



Franzius-Institut für Wasserbau
und Küsteningenieurwesen
Universität Hannover
Prof. Dr.-Ing. C. Zimmermann



Institut für Werkstoffkunde
Universität Hannover
Prof. Dr.-Ing. Fr.-W. Bach



Laser Zentrum Hannover e.V.
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. mult. Dr. med. h.c.
H. Haferkamp

„Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“

*Dr.-Ing. W. Reimche,
Institut für Werkstoffkunde, Universität Hannover*

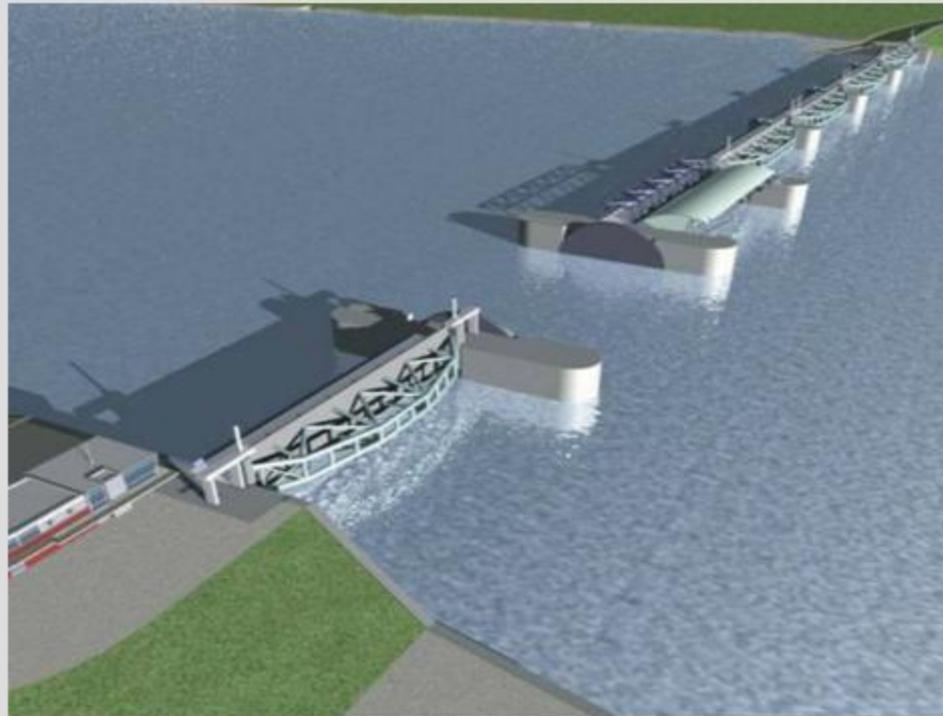
**9. KFKI - Seminar zur Küstenforschung,
03. November 2004**

Deutsches Schifffahrtsmuseum, Bremerhaven



Einführung

Problematik: Mögliche Kolkbildung im Bereich von Küstenbauwerken



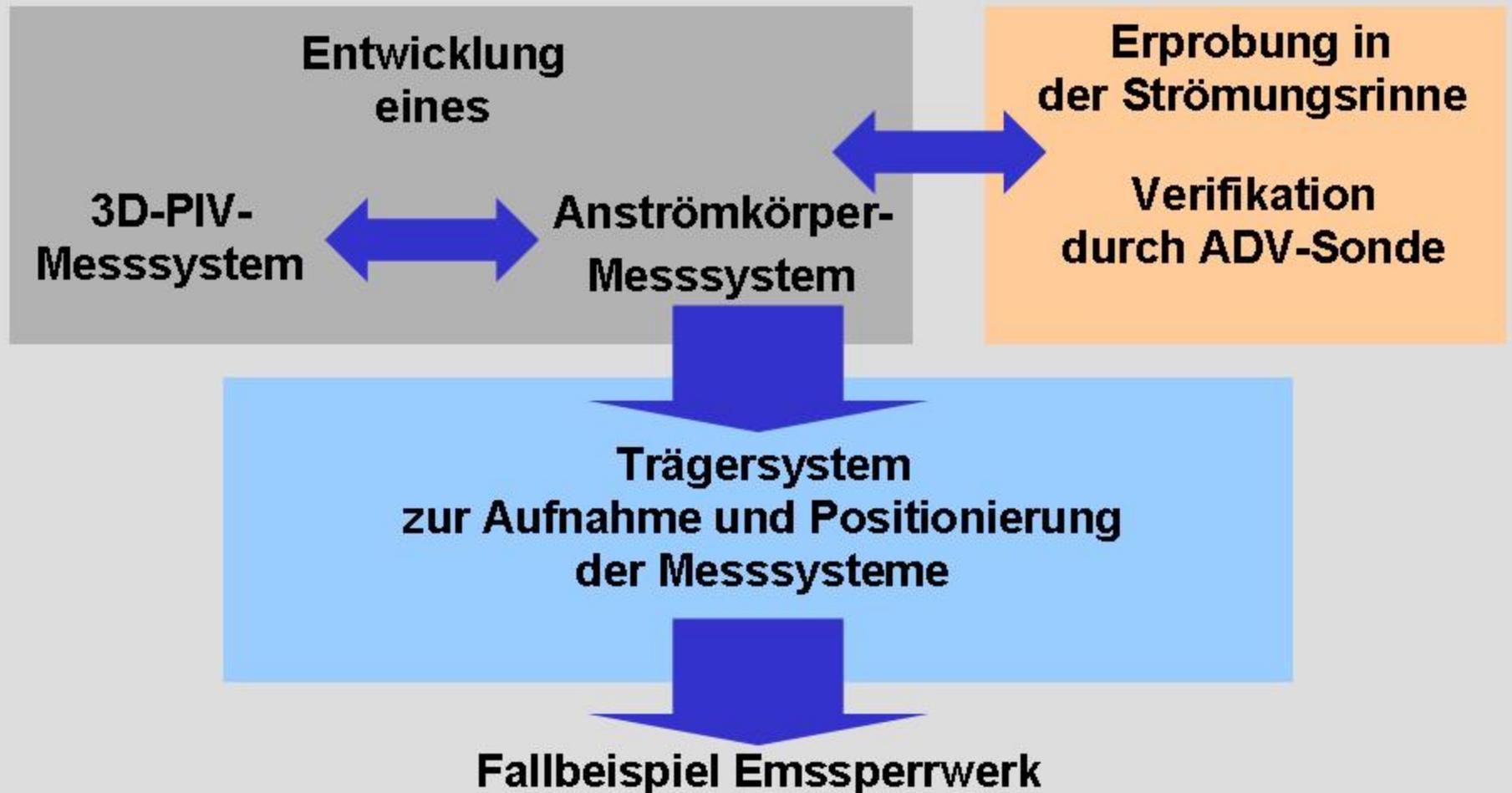
- Hohe Strömungsgeschwindigkeiten und Turbulenzen im Bereich vom Bauwerk
- Stark variierender Wasserstand (Ebbe/Flut), Salz- und Schwebstoffgehalt (Trübung)
- Unterschiedliche Betriebszustände beim Öffnen und Schließen der Tore

**Abbildung der Strömungsverhältnisse
mit hochaufgelösten
3D-Strömungssimulationen**

**Verifikation über
physikalische
Strömungsmodelle**

**Überprüfung mit Messungen
an realen Küstenschutzbauwerken**

**Entwicklung und Aufbau eines Mess- und Trägersystems
zur Messung hochturbulenter Strömungszustände
unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss**



- *Verifikation hochaufgelöster 3D-Strömungssimulationen*
- *Basis zur Erfassung und Vermeidung kritischer Betriebszustände*



Projektkoordination:

Institut für Werkstoffkunde
Universität Hannover

- Anströmkörper
-Strömungsmesssystem
- Trägersystem
und Tauchgehäuse



Projektpartner:

Franzius-Institut für Wasserbau
und Küsteningenieurwesen
Universität Hannover

- Strömungssimulation
- Strömungsmessung



Unterauftragnehmer:

Laser Zentrum Hannover e.V.

- PIV-Messsystem
(Particle-Image-Velocimeter)



Dr.-Ing. Reimche, IW



Projektstruktur



Aufbau des hydrodynamischen 3D-Modells und Vergleich mit physikalischen Modellversuchen

Dipl.-Ing. J. Scheffermann, Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen



Mechanisches Anströmkörper-Strömungsmesssystem, Entwicklung eines Trägersystems und der Tauchgehäuse

Dipl.-Ing. C. Scheer, Institut für Werkstoffkunde



Erfassung von turbulenten Strömungen mittels PIV-System (Particle-Image-Velocimeter)

Dipl.-Phys. J. Walter, Laser Zentrum Hannover e.V.



Dipl.-Ing. Scheffermann, Dr.-Ing. Matheja, FI



Universität Hannover

Aufbau des hydrodynamischen 3D-Modells

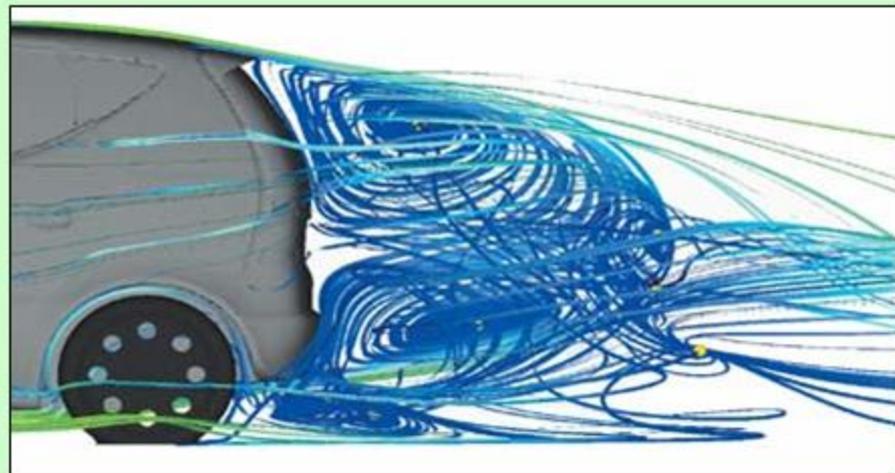
- Kommerzielles CFD-Programm STAR-CD

- Hauptsächliche Anwendungsgebiete:

- Automobilbau
- Maschinenbau
- Motorenentwicklung

- Finite – Volumen – Methode (FVM)

- als Begrenzung der Wasseroberflächen können Druckrandbedingungen angesetzt werden oder es kann mit freier Oberfläche gerechnet werden



- Bewegungsvorgänge können mit beweglichen Gittern simuliert werden

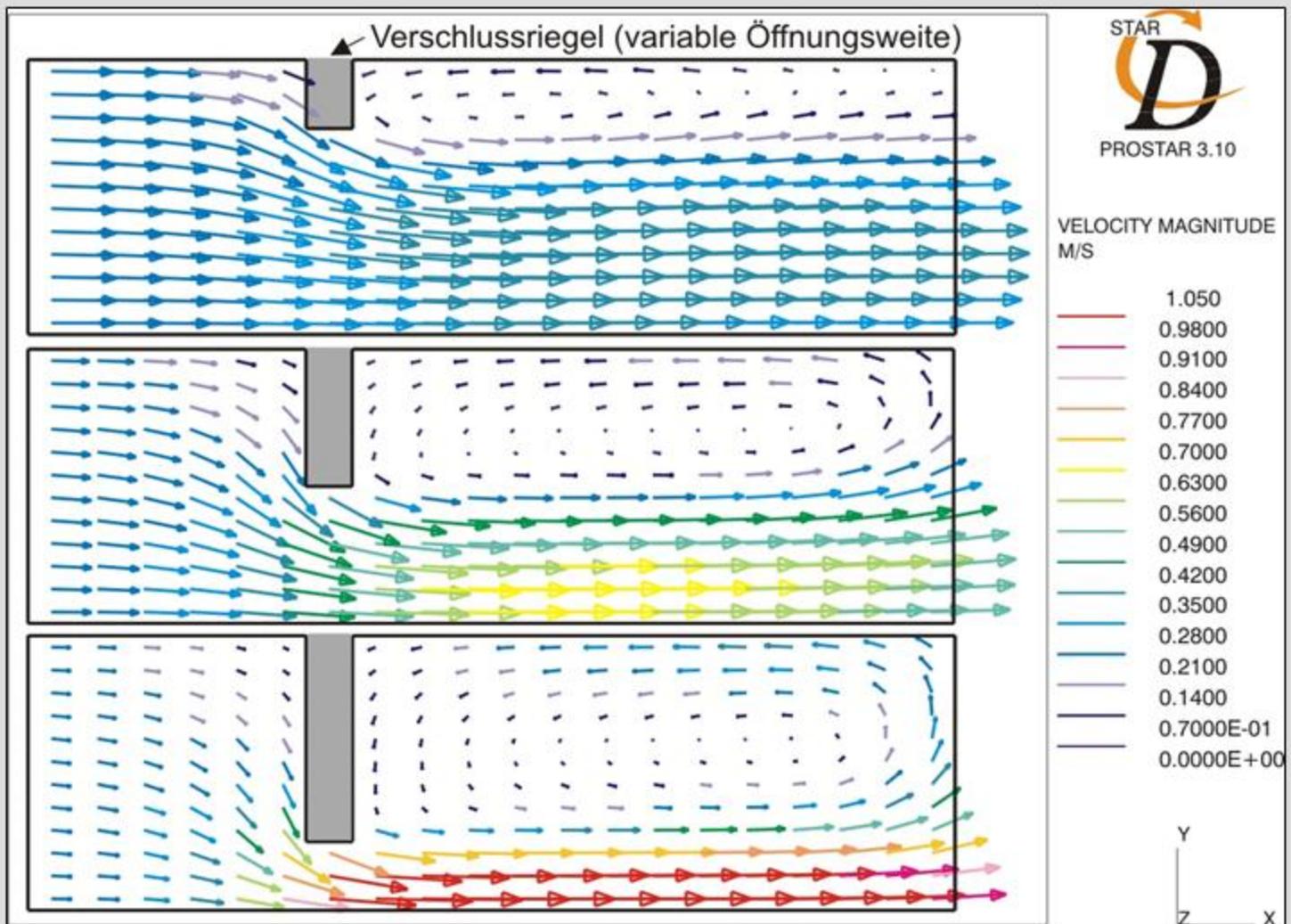
RANSE:
$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \rho \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \overline{u_i' u_j'} \right] + \bar{f}_i$$

↑
↑
↑
↑
↑

lokale konvektive Beschleunigung Druckterm Spannungsterm Massenkkräfte

Kontinuitätsgleichung: $0 = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i}$





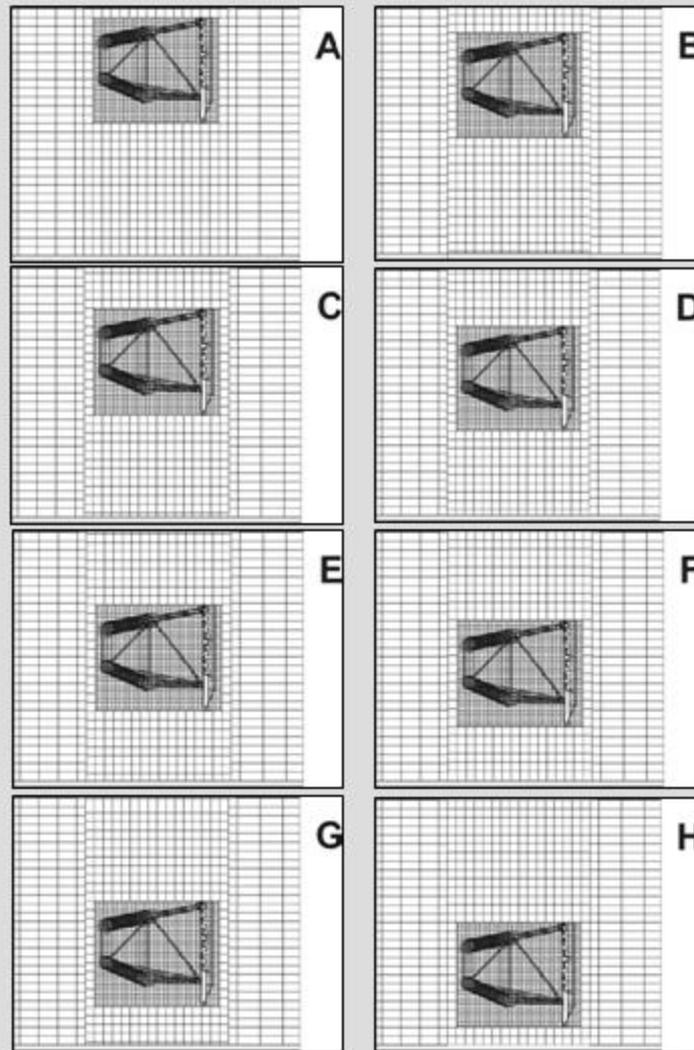
Entwicklung der Strömungsverhältnisse um einen sich bewegenden Verschlussriegel
[Prototyp zum Erstellen von Unterprogrammen]



Dipl.-Ing. Scheffermann, Dr.-Ing. Matheja, FI



Entwicklung Prototypen für Numerische Simulationen



Numerisches Modell mit:

- freier Oberfläche
- Trägerstruktur des Hubtores
- in der vertikalen frei verfahrbarer Struktur

Numerisches Ausschnittmodell des Hubtorverschlusses des Emmsperrwerkes



Dipl.-Ing. Scheffermann, Dr.-Ing. Matheja, FI

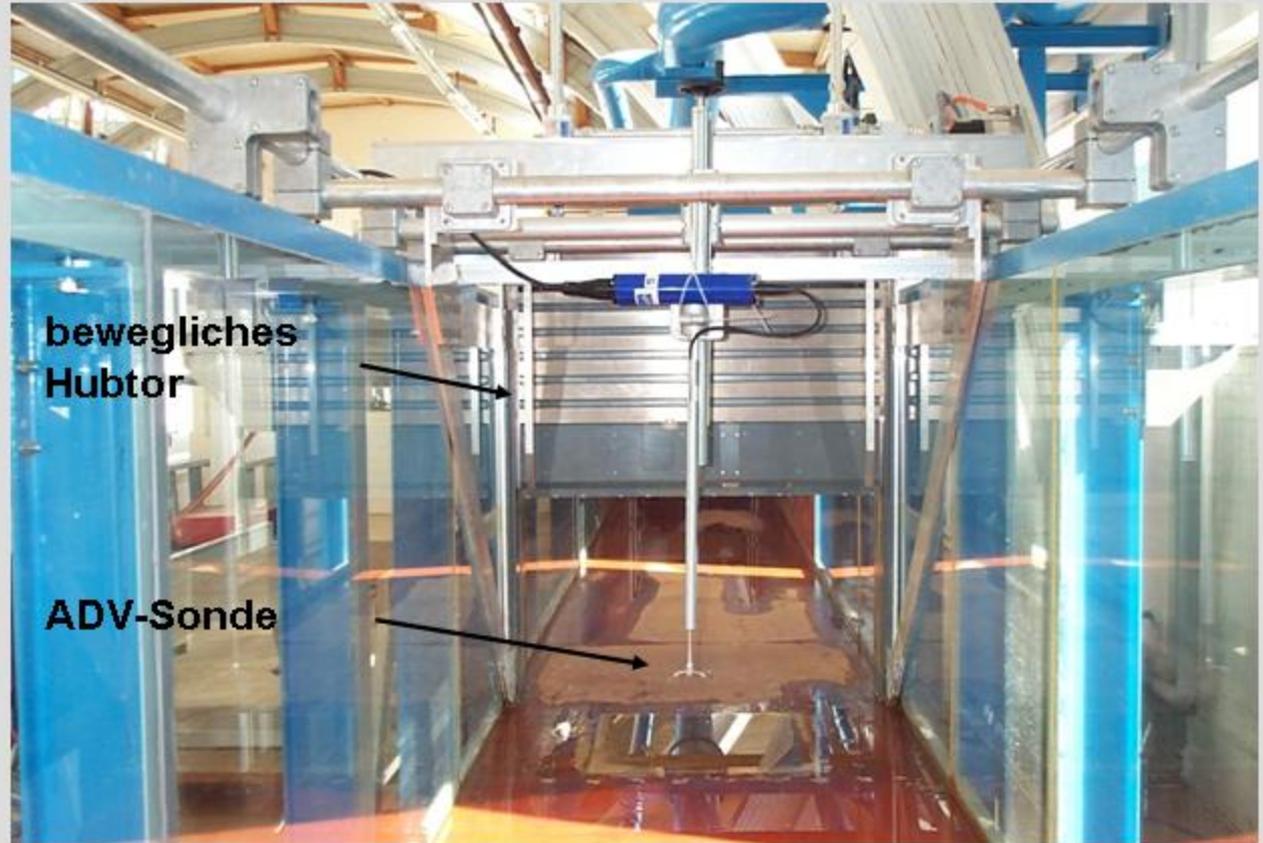


Numerisches Modell des Hubtorverschlusses



Messungen mit einer Acoustic Doppler Velocimeter Sonde:

