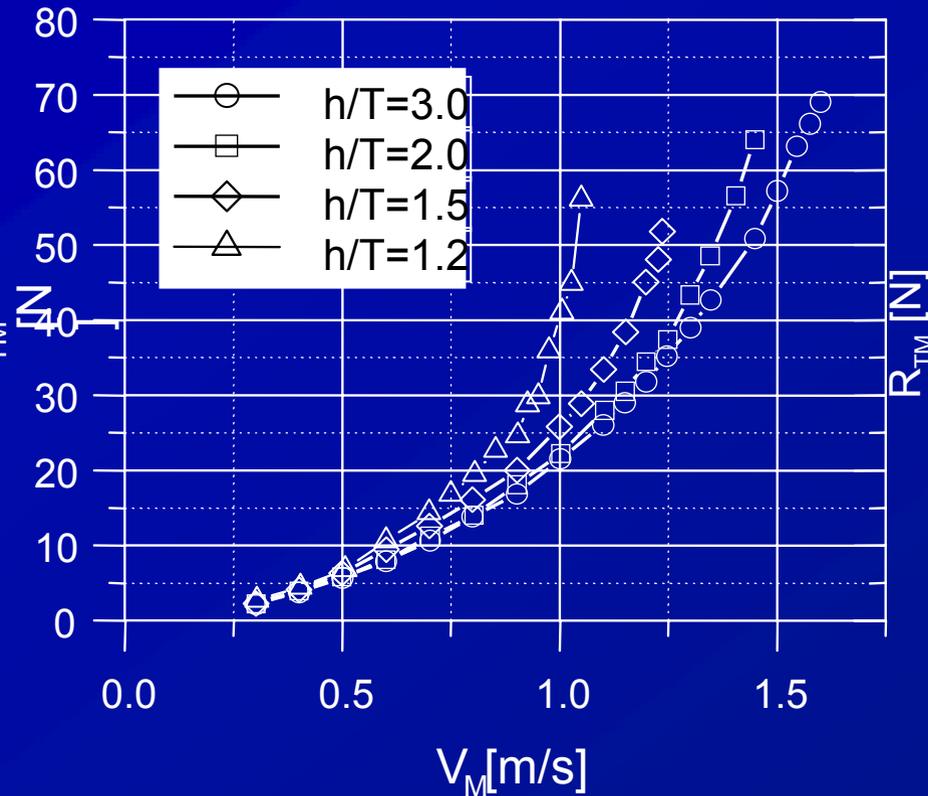
$$\frac{Y'_v}{Y'_{\text{voo}}} = K_0 + K_1 \frac{B}{T} + K_2 \left(\frac{B}{T}\right)^2$$
$$K_0 = 1 + \frac{0.0775}{F^2} - \frac{0.0110}{F^3} + \frac{0.000068}{F^5}$$
$$K_1 = -\frac{0.0643}{F} + \frac{0.0724}{F^2} - \frac{0.0113}{F^3} + \frac{0.0000765}{F^5}$$
$$K_2 = \frac{0.0342}{F}; \text{ for } \frac{B}{T} > 4: K_2 = \frac{0.137 T}{F B}$$
$$F = \frac{h}{T} - 1$$

