

# Der Ringflügelrotor als Wasserkraft-Energiewandler

## Verbund-Forschungsprojekt

- Dethloff & Lange GmbH
- Lehrstuhl für Meerestechnik an der Universität Rostock



Gefördert durch:



EUROPÄISCHE UNION  
Europäischer Fonds für  
regionale Entwicklung



Technologie-Beratungs-Institut GmbH

Dr.-Ing. Karsten Breddermann  
karsten.breddermann@uni-rostock.de  
Dipl.-Ing. Christian Semlow  
christian.semLOW@uni-rostock.de

# Grundidee

## Übertragung des Wirkprinzips des effizienten DELA-Rotors auf das Medium Wasser



- Entwicklung eines effizienten Rotors als Antrieb für eine Wasserkraft-Energiewandlungsanlage auf Basis des Konstruktions- und Wirkprinzips des DELA-Rotors
- Aufgabe LMT:
  - Rotorentwurf für Fließgewässer
  - Leistungsprognose des Rotors
  - Durchführen von Modellversuchen

## Projekttablauf

- Arbeitspaket 1 – Numerische Modellbildung
- Arbeitspaket 2 – Physische Modellbildung (Rotorentwurf)
- Arbeitspaket 3 – Experimentelle Verifizierung
- Arbeitspaket 4 – Entwicklung des Großmodells
- Arbeitspaket 5 – Wasserbehördliche Nutzungsprüfung
- Arbeitspaket 6 – Entwicklung des Generators
- Arbeitspaket 7 – Entwicklung der Leistungs- und Steuerelektronik
- Arbeitspaket 8 – Bau des Testmusters
- Arbeitspaket 9 – Großversuch und Dokumentation

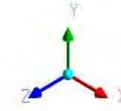
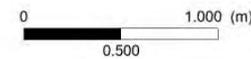
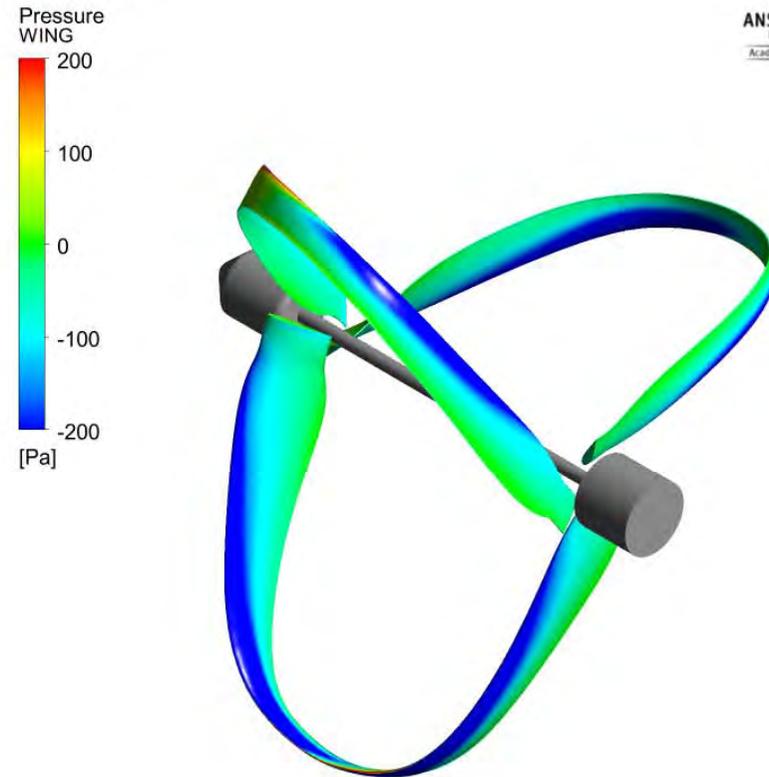
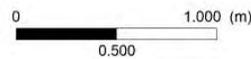
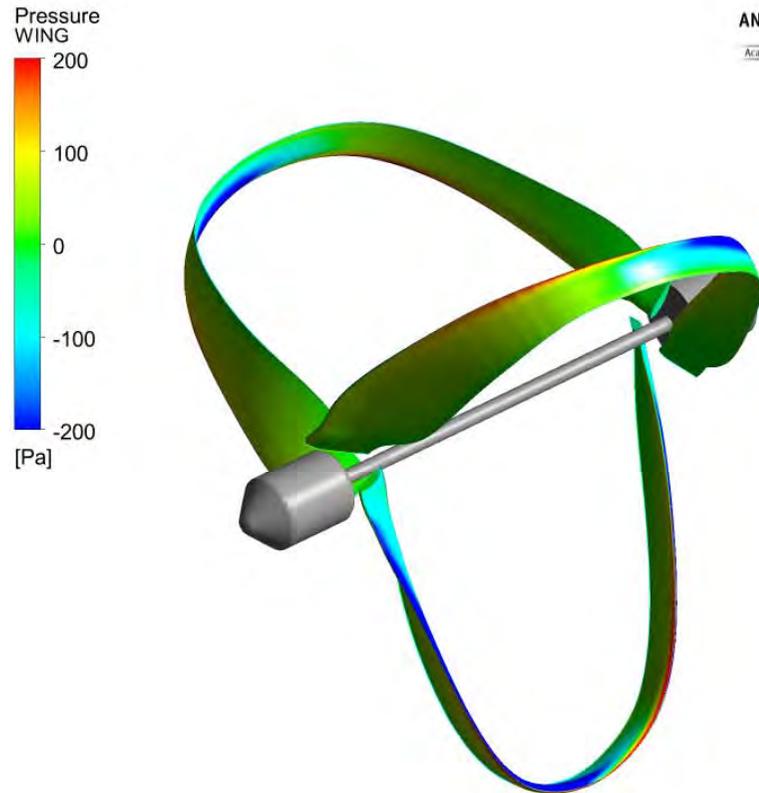
# Entwurfswerkzeug

## CAD und CFD

- Konstruktion des Rotorblatts mit **PTC Creo Parametric 3.0**
- Bestimmung Auftriebsbeiwerte der Profilschnitte mit **Qblade 0.96** (basiert auf **Xfoil**-Lösungsalgorithmen)
- Vernetzung des Konstruktionsentwurfs mit **ICEM CFD**
- Strömungssimulation des DELA-Rotors mit **Ansys CFX**, transiente RANS-Rechnung mit rotierender Domain,  $1^\circ$  pro Zeitschritt
- Auswertung und Visualisierung der Ergebnisse mit **Ansys CFD Post**

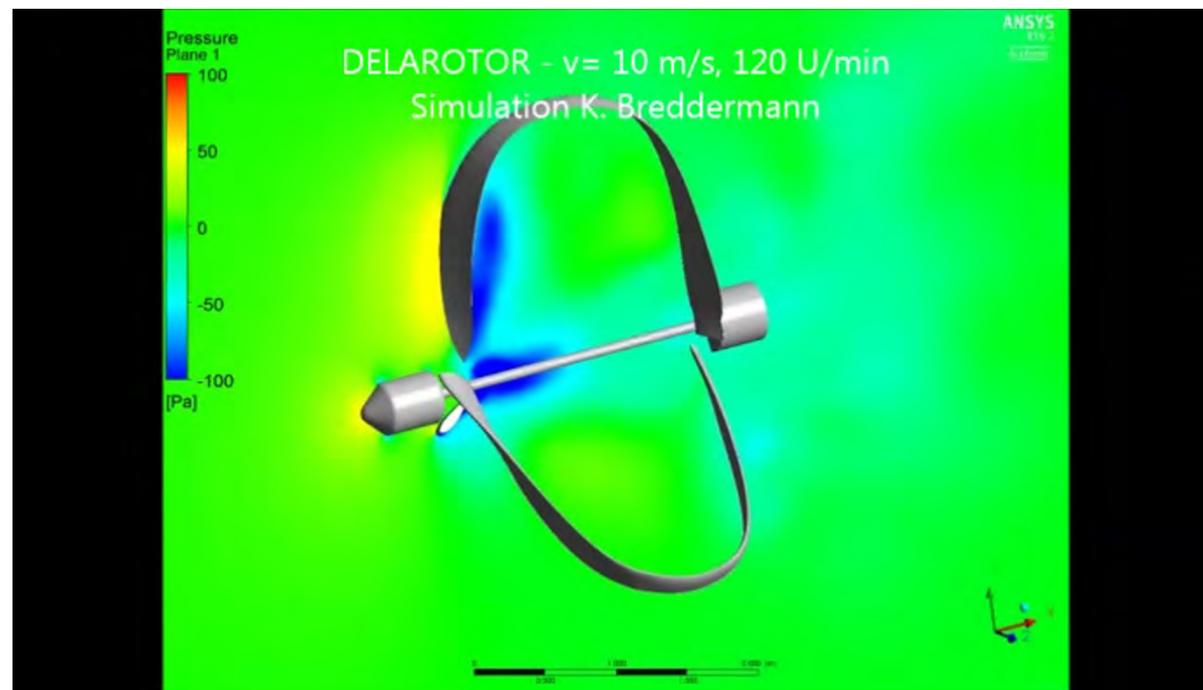
# Entwurfswerkzeug

## Validierung CFD-Methode



# Entwurfswerkzeug

## Validierung CFD-Methode



# Entwurfswerkzeug

## Validierung CFD-Methode

Wellenleistung:

