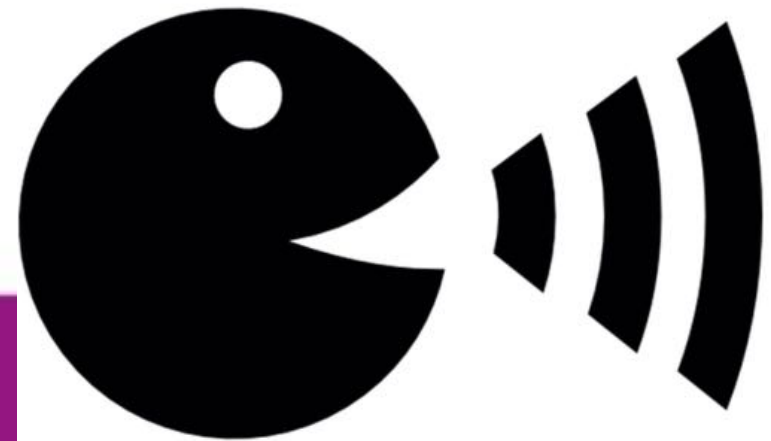


Fluss-Strom Forschung im Labor: Simulationen und Versuchsrinne

Prof. Dr.-Ing. Dominique Thévenin

Olivier Cleynen, M. Eng.
Stefan Hoerner, M. Sc.
Emeel Kerikous, M. Sc.



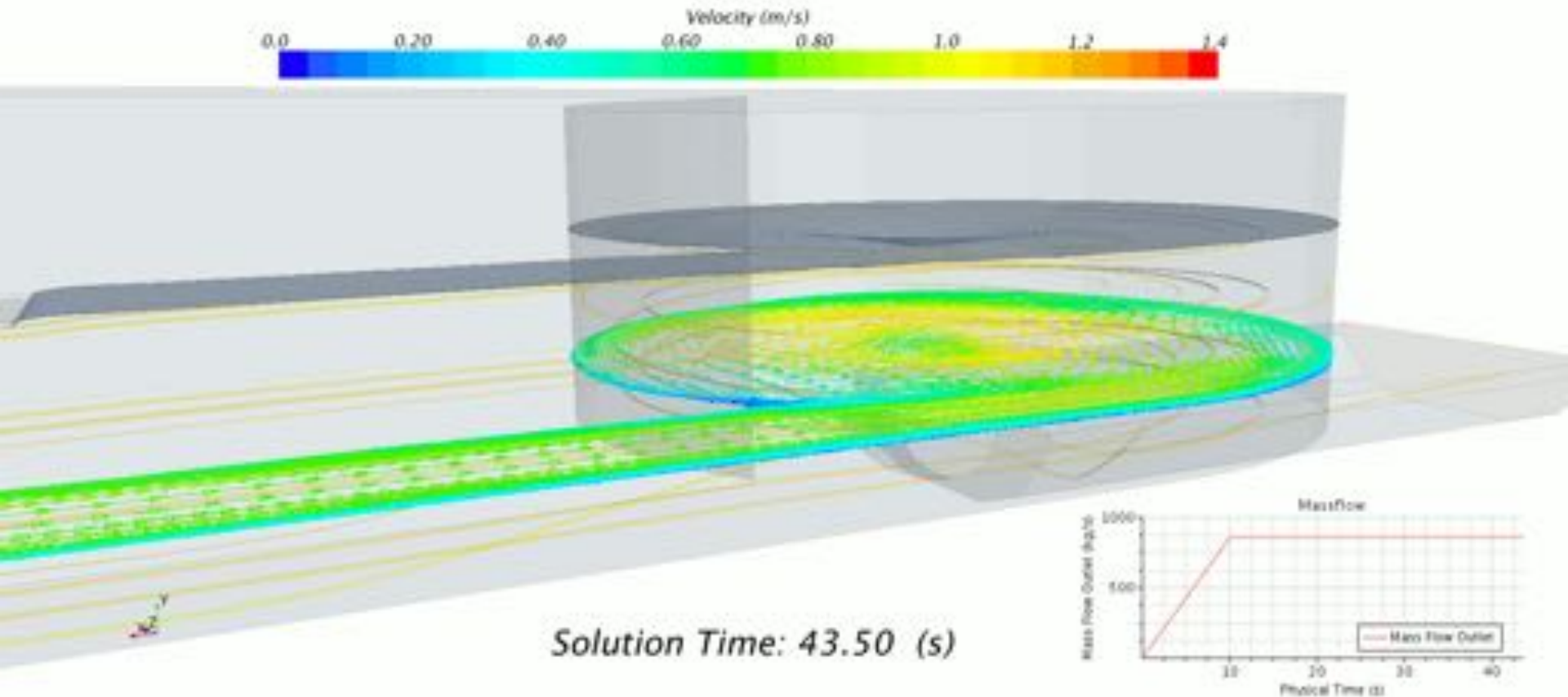
Numerische Simulationen (CFD – *Computational Fluid Dynamics*)

Der Traum aller Strömungsmechaniker seit Jahrhunderten?

- > hydrodynamische Lösungen finden,
- > aber mit trockenen Füßen!
- Informationen bekommen, die nicht messbar sind;
- Einfluss aller Parameter quantifizieren und vergleichen können.

