

BMBF Forschungsvorhaben 03KIS036

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

Abschlussbericht

für den Zeitraum

01.10.2001 – 30.09.2004

Teil A: Zusammenfassung

Teil B: Institut für Werkstoffkunde

Mechanisches Anströmkörper-Strömungsmesssystem,
Entwicklung des Trägersystems und der Tauchgehäuse

Teil C: Laser Zentrum Hannover

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

Teil D: Franzius Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen

Numerische Simulationen und physikalische Versuche

von

Dipl.-Ing. C. Scheer Dr.-Ing. W. Reimche Prof. Dr.-Ing. Fr.-W. Bach

Projektkoordination:

Universität Hannover, Institut für Werkstoffkunde

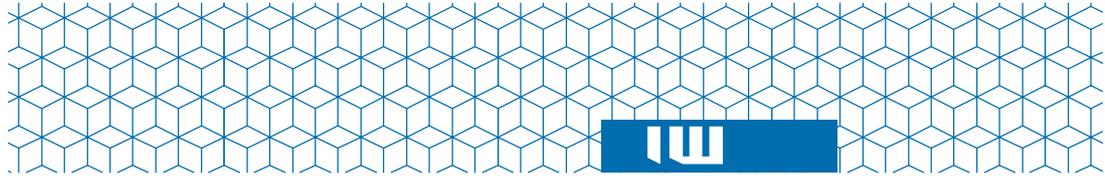
Projektpartner:

**Universität Hannover, Franzius-Institut
für Wasserbau und Küsteningenieurwesen**

Unterauftragnehmer:

Laser Zentrum Hannover e.V.

März 2005



Universität Hannover Institut für Werkstoffkunde
Prof. Dr.-Ing. Friedrich-Wilhelm Bach

Abschlussbericht Teil A

Zusammenfassung

Institut für Werkstoffkunde

Institutsleitung: Prof. Dr.-Ing. Fr.-W. Bach

Projektleitung: Dr.-Ing. W. Reimche

Projektbearbeitung: Dipl.-Ing. C. Scheer

Lise-Meitner-Str. 1, 30823 Garbsen

Tel.: 0511 / 762 – 4311

Tel.: 0511 / 762 – 9861

Tel.: 0511 / 762 – 9839

Fax: 0511 / 762 – 9837

e-Mail:

office@iw.uni-hannover.de

reimche@iw.uni-hannover.de

scheer@iw.uni-hannover.de



Inhaltsverzeichnis

	Seite:
1	Einleitung4
2	Gesamtziel des Vorhabens5
3	Bezug zu den förderpolitischen Zielen des BMBF6
4	Stand der Wissenschaft und Technik.....7
4.1	Strömungsmesssysteme für hohe und höchste Geschwindigkeitsbereiche 7
4.2	Modellierung hochturbulenter dreidimensionaler Strömungen 8
5	Aufgabenstellung und Entwicklungsarbeiten..... 10
5.1	Projektpartner..... 12
5.2	Stationäres 3D-Strömungsmesssystem und Trägersystem 15
5.3	Vergleichsuntersuchungen unter realistischen Betriebsbedingungen 16
5.4	Anwendungsfall – Sturmflutsperrwerk in der Ems bei Gandersum 17
5.5	Mechanisches Messsystem und Trägersystem, IW 19
5.6	Particle-Image-Velocimeter (PIV-System), LZH 21
5.7	Numerische Simulationen und physikalische Versuche, FI 24
6	Zusammenfassung.....27
7	Literatur.....31
8	Veröffentlichungen32



Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

	Seite:
Abb. 5-1	Zielsetzung des Projektes 10
Abb. 5-2	Entwicklungsarbeit im Projekt 11
Abb. 5-3	Struktur Projektes 12
Abb. 5-4	Komponenten des 3D-Strömungsmesssystems und Trägersystems 15
Abb. 5-5	Erprobung unter realistischen Betriebsbedingungen 16
Abb. 5-6	Sturmflutsperrwerk in der Ems bei Gandersum 17
Abb. 5-7	Messprinzip des mechanischen Anströmkörper- Strömungsmesssystems 18
Abb. 5-8	Anströmkörper-Strömungsmesssystem am Emssperrwerk 19
Abb. 5-9	Signale des Anströmkörper-Strömungsmesssystems 20
Abb. 5-10	Particle-Image-Velocimeter 21
Abb. 5-11	Strömungsfeld einer Welle 22
Abb. 5-12	PIV-Messungen am Emssperrwerk 22
Abb. 5-13	Ausschnitt des numerischen Modells des Emssperrwerkes 25
Abb. 5-14	Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten am Emssperrwerk 26
Abb. 6-1	Vergleich des Anströmkörper-Strömungsmesssystems mit der Simulation 28
Abb. 6-2	Messung des PIV-Systems 28
Tab. 5-1	Arbeitsschritte des Projektes 13
Tab. 5-2	Zeitplan des Projektes 13



1 Einleitung

Sohlbefestigungen im Bereich von Küstenschutzsystemen und die Bauwerke selbst sind im Allgemeinen einer enormen Beanspruchung durch die Belastungsgrößen Tide, Strömung und Seegang ausgesetzt und dementsprechend zu bemessen. Insbesondere im Nahbereich von Sturmflutsperrwerken treten infolge der Querschnittsverengung bzw. der sich einstellenden Wasserstandsdifferenzen bei Sturmflutentlastung und Staurationtlenkung hohe Strömungsgeschwindigkeiten auf. In der Folge kommt es daher nicht selten zu Kolkbildungen im Nahbereich von Küstenschutzbauwerken bzw. zu Bauwerksschäden, deren Ausgleich die Unterhaltungskosten nicht unerheblich mitbestimmt.

Eine Beschreibung der in diesen Bereichen auftretenden hochturbulenten, dreidimensionalen Strömungsvorgänge und damit einhergehend eine Prognose auftretender Strömungsgeschwindigkeiten war bis heute nur in physikalischen Modellen mit ausreichender Genauigkeit und mit vertretbarem Aufwand möglich.

Die Anwendung numerischer Verfahren für die Beschreibung derartiger Strömungsvorgänge ist zwar möglich, jedoch in ihrer Aussagefähigkeit begrenzt, da die notwendige Datengrundlage für eine Kalibrierung bzw. Validierung der im Allgemeinen zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Modelle weitestgehend fehlt.

Für die Parametrisierung der Rauheits- und Turbulenzparameter ist die Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeiten auch während des Betriebes von Bauwerken des Küstenschutzes und im Offshore-Bereich von großer Bedeutung. In diesem Zusammenhang steht die Optimierung des Betriebsablaufes (Sperrwerke, Siele, Auslaufbauwerke etc.), die Vermeidung von kritischen Lastzuständen (im Bereich von Bohr- und Hubinseln unter Strömungs- und Wellenbelastung) bzw. die Überwachung von Strömungsvorgängen (z.B. an Mohlenköpfen und in Wattprielen) im Vordergrund.



2 Gesamtziel des Vorhabens

Übergeordnetes Ziel des Projektes war es daher, ein stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände zu entwickeln. Das Messsystem wurde anhand eines ausgewählten Fallbeispiels erprobt und für die Messung von Strömungsgeschwindigkeiten eingesetzt. Die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in hohen und höchsten Geschwindigkeitsbereichen wurden für den Aufbau eines numerischen Modells für das gewählte Fallbeispiel genutzt.