$$P = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M$$

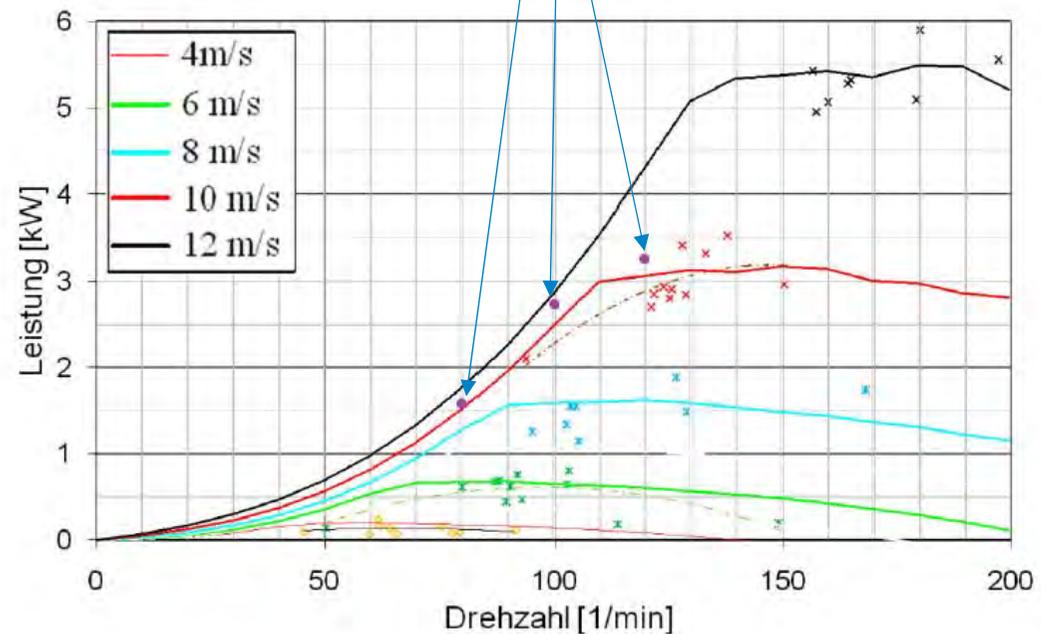
$n$  - Drehzahl

$M$  - Drehmoment

— Leistung aus BEM für  
DELA-Rotor

x aus gemessenem  
Drehmoment berechnete  
Leistung

Ergebnisse aus Strömungssimulation für  $v_{\text{Wind}} = 10 \text{ m/s}$



Grafik aus P. Richter, „Konstruktion und Fertigung eines neuartigen Rotorblattkonzeptes für kleine Windenergieanlagen“. Erweitert durch CFX Ergebnisse

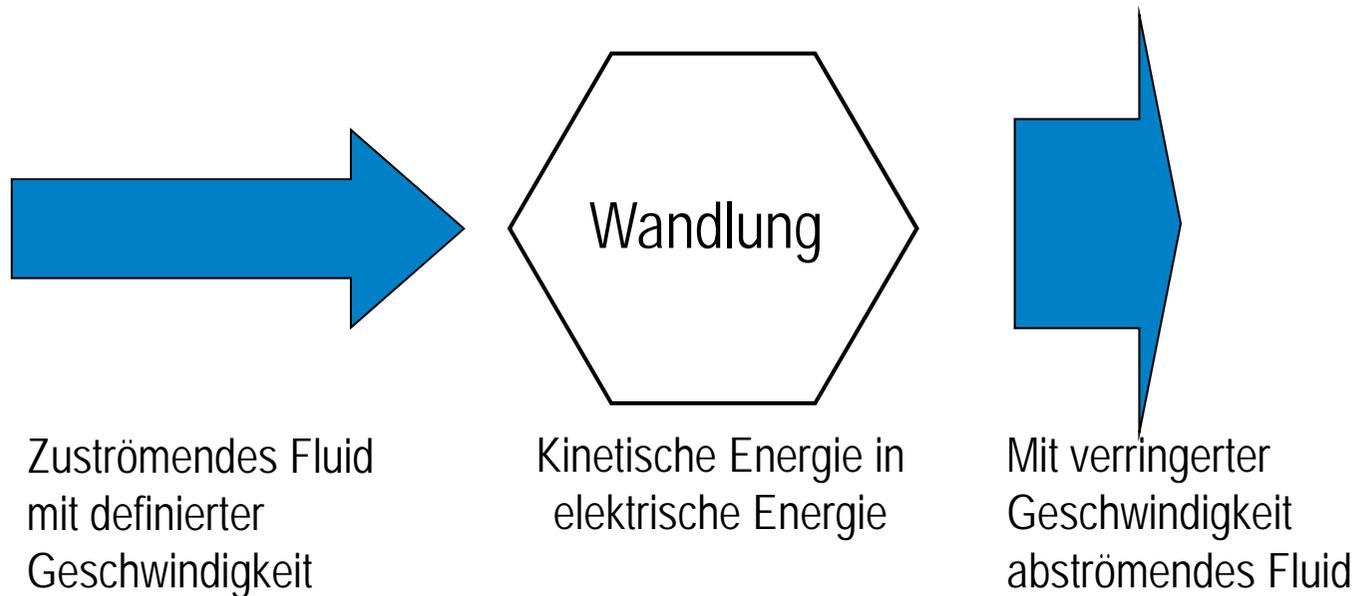
# Entwurfswerkzeug

## Fazit

- Simulationsergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit der Messung und Vorhersage
- Programmpaket ANSYS CFD und gesetzte Randbedingungen sind geeignet um die Strömungsphänomenologie um den Rotor zu beschreiben, die Rotorleistung vorherzusagen und den Rotorentwurf zu analysieren und in Folge zu verbessern

# Rotorentwurf – Grundlage I

## Arbeitsvermögen des strömenden Fluids nach Betz (1926)



$$P_{\max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho_{\text{Wasser}}}{2} \cdot A \cdot v_{\text{in}}^3$$

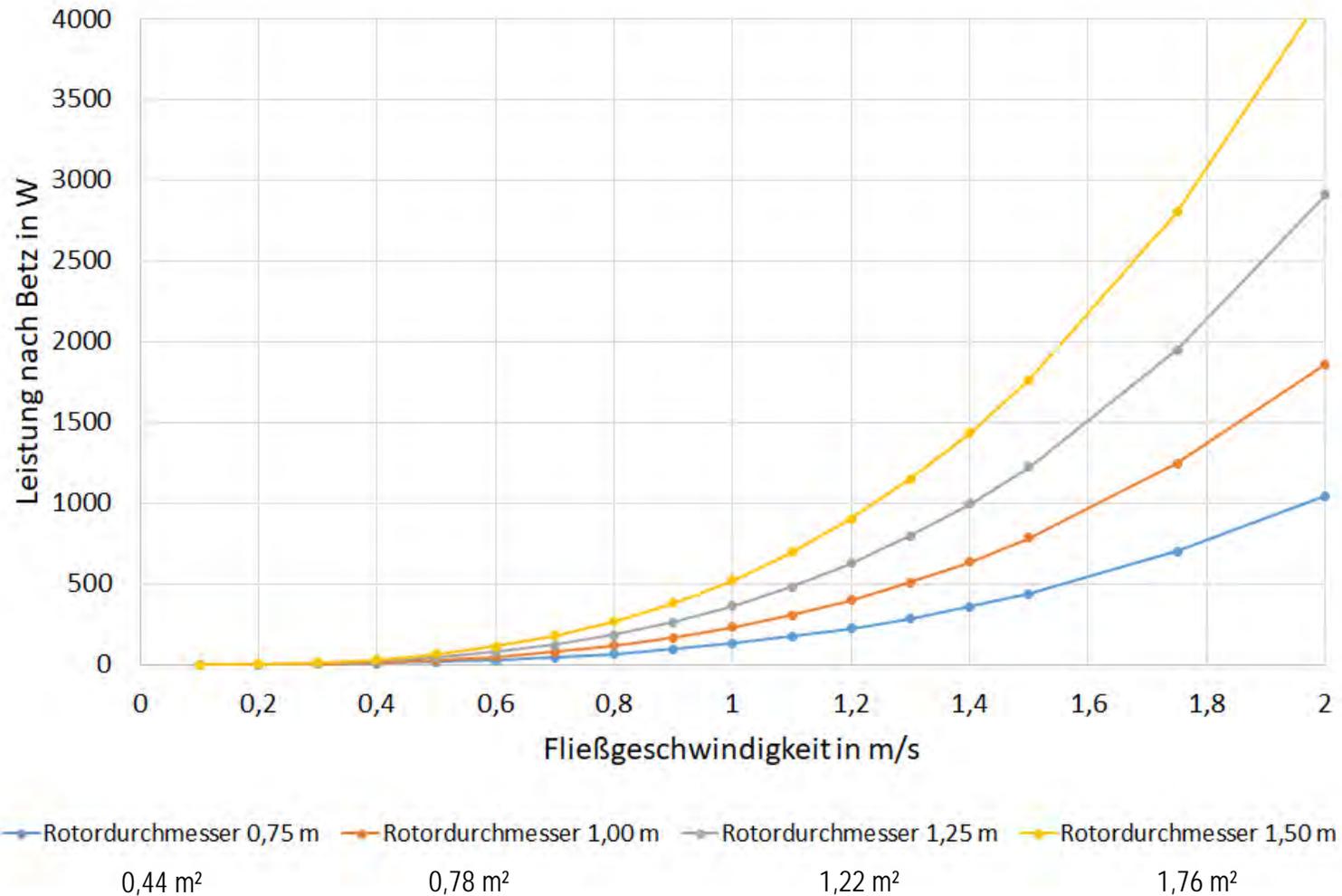
$v$  – Fluidgeschwindigkeit

$A$  – Fläche Radebene in  $\text{m}^2$

$P_{\max}$  – maximal zu entnehmende Leistung in W

# Betz

## Maximal zu wandelnde Leistung nach Betz



# Leistungsbeiwert

Maß für die Qualität des Rotors

$$c_p = \frac{2 \cdot P}{\rho_{Fluid} \cdot A \cdot v_{in}^3}$$

$A$  – vom Rotor überstrichene Fläche bei nicht ummantelten Anlagen,  
Düseneinlassfläche bei ummantelten Anlagen