Basis: **Erhaltungssätze von Masse, Impuls, Energie**

Beispiel: Fischfreundliches Wehr

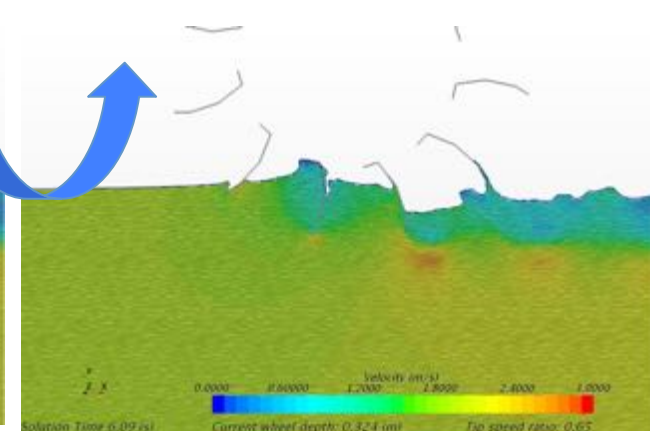
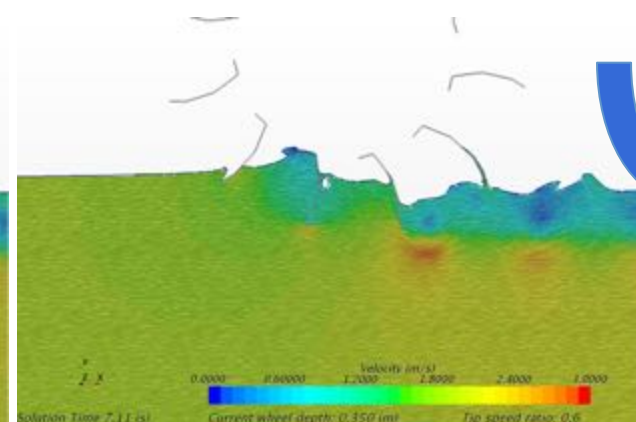
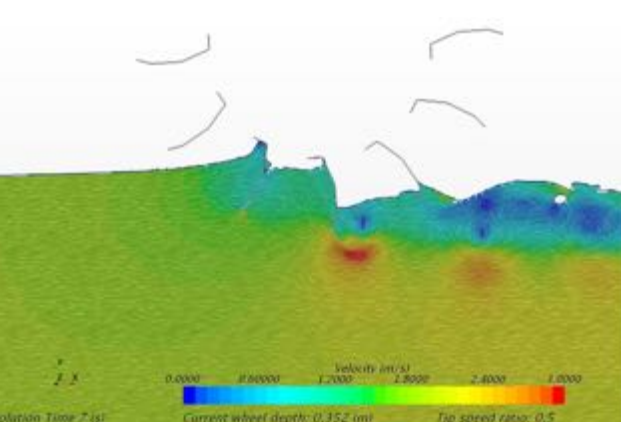
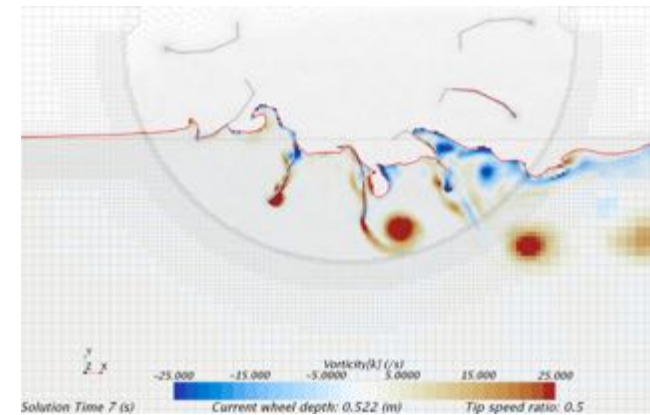
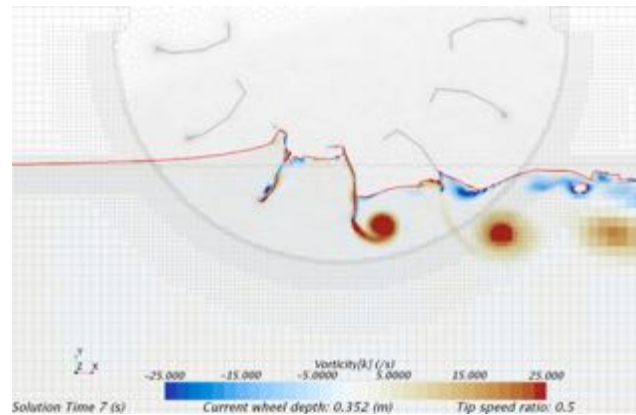
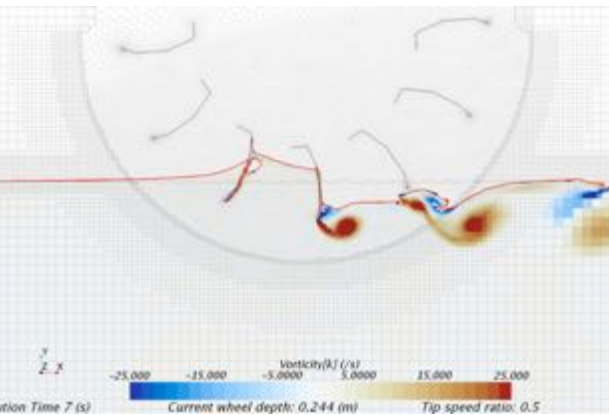


Beispiel: Wasserrad



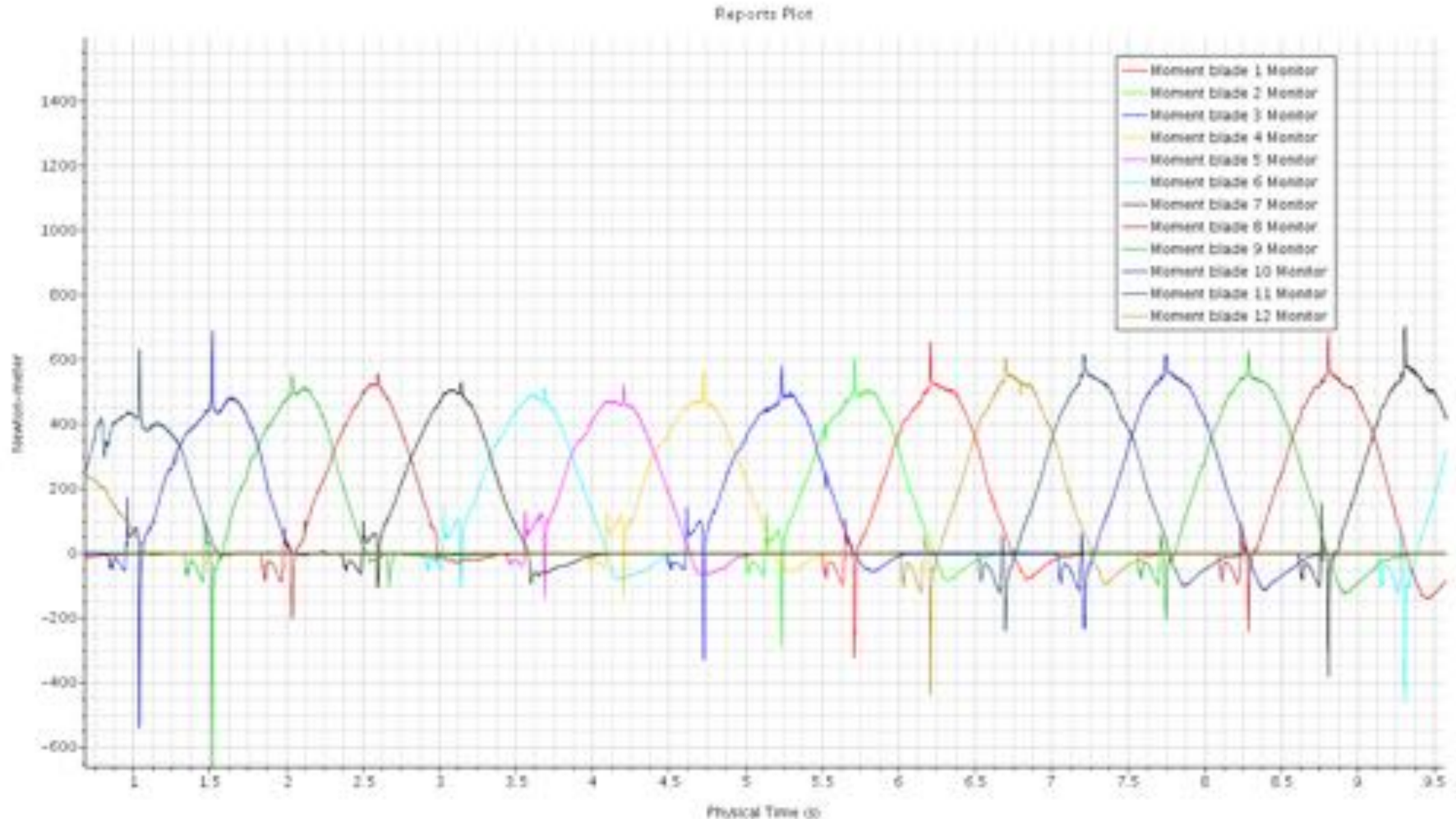
CFD-basierte Parametervariation: ein Beispiel