- dreidimensional
- verfahrbar
- instationär
- hochgenau positionierbar
- Punktmessung



Physikalisches Ausschnittsmodell des Hubtorverschlusses im Maßstab 1: 15

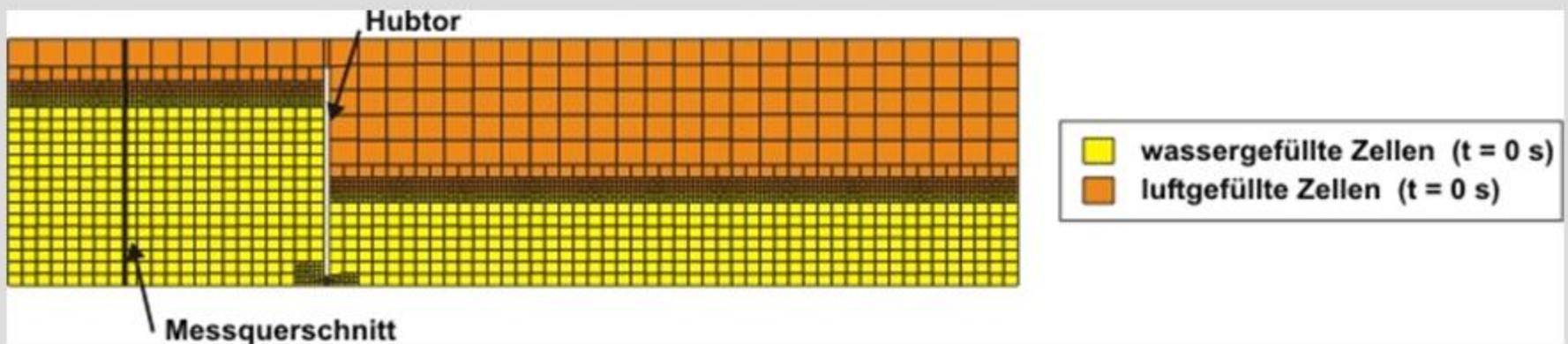
(Strömungsrinne am Franzius-Institut)

Dipl.-Ing. Scheffermann, Dr.-Ing. Matheja, FI

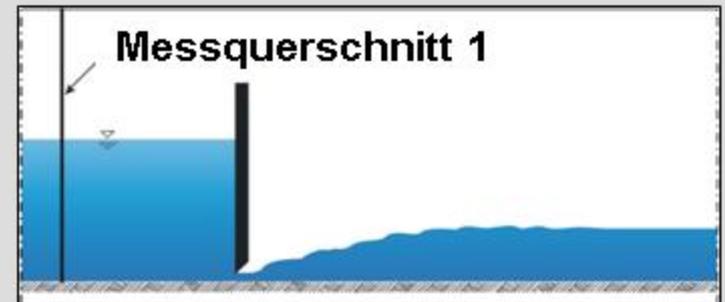
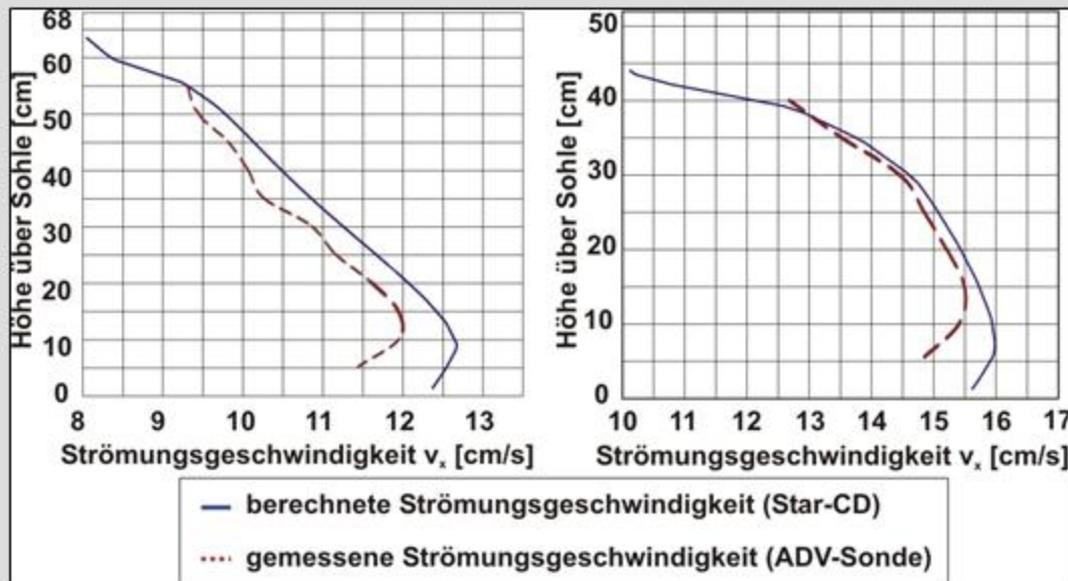


Universität Hannover

Physikalisches Modell des Hubtorverschlusses

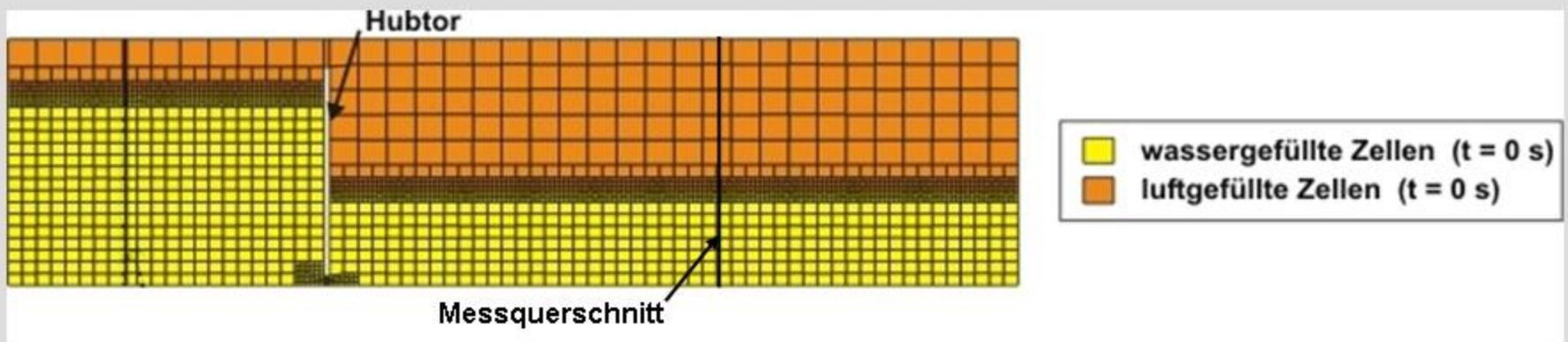


Numerisches Berechnungsgitter

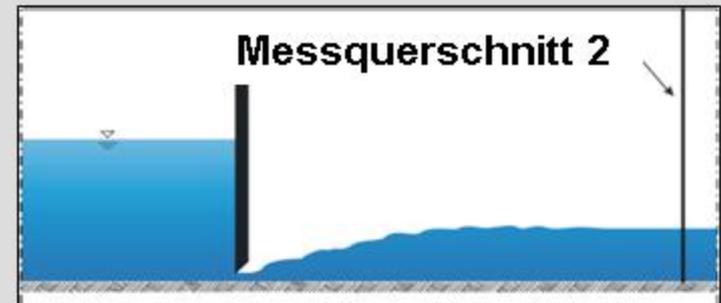
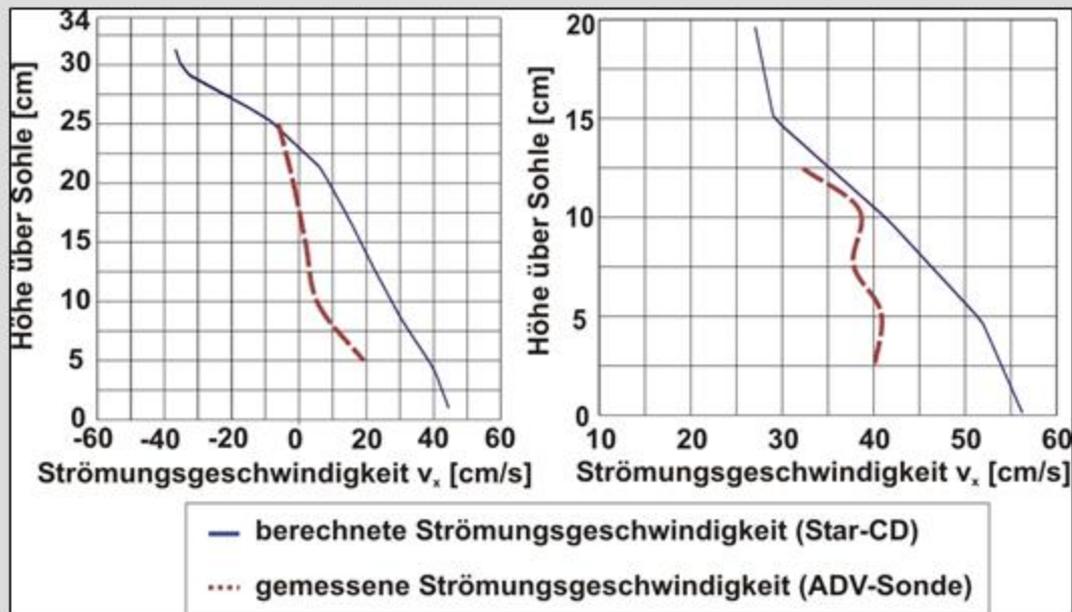


Strömungsgeschwindigkeiten bei strömendem (links) und schießendem (rechts)
Abfluss im Querschnitt 1

Dipl.-Ing. Scheffermann, Dr.-Ing. Matheja, FI



Numerisches Berechnungsgitter



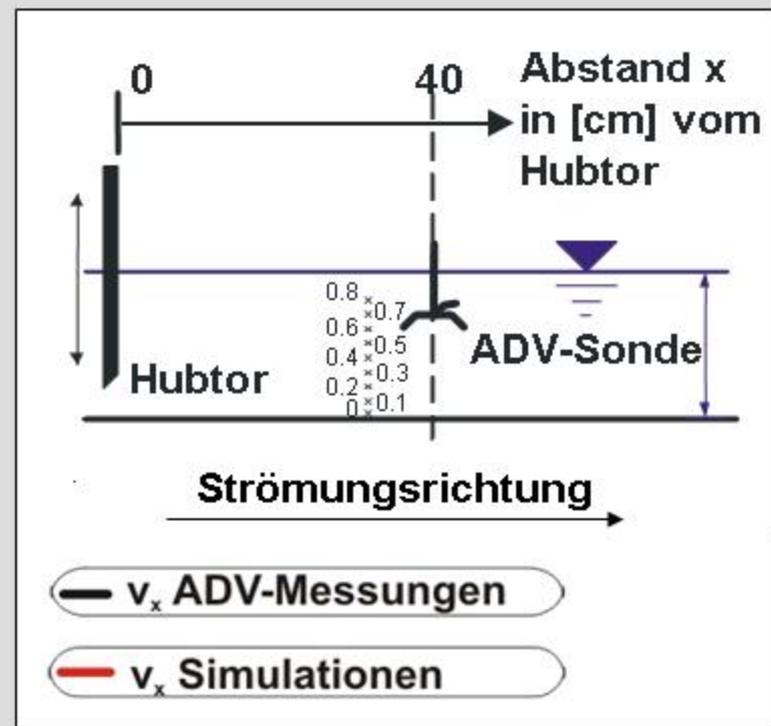
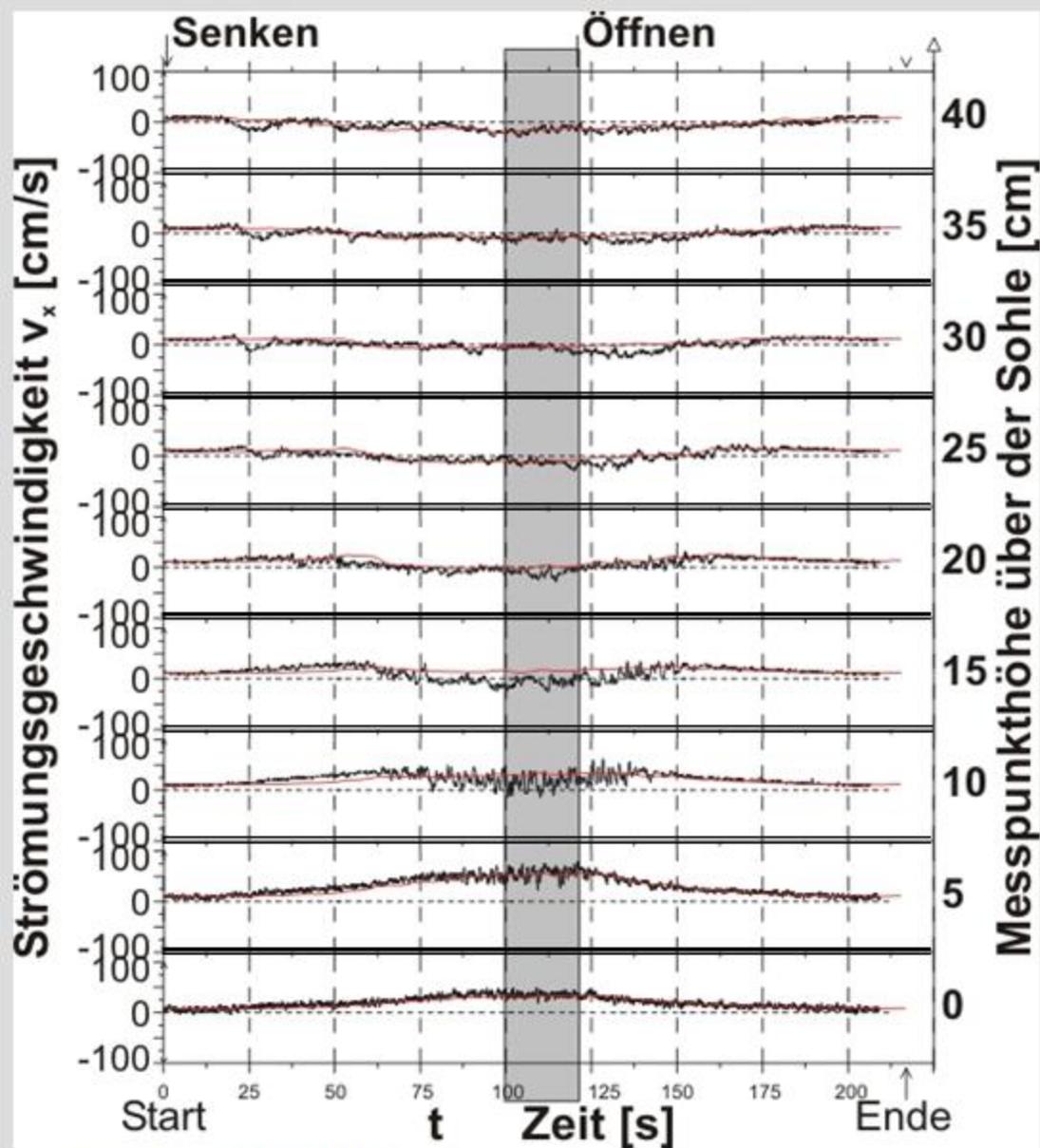
Strömungsgeschwindigkeiten bei strömendem (links) und schießendem (rechts)
Abfluss im Querschnitt 2



Dipl.-Ing. Scheffermann, Dr.-Ing. Matheja, FI

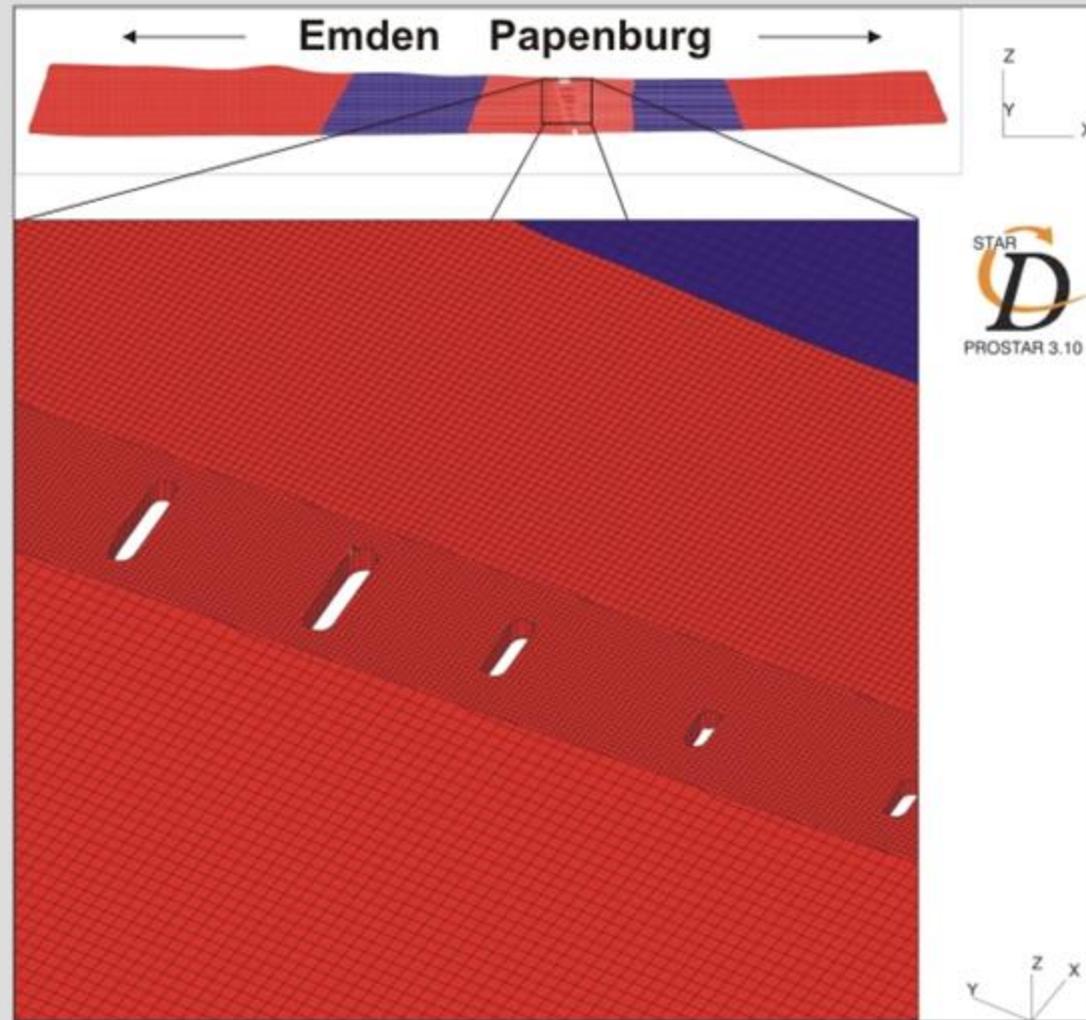


Strömungen im stationären Hubtormodell



Randbedingungen:

- Wassertiefe: 50 cm
- Schließen: 100 s
- Schließdauer: 20 s
- Öffnen: 100 s



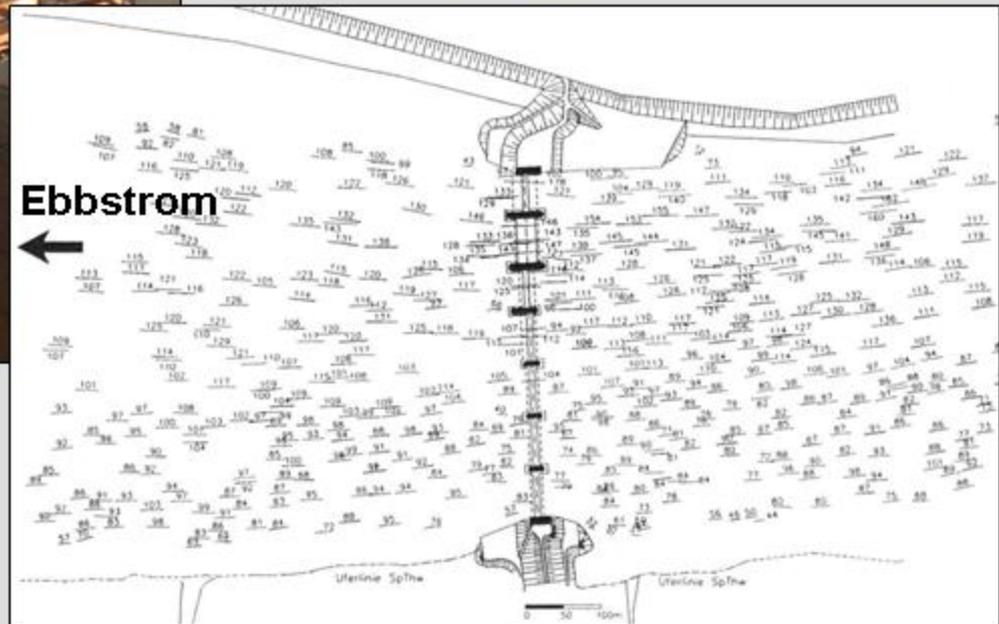
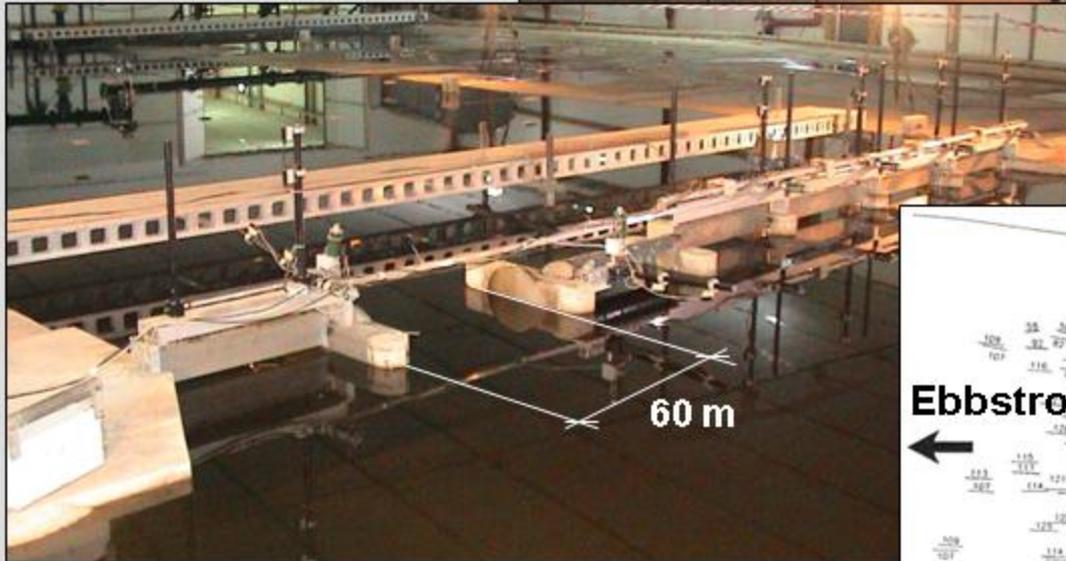
Detail des Berechnungsnetzes für die Simulation des Emssperrwerkes



Dipl.-Ing. Scheffermann, Dr.-Ing. Matheja, FI



Numerisches Modell des Emssperrwerkes



Physikalisches Modell im Maßstab 1:60 des Emssperwerkes am Franzius-Institut in Hannover / Marienwerder mit Ergebnisplot

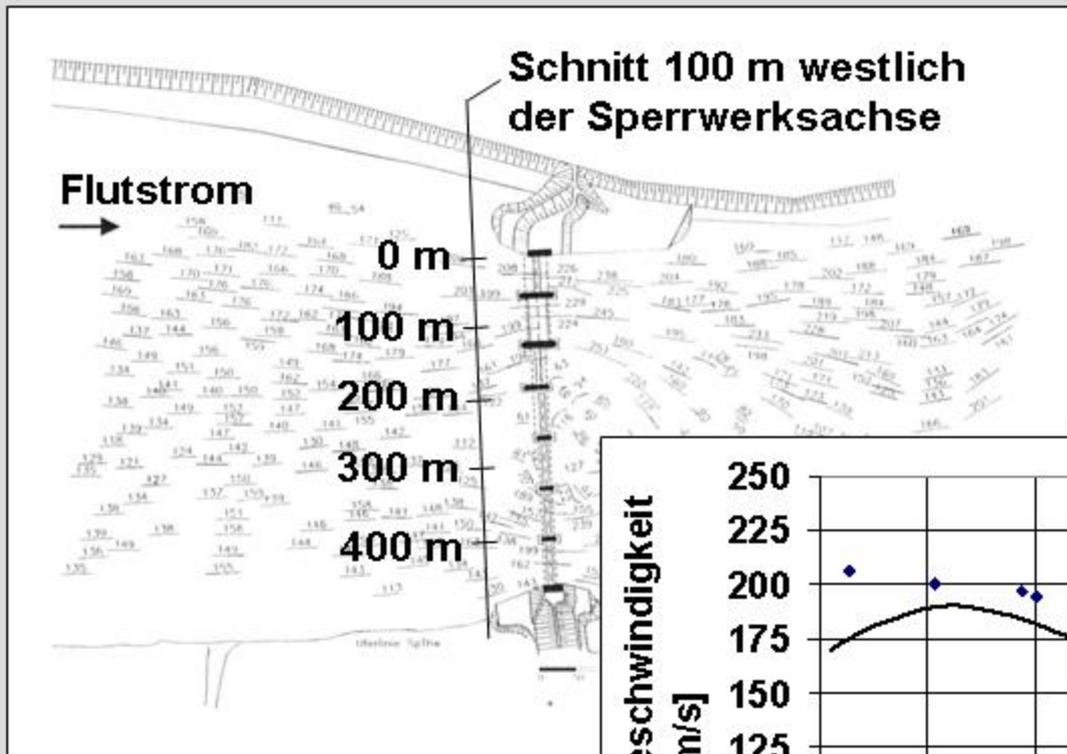


Dipl.-Ing. Scheffermann, Dr.-Ing. Matheja, FI



Universität Hannover

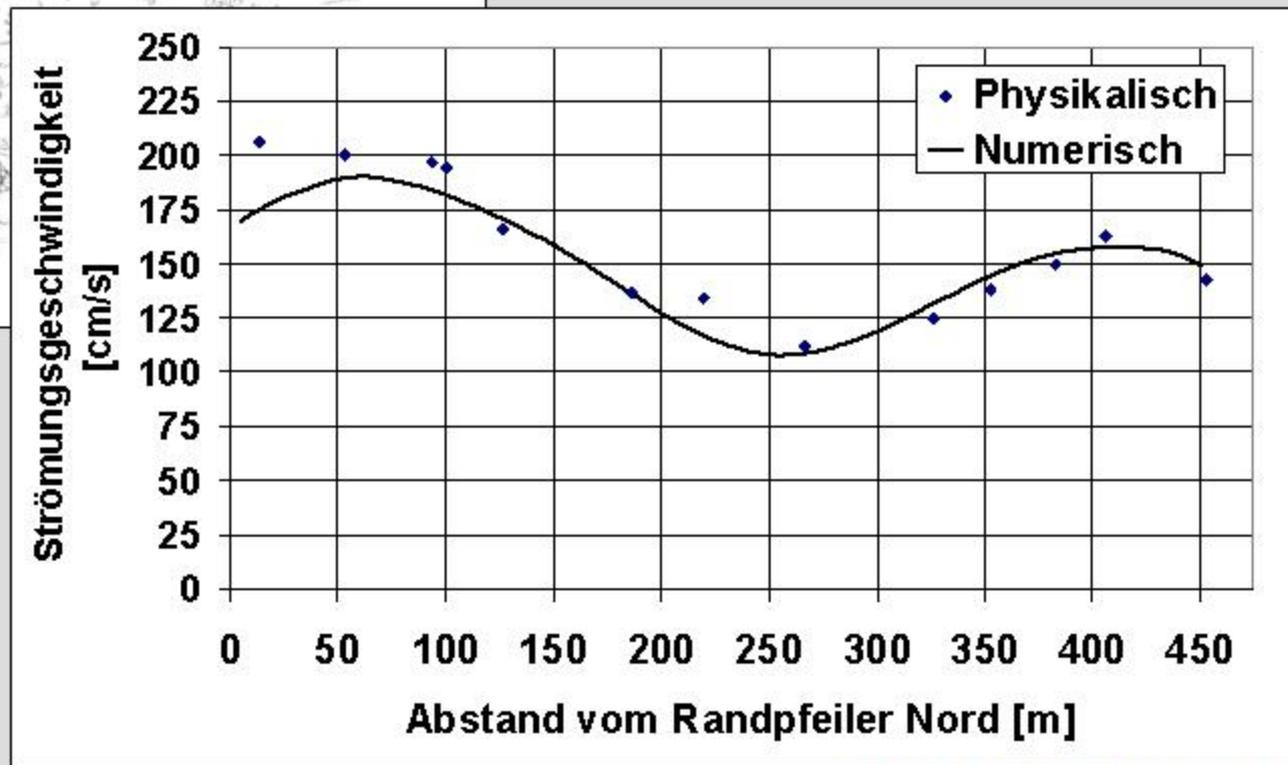
Physikalisches Modell des Emssperwerkes



Im hydraulischen Tidemodell ermittelte Strömungsgeschwindigkeiten

←

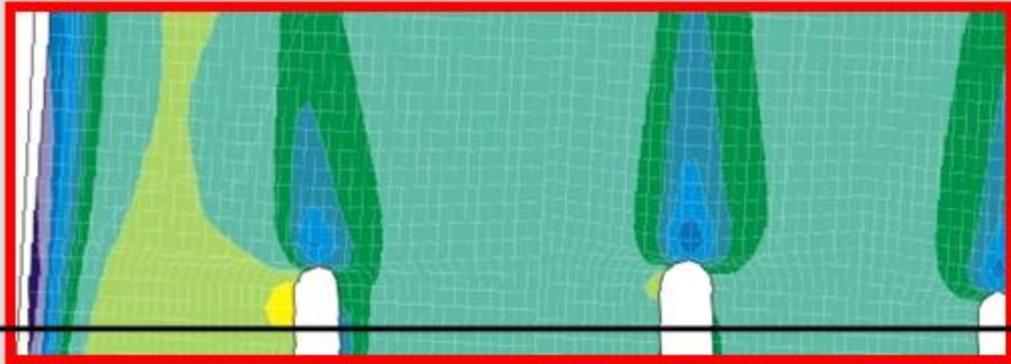
- Randbedingungen:**
- maximaler Flutstrom
 - 2. NÖ und 3. NÖ geschlossen
 - Schnitt 100 Meter östlich der Sperrwerksachse



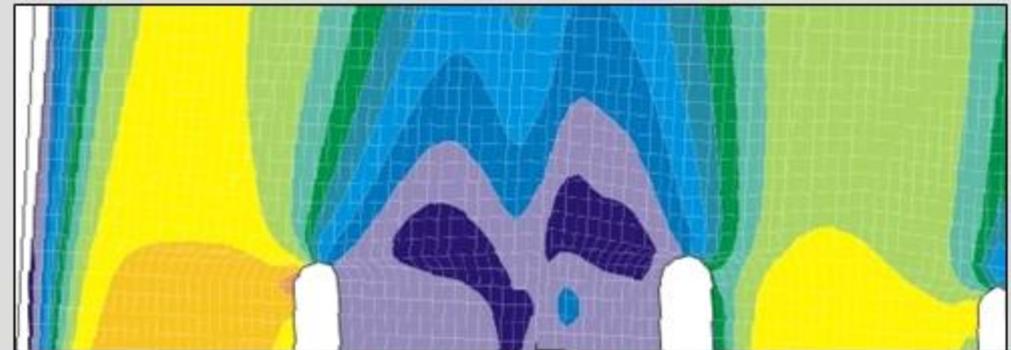
Dipl.-Ing. Scheffermann, Dr.-Ing. Matheja, FI



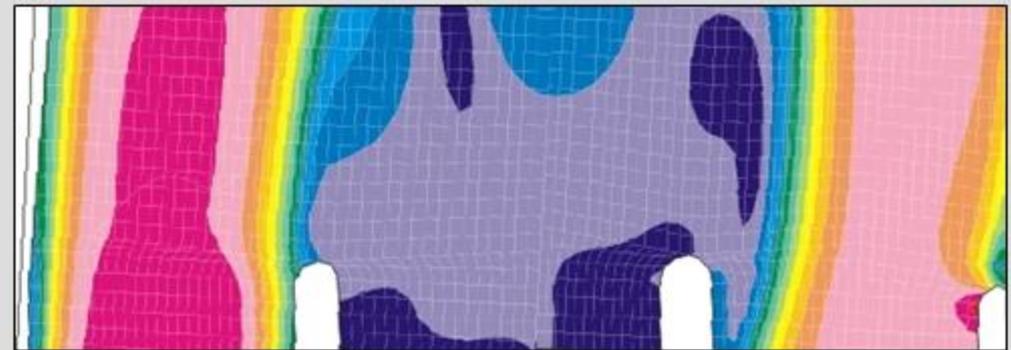
Vergleich Strömung am Emssperrwerk (Phys. – Num. Modell)



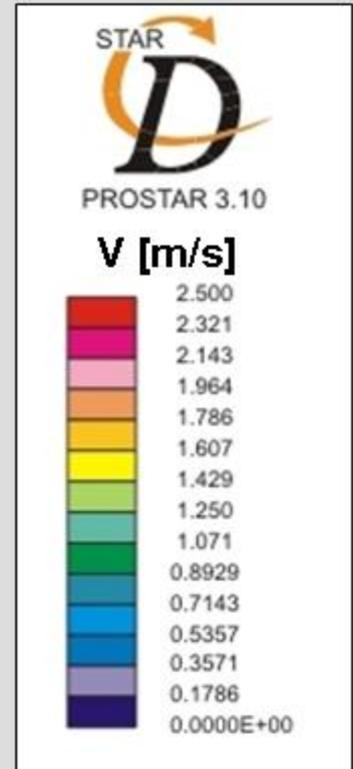
T = 0 min:
HSÖ geöffnet



T = 10 min:
HSÖ halb
geschlossen



T = 20 min:
HSÖ
geschlossen



Simulierte Entwicklung der oberflächennahen Strömungsgeschwindigkeiten in den Sperrwerksöffnungen während des Schließens der Hauptschiffahrtsöffnung