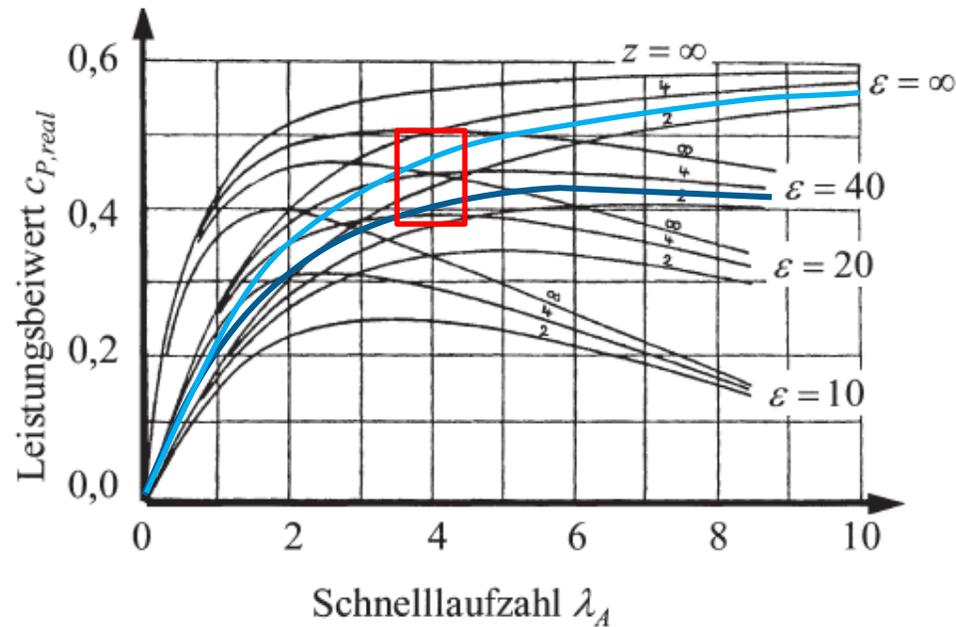
nach Betz:

$$c_{p,max} = \frac{16}{27} \approx 0,59$$

# Rotorentwurf – Grundlage II

## Leistungsbeiwert nach Schmitz

$$c_p = \frac{2 \cdot P}{\rho_{Fluid} \cdot A \cdot v_{in}^3}$$



Gleitzahl  $\epsilon$ :

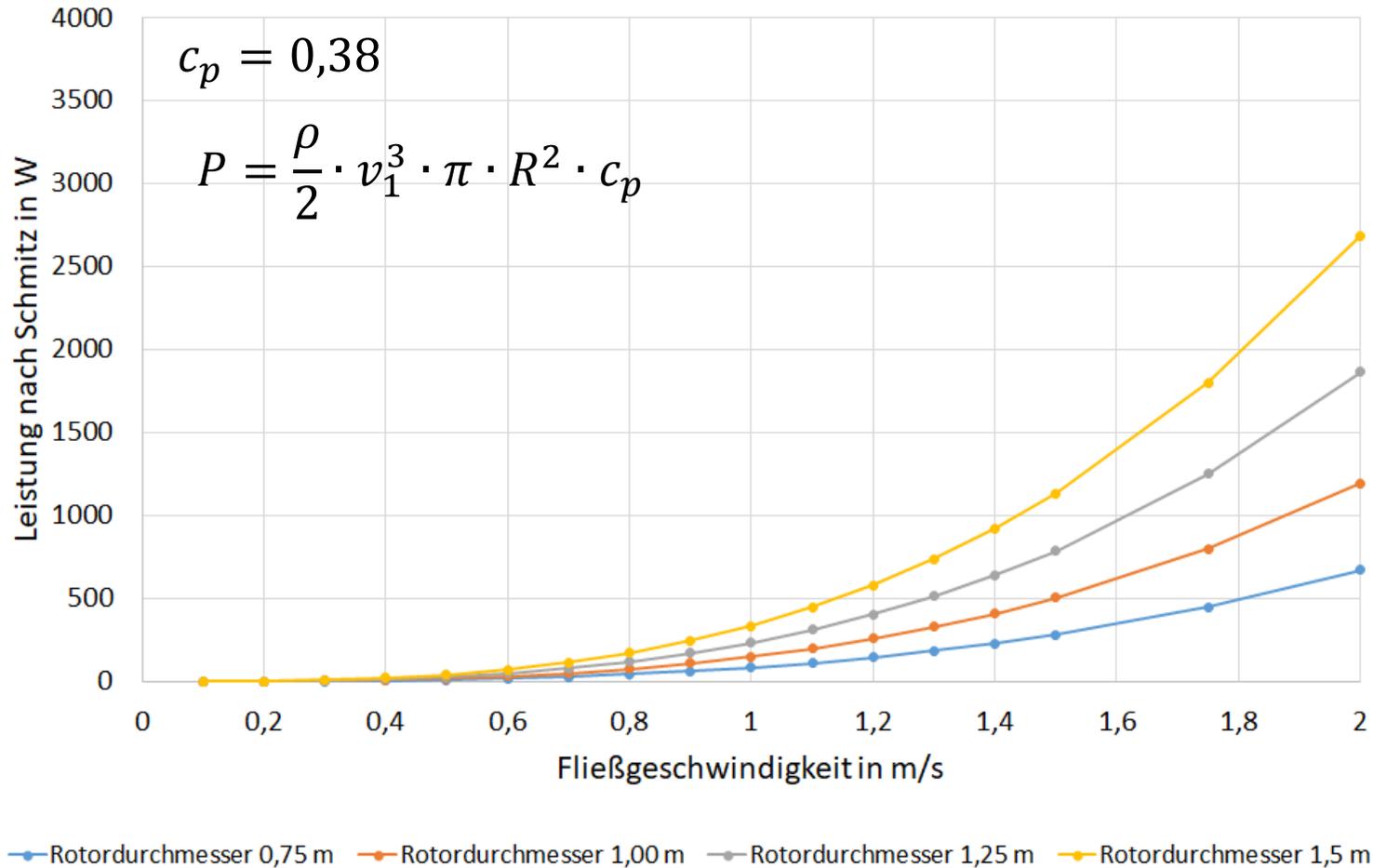
Schmitz-Diagramm

$$\epsilon = \frac{c_{A,Profil}}{c_{W,Profil}}$$

$$\lambda_A = \frac{\text{Umfangsgeschwindigkeit}}{\text{Fließgeschwindigkeit}} = \frac{\Omega \cdot R}{v_{in}}$$

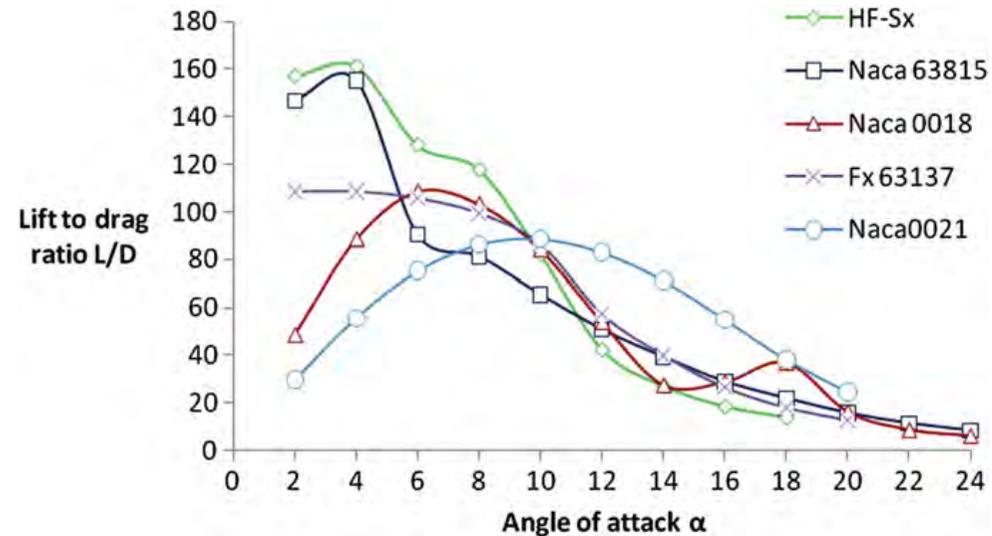
# Schmitz

Leistungserwartung nach Schmitz ( $c_p = 0,38$  bis  $0,46$ )



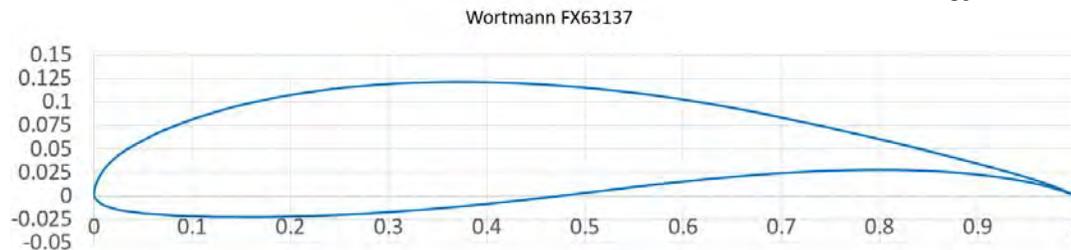
## Fazit Vorbetrachtung

- Schnelllaufzahl  $\lambda_A \geq 4$
- Gleitzahl Profil möglichst hoch
- Rotordurchmesser 1,5 m
- Fließgeschwindigkeit 1,5 m/s
- Kavitation