Für die Kalibrierung und Validierung des räumlich und zeitlich hoch aufgelösten numerischen Modells war es notwendig ein geeignetes Messsystem (Träger- und Messeinheit) zu entwickeln, welches abgesehen von Zeiten mit Eisgang, ganzjährig einsetzbar ist (Dauermessungen). Das Messsystem musste den gestellten Anforderungen bezüglich Messgenauigkeit, zeitlicher Auflösung der Messintervalle, Herstellungskosten und Praxistauglichkeit unter schwerster hydrodynamischer Belastung gerecht werden. Eine Dauermessung der Strömungsgeschwindigkeit in den genannten Anwendungsbereichen war mit bekannten Verfahren bisher nicht realisierbar. Dies liegt vor allem in der hohen strömungsmechanischen Belastung begründet, welche den Einsatz konventioneller Trägersysteme verhinderte und gleichzeitig die Anforderungen an die verwendete Messtechnik bezüglich Verfahren, Robustheit und Langlebigkeit definierte.

Die Dringlichkeit, eine derartige Messtechnik zu entwickeln und für den Aufbau numerischer Modelle nutzbringend einzusetzen wurde durch vermehrt aufgetretene Schadensfälle unterstrichen. Diese konzentrierten sich vornehmlich auf Bauwerksteile, die hochturbulenten Strömungen ausgesetzt sind und in der Wasserwechselzone (Tideeinfluss) einer erhöhten Abnutzung unterliegen.



3 Bezug zu den förderpolitischen Zielen des BMBF

Das BMBF fördert Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Meeresforschung und dabei im Besonderen die Entwicklung von Meeresforschungs- und Meeresüberwachungstechnik (BMBF: „Meeresforschung – Programm der Bundesregierung“, 1999.)

Das Vorhaben bezieht sich in zweifacher Form auf das förderpolitische Ziel. Zum einen kann das zu entwickelnde Strömungsmesssystem durch eine automatisierte Bereitstellung abgesicherter und vergleichbarer Daten zum Aufbau qualitativ hochwertiger numerischer HD-Modelle (Hydro-Dynamische Modelle) beitragen. Dieser Nachweis sollte unter anderem im Rahmen des Vorhabens geführt werden.

Zum anderen kann das Messsystem für die Echtzeitüberwachung von Offshorekonstruktionen (z.B. Messplattformen) eingesetzt werden, um kritische Belastungsfälle schon frühzeitig in ihrer Entwicklung zu erkennen und durch geeignete Betriebsweise der Konstruktion (frühzeitiges Heben und Absenken der Plattform) Gefahrensituationen von vornherein auszuschließen.

In diesem Zusammenhang ist insbesondere die Zielsetzung des Vorhabens zu nennen, eine Messeinrichtung zu entwickeln, die bzgl. Langzeitstabilität (Bewuchs und Korrosion) sowie Energieversorgung als Ganzjahres-Strömungsmesssystem fungieren kann.

4 Stand der Wissenschaft und Technik

4.1 Strömungsmesssysteme für hohe und höchste Geschwindigkeitsbereiche

Im Bereich der Meeresmesstechnik sind für die Messung von Geschwindigkeiten in stark turbulenten Gewässern im hohen und höchsten Geschwindigkeitsbereich bisher keine Messgeräte realisiert, die im dauerhaften Betrieb wartungsfrei über längere Zeiträume einsetzbar sind. Bisher kommen lediglich Messpfähle zum Einsatz, die als Trägersystem im Küstenvorfeld fungieren und mit unterschiedlichen Wertgebern (Windgeschwindigkeit, Temperatur, Seegang bzw. Tidenhub) bestückt sind. Speziell in Hochgeschwindigkeitsbereichen existieren keine praxistauglichen Verfahren, da die Belastungen durch turbulente Strömungen mit Geschwindigkeiten bis zu 14 m/s sowie durch Treibgut, Wellengang und Salzwasser einen dauerhaften Einsatz verhindern. Darüber hinaus muss beachtet werden, dass die Funktion der Messeinrichtungen durch starken Bewuchs mit Algen, Muscheln oder See-pocken schon nach kurzer Zeit stark beeinträchtigt werden kann.