Variation der Eindringtiefe

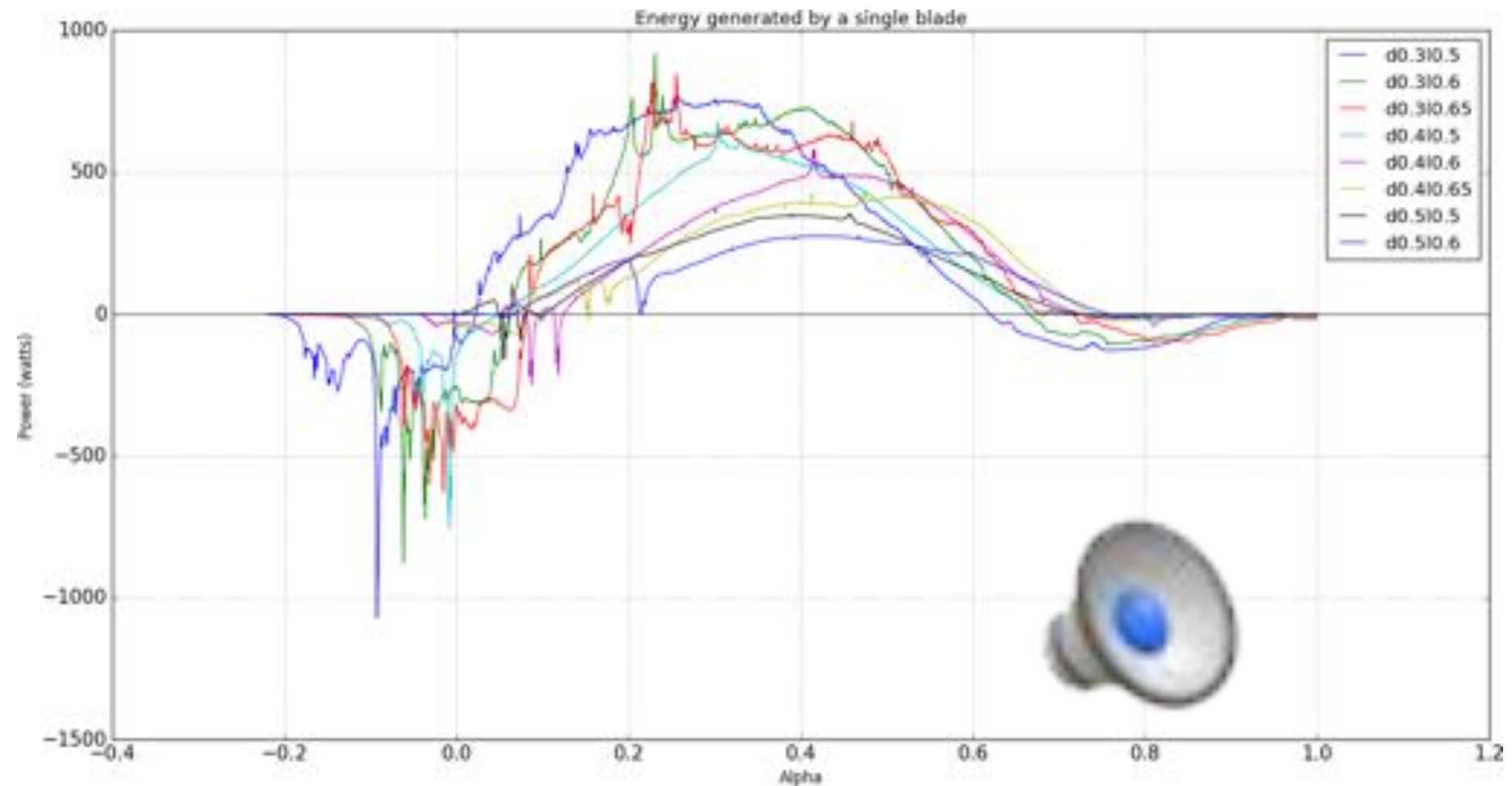


Variation der Rotationsgeschwindigkeit

Aus der CFD: Drehmoment für jede einzelne Schaufel eines Wasserrads



Aus der CFD: Leistung einer einzigen Schaufel für 8 unterschiedliche Prozessbedingungen



Dann, warum Experimente überhaupt?

- Exakte numerische Simulationen (Direkte Numerische Simulation: DNS) sind *extrem* zeitaufwändig
- Praktisch mögliche Simulationen sind „nur noch“ langsam: wir benutzen hierfür vereinfachte *Turbulenzmodelle*

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u}$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + (\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \bar{\mathbf{u}} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \nabla \bar{p} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \bar{\mathbf{u}} + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}_{ij\text{turb}})$$


- Deshalb muss jede Simulation einmal durch ein Experiment **validiert** werden

Warum eine Wasserrinne? Die Elbe fließt vor der Tür!

- Vollskalige Experimente sind teuer
- Manchmal können solche Messungen gar nicht erfolgen:
 - Kein optischer Zugang
 - Prototyp existiert noch nicht...

River Rider Photo CC-BY-SA Marion Halft



Prandtl, 1906



Eine bewährte Lösung:
Modellexperimente im kleinem
Maßstab

Wann sind zwei Strömungen „identisch“?

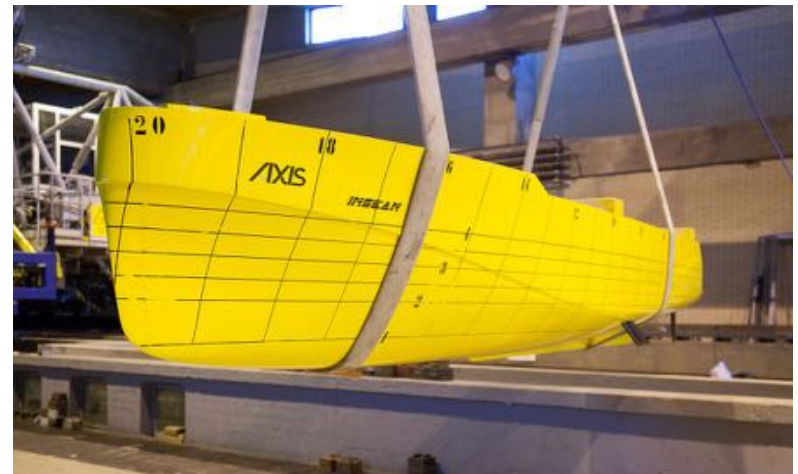
- Hierfür müssen alle dimensionslose Parameter gleich sein (**Ähnlichkeitstheorie**):