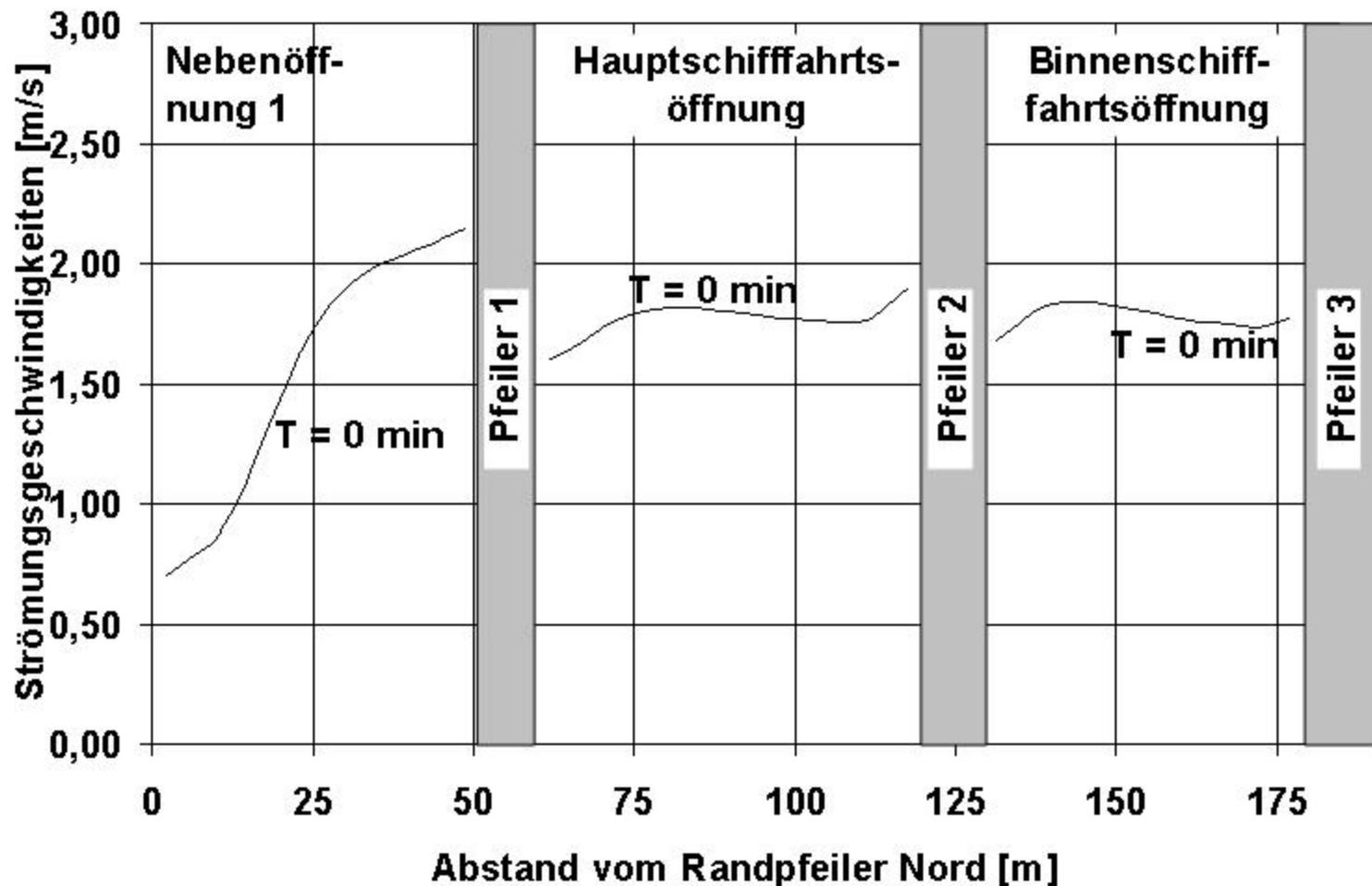


Dipl.-Ing. Scheffermann, Dr.-Ing. Matheja, FI



Universität Hannover

Strömungen im Emssperrwerk während des Schließens



T = 0 min:
HSÖ geöffnet

T = 10 min:
HSÖ halb
geschlossen

T = 20 min:
HSÖ
geschlossen

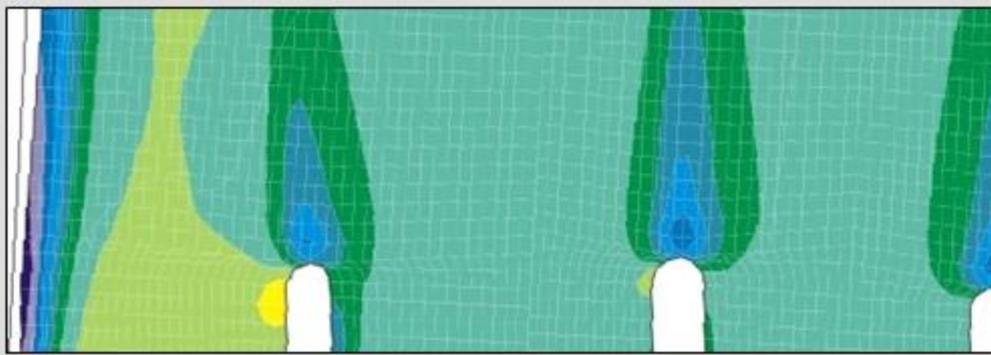
Simulierte Entwicklung der oberflächennahen Strömungsgeschwindigkeiten in den Sperrwerksöffnungen während des Schließens der Hauptschifffahrtsöffnung



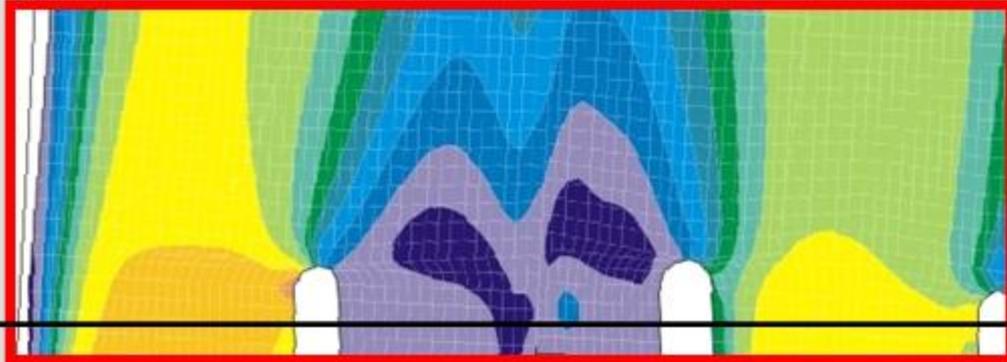
Dipl.-Ing. Scheffermann, Dr.-Ing. Matheja, FI



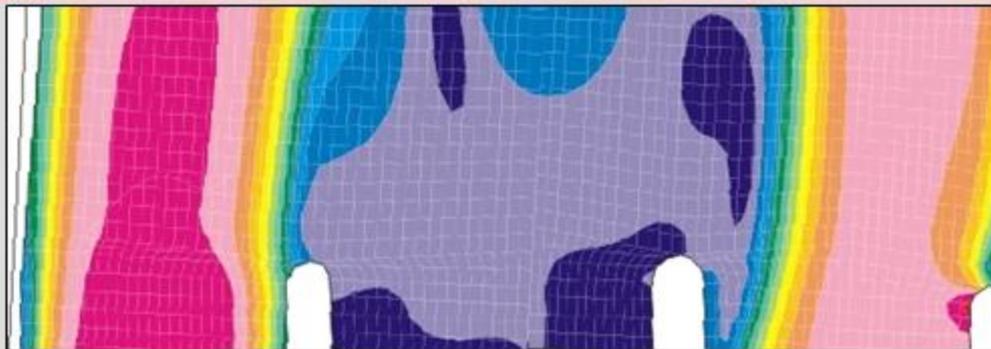
Strömungen im Emssperrwerk während des Schließens



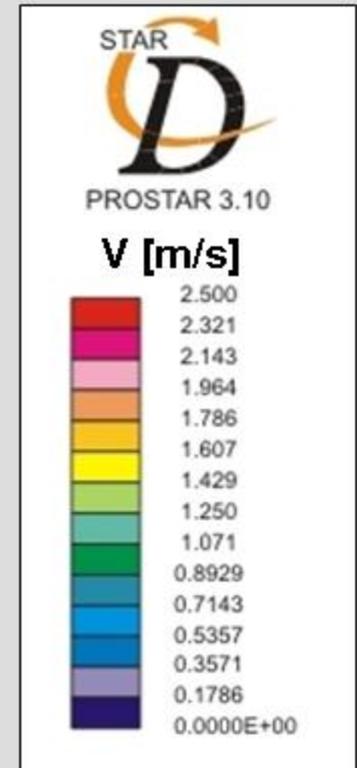
T = 0 min:
HSÖ geöffnet



T = 10 min:
HSÖ halb
geschlossen



T = 20 min:
HSÖ
geschlossen



Simulierte Entwicklung der oberflächennahen Strömungsgeschwindigkeiten in den Sperrwerksöffnungen während des Schließens der Hauptschiffahrtsöffnung

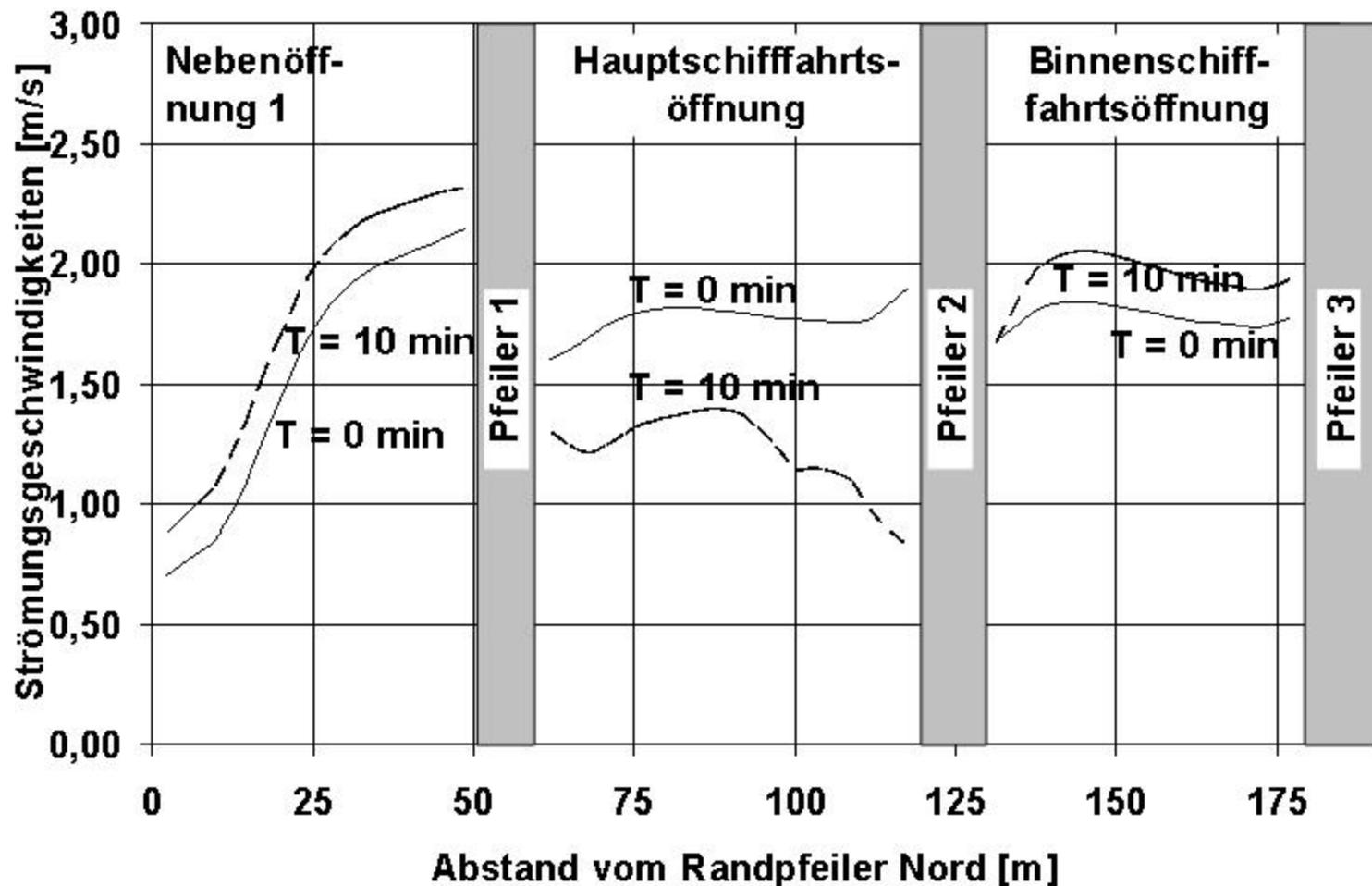


Dipl.-Ing. Scheffermann, Dr.-Ing. Matheja, FI



Universität Hannover

Strömungen im Emssperrwerk während des Schließens



T = 0 min:
HSÖ geöffnet

T = 10 min:
HSÖ halb
geschlossen

T = 20 min:
HSÖ
geschlossen

Simulierte Entwicklung der oberflächennahen Strömungsgeschwindigkeiten in den Sperrwerksöffnungen während des Schließens der Hauptschifffahrtsöffnung

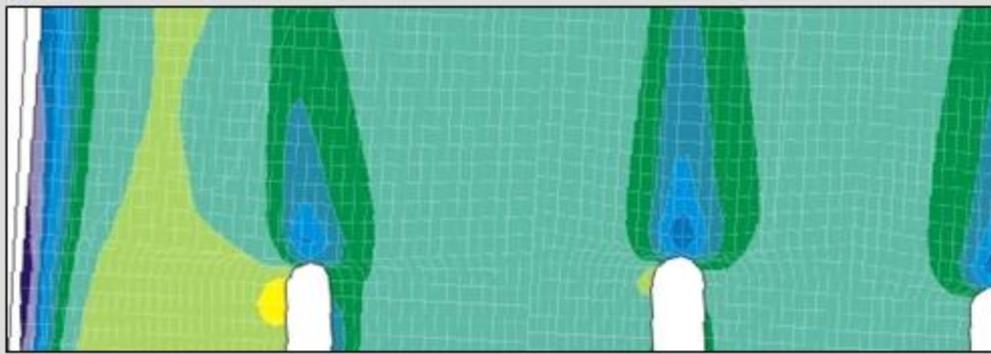


Dipl.-Ing. Scheffermann, Dr.-Ing. Matheja, FI

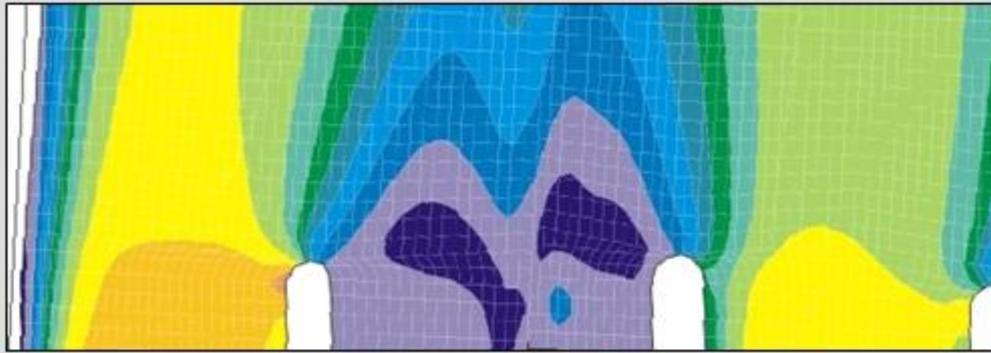


Universität Hannover

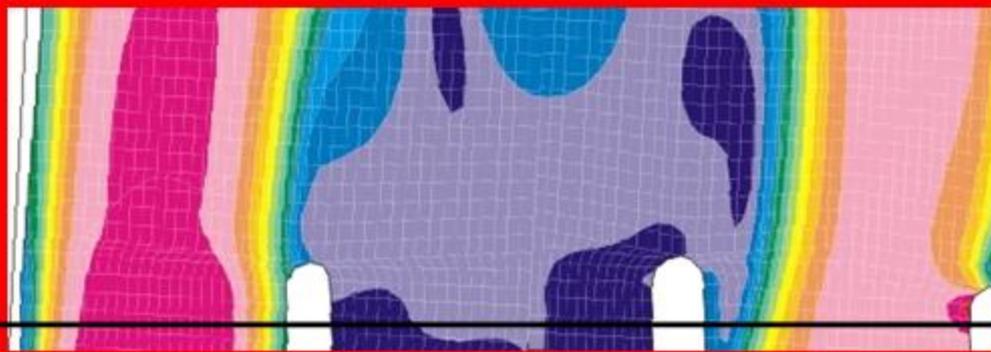
Strömungen im Emssperrwerk während des Schließens



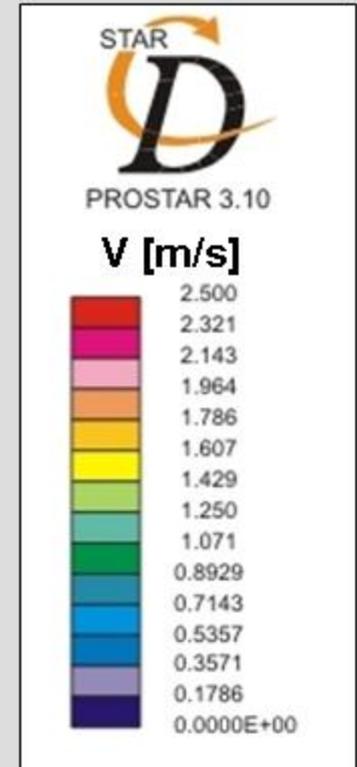
T = 0 min:
HSÖ geöffnet



T = 10 min:
HSÖ halb
geschlossen



T = 20 min:
HSÖ
geschlossen



Simulierte Entwicklung der oberflächennahen Strömungsgeschwindigkeiten in den Sperrwerksöffnungen während des Schließens der Hauptschiffahrtsöffnung

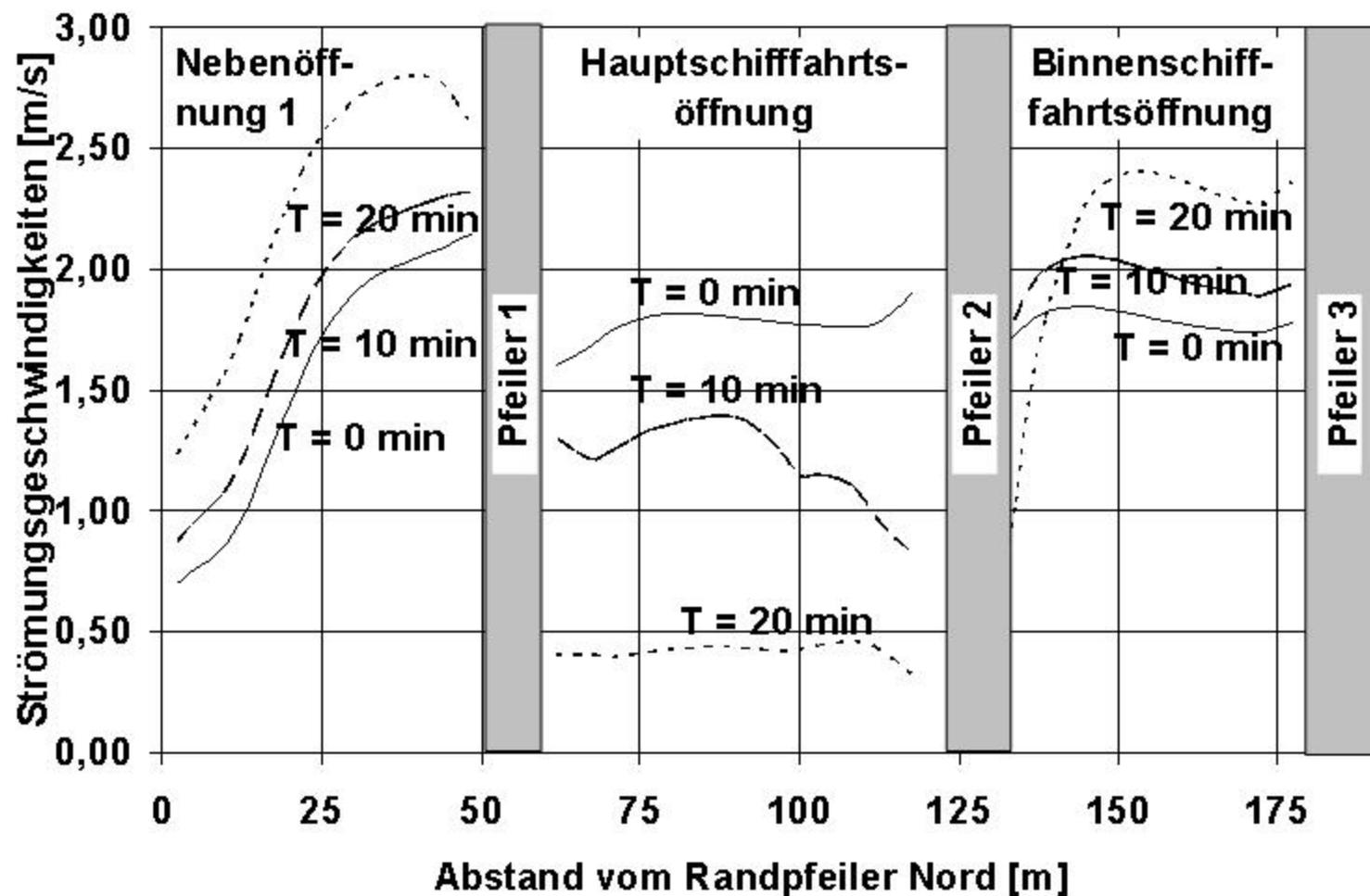


Dipl.-Ing. Scheffermann, Dr.-Ing. Matheja, FI



Universität Hannover

Strömungen im Emssperrwerk während des Schließens



T = 0 min:
HSÖ geöffnet

T = 10 min:
HSÖ halb
geschlossen

T = 20 min:
HSÖ
geschlossen

Simulierte Entwicklung der oberflächennahen Strömungsgeschwindigkeiten in den Sperrwerksöffnungen während des Schließens der Hauptschifffahrtsöffnung



Dipl.-Ing. Scheffermann, Dr.-Ing. Matheja, FI



Strömungen im Emssperrwerk während des Schließens



Aufbau des hydrodynamischen 3D-Modells und Vergleich mit physikalischen Modellversuchen
Dipl.-Ing. J. Scheffermann, Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen



Mechanisches Anströmkörper-Strömungsmesssystem, Entwicklung eines Trägersystems und der Tauchgehäuse
Dipl.-Ing. C. Scheer, Institut für Werkstoffkunde



Erfassung von turbulenten Strömungen mittels PIV-System (Particle-Image-Velocimeter)
Dipl.-Phys. J. Walter, Laser Zentrum Hannover e.V.