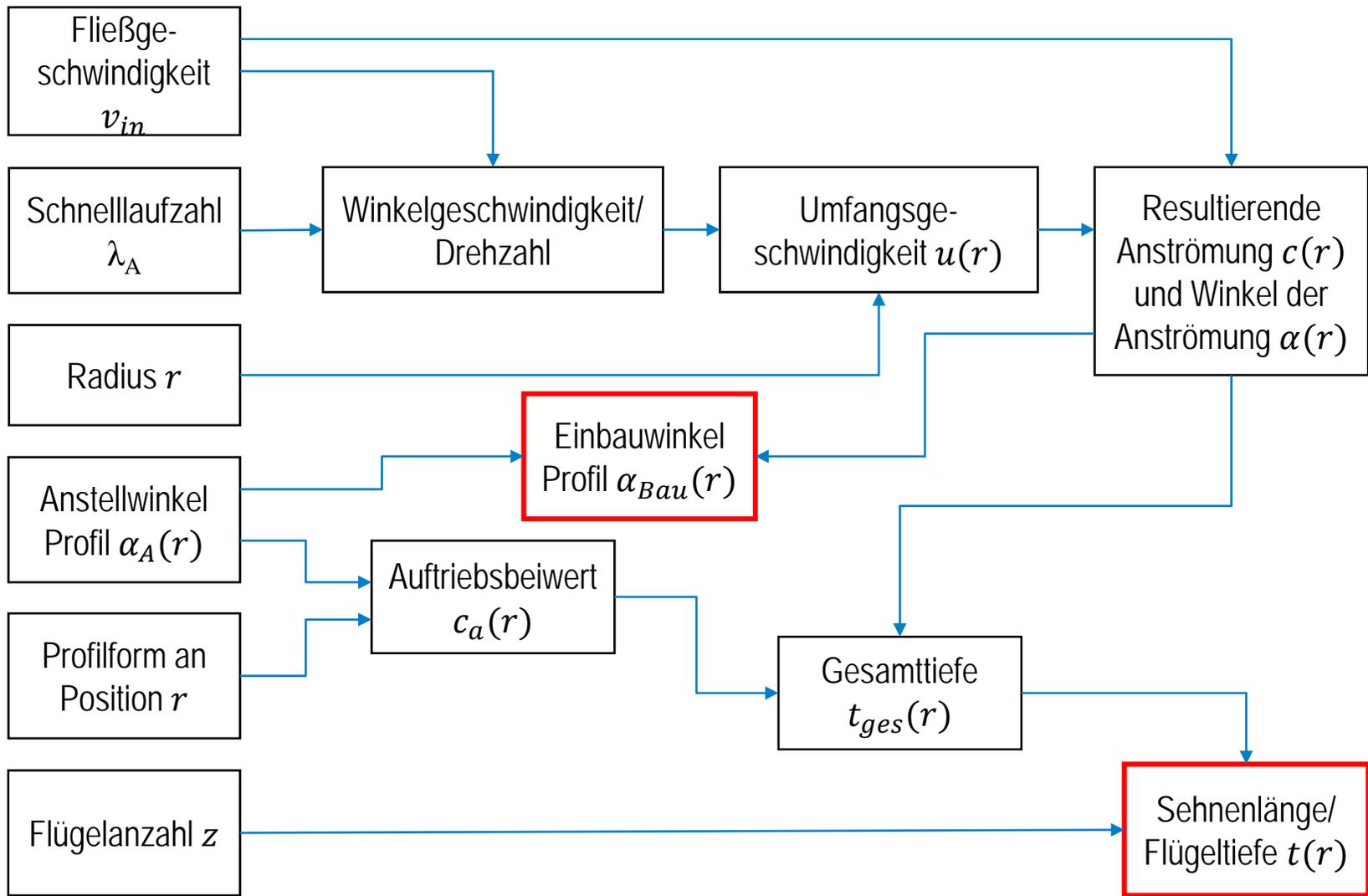


J. N. Goundar et al. - *Numerical and experimental studies on hydrofoils for marine current turbines*. Renewable Energy, 42, 2012, 173-179.

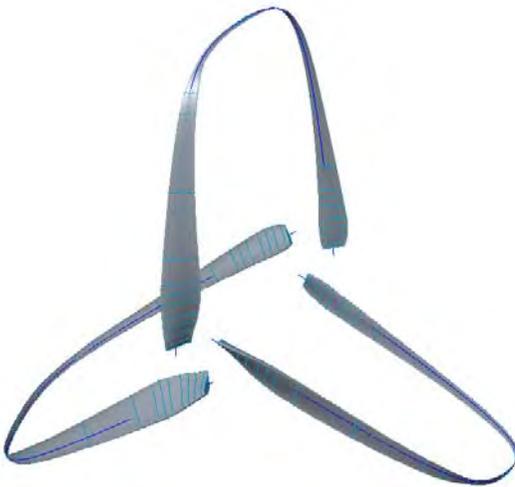
### Wortmann FX63137



# Entwurfsschema



# Rotorevolution



$c_p=0.37$



$c_p=0.38$



$c_p=0.39$



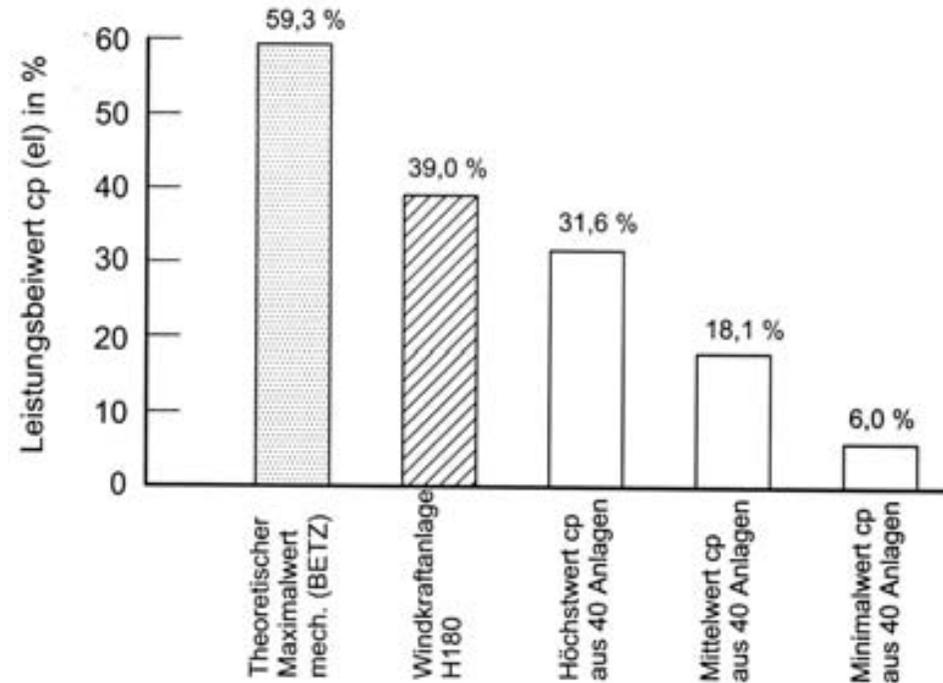
$c_p=0.41$

Leistungsbeiwert  $c_p$  für Schnelllaufzahl  $\lambda_A = 4$  aus Leistungsprognose CFD

# Leistungsbeiwert

## Beurteilung Rotorentwurf

$$c_p = \frac{2 \cdot P}{\rho_{Fluid} \cdot A \cdot v_{in}^3}$$

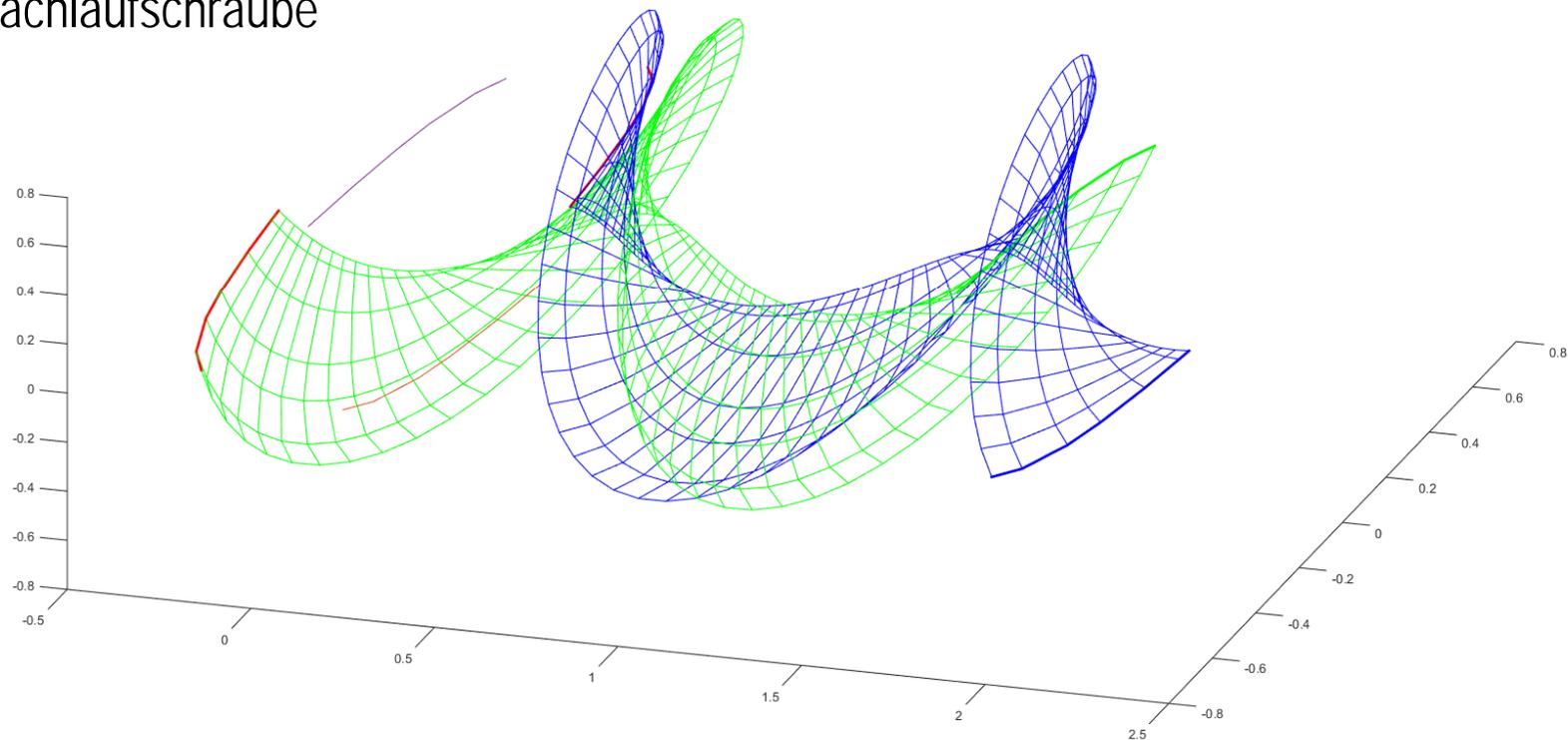


E. Hafner - Strömungsmechanische Besonderheit kleiner Windkraftanlagen.  
DEWI Magazin Nr. 28, Februar 2006

# Rotorentwurf

## Eigenheiten Ringflügel

- Energiewandlung in zwei Ebenen
- Nachstromfeld
- Nachlaufschraube



# Experimentelle Verifizierung

## Konzeption und Planung der Experimente

- Kleinskalige, entwurfsbegleitende Untersuchungen im Gerinne mit unterschiedlichen Rotorentwürfen als 3-D-gedruckte Modelle (Modelldurchmesser ca. 100 mm)
- Mittelskalige Modellversuche im Schleppkanal zur Verifizierung des „Siegerentwurfes“ im Gerinne (Modelldurchmesser ca. 600 mm)
- Versuche mit einem Testmodell unter natürlichen Bedingungen auf dem Versuchsträger VECTOR in der Elbe bei Genthin (Originalgröße, Durchmesser ca. 1 m bis 1,5 m)