Im Bereich der grundlegenden Messverfahren existiert jedoch eine Vielzahl von Verfahren für die Bestimmung von Fließgeschwindigkeiten sowohl in Gasen als auch in Fluiden. Die im Wesentlichen eingesetzten Messprinzipien lassen sich in vier Gruppen unterteilen: mechanische, elektrische, optische und akustische Verfahren. Während in der Meteorologie im Wesentlichen mechanische Anemometer eingesetzt werden, um Windgeschwindigkeiten zu ermitteln, wird dieses Messverfahren in der Meeresmesstechnik nicht eingesetzt, da die Verschmutzungsgefahr nur kurzzeitige Messungen erlauben würde. Andererseits nehmen in der Tierwelt viele Arten Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen mit Hilfe von mechanischen Sensoren hochpräzise auf (Barthaare). In der Meeresmesstechnik werden speziell die akustischen Verfahren eingesetzt, da diese, mit einer entsprechenden Software ausgestattet, die Messung ganzer Strömungsprofile berührungslos ermöglichen (KOLB, 1994 / GRIF-FITHS, 1992 / KOLB, 1992 / FANGER, 1992). Sie sind jedoch laut Herstellerangaben nicht für den Bereich mit hoher Biomasseproduktion geeignet, da ein Bewuchs der Schallwandler zu einem Ausfall der Messung führt (NORTEK, 1998). Außerdem führt ein erhöhter Lufteintrag, wie er beispielsweise hinter Sperrwerken existiert, zu nicht auswertbaren Messergebnissen akustischer Messsysteme, da die Grenzschichtübergänge die Messung verfälschen.

Aus den gleichen Gründen kamen bisher optische Sensoren, die in Laboren bereits erfolgreich eingesetzt wurden, nicht zum Einsatz. Optische Verfahren zur Strömungsmessung von Fluiden mit Schwebstoffgehalt lassen sich hinsichtlich ihres Prinzips in vier wesentliche Gruppen unterteilen:

- PTV (Particle Tracking Velocimetry)
- LSV (Laser Speckle Velocimetry)
- LDA (Laser Doppler Anemometer)
- PIV (Particle Image Velocimetry)

Bei dem PTV und dem LDA dienen individuelle Partikel (Verschmutzungen im Wasser) zur Analyse. LSV und PIV hingegen bedienen sich entweder der Analyse und statistischen Auswertung von Speckle-Mustern, die durch Lichtstreuung an verschiedenen Partikeln entstehen

(LSV) bzw. der statistischen Bildauswertung von zeitverzögert (ms-Bereich) aufgenommenen Bildern von Partikeln innerhalb einer Laserlichtschneitebene (PIV). Nachteile der PTV und LDA Technik liegen in der Notwendigkeit für Analysen, die über den Durchmesser eines Partikels hinausgehen, den Messpunkt als Funktion der Zeit zu bewegen, welches bei zeitlich instationären Strömungen zu fehlerhaften Aussagen führen kann.

Bei der Analyse insbesondere unstetiger Strömungsverhältnisse kommen die Vorteile des PIV zum Tragen. PIV-Messungen erlauben die simultane Aufnahme einer Vielzahl von Punkten durch die Analyse der von den Partikeln reflektierten Strahlung. Die Geschwindigkeit wird durch die statische Auswertung des Partikelversatzes, der mittels CCD-Kameras aufgenommen wird, innerhalb der Zeitspanne zwischen zwei Belichtungsimpulsen berechnet. Die Voraussetzung für die Anwendbarkeit der PIV-Verfahren ist eine orthogonale Anordnung der Laserstrahl- und der Beobachtungsachse. Durch Verwendung von Umlenkoptiken lassen sich jedoch neben einer orthogonalen Anordnung von Laser und Kamera auch parallele Anordnungen realisieren (TSI, 1998). Ferner muss die zu untersuchende Strömung eine ausreichende Partikel-Konzentration aufweisen. Durch eine intelligente Hardware- und Softwaresteuerung (Leistung- bzw. Empfindlichkeitsregelung sowie optimierte Merkmalsextraktion bei der Bildverarbeitung) kann auch bei Auftreten unterschiedlicher Partikelgrößen oder Blasen ein größtmöglicher Informationsgehalt extrahiert werden (DANTEC, 1998).