## B) Datenbank





# Rationale Analyse der Abhängigkeit der Koeffizienten von der Wassertiefe

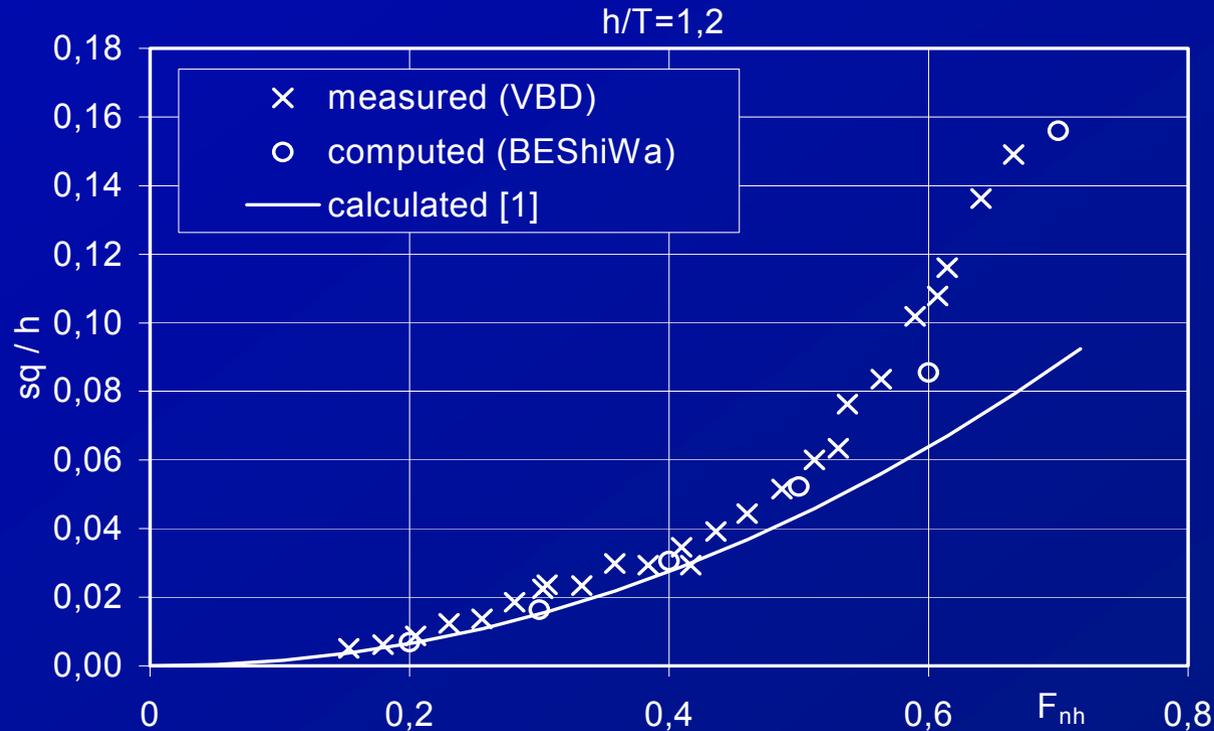


Widerstand als Funktion der Geschwindigkeit über Grund (stark abhängig von der Wassertiefe)

Widerstand als Funktion einer mittleren Geschwindigkeit (unabhängig von der Wassertiefe)



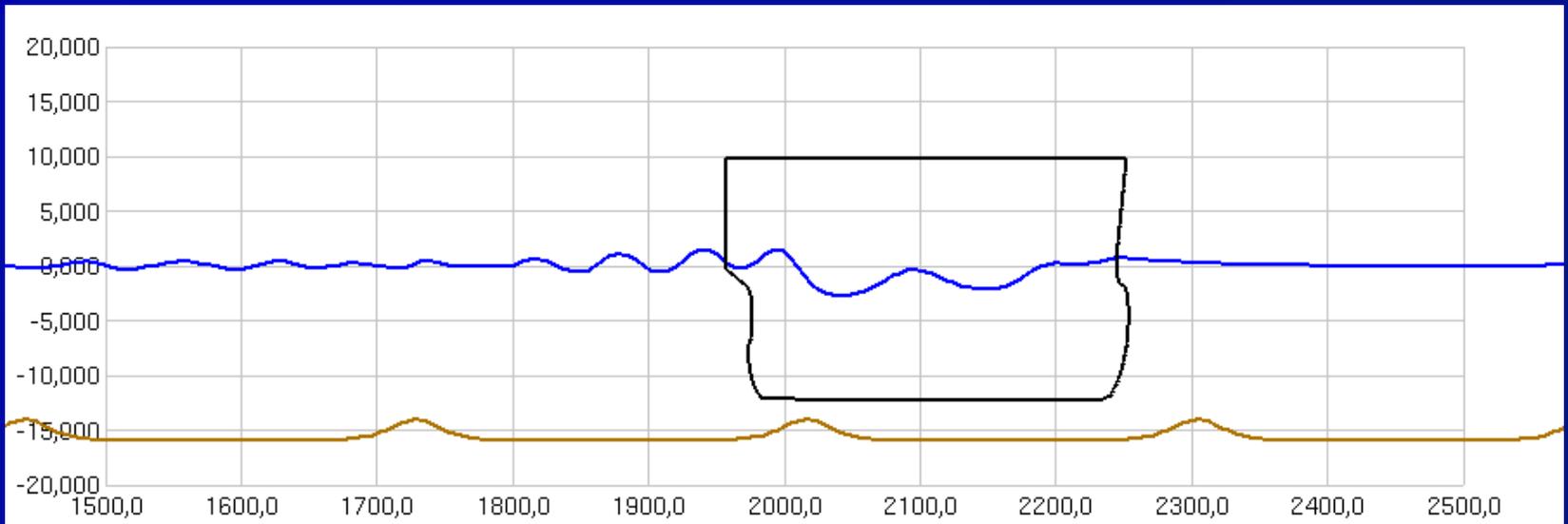
# Zentrales Problem im Flachwasser: geschwindigkeitsabhängige Koeffizienten in Folge „Squat“