# Kleinskalige Modellversuche

## Modelle

			
<b>Rotor 1</b> Maßstab 1:15	<b>Rotor 2</b> Maßstab 1:15	<b>Rotor 3</b> Maßstab 1:10	
Geometrie analog Luft-Rotor, gedruckt mit fest haftender Stützstruktur, nach dem Drucken gespachtelt und geschliffen, mehrere Bruchstellen geklebt	Geometrie analog Luft-Rotor, gedruckt mit auswaschbarer Stützstruktur, Rotorblatt-Oberflächen geschliffen	Geometrie als Wasser-Rotor, gedruckt mit auswaschbarer Stützstruktur, geklebt aus drei gleichen Segmenten, dadurch gleiche Oberflächenstruktur der Rotorblätter	
			
<b>Rotor 4</b> Maßstab 1:10	<b>Rotor 5</b> Maßstab 1:10	<b>Rotor 6</b> Maßstab 1:10	<b>Rotor 7</b> Maßstab 1:10
wie Nr. 3, nur mit geschliffenen Rotorblatt-Oberflächen	wie Nr. 4, aber mit vergrößerten Rotorblatt-Oberflächen durch aufgeklebte Folien	2-Flügler mit parallelen Profilachsen	2-Flügler mit verdrehten Profilachsen

# Kleinskalige Modellversuche

## Schema

Leistung aus Rotation:

$$P_{gem.} [W] = 2 \cdot \pi \cdot M \cdot n$$

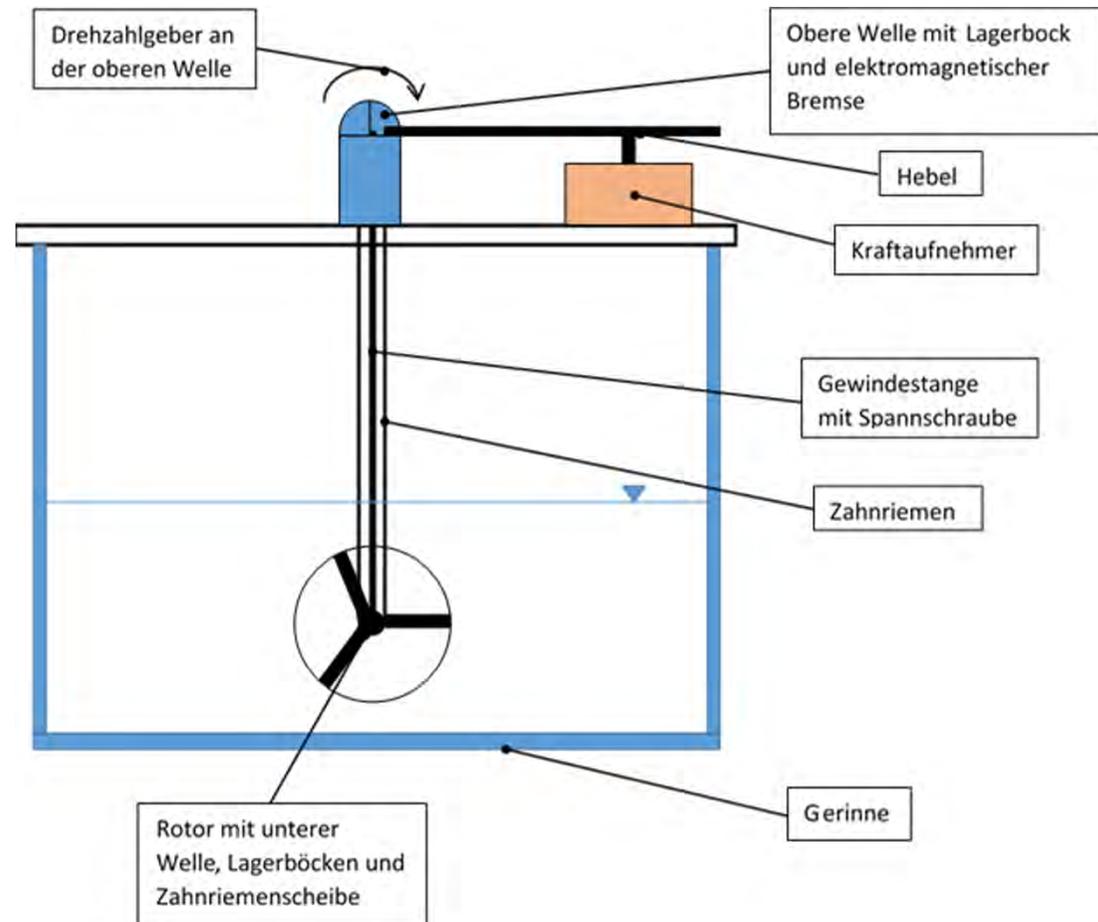
$$= 2 \cdot \pi \cdot F \cdot r \cdot n$$

Bekannt:

- Hebelarm  $r$

Gemessen:

- Drehzahl
- Kraft
- Bremsleistung (Strom und Spannung)



# Kleinskalige Modellversuche

## Übersicht Versuchsaufbau



Modellhalter mit Modell und Messgeräten

Netzgerät für die Bremse

Flügelradanemometer

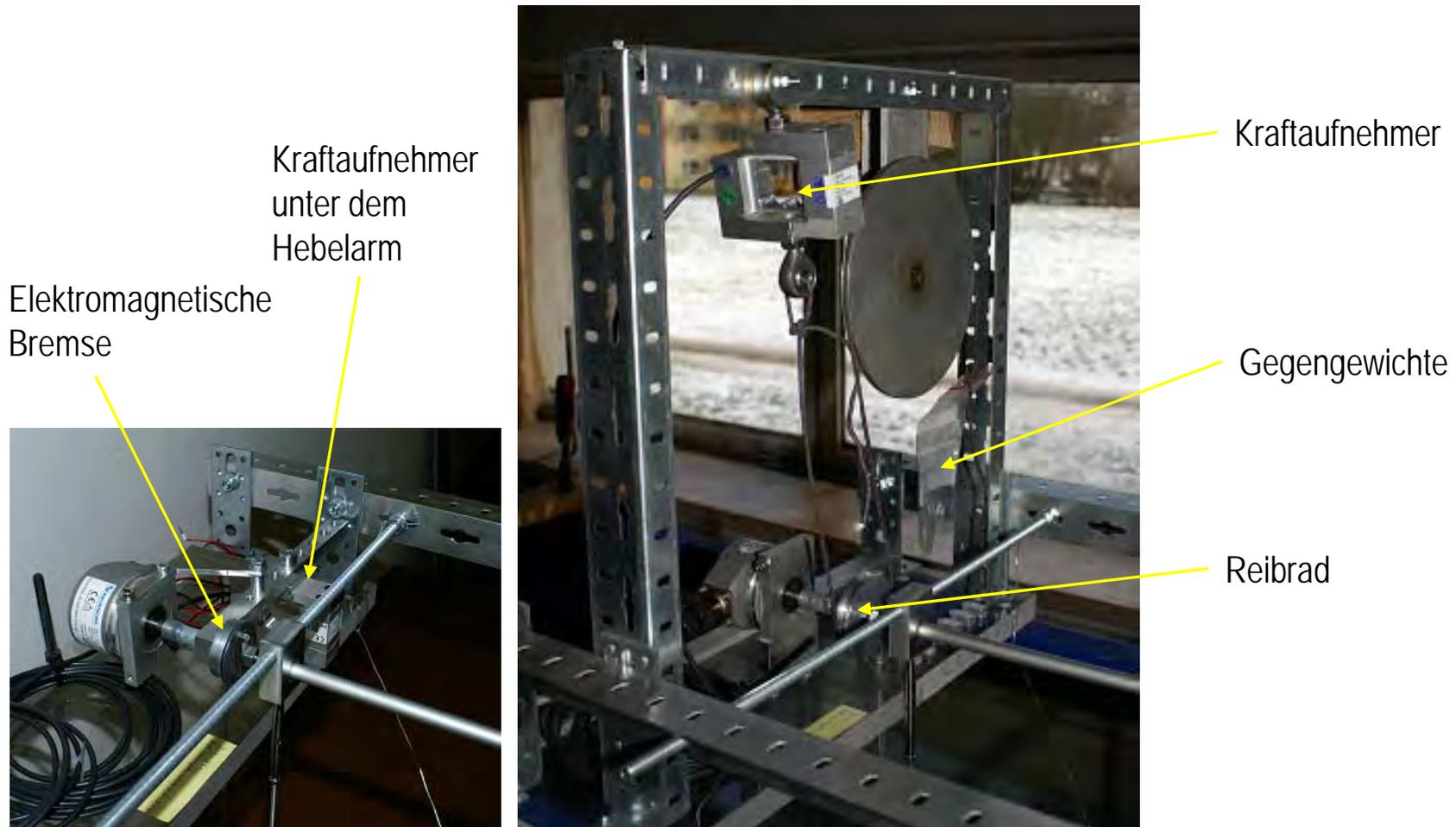
Drehzahlanzeige PAXI

Messrechner

Datalogger für die Strömungsgeschwindigkeit

# Kleinskalige Modellversuche

## Details Versuchsaufbau



## Kleinskalige Modellversuche



Strömungsgeschwindigkeit  $v_s = 0,78$  m/s



Strömungsgeschwindigkeit  $v_s = 0,83$  m/s

### Fazit

- Ähnlichkeitsbedingungen konnten nicht eingehalten werden
- Schnellaufzahlen  $< 1$
- Ergebnisse liefern nur eine Tendenz