Dipl.-Ing. Scheer, IW



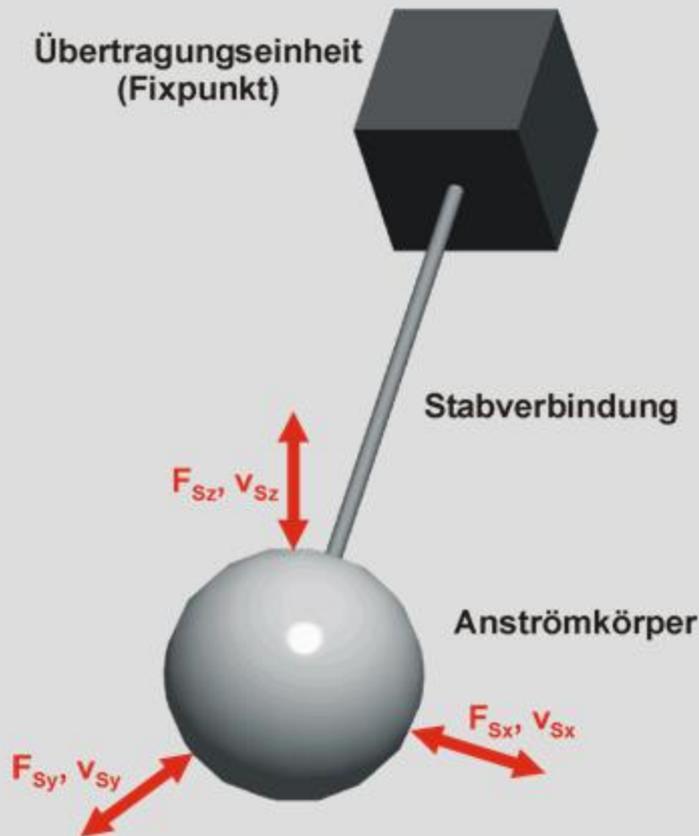
Universität Hannover

Vorstellung der Arbeiten

Aufbau eines Anströmkörper-Strömungsmesssystems:

- **Ermittlung von Referenzwerten für das PIV-Messsystem**
- **Bereitstellung von Messdaten zur Verifizierung von numerischen Modellen**
- **Universell einsetzbares, robustes kostengünstiges Messsystem**
 - **Aufbau und Test von Modellen**
 - **Vergleichsmessungen mit einer ADV-Sonde als Referenz-Messsystem**
 - **Strömungsmessungen am Emssperrwerk**





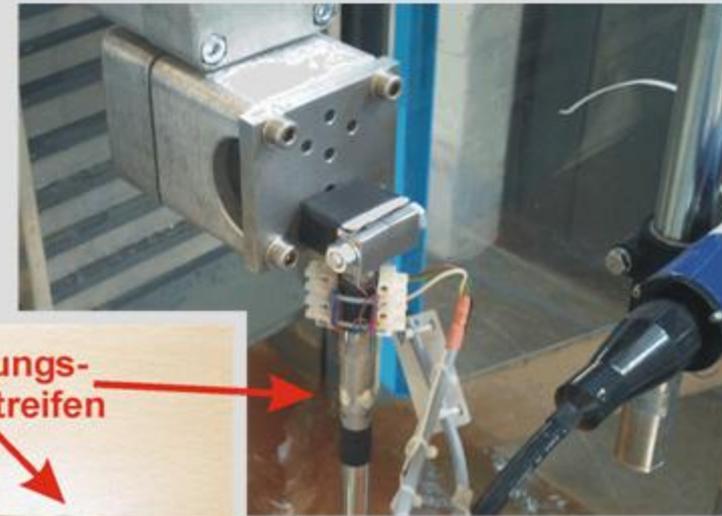
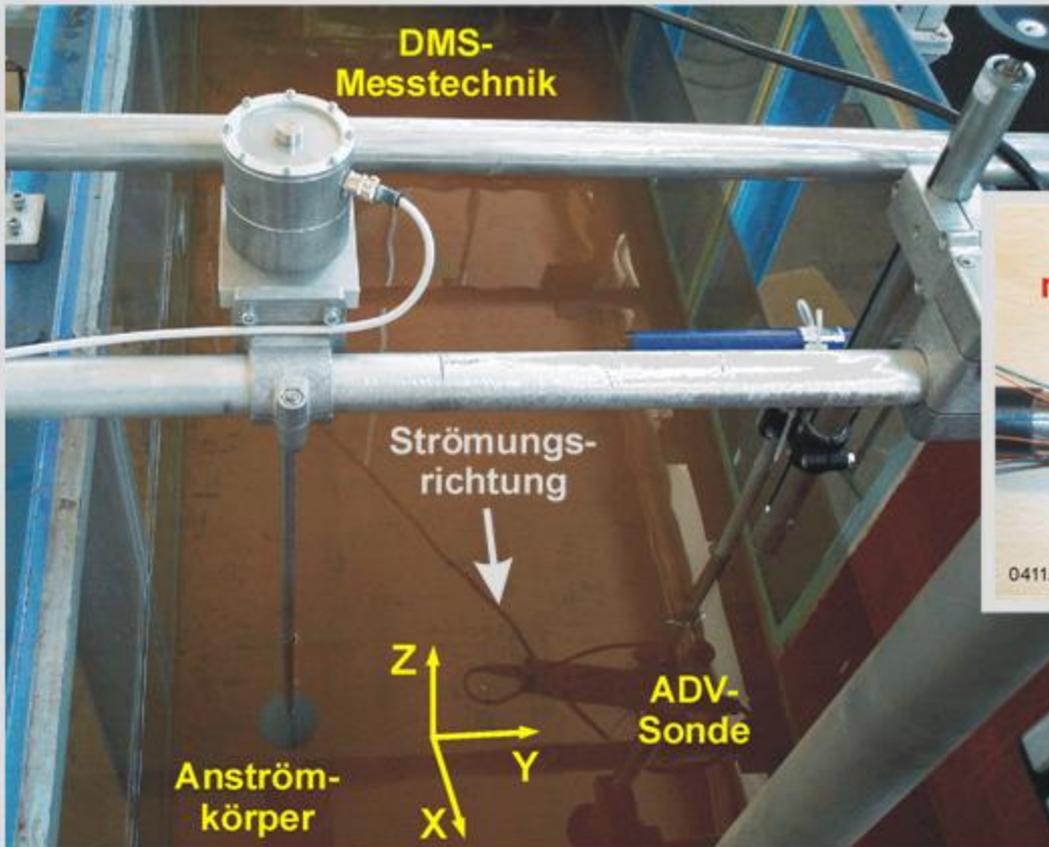
DMS in
wasserdichtem Gehäuse
mit Druckausgleich

variable
Stablänge

variabler
Kugeldurchmesser

Messung der Auslenkung des Anströmkörpers:

- Feste Einspannung der Stabverbindung in der Übertragungseinheit
- Messung der Stabverformung durch die Anströmkraft mittels Dehnungsmessstreifen (DMS)
- Flexibel anzupassen an unterschiedliche Einsatzfälle



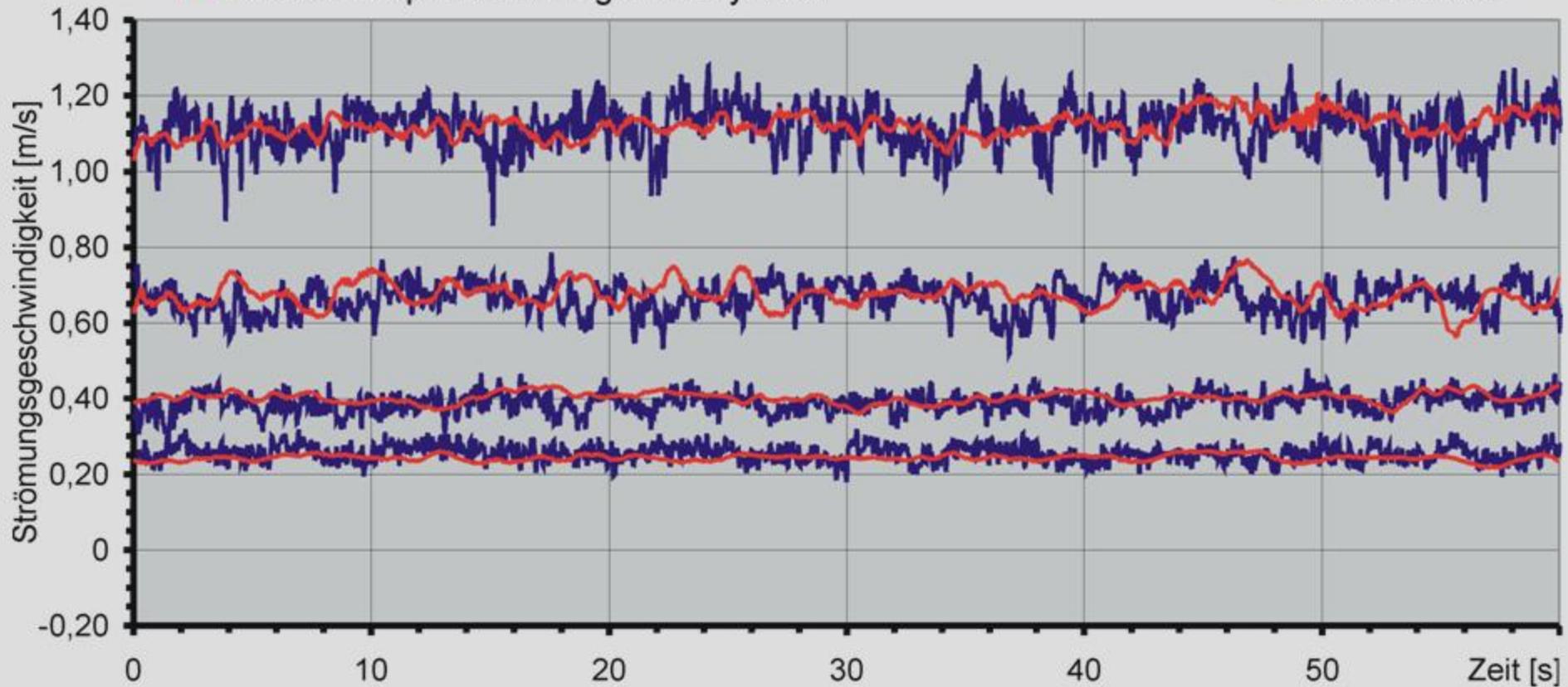
Dipl.-Ing. Scheer, IW



Strömungsmesssystem mit DMS-Messtechnik

— Anströmkörper-Strömungsmesssystem

— ADV-Sonde



- **Gute Übereinstimmung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit mit den Messwerten der ADV-Sonde, Erfassung von Turbulenzen**
- **Schwankungsbreite nimmt mit der Strömungsgeschwindigkeit zu**
- **Mittelung der Signale entsprechend dem Systemverhalten**

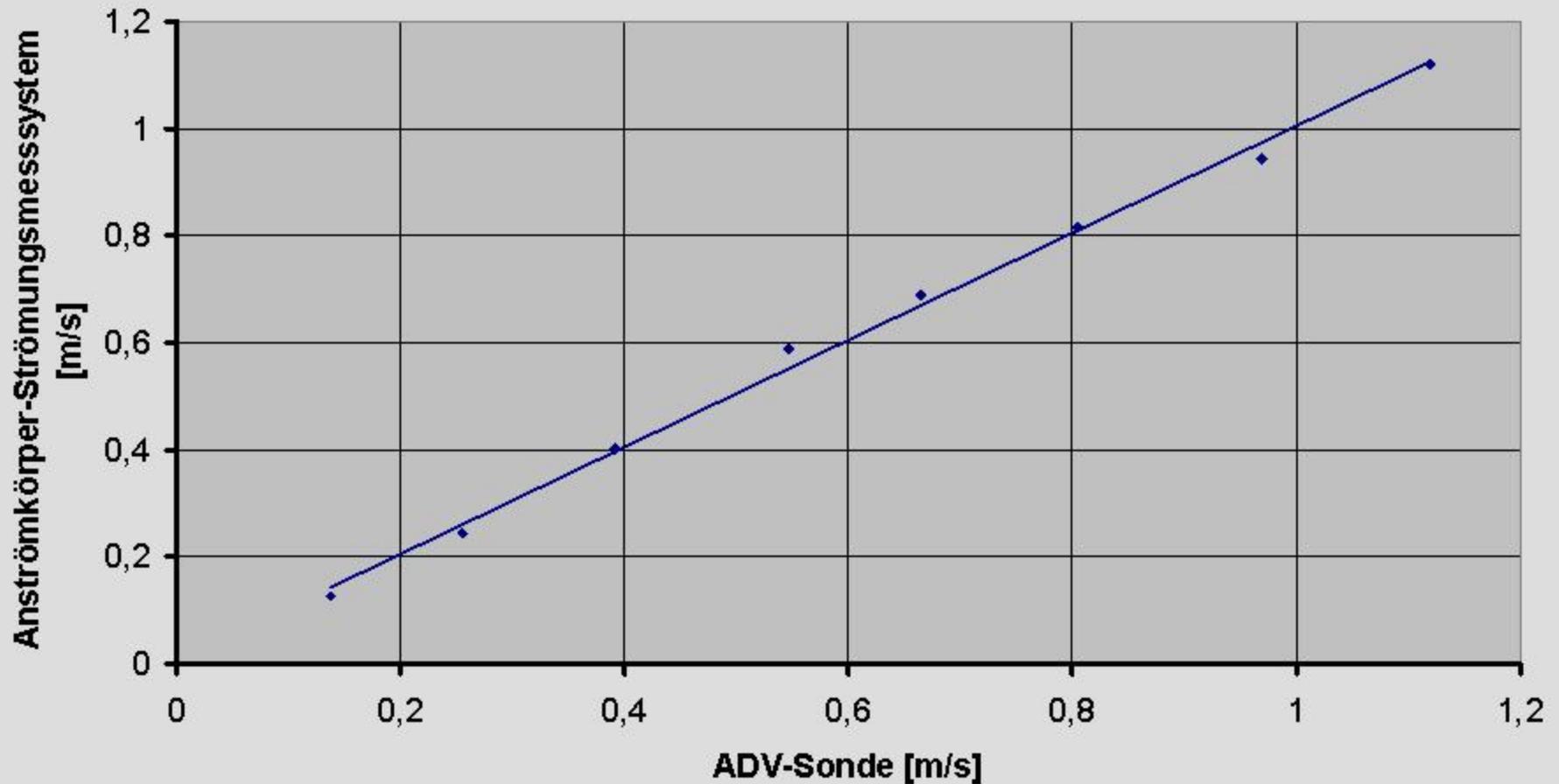


Dipl.-Ing. Scheer, IW



Universität Hannover

DMS-Messtechnik - ADV-Sonde in Hauptströmungsrichtung



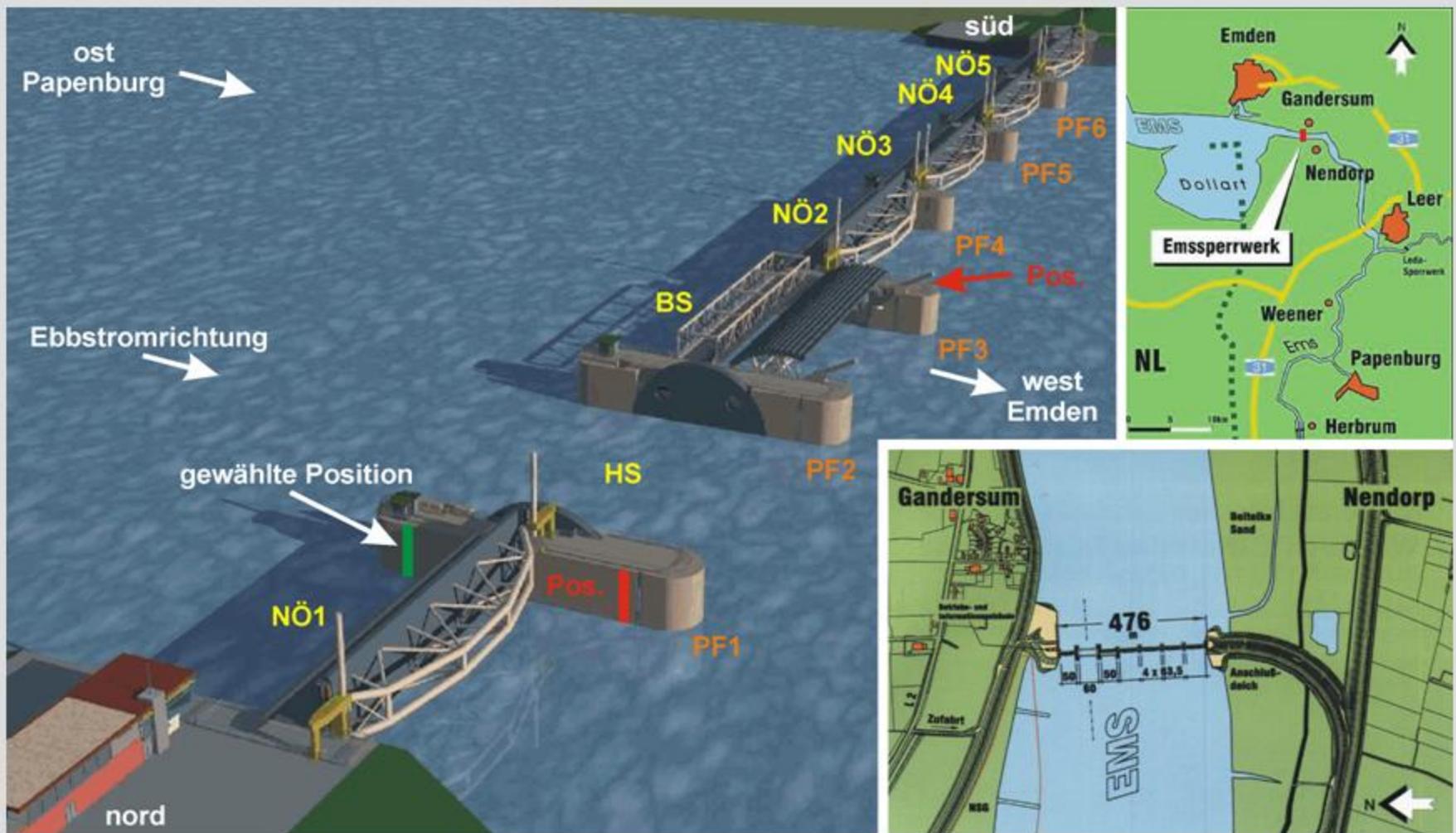
- Linearer Zusammenhang zwischen ADV-Sonde und Anströmkörper-Strömungsmesssystem