- Signifikante Veränderung des lokalen Wasserspiegels
- Merkliche Veränderung der benetzten Oberfläche



# Fahrt über einen sich periodisch ändernden Boden



**Abstand zwischen Bodenhindernissen gleich der Schiffslänge**

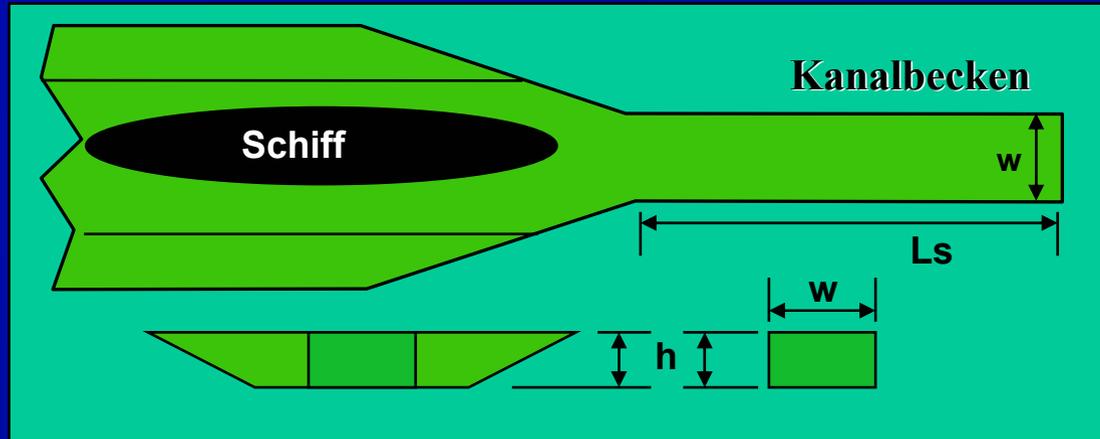


# Simulation der Sonderfahrten

## Beispiel: Fahrt durch die Schleuse



# Schiffsdynamik an der Schleuse



Schleusenabmessungen:  $L_s = 200$  m,  $w = 12$  m,  $h = 3$  m

Schiffsabmessungen:  $L = 110$  m,  $B = 11.45$  m,  $T = 2.5$  m



Einfahrt in die Schleuse



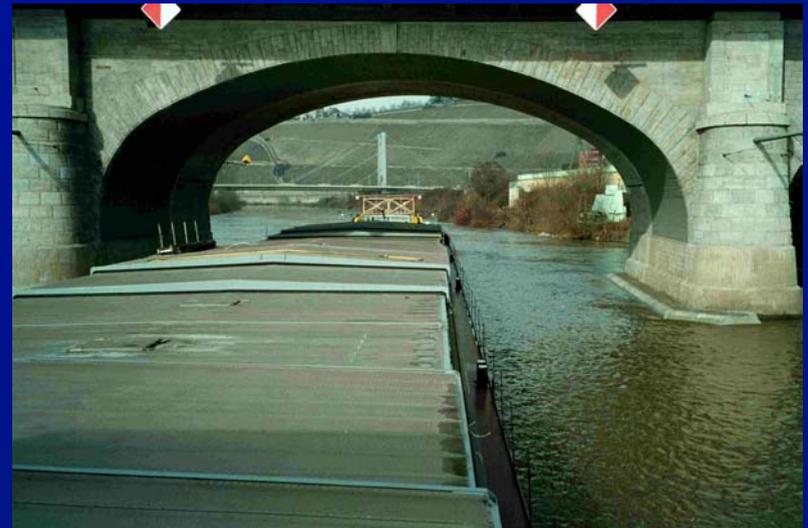
# Fahrt an festen Hindernissen

## Buhnenfeld am Rhein

(Quelle WSA Köln)