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p - \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u}$$

$$[\text{St}] \frac{\partial \mathbf{u}^*}{\partial t} + (\mathbf{u}^* \cdot \nabla^*) \mathbf{u}^* = \frac{1}{[\text{Fr}]^2} \mathbf{g}^* - [\text{Eu}] \nabla^* p^* - \frac{1}{[\text{Re}]} \nabla^{*2} \mathbf{u}^*$$

- In unserem Fall ist die **Froude-Zahl Fr** von besonderer Bedeutung

$$[\text{Fr}] \equiv \frac{V}{\sqrt{g L}}$$



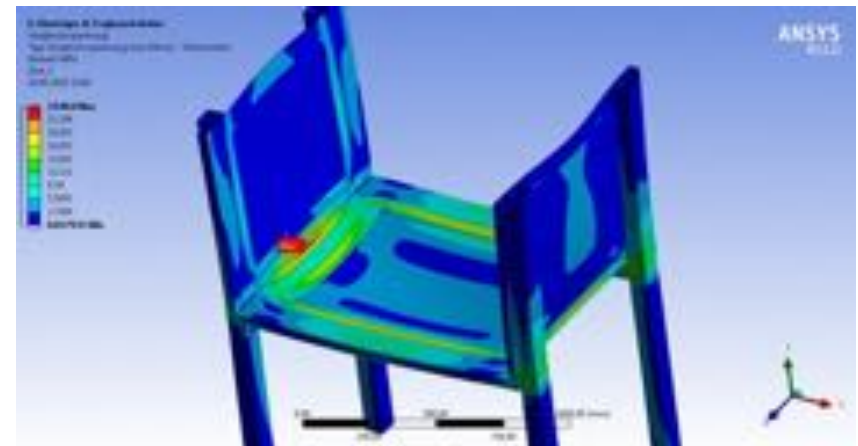
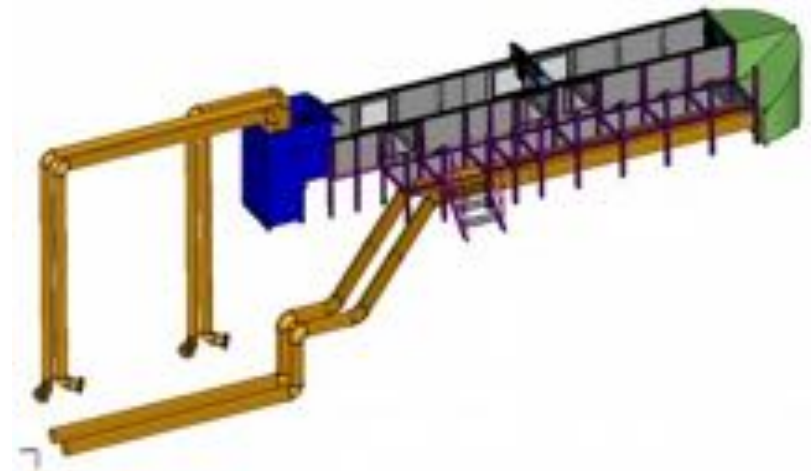
Dimensionierung unseres Wasserkanals

- Elbe am VECTOR-Standort
Magdeburg:
 Fr um 0,35
- Breite des Kanals: 1,2m
(Versperrungseffekte durch
Modell minimieren: <10%)
- Gleiche [Fr] mit max.
Geschwindigkeit
von 0,8 m/s:
 - Tiefe: 0,6 m
 - Volumenstrom 600 L/s
- Einlass und Auslass ohne Störung
der Strömung: jeweils 5m Länge



Planung und Bau des Wasserkanals

- Analyse der Strömung
- Analyse der Lasten
- Konzeption
- Festigkeitsberechnungen
- Erstellung des CAD-Modells



Planung und Bau des Wasserkanals

- Modularer Aufbau
- Segmente aus Edelstahl
- Verrohrung als 3D-Puzzle



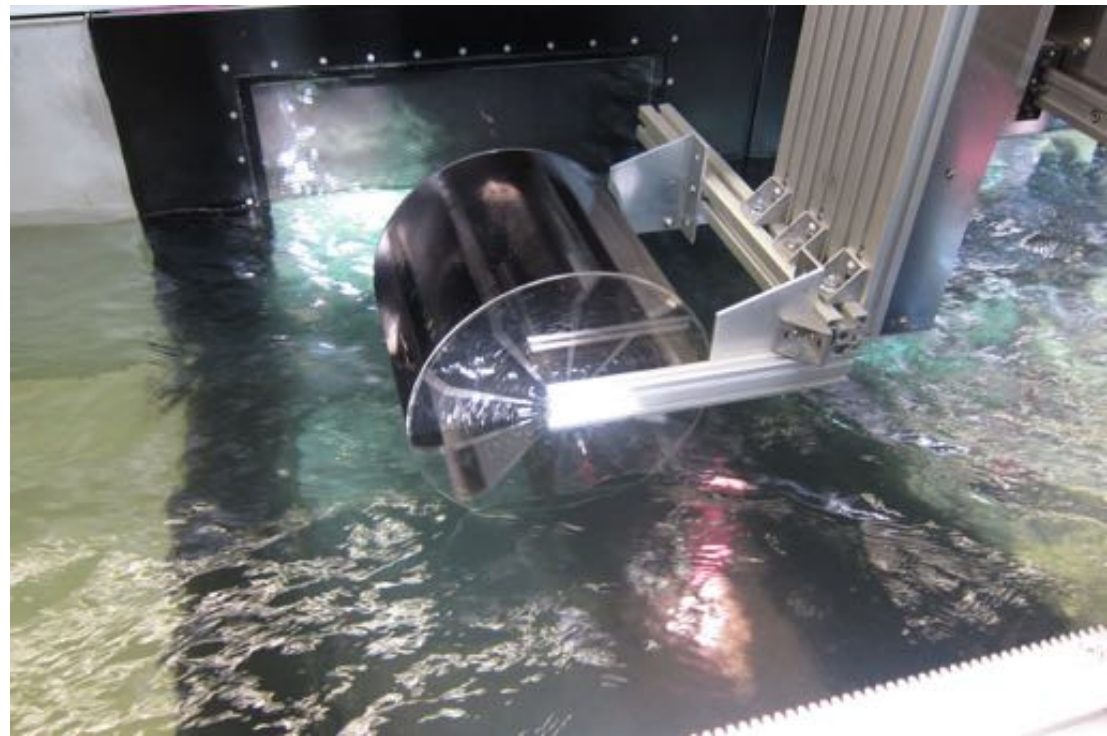
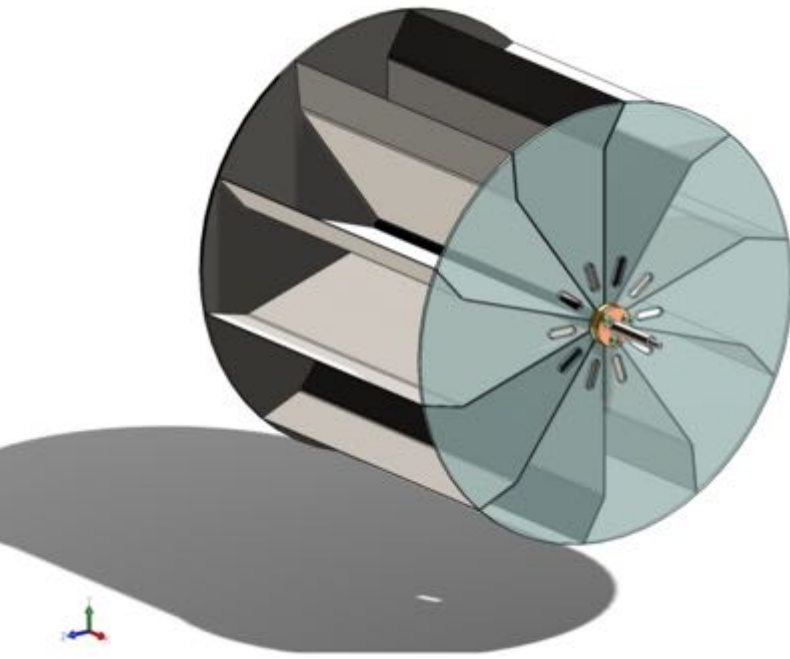
Planung und Bau des Wasserkanals