PIV-Verfahren erlauben die Messung von Geschwindigkeiten im Bereich von einigen mm/s bis Überschall bei vergleichbarer Genauigkeit und Auflösung eines LDA. Ferner bietet die PIV Technik die Option mittels zwei CCD-Kameras die Geschwindigkeitsvektoren in einem quasi 3D Bereich zu bestimmen. Typischer Einsatzbereich dieser Verfahren ist derzeit vor allem der Forschungs- und Entwicklungsbereich, da das Verfahrenspotential für industrielle Anwendungen zwar erkannt, aber eine Umsetzung in industrielle Applikationen bisher nur in Einzelfällen erfolgt ist. Das in einem Trägersystem integrierte PIV-Messsystem bietet hier neue Ansätze hinsichtlich eines breitenwirksamen Einsatzes optischer Messverfahren in den genannten Anwendungsbereichen unter natürlichen Bedingungen. Die ständige Weiterentwicklung wirtschaftlicher und kompakter Hochleistungslaserdioden stellt ferner ein hohes Potential zur Realisierung leicht handhabbarer Beleuchtungsquellen geringer Baugröße dar. Ferner erlaubt der Wellenlängenbereich der emittierten Strahlung eine flexible Strahlführung mittels optischer Fasern.

4.2 Modellierung hochturbulenter dreidimensionaler Strömungen

Die meisten Strömungen von praktischer Bedeutung sind turbulent. Turbulenz tendiert zu dreidimensionalen hochgradig instationären Wirbelstrukturen, die durch Zerfall der mittleren Strömung kinetische Energie entziehen. Am Ende der Wirbelkaskade wandeln sich die kleinsten Wirbel in Wärmeenergie um (Dissipation). Die Frequenz der Wirbelbewegung ist umgekehrt proportional zum Längenmaß der Wirbelstrukturen. Die niederfrequenten großen Wirbel dominieren das Strömungsgeschehen. Hochfrequente Wirbel dissipieren ab einer Größenordnung, die umgekehrt proportional zur Reynolds-Zahl der Strömung ist. Dieser Zusammenhang zwischen Turbulenzstruktur und Strömungsgeschwindigkeit erfordert die gezielte Auswahl geeigneter Turbulenzmodelle für die Modellierung hochturbulenter Strömungen.



Für die Modellierung werden CFD-Programmsysteme (Computer-Fluid-Dynamics) eingesetzt, die eine hohe räumliche Auflösung des zu modellierenden Natursystems ermöglichen und deren Lösungsalgorithmen in der Lage sind, den zu modellierenden Zeitraum entsprechend hoch aufzulösen, was für die im genannten Anwendungsbereich auftretenden hohen Strömungsgeschwindigkeiten eine Grundvoraussetzung ist (LAUNDER, 1974 / RHODI, 1991 / YAKHOT, 1986 / YAKHOT, 1992).

Für die Beschreibung von hochturbulenten Strömungsvorgängen wurden in den vergangenen Jahrzehnten theoretische Ansätze (z.B. $k-\epsilon$ Modelle und Large-Eddy-Simulation) entwickelt, die zum Teil Eingang in numerische Modelle gefunden haben (CHEN, 1987 / FORKEL, 1995). Gemeinsam ist den genannten Ansätzen, dass sie auf der Grundlage von Laborversuchen unter idealisierten Bedingungen entwickelt, nur in begrenzten realen Anwendungsfällen getestet wurden und bisher noch keine Anwendung in dem eingangs skizzierten Anwendungsbereich fanden. Daher fehlen jegliche Basisinformationen zur Auswahl eines geeigneten Turbulenzmodells (in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit und anderen Randbedingungen – z.B. Formgebung der Bauwerke, Ausbildung von Sperrwerkstoren, etc.) bzw. zum Ansatz von Sohl- und Wandrauheiten.