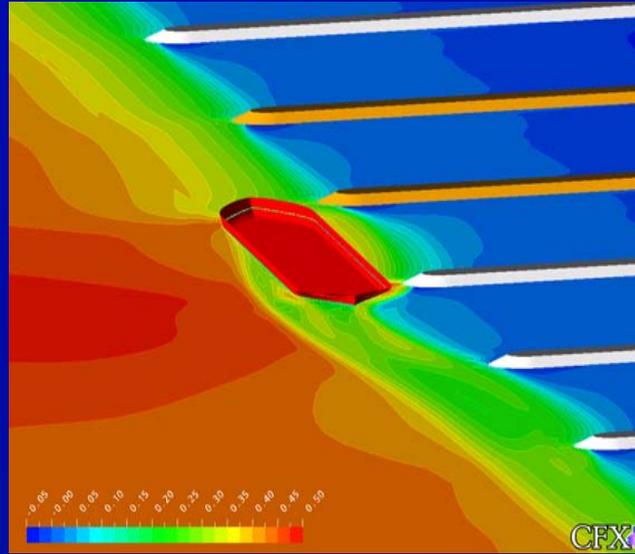


## Brückenpfeiler





# Simulation der Vorbeifahrt am Bühnenfeld



Simulation : Echtzeit (interaktiv)

Pause Weiter Fertig

Zusatzorgan 1

Propeller-Drehzahl 5

Ruderwinkel 60 -60

Dr.Geschw. Kurs Ruder

Autopilot Drehgeschw. Autopilot Kurswinkel Autopilot AUS

Sensitivität Autopilot Dr.Geschw. 200%

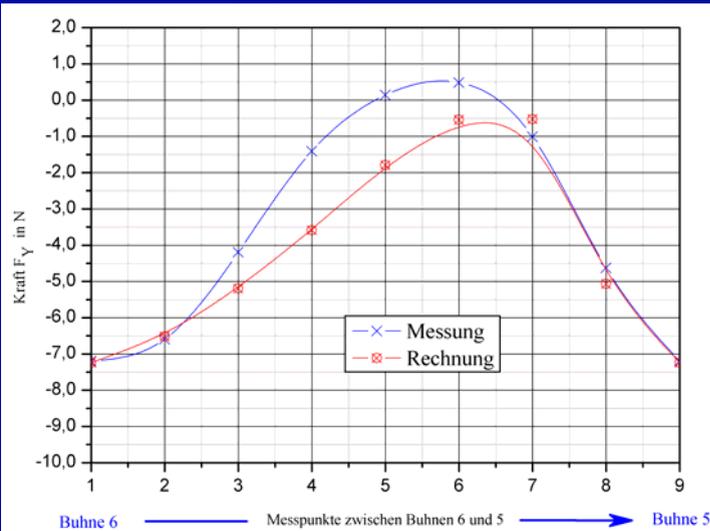
Ruderlage [°]	32.0
Drehzahl	0
Zusatzorgan	0.00
Zeit [s]	246.0
Kurs [°]	3.6
Geschw. [km/h]	8.841
Drehge. [1/s]	-0.187
Driftwinkel [°]	-1.825
X-Koord. [m]	610.225
Y-Koord. [m]	-13.988