- Lamellenwehr zur Regelung des Massenstroms
- μ -Controller für Steuerung einer 3-Achsen-Messtraverse
- Viele Fenster für guten optischen Zugang

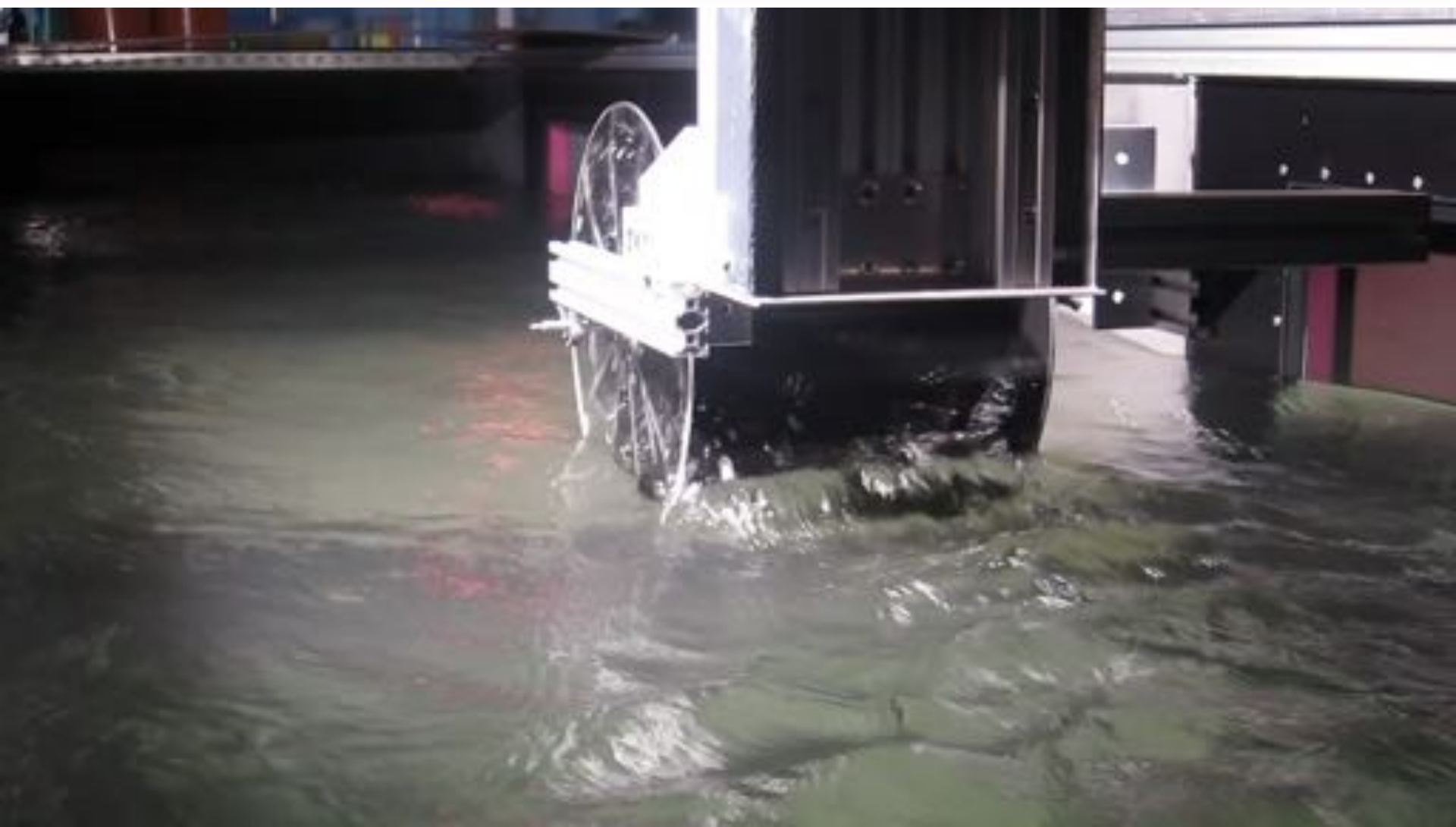


Wasserradmodell

Konzeption und Bau eines Wasserradmodells – Guter optischer Zugang, präzise Geometrie und akkurate Positionskontrolle