Trägersystem und Tauchgehäuse:

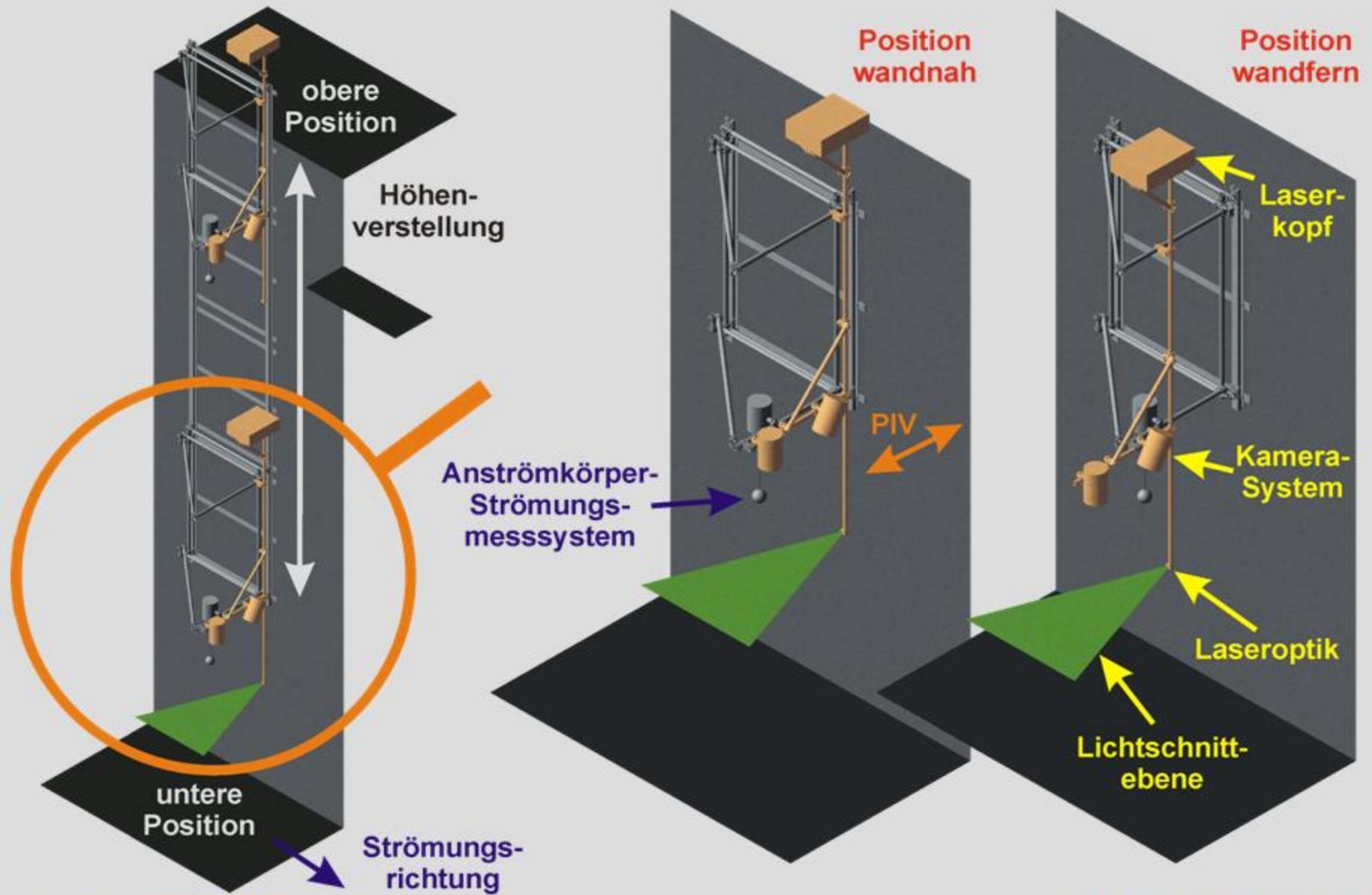
Erprobung der Strömungsmesstechniken unter Naturbedingungen am Fallbeispiel Küstenschutzbauwerk Emssperrwerk:

- Robuste, sichere Befestigung der Messsysteme an Pfeilern des Sperrwerks
- Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Einflüssen, wie Strömung, Treibgut, etc.
- Flexible Positionierung des Messsystems zur Anpassung an unterschiedliche Betriebsbedingungen, wie Tidenhub und Öffnen bzw. Schliessen der Tore
- Konstruktion eines Trägersystems und der Tauchgehäuse
- Anbau des Trägersystems am Emssperrwerk





- Keine Behinderung des Sperrwerkbetriebs
- Position von der Betriebskanzel gut einsehbar
- Für Montage- und Wartungsarbeiten gut erreichbar



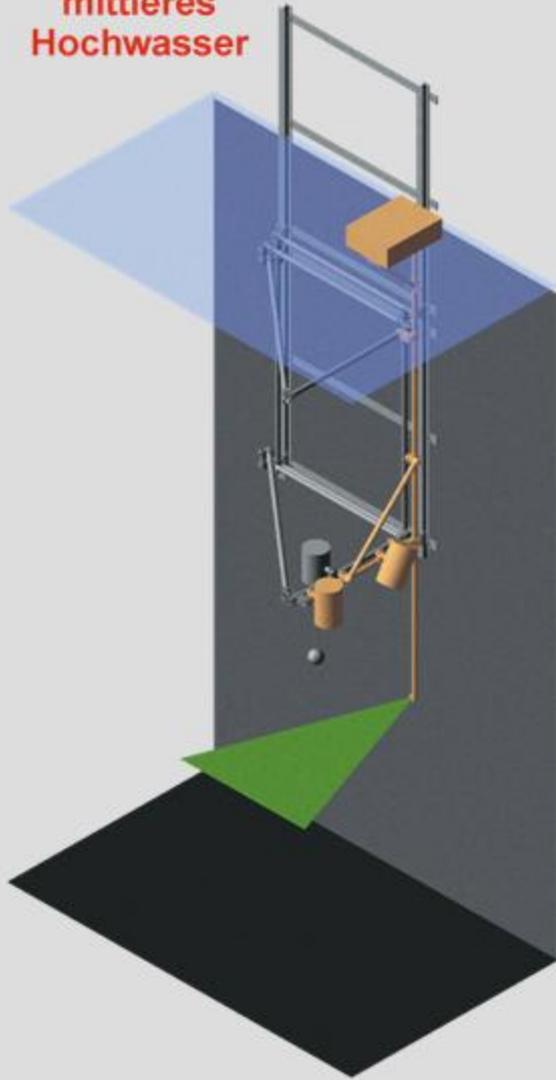
Dipl.-Ing. Scheer, IW



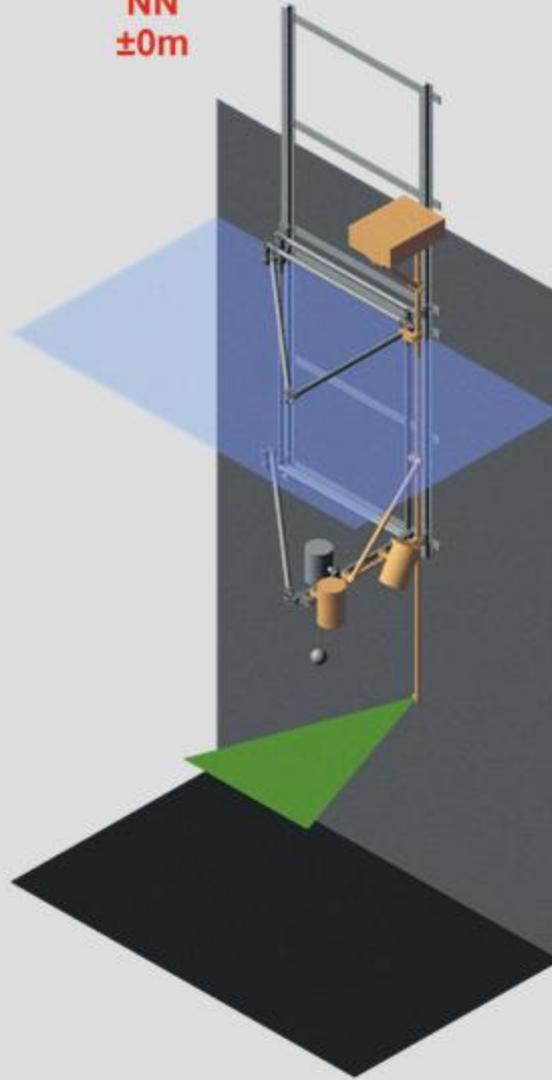
Universität Hannover

Trägersystem, Positionierung der Messsysteme

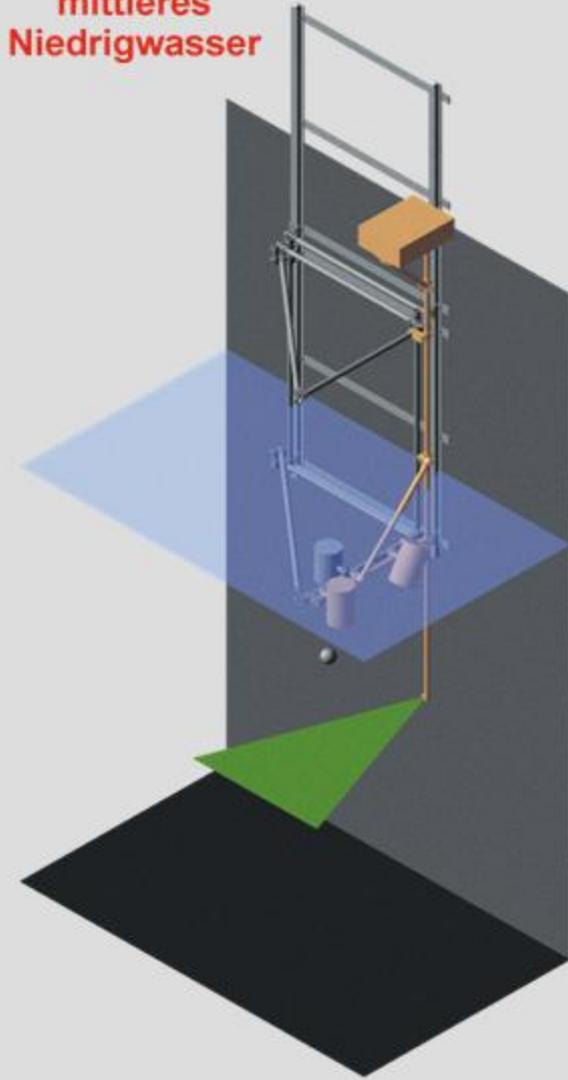
mittleres
Hochwasser



NN
 $\pm 0m$



mittleres
Niedrigwasser



Dipl.-Ing. Scheer, IWM



Universität Hannover

Strömungsmesssystem unter Tideneinfluss



- Positionierung der Messsysteme in unterschiedlichen Wassertiefen und Abständen vom Pfeiler

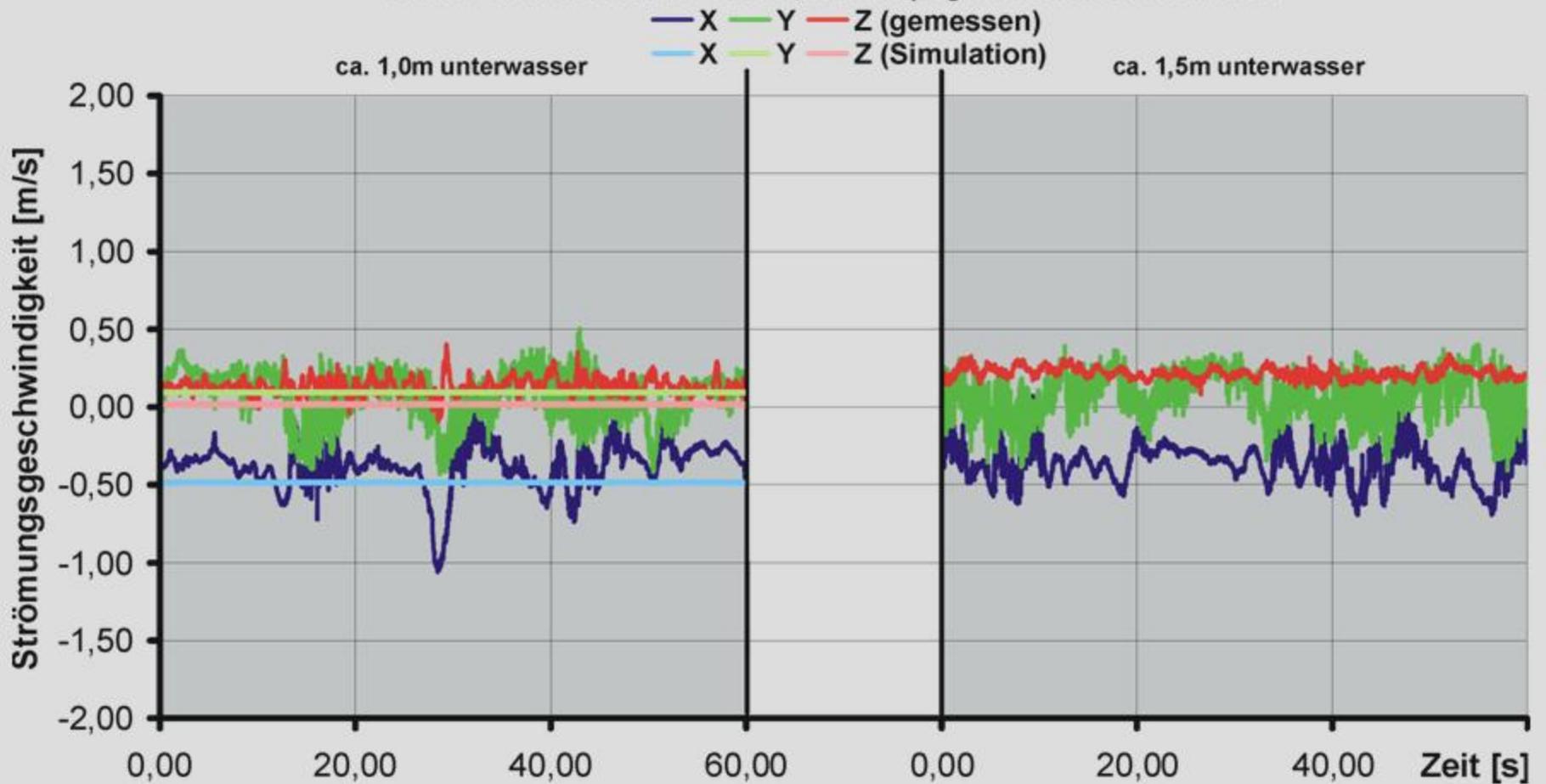


Dipl.-Ing. Scheer, IWH



Strömungsmesssystem am Pfeiler 1

Emssperrwerk Gandersum, Pfeiler1 Nebenöffnung1
28.10.04 15:40 ablaufendes Wasser, Wasserspiegel ca. 1m unter Hochwasser



- Dynamische Anteile durch Wirbelbildung
- Gute Übereinstimmung des Mittelwerts in X- und Y-Richtung mit der Simulation (Messung mit 25Hz – Simulation mit 0,2Hz)



Dipl.-Ing. Scheer, IWH



Strömungsmessungen am Pfeiler 1



Aufbau des hydrodynamischen 3D-Modells und Vergleich mit physikalischen Modellversuchen
Dipl.-Ing. J. Scheffermann, Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen



Mechanisches Anströmkörper-Strömungsmesssystem, Entwicklung eines Trägersystems und der Tauchgehäuse
Dipl.-Ing. C. Scheer, Institut für Werkstoffkunde



Erfassung von turbulenten Strömungen mittels PIV-System (Particle-Image-Velocimeter)
Dipl.-Phys. J. Walter, Laser Zentrum Hannover e.V.