- Ausgabefile -

Shift vertikal

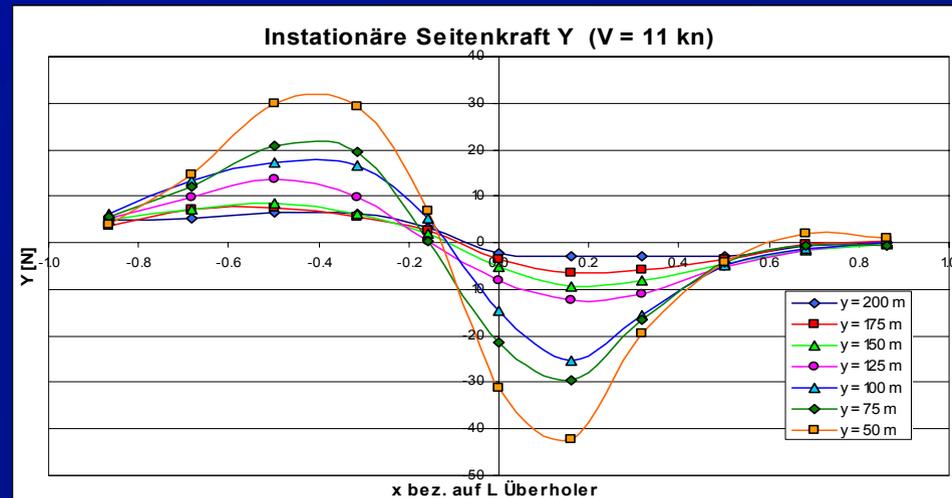
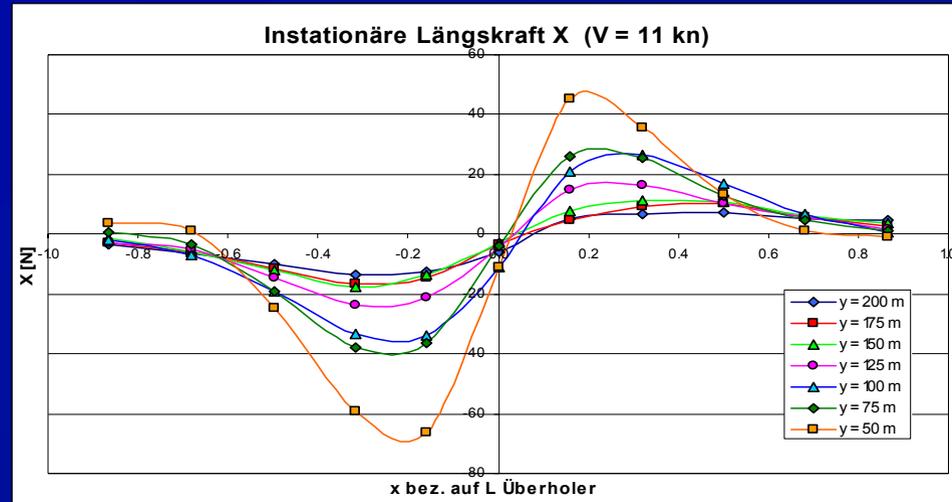
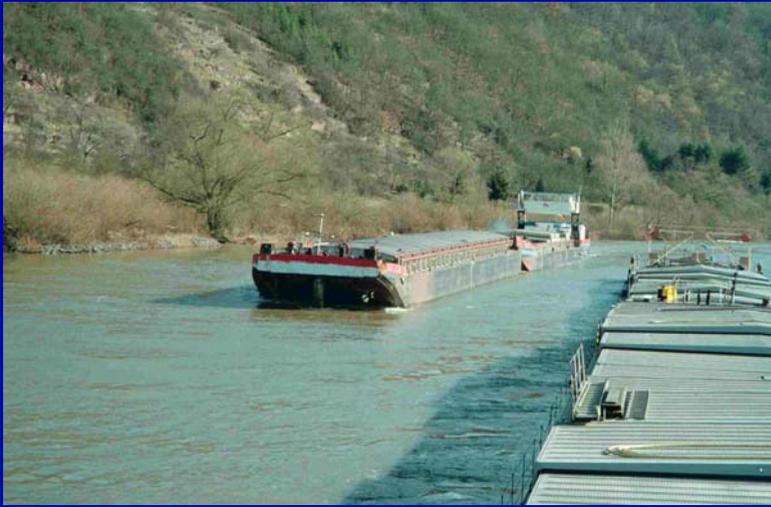
Echtzeit  
 Doppeltes Tempo  
 5 - faches Tempo  
 10 - faches Tempo  
 20 - faches Tempo  
 50 - faches Tempo  
 100-faches Tempo  
 200-faches Tempo

Shift horizontal





# Simulation der Begegnungs- und Überholfahrt



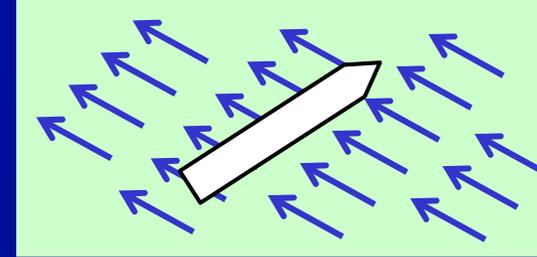
Parallelbetrieb von zwei Schleppwagen



# Simulation der Fahrt in fließenden Gewässern

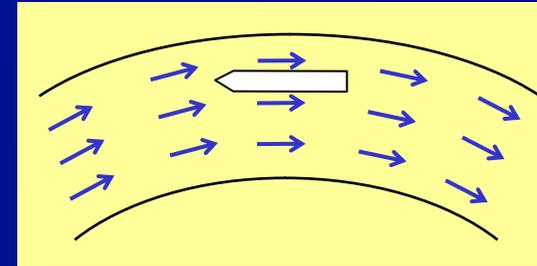
- **Geschwindigkeitsprofil über Wassertiefe  
auch bei homogener Strömung**