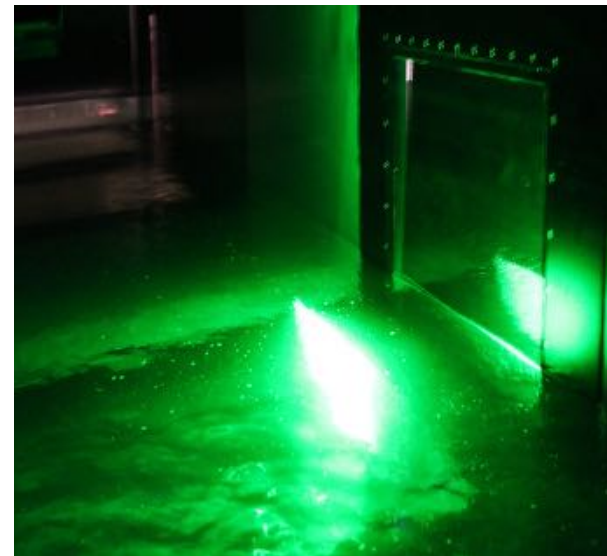






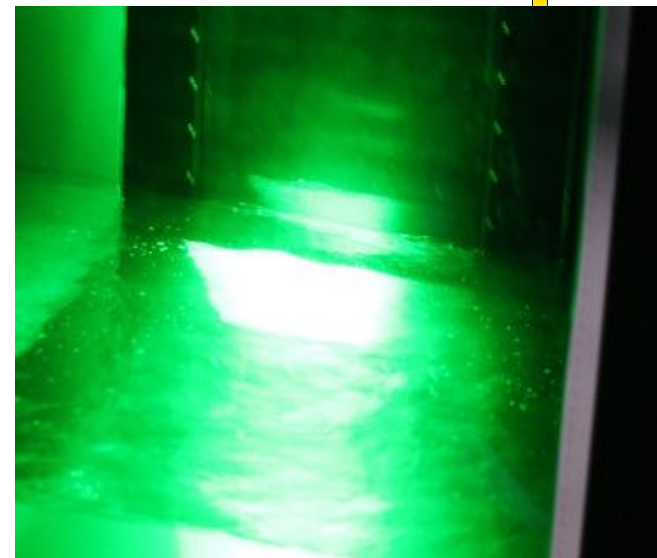
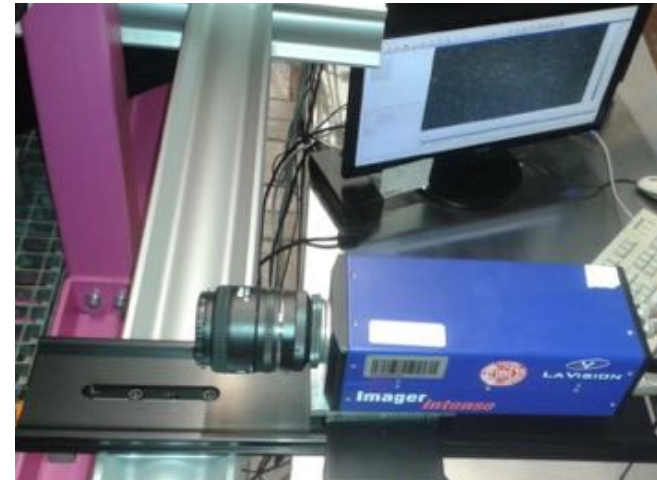
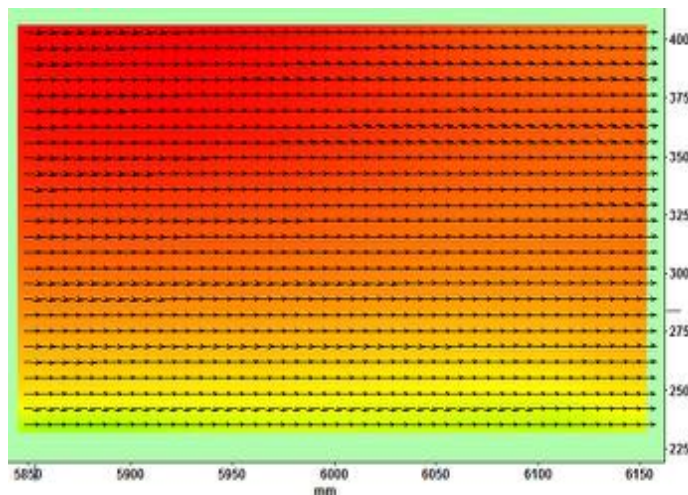
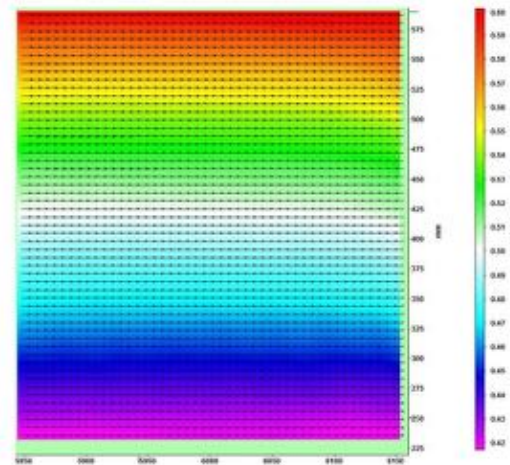
Messungen im Wasserkanal

- Laser-Doppler Anemometrie (LDA): hohe Genauigkeit, aber nur Einzelpunkte
- Particle Image Velocimetry (PIV): komplette 2D-Geschwindigkeitsfelder
- Drehmoment und Rotationsgeschwindigkeit am Modell



Charakterisierung der Strömung im Wasserkanal

PIV-gemessene
Geschwindigkeitsverteilungen
bei unterschiedlichen
Wasserhöhen und
Volumenströmen



Beispielmessungen: Darrieus-Turbine

Kooperation mit:

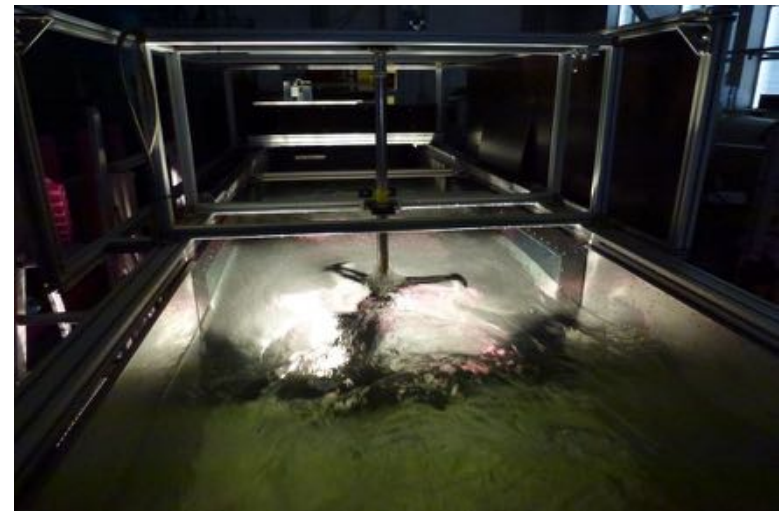
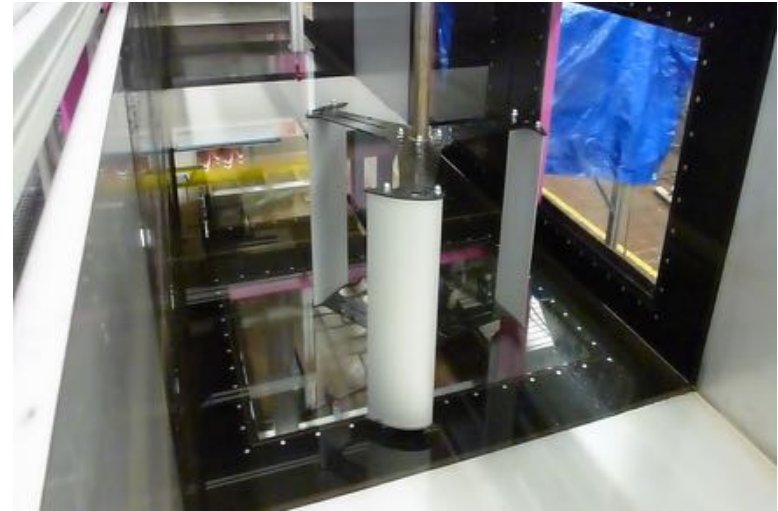
Prof. Weber, HS-MD