Dipl.-Phys. Walter, LZH



Universität Hannover

Vorstellung der Arbeiten

3D-PIV Strömungsmesssystem:

- Ermittlung einer Datenbasis für Modellsimulation
- Bereitstellung von Messdaten zur Verifizierung von numerischen Modellen

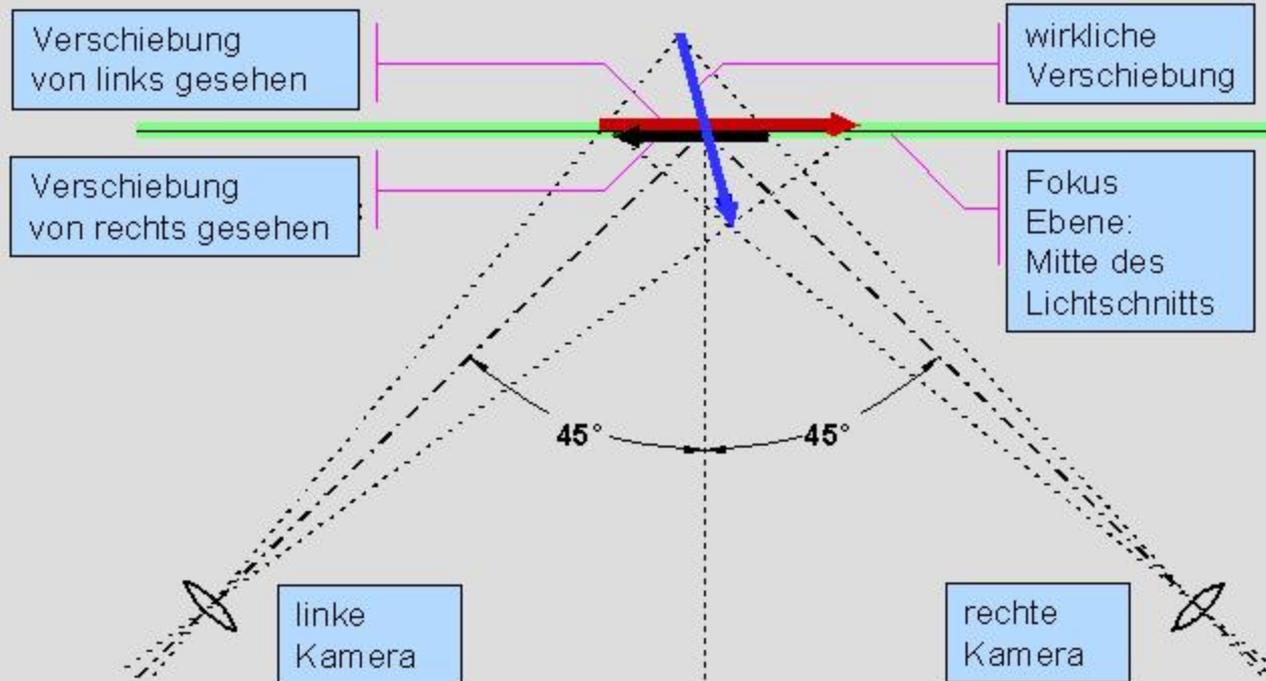
Stand der Technik:

- Meerestechnik: akustische Verfahren, Durchflusszähler, Staudrucksonden
- lasergestützte Systeme in Wasserbaulaboren und Schlepptanks

Anforderungsprofil des 3D-PIV Messsystems:

- ausreichend große Lichtschnittebene $> 800 \times 600$ mm
- geeignetes Gesichtsfeld $> 600 \times 400$ mm
- optimierter Abstand Kameras / Lichtschnittebene > 2 m
- berührungsloser, wartungsarmer Dauereinsatz
- gutes Signal-Rausch Verhältnis 20-25 dB
- Geringe Beeinflussung durch Blasen und Wellen < 5 %
- geeignet in Bereichen mit hoher Biomasseproduktion und Sedimentlasten

Verfahrensprinzip eines 3D-PIV-Systems



Die reale 3D Bewegung ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) ergibt sich aus zwei 2D Verschiebungen, die von der linken und rechten Kamera aufgenommen werden

Quelle: Dantec Dynamics

Belichtung

Streuung

Aufnahme

Messung

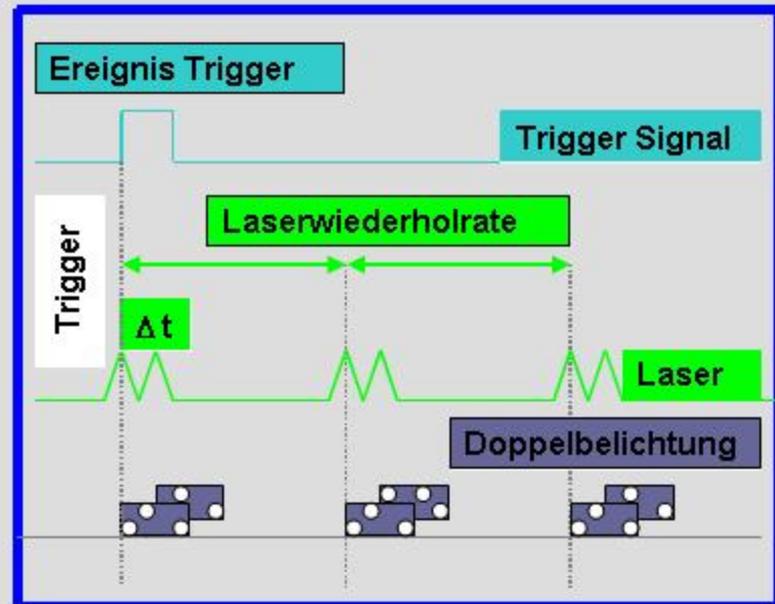
Auswertung

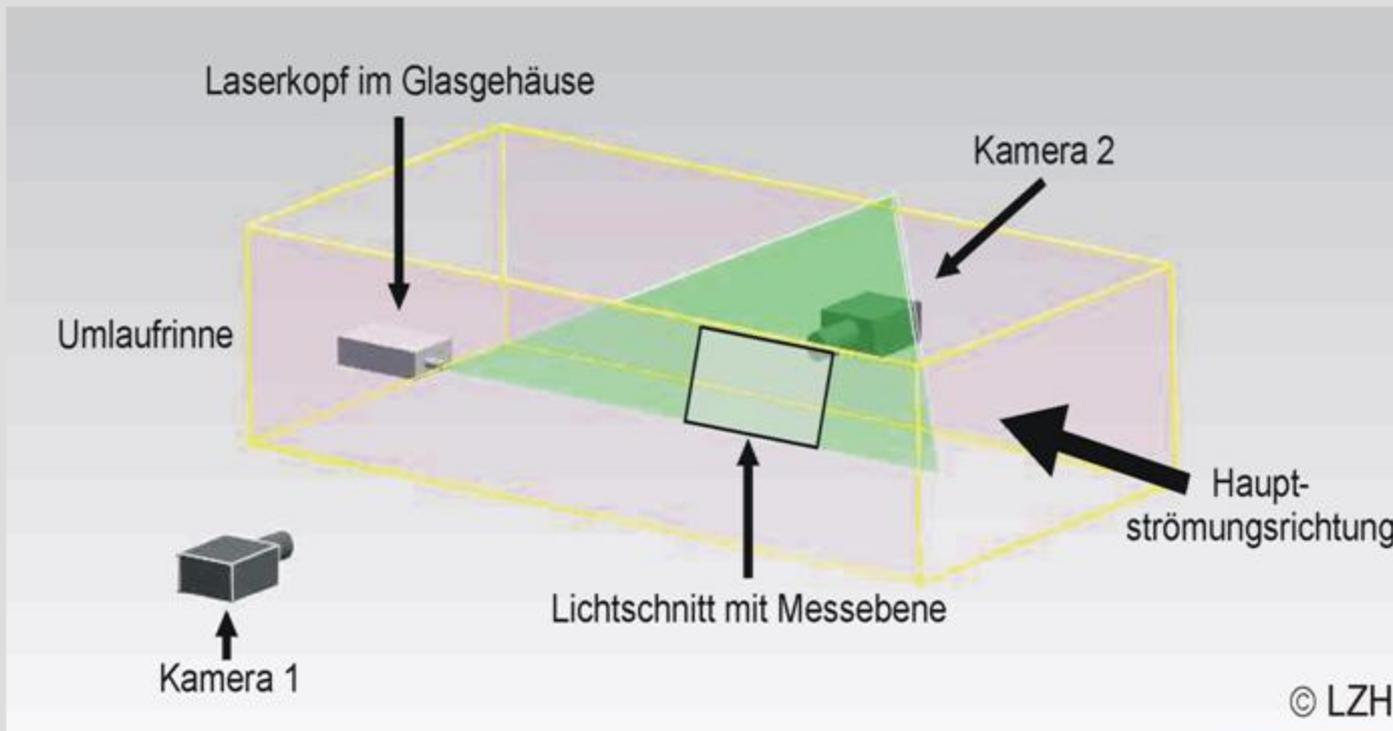
Pulsenergie 60-90 mJ

Pulslänge 3-5 ns

Belichtung 100 μ s – 10 ms

Pulsfrequenz 15 Hz





Tauchgehäuse mit Laserkopf

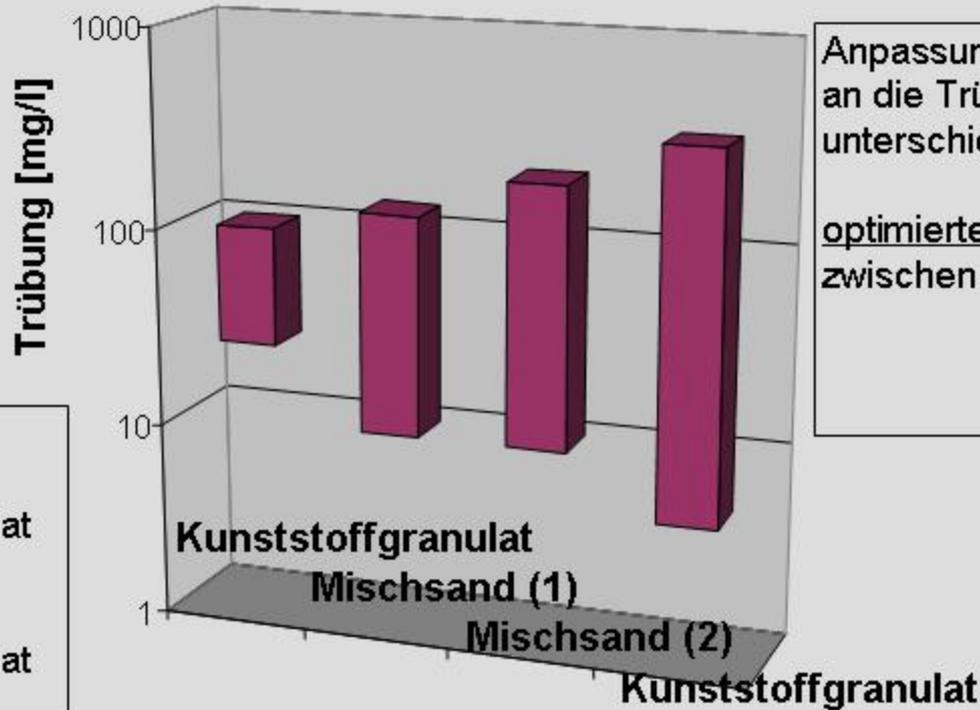
Periskopbefestigung mit Laserkopf



Dipl.-Phys. Walter, LZH



Messtechnik / Periskop

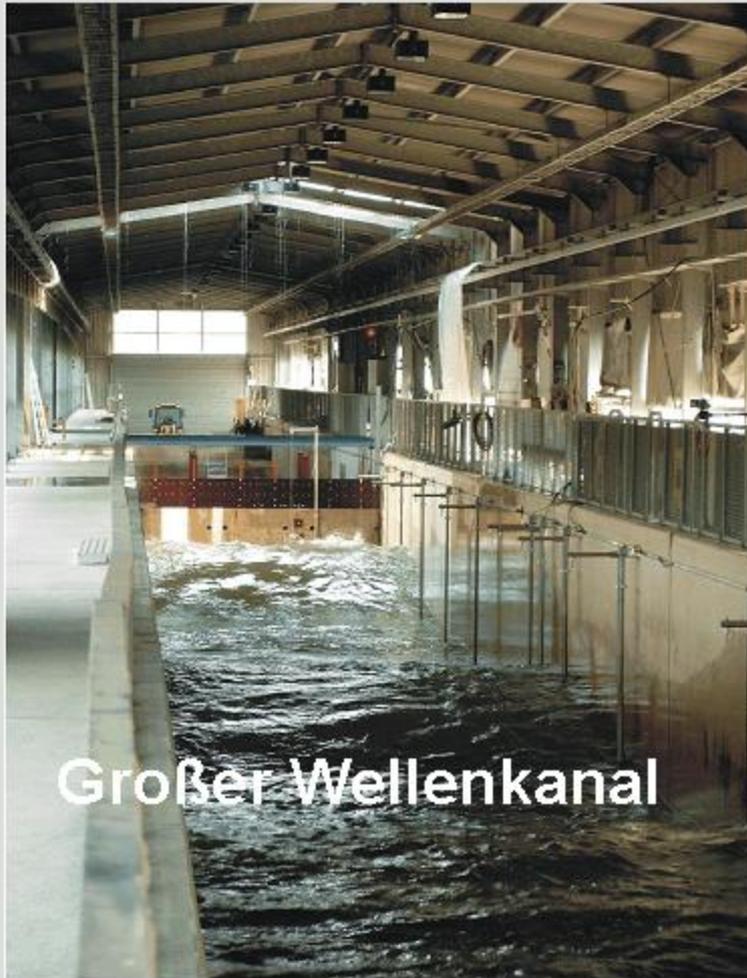


Anpassung der Parameter
an die Trübung bei
unterschiedlichem Seeding

optimierte Pulsenergien
zwischen 60 und 100 mJ

Mischsand (1):
Feinsand ca. 70 %
Rest Kunststoffgranulat
Mischsand (2)
Feinsand ca. 30 %
Rest Kunststoffgranulat

Seeding	mittl. Durchmesser [mm]	Pulsenergie [mJ]	Dichte [g/ml]	Bezugsquelle
Feinsand	0,4	100-120	2,6	Natur
Kunststoffgranulat	1,2	50-60	1,2	unbekannt
Vestosint®	0,06	90-100	1,05	Degussa