→ Superposition nicht möglich



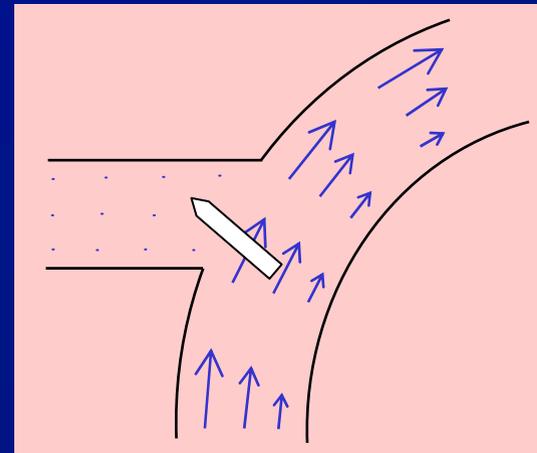
- **Strömung im Fluss**

→ Zusätzliche Wirkung der Krümmung



- **Strömung im Fluß bei Hafeneinfahrten**

→ Inhomogene Strömung





# Wesentliche Komponenten eines Simulators

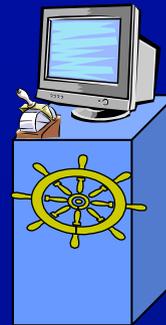
- **Computer**

Berechnung der Schiffsbewegungen



- **Brückenhaus**

Einbindung der Steuer- und Manövrierorganen sowie Radarsichtgeräte



- **Rundum-Projizierung**

Realisierung der Fahrumgebung



$$X, Y, N = f(u, v, r, d)$$

**Das Herzstück (Kernel) eines Simulators ist das zugrunde liegende mathematische Modell!**

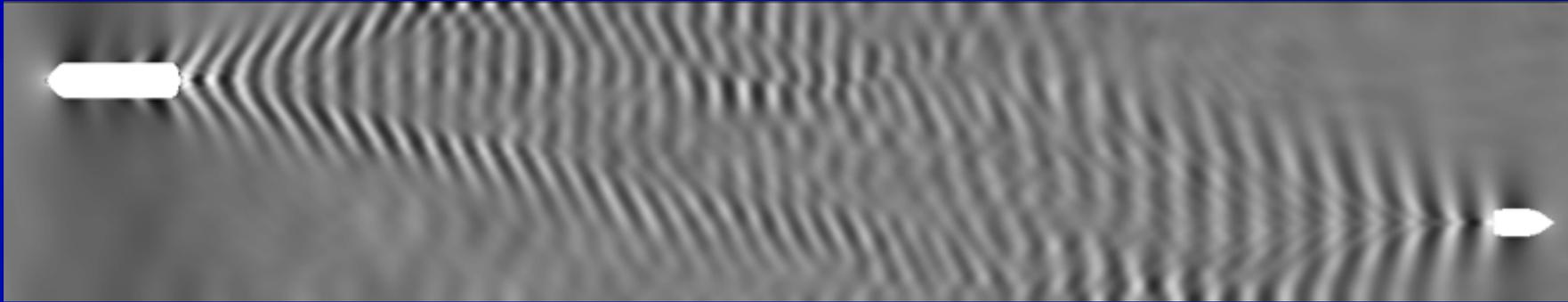


# Weiterentwicklungen und Herausforderungen für die Simulation der Schiffsbewegungen auf Binnenwasserstraßen

- Geeignete mathematische Modellierung
  - Hydrodynamische Wirkungen von Rumpf, Propeller und Ruder (ähnlich wie bei Seeschiffen)
  - Wechselwirkung zwischen beteiligten Wasserfahrzeugen
  - Interaktion zwischen Schiff und Wasserstraße
  - Identifizierbarkeit der Koeffizienten
  - **Herausforderung: Geschwindigkeitsabhängigkeit!**
- Geeignete Methoden zur Parameteridentifikation
  - aus Modellmessungen
  - aus CFD-Berechnungen
  - aus empirischen Approximationen
  - **Herausforderung: aus Großausführungsmessungen!**
- Echtzeit-Simulationen
  - Koeffizienten-Modelle
  - **Herausforderung: Direkte CFD-Simulationen!**



# Simulation der Wellenbildung bei der Begegnung eines Passierschiffes mit einem Großmotorschiff auf einer Binnenwasserstraße



**Thanks for your attention!**