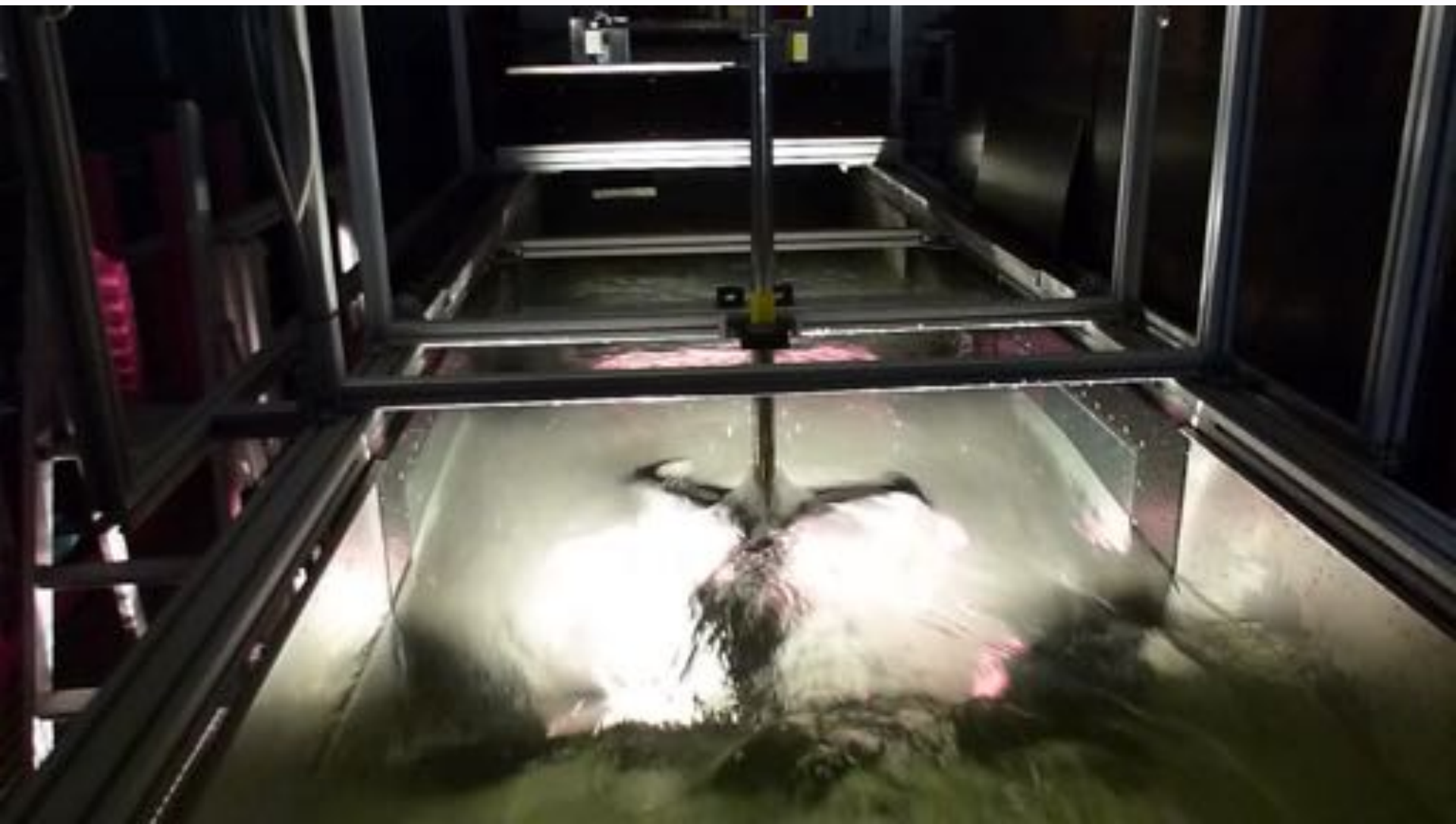
- Darrieus-Turbine und Konstruktion

Prof. Leidhold, OvGU/IESY,

Shokoofeh Abbaszadeh, M.Sc

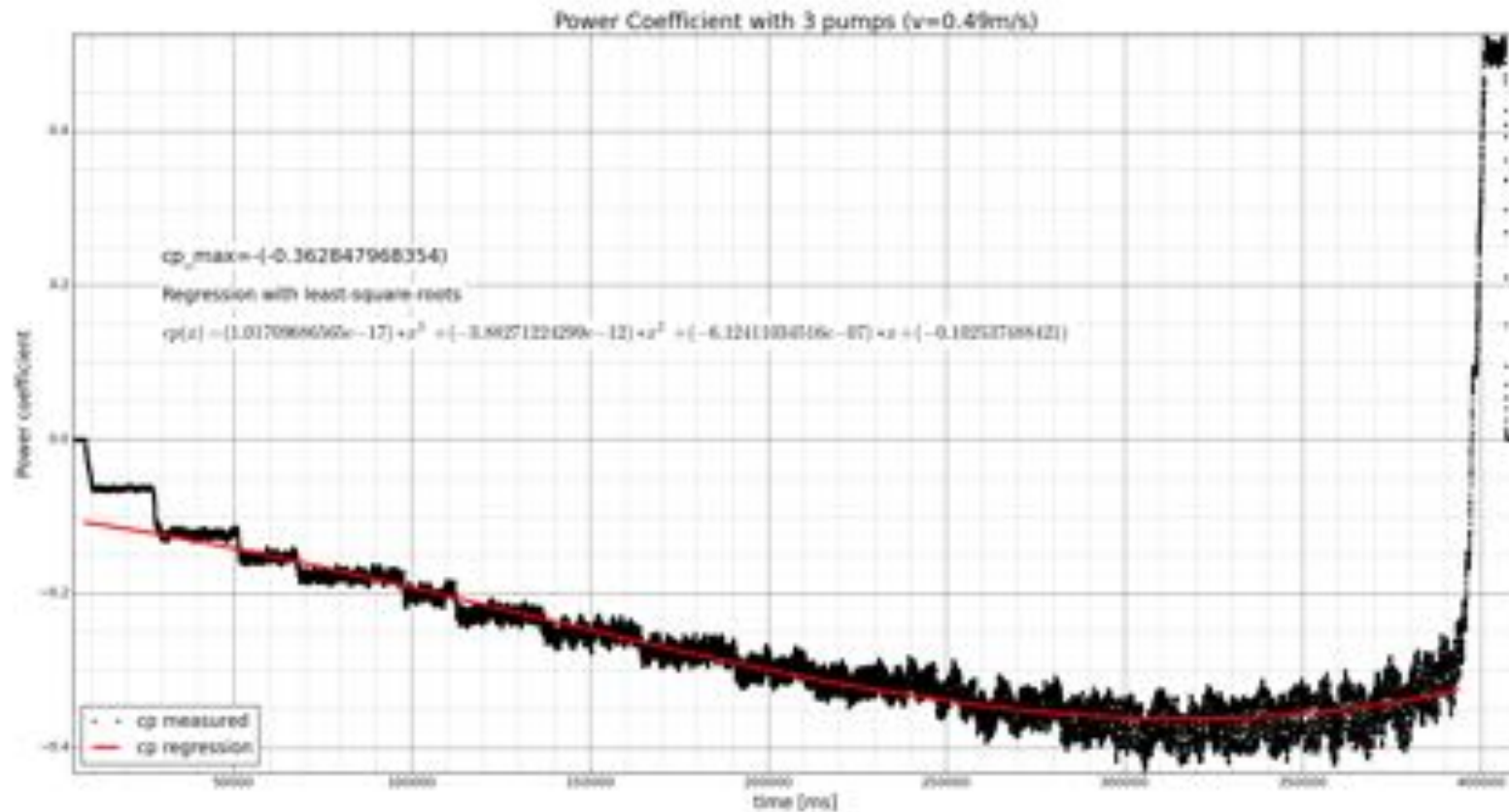
- Drehmomentregelung und -messung







C_p (Drehzahl)–Messungen: Darrieus–Turbine



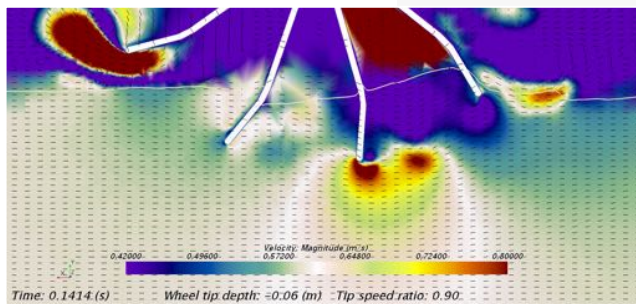
Erste Vergleiche Experiment – Simulation

Erste Experimente mit dem frei-
laufenden Modellwasserrad



Ziel: Kalibrierung und Validierung
der CFD-Simulation
mittels LDA- & PIV-
Geschwindigkeitsmessungen

laufen zurzeit!



Time: 0.0911 (s)

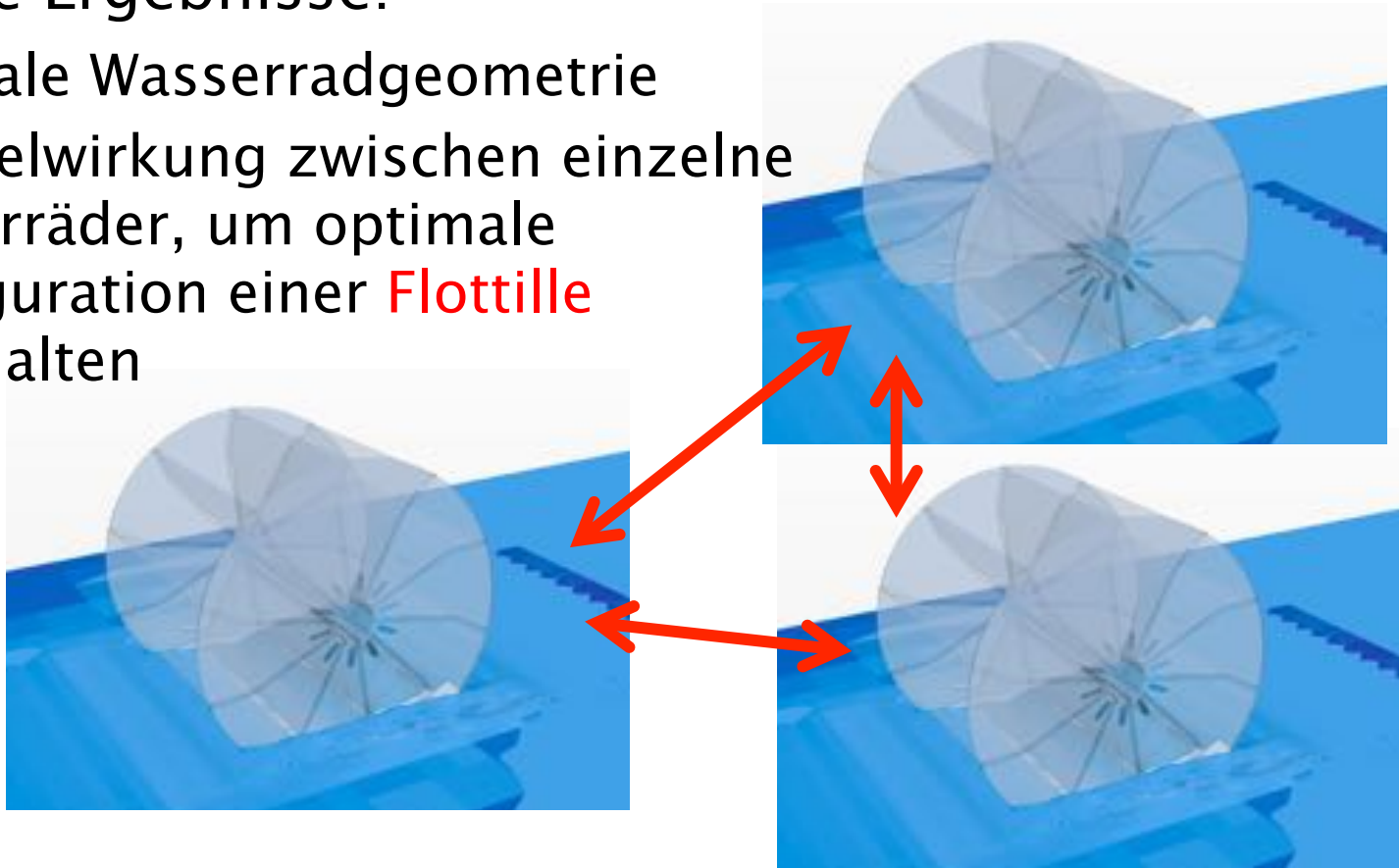
Wheel tip depth: -0.06 (m)

Tip speed ratio: 0.90

Erste Vollsimulation des Modells
(128 CPUs auf dem HPC-Cluster
der Universität, „Neumann“)

Zusammenfassung

- CFD für Anlagenoptimierung extrem hilfreich, aber
 - Validierung durch Vergleich mit experimentellen Messungen erforderlich
 - Lange Rechenzeiten
- Erwartete Ergebnisse:
 - Optimale Wasserradgeometrie
 - Wechselwirkung zwischen einzelnen Wasserräder, um optimale Konfiguration einer **Flottille** zu erhalten



Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungstechnik (LSS)

<http://www.lss.ovgu.de/>

Prof. Dr-Ing. Dominique Thévenin

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!



Financial support of BMBF within „Fluss-Strom“-initiative is gratefully acknowledged!