## Mittelskalige Modellversuche

### Modell

- Maßstab 1:2,5
- Rotordurchmesser 600 mm
- Nabenkonstruktion nicht maßstäblich
- Fertigung der Modell-Rotorblätter aus Aluminium auf einer 5-Achs-Fräse des Projektpartners Dethloff und Lange GmbH
- Modellversuche unter Einhaltung Reynold'scher und Strouhal'scher Ähnlichkeit
- Fließgeschwindigkeit von 1,5 m/s entspricht Schleppgeschwindigkeit im Kanal von 3,75 m/s



Bilder Nabe: P. Richter ,  
Dethloff & Lange GmbH

# Mittelskalige Modellversuche



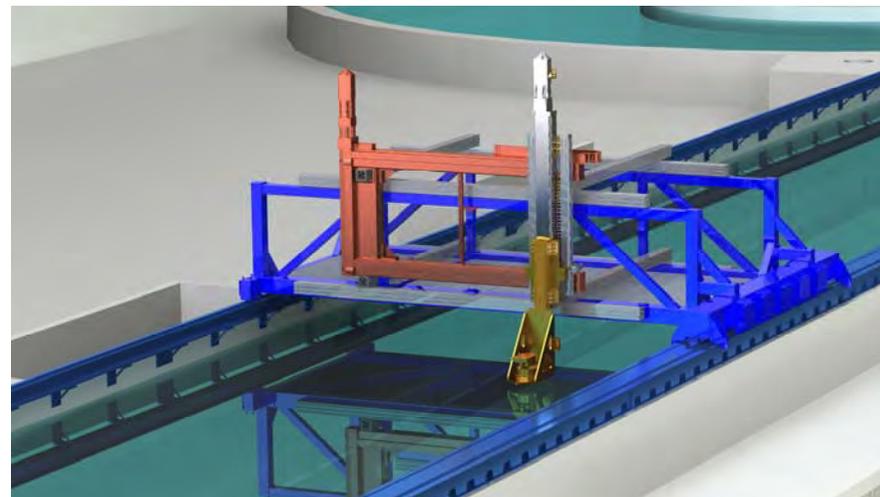
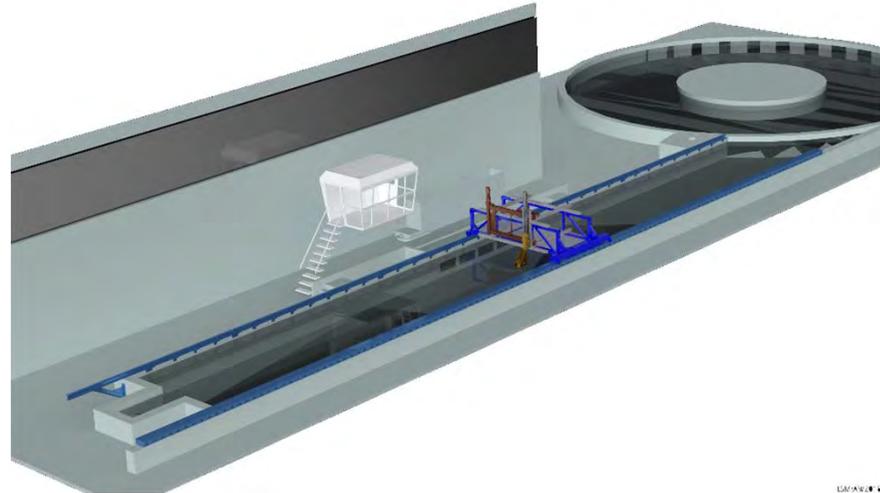
## Vorbetrachtung

Versuchsbedingungen für Modellversuche in Abhängigkeit von der Reynoldszahl											
	$v_s$	L (=D)	$\rho_w$	dynamische Viskosität $\eta_w$ für Wasser			$Re = \rho_w \cdot v_s \cdot L / \eta_w$	dynamische Viskosität $\eta_L$ für Luft		$\rho_L$	$v_s = Re \cdot \eta / \rho \cdot L$
	[m/s]	[m]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mPas]	[kg/ms]		[-]	[mPas]	[kg/ms]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]
Original in Wasser	1,5	1,5	1000	1,297	0,001297	bei 10°C	2,25E+06				
Modell in Wasser	3,75	0,6	1000	1,00	0,001	bei 20°C	2,25E+06				
	<b>Modell in Wasser mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten</b>						<b>umgerechnet für das Modell in Luft</b>				
	0,60	0,6	1000	1,00	0,001		3,60E+05	0,0176	0,0000176	1,204	8,77
	0,80	0,6	1000	1,00	0,001		4,80E+05	0,0176	0,0000176	1,204	11,69
	1,00	0,6	1000	1,00	0,001		6,00E+05	0,0176	0,0000176	1,204	14,62
	1,20	0,6	1000	1,00	0,001		7,20E+05	0,0176	0,0000176	1,204	17,54
	1,40	0,6	1000	1,00	0,001		8,40E+05	0,0176	0,0000176	1,204	20,47
	1,60	0,6	1000	1,00	0,001		9,60E+05	0,0176	0,0000176	1,204	23,39
Maximum	1,80	0,6	1000	1,00	0,001		1,08E+06	0,0176	0,0000176	1,204	26,31
Schlepprinne	2,00	0,6	1000	1,00	0,001		1,20E+06	0,0176	0,0000176	1,204	29,24
	2,25	0,6	1000	1,00	0,001		1,35E+06	0,0176	0,0000176	1,204	32,89
	2,50	0,6	1000	1,00	0,001		1,50E+06	0,0176	0,0000176	1,204	36,54
	2,75	0,6	1000	1,00	0,001		1,65E+06	0,0176	0,0000176	1,204	40,20
	3,00	0,6	1000	1,00	0,001		1,80E+06	0,0176	0,0000176	1,204	43,85
	3,25	0,6	1000	1,00	0,001		1,95E+06	0,0176	0,0000176	1,204	47,51
	3,50	0,6	1000	1,00	0,001		2,10E+06	0,0176	0,0000176	1,204	51,16
	3,75	0,6	1000	1,00	0,001		2,25E+06	0,0176	0,0000176	1,204	54,82

## Mittelskalige Modellversuche

### Schleppkanal am Lehrstuhl für Strömungsmechanik

- Länge 37 m
- Breite 5 m
- Wassertiefe max. 3 m
  
- Hochleistungsschleppsystem (HLSS)
  - Geschwindigkeiten bis 9 m/s
  - Beschleunigungen bis 8 m/s<sup>2</sup>



Bilder: Lehrstuhl für Strömungsmechanik, [www.lsm.uni-rostock.de](http://www.lsm.uni-rostock.de)

# Mittelskalige Modellversuche

## Übersicht Versuchsaufbau Schleppkanal

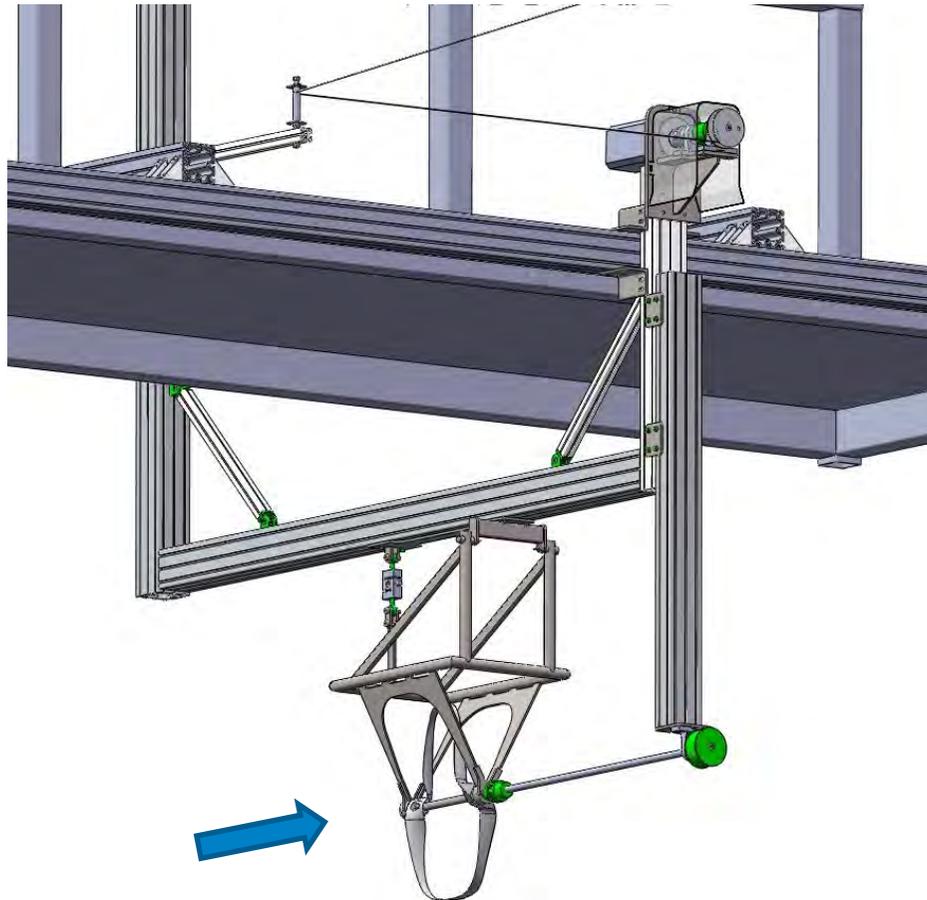
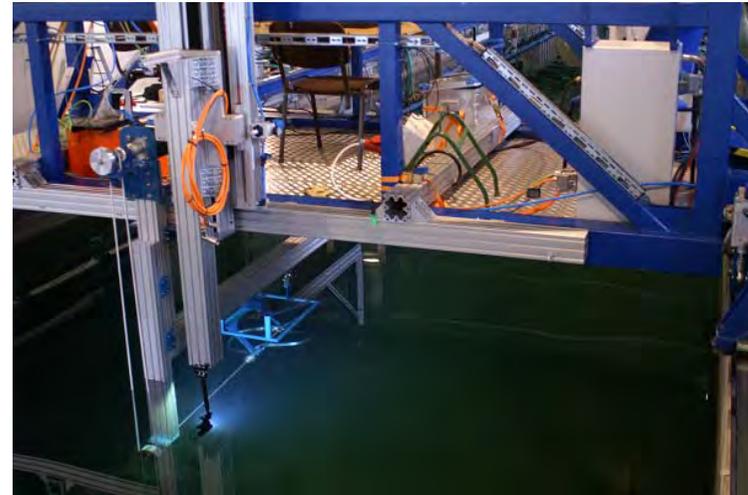