Neben der Modellierbarkeit des Naturphänomens durch Lösung der entsprechenden Differentialgleichungssysteme mussten für die Formoptimierung eines Küstenbauwerkes bzw. die Optimierung von Betriebsabläufen Algorithmen angewendet werden, die es erlaubten, einzelne Bauwerksteile während der Simulation zu verschieben (z.B. Bewegung von Sperrwerkstoren). Diese Möglichkeit ist nur in wenigen Algorithmen bisher implementiert und musste auf die zu modellierenden Anwendungsfälle entsprechend angepasst werden.

Die Programmsysteme STAR-CD und COMET sind bezüglich ihrer Rechenalgorithmen und Speicherplatzverwaltung nahezu identisch. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass für das Programmsystem STAR-CD für nahezu jede Zielplattform und Rechnerarchitektur ein lauffähiger und entsprechend optimierter Code vorhanden ist. Die Vorteile des Programmsystems STAR-CD lagen vornehmlich in der graphischen Benutzeroberfläche (COMET präsentierte sich als Toolbox und wurde im Wesentlichen über Terminalbefehle gesteuert) und den vielfältigen Visualisierungsmöglichkeiten. Dies war für die Modellierung von dreidimensionalen Strömungszuständen von großer Bedeutung. Weitere entscheidende Vorteile von STAR-CD gegenüber COMET waren effizientere Algorithmen zur Nachbildung sich bewegender Geometrien, die in das Programmsystem COMET in dieser Form hätten zunächst zu implementiert werden müssen.

Innerhalb von STAR-CD stehen eine größere Anzahl von Benutzerschnittstellen zum Eingriff in den Quellcode des Programmsystems zur Verfügung, was zur Erfüllung der komplexen Aufgabe notwendig ist (z.B. Implementierung neuer Turbulenzmodelle). Das CFD-Programmsystem STAR-CD, das innerhalb dieses Vorhabens zum Einsatz kam, bietet die Möglichkeit verschiedene Turbulenzmodelle in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl auszuwählen und die Möglichkeit Systemelemente beweglich zu gestalten. Es bietet daher ideale Voraussetzungen für die Modellierung hochturbulenter dreidimensionaler Strömungsvorgänge.

5 Aufgabenstellung und Entwicklungsarbeiten

In der Vergangenheit vermehrt aufgetretene Schadensfälle an verschiedenen wasserbaulichen Strukturen im Küstenschutz unterstreichen die Notwendigkeit zur Entwicklung neuartiger Strömungsmesstechniken unter den Anforderungen und Randbedingungen im Küstenbereich sowie einer angepassten Numerik zur hochaufgelösten Modellierung der Strömungsverhältnisse, um extreme Betriebszustände im Voraus genauer zu simulieren und somit kritische Belastungen von vornherein ausschließen zu können. Die Anwendung numerischer Verfahren für die Beschreibung derartiger Strömungsvorgänge ist zwar möglich, jedoch in ihrer Aussagefähigkeit begrenzt, da die notwendige Datengrundlage für eine Kalibrierung bzw. Validierung der zeitlich und räumlich hochaufgelösten Modelle weitestgehend fehlt. Die für diese Betriebszustände maßgeblichen Randbedingungen (freie Oberfläche, bewegliche Geometrien) sind für ein in einem solchen Anwendungsfall notwendiges großflächiges und abschnittsweise fein aufgelöstes Modellgebiet noch nicht angewandt worden.

Eine Dauermessung der Strömungsgeschwindigkeit in Anwendungsbereichen mit hohen strömungsmechanischen Belastungen ist mit bekannten Verfahren und konventionellen Trägersystemen zuvor nicht realisiert worden. Hiermit wurden gleichzeitig die Anforderungen an die zu entwickelnden Messsysteme bzgl. Verfahren, Robustheit und Langlebigkeit definiert.