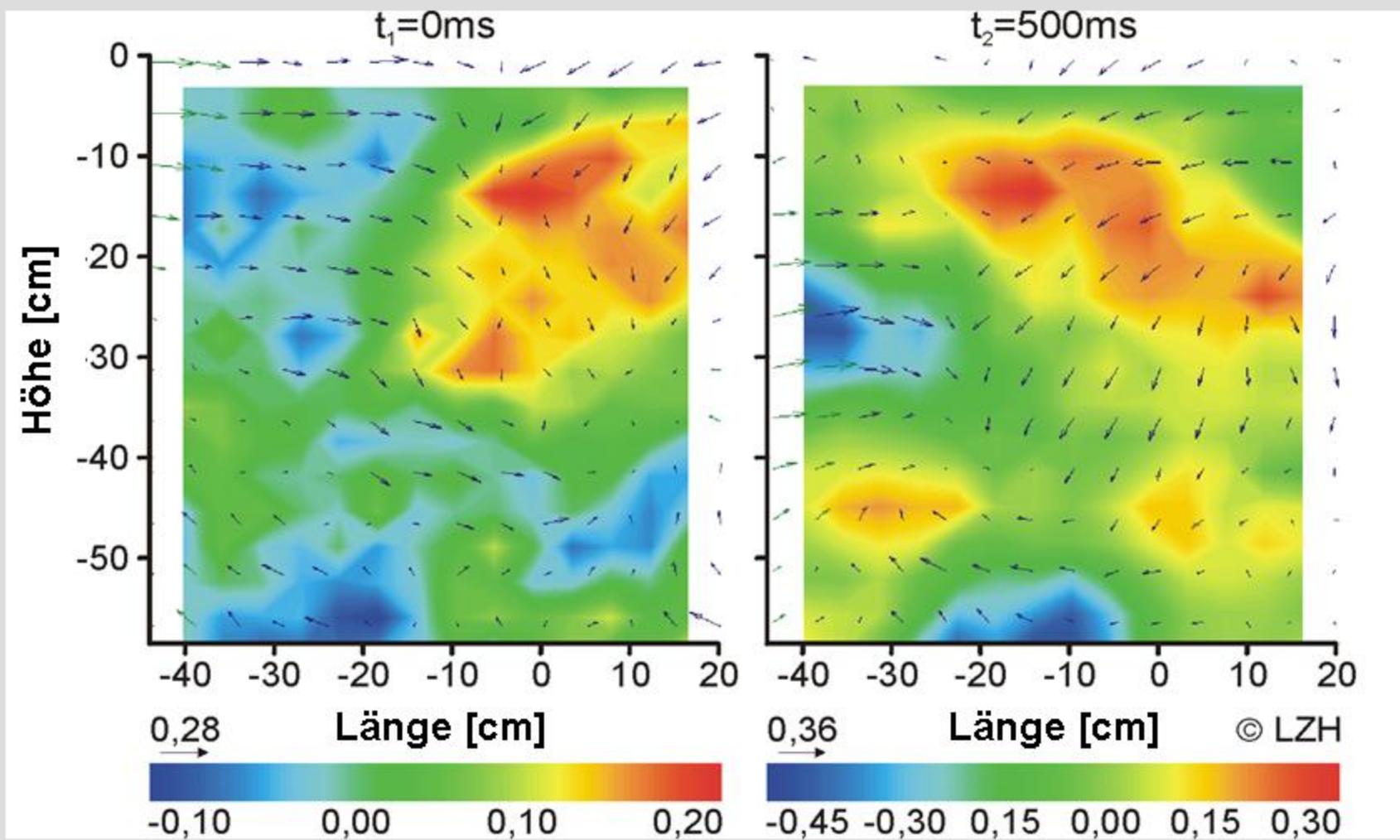


links: Gesamtansicht GWK



oben: Detail Messsystem

© LZH



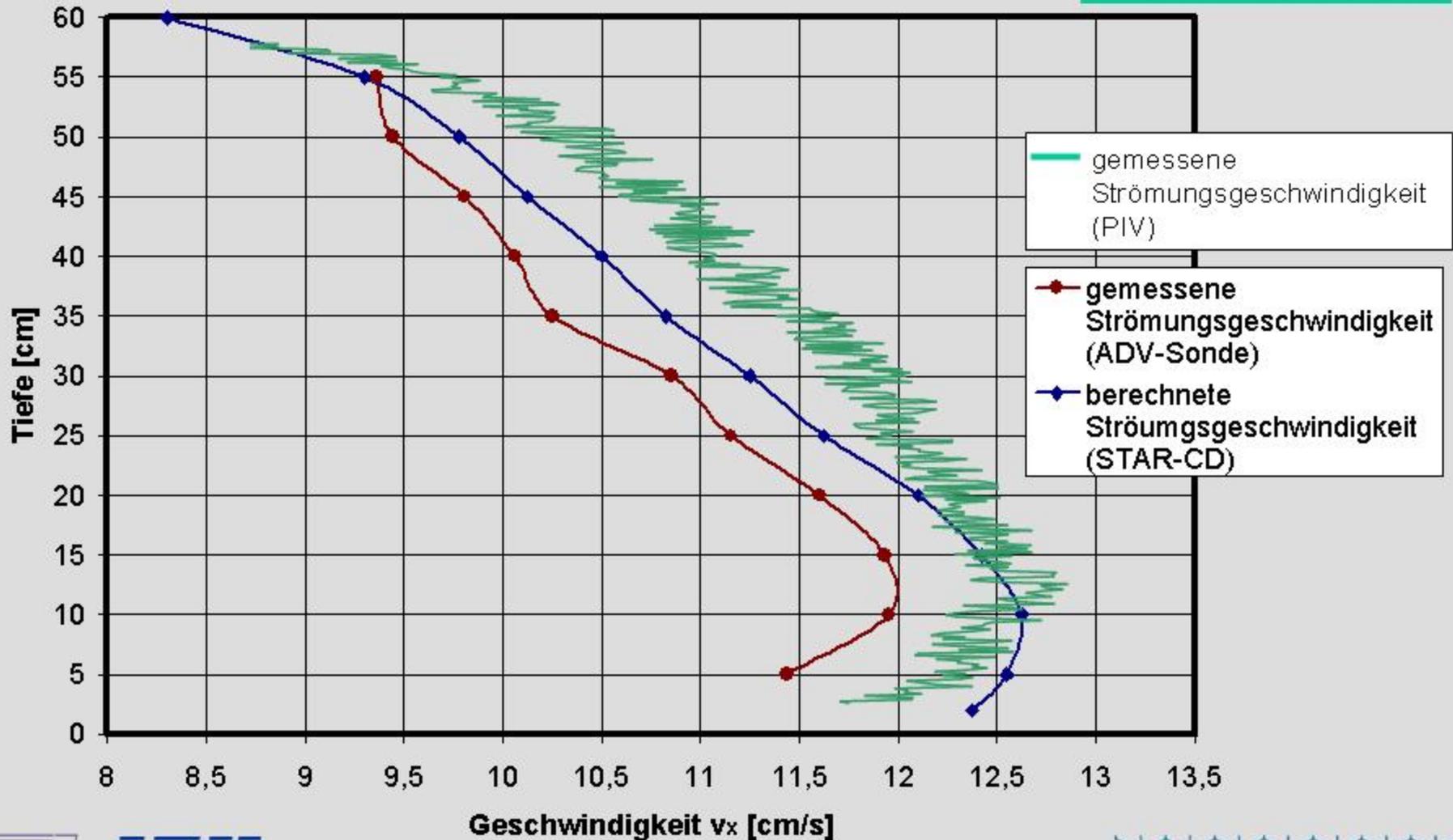
$v = [\text{m/s}]$

GWK: Strömungsfeld einer Welle

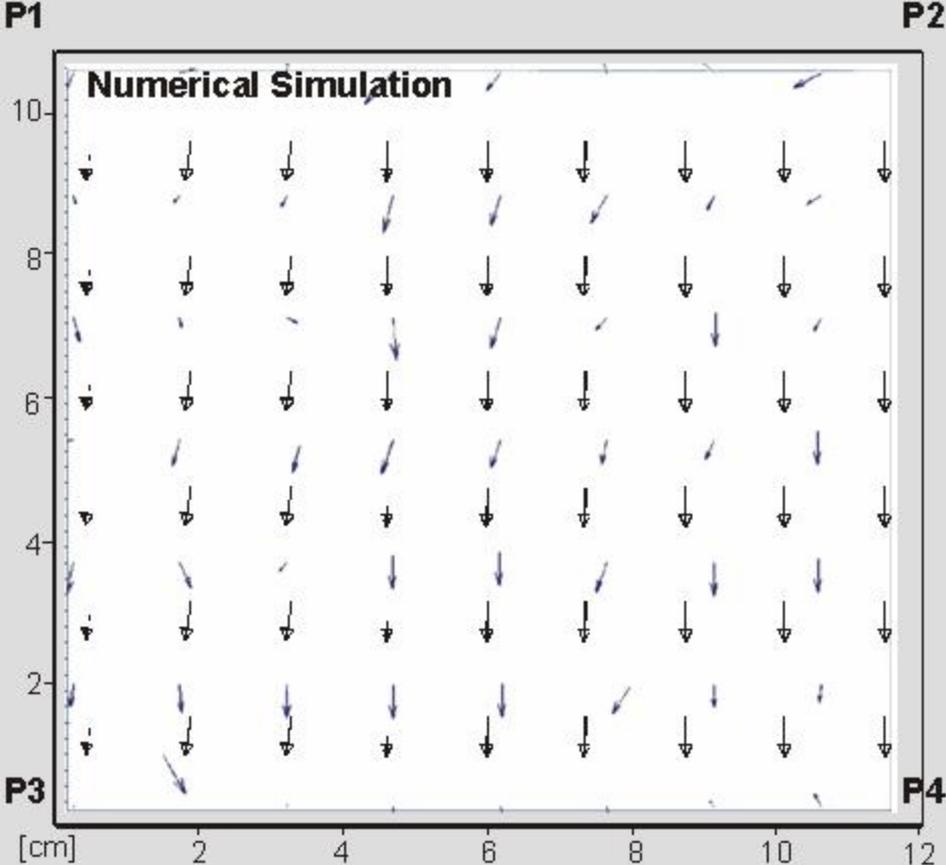
Tiefenprofile Strömender Abfluss

Numerik / Messung ADV Sonde

Messung 3D-PIV

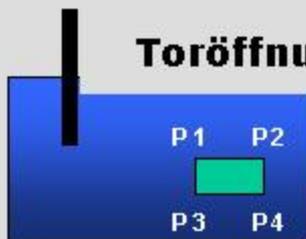


Geschwindigkeitsprofil aus Messungen und Simulation



Strömungsfeld bei t=50 s

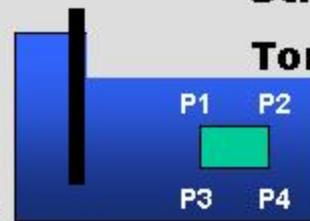
Toröffnung h=30 cm



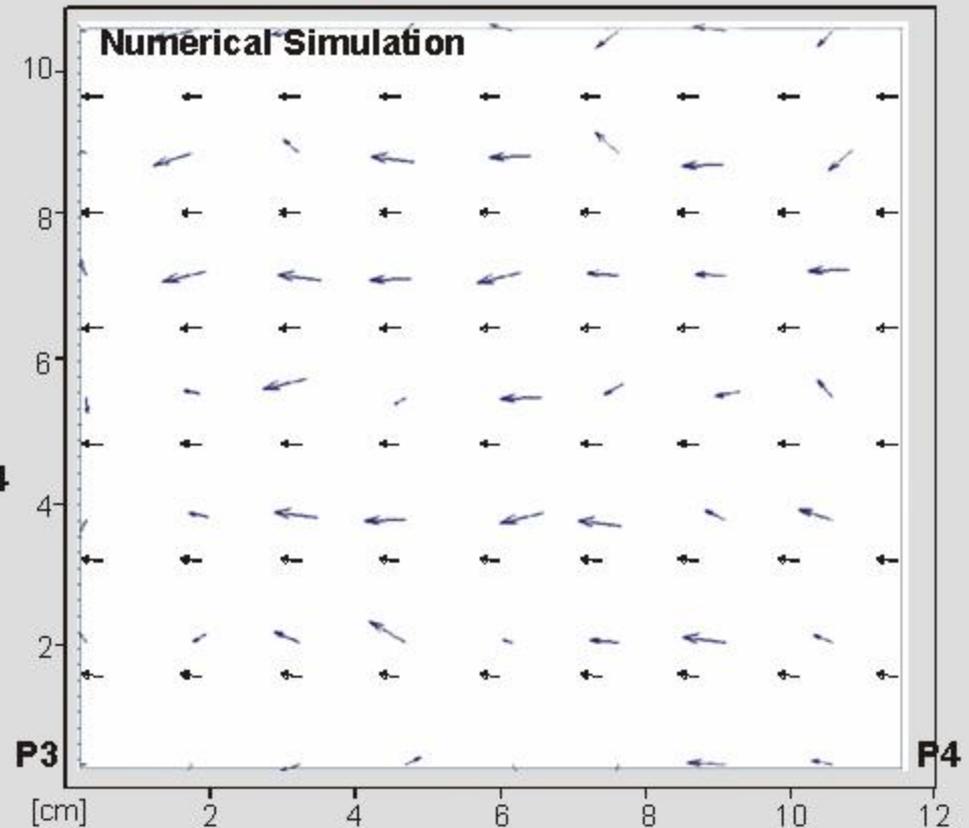
Strömungsfeld bei t=110 s

Toröffnung h=10 cm

P1

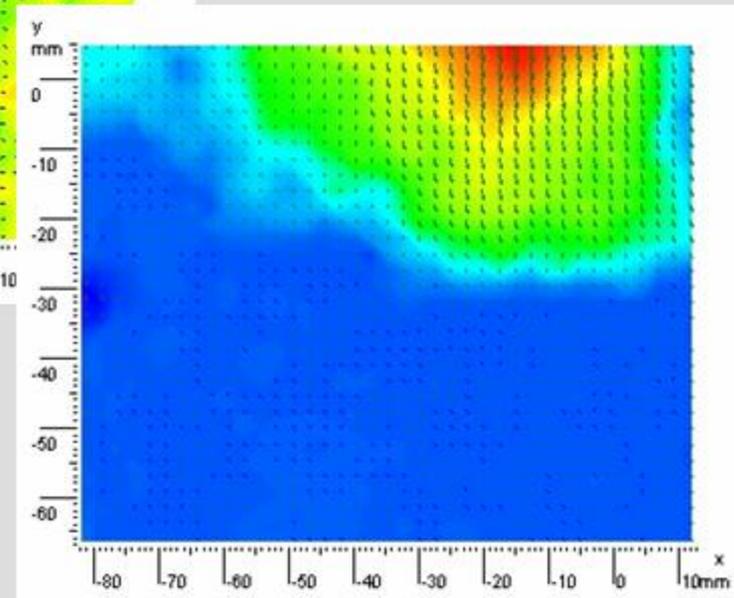
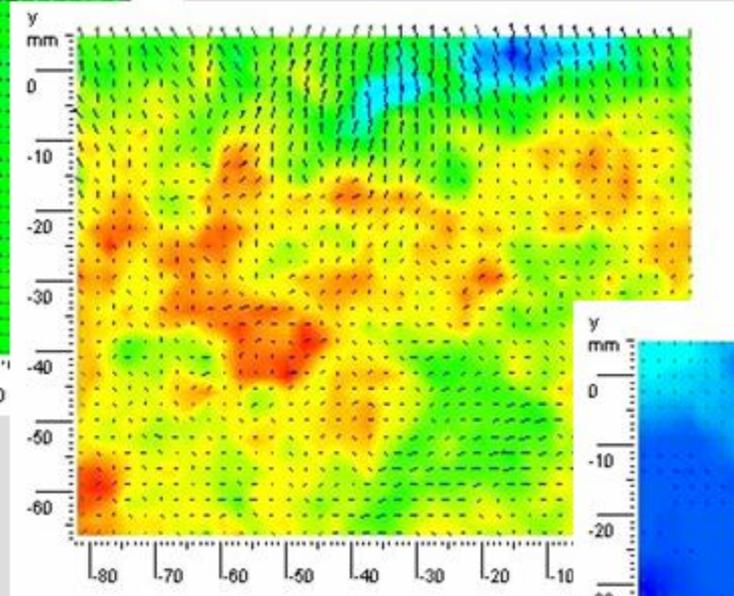
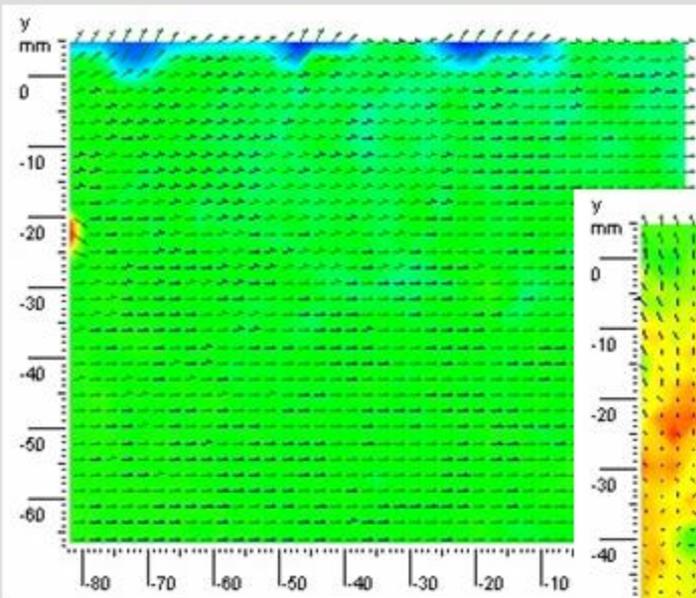


P2



Universität Hannover

Vergleich Messung und Simulation (Dyn. Hubtormodell)



Wirbelbildung hinter dem nach unten bewegten Hubtor



Dipl.-Phys. Walter, LZH



Auswertung-Ergebnisse

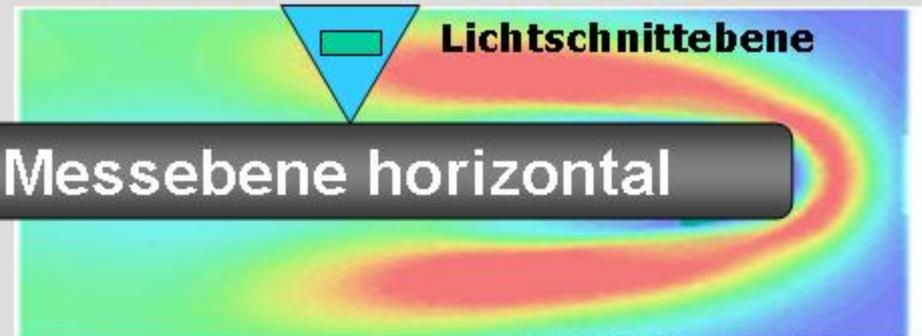
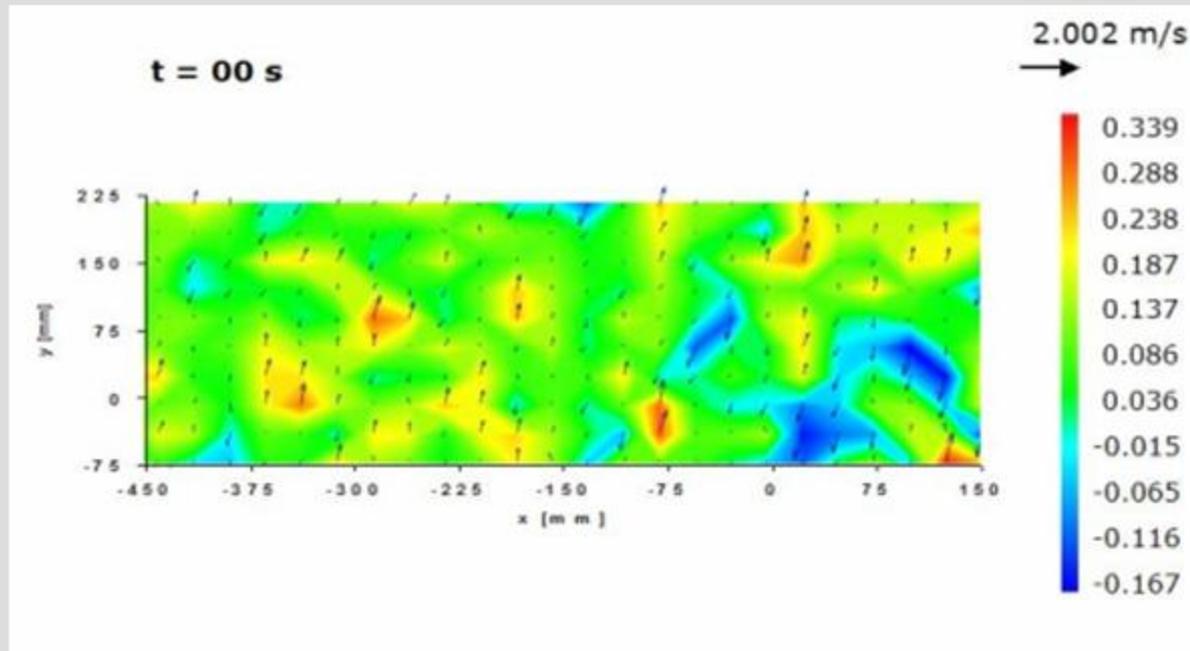


Emden



Papenburg

Geschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung: 1,2-1,7 m/s



Pfeiler 1 (Aufsicht) - Messebene horizontal



Auswertung-Ergebnisse



Hydrodynamisches Modell, Physikalische Modellversuche

- **erfolgreiche Simulation einer beweglichen Geometrie unter Berücksichtigung der freien Oberfläche**
- **Erfolgreiche Simulation der Strömungen am Emssperrwerk**
- **Vergleich von Simulationsergebnissen und Messergebnissen erfolgreich**

Anströmkörper-Strömungsmesssystem, Trägersystem

- **Gute Übereinstimmung der Messungen mit ADV-Sonde und mit der Simulation**
- **Einsatz des Messsystems in der Praxis erfolgreich**
- **Trägersystem zur flexiblen Positionierung der Messsysteme am Emssperrwerk**

PIV Messsystem

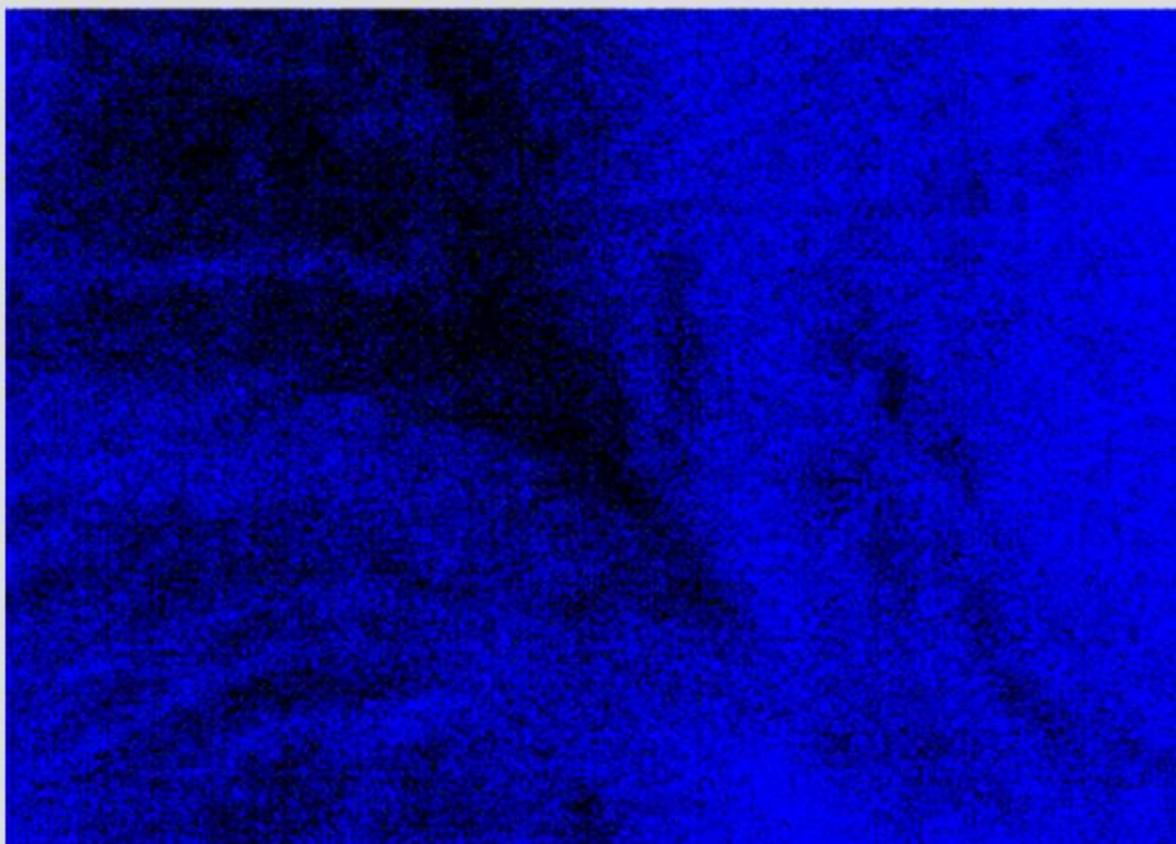
- **Einsatz des optimierten Messsystems in der Praxis an mehreren Standorten erfolgreich**
- **Übereinstimmung mit Messungen durch ADV-Sonde und Simulation**



Dr.-Ing. Reimche, IW



Zusammenfassung



PIV Rohdaten:
LZH

- *Vergleich der Messsysteme unter verschiedenen Betriebsbedingungen*
- *Weitere Einsatzmöglichkeiten der Simulation, des Anströmkörper-Strömungsmesssystems und des PIV Messsystem:*
 - *Einsatz an anderen Küstenschutzbauwerken (Langzeiteinsatz)*
 - *Ermittlung der Partikeldichte, Verteilung von Sedimentlasten und Ablagerungen*



Dr.-Ing. Reimche, IW



Universität Hannover

Ausblick