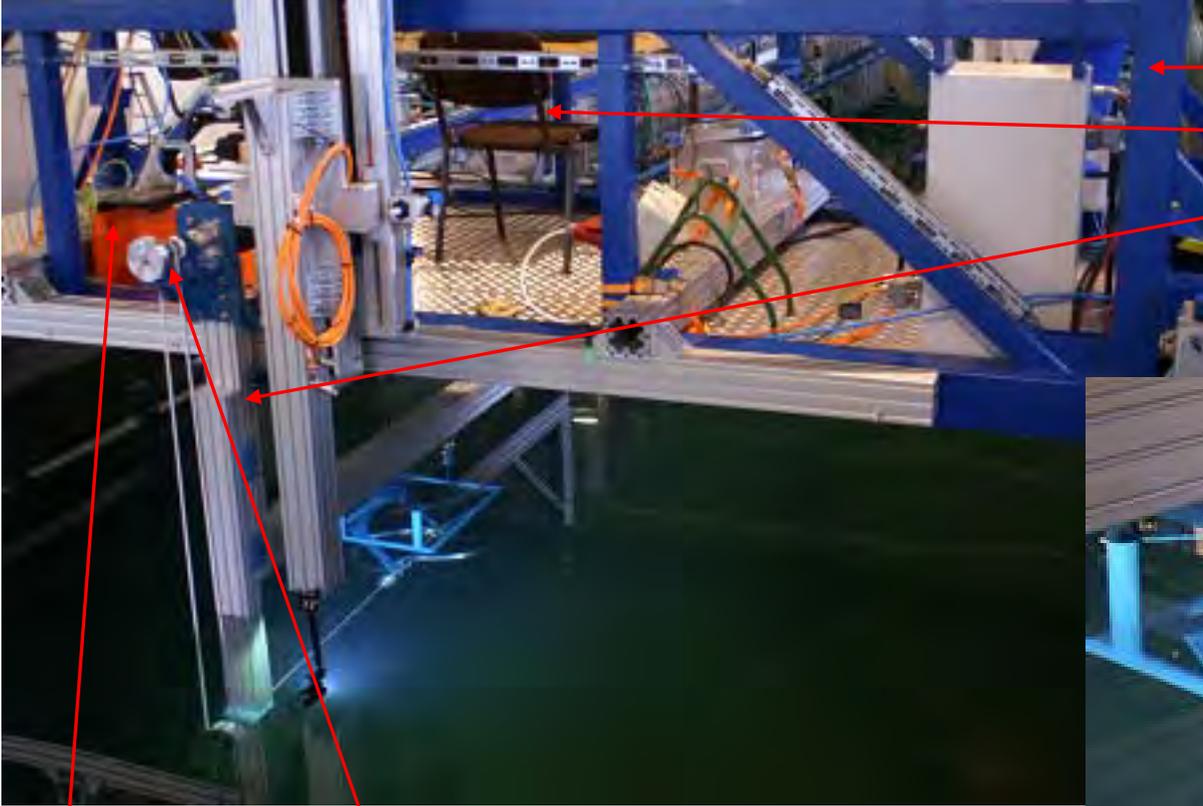
Bild: P. Richter, Dethloff & Lange GmbH



# Mittelskalige Modellversuche

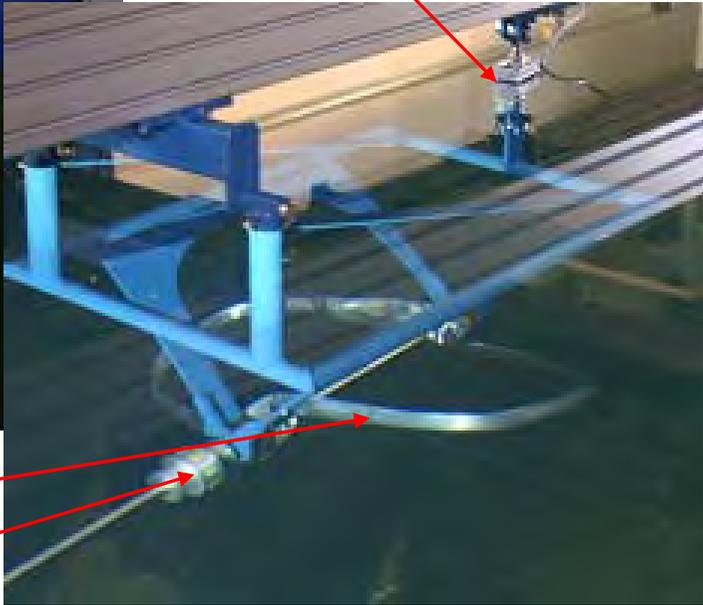


## Details Versuchsaufbau Schleppkanal



Schleppwagen mit  
Messplatz und  
Rotorhalterung

Kraftaufnehmer für die  
Widerstandsmessung



Rotor mit Welle  
und Kupplung

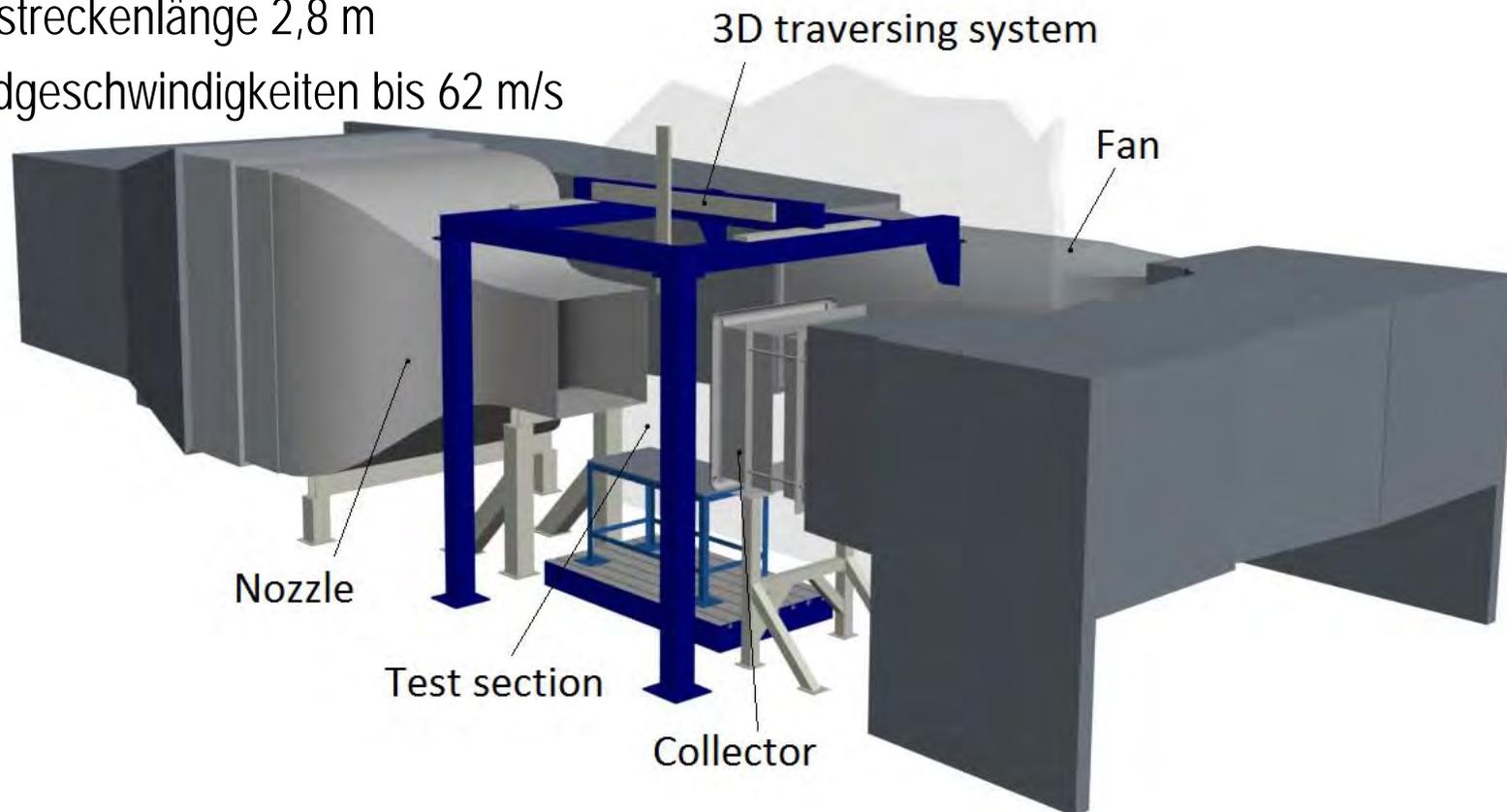
Drehmomentenmessung mit  
Servo Maschinenprüfstand  
Typ SE2663-6U der Lucas  
Nülle GmbH

Generatorwelle mit  
Antriebszahnscheibe und  
Servomotor für das  
Aufbringen des  
Drehmomentes

## Mittelskalige Modellversuche

### Windkanal am Lehrstuhl für Meerestechnik

- Göttinger Bauart
- Düsenquerschnitt 1,4 m x 1,4 m
- Teststreckenlänge 2,8 m
- Windgeschwindigkeiten bis 62 m/s



# Mittelskalige Modellversuche



## Übersicht Versuchsaufbau Windkanal



Rotor

Rotorwelle mit  
Zahnscheibe für den  
Zahnriemen-Abtrieb

Generatorwelle mit  
Zahnscheibe für den  
Antrieb und  
Servomotor zum  
Aufbringen des  
Drehmomentes