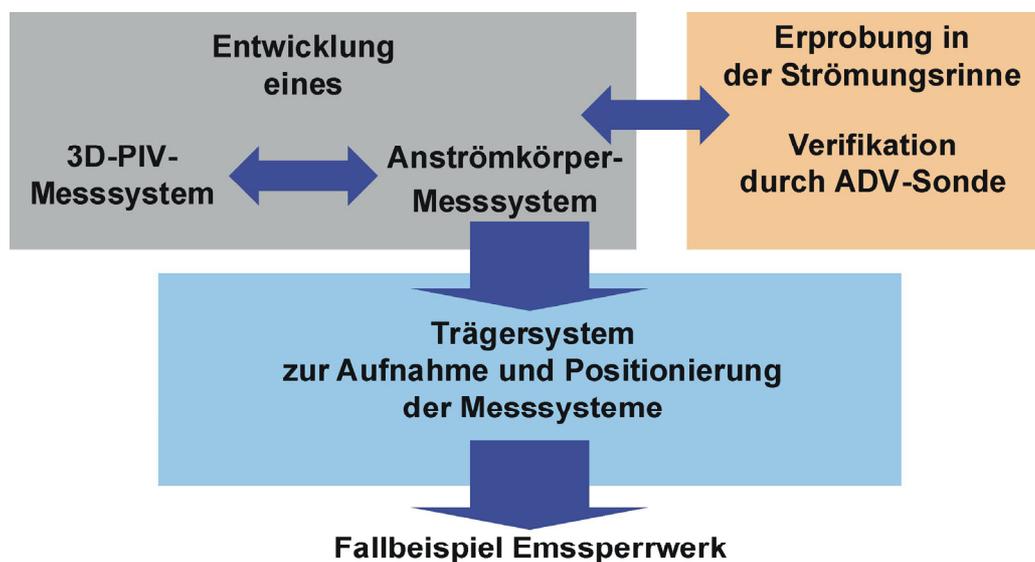


Abb. 5-1: Zielsetzung des Projektes

Einsatzbereiche für die Messsysteme stellen z.B. Einleitungsbauwerke, Wehre und Sturmflutsperrwerke dar. Insbesondere im Nahbereich von Sturmflutsperrwerken treten infolge der Querschnittsverengung bzw. der sich einstellenden Wasserstandsdimensionen bei Sturmflutentlastung und Staurationentleerung hohe Strömungsgeschwindigkeiten auf. In der Folge kommt es daher nicht selten zu Kolkbildungen im Nahbereich von Küstenschutzbauwerken bzw. zu Bauwerksschäden, deren Ausgleich die Unterhaltungskosten nicht unerheblich mitbestimmt. Daher sind vor allem die Betriebsabläufe von Sperrwerken (Schließen und Öffnen der Sperrwerkstore, auch zeitversetzt und mit verschiedenen Hub- und Senkgeschwindigkei-

ten, zu verschiedenen Tidephasen, Seegangsbelastungen und binnenseitigen Oberwasserzuflüssen) zur Vermeidung von kritischen Betriebszuständen zu optimieren.

Aus diesen Forderungen ergab sich die Zielsetzung des Forschungsprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“. Im Einzelnen waren dies die Abbildung der Strömungsverhältnisse an einem realen Fallbeispiel mit hochaufgelösten 3D-Strömungssimulationen, welche einerseits über physikalische Strömungsmodelle zu verifizieren sowie andererseits an dem realen Fallbeispiel zu überprüfen waren (Abb. 5-1). Diese Aufgaben erforderten die Entwicklung und den Aufbau eines Mess- und Trägersystems zur Messung hochturbulenter Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss (Abb. 5-2).



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

Abb. 5-2: Entwicklungsarbeit im Projekt

5.1 Projektpartner

Um diese Entwicklungsarbeiten durchzuführen, erhielt mit Bescheid vom 28.11.2001 des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) das Institut für Werkstoffkunde der Universität Hannover eine Zuwendung für die Bearbeitung des Vorhabens „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ in Zusammenarbeit mit dem Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover als Projektpartner und dem Laser Zentrum Hannover e.V. Abbildung 5-3 zeigt die Struktur des Projektes sowie die Aufteilung der einzelnen Aufgabenbereiche auf die beteiligten Institute. Eine Zuordnung zu den Projektpartnern und genaue Aufstellung der einzelnen Arbeitsschritte anhand derer die Entwicklungsarbeiten durchgeführt wurden zeigt die Tabelle 5-1. Der Zeitplan der Realisierung ist Tabelle 5-2 zu entnehmen.