Messplatz mit Messrechnern  
und Steuergerät

# Mittelskalige Modellversuche

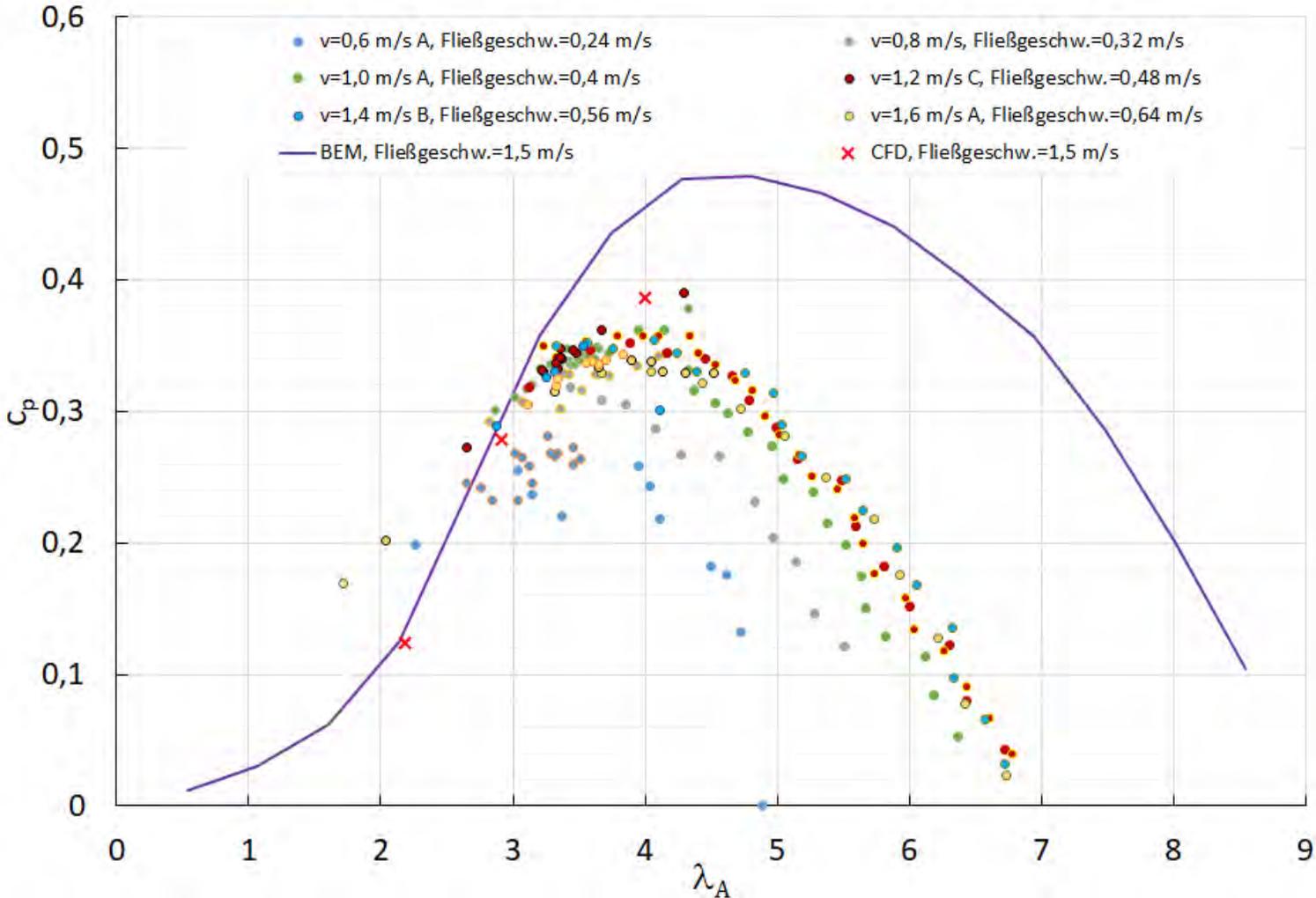


## Durchgeführte Versuche

In der Schlepprinne:						Im Windkanal:				
$v_s$	$L (=D)$	$\rho_w$	dynamische Viskosität $\eta_w$ für Wasser		$Re = \rho_w \cdot v_s \cdot L / \eta_w$	dynamische Viskosität $\eta_L$ für Luft		$\rho_L$	$v_s = Re \cdot \eta / \rho \cdot L$	
[m/s]	[m]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mPas]	[kg/ms]	[-]	[mPas]	[kg/ms]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	
<b>Modell in Wasser</b> mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten						umgerechnet für das <b>Modell in Luft</b>				
<b>0,60</b>	0,6	1000	1,00	0,001	3,60E+05	0,0176	0,0000176	1,204	8,77	
<b>0,80</b>	0,6	1000	1,00	0,001	4,80E+05	0,0176	0,0000176	1,204	<b>11,69</b>	
<b>1,00</b>	0,6	1000	1,00	0,001	6,00E+05	0,0176	0,0000176	1,204	<b>14,62</b>	
<b>1,20</b>	0,6	1000	1,00	0,001	7,20E+05	0,0176	0,0000176	1,204	<b>17,54</b>	
<b>1,40</b>	0,6	1000	1,00	0,001	8,40E+05	0,0176	0,0000176	1,204	<b>20,47</b>	
<b>1,60</b>	0,6	1000	1,00	0,001	9,60E+05	0,0176	0,0000176	1,204	23,39	
<b>1,70</b>	0,6	1000	1,00	0,001	1,02E+06	0,0176	0,0000176	1,204	24,85	
<b>1,80</b>	0,6	1000	1,00	0,001	1,08E+06	0,0176	0,0000176	1,204	26,31	

# Mittelskalige Modellversuche

## Vorläufige Versuchsergebnisse Schleppkanal

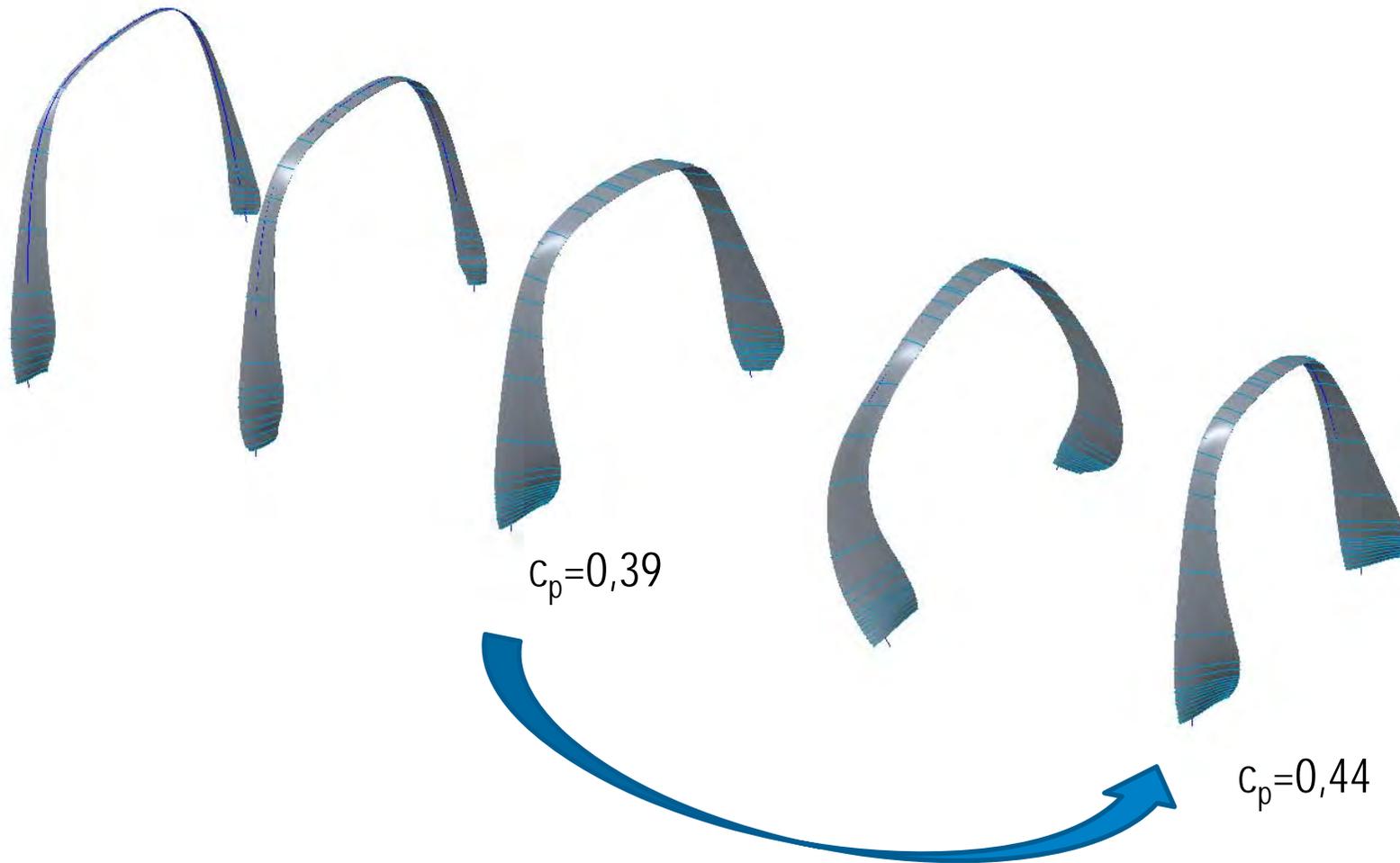




# Abschluss



## Verwertung Erkenntnisgewinn





## Abschluss



### Fazit

- Konkurrenzfähiger Rotorentwurf ist entstanden
- ANSYS CFX hat sich als geeignetes Entwurfswerkzeug erwiesen
- Versuche mit Großmodell zur Bestätigung der Leistungserwartung unter realen Bedingungen (Abweiserkäfig, Generatorverluste)

Fachforum Fluss-Strom 27.09.2017

... Diskussion eröffnet

**Vielen Dank für die Aufmerksamkeit**