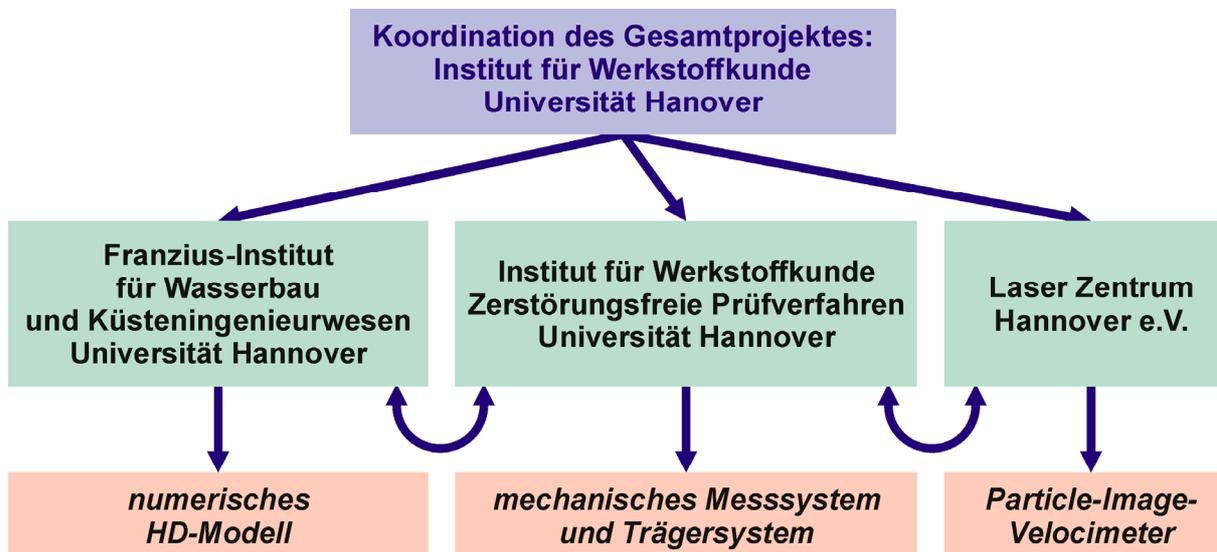


Abb. 5-3: Struktur des Projektes



	Beteiligte	Arbeitsschritt
1		Analyse der Randbedingungen
1.1	ABC	Physikalische Randbedingungen
1.2	ABC	Chemische und biologische Randbedingungen
1.3	ABC	Technische Randbedingungen
1.4	ABC	Datenbeschaffung und -analyse bereits erhobener Daten im Bereich des ausgewählten Bauwerkes und Analyse der naturräumlichen Randbedingungen
2		Definition des Anforderungsprofils
2.1	ABC	Anforderungsprofil Sensorik und Trägersystem
2.2	ABC	Anforderungsprofil Datenübertragung und Datenpräsentation
2.3	B	Definition eines geeigneten Messprogramms für den Aufbau eines numerischen 3D-Modells
3		Entwicklung
3.1	AC	Entwicklung der Sensorik
3.2	ABC	Entwicklung der Module für Datenübertragung und Datenpräsentation
3.3	ABC	Konzeption eines Trägersystems
3.4	B	Entwicklung eines Modellkonzepts, Gebietsabgrenzung, Spezifizierung von Randbedingungen und Auswahl des zu verwendenden Programmsystems
4		Fertigung und Erprobung eines Modells
4.1	A	Fertigung und Erprobung eines Modells
4.2	ABC	Optimierung des Systems
4.3	B	Aufbau, Kalibrierung und Validierung des numerischen HD-Modells auf der Grundlage der bereits erhobenen Daten
5		Aufbau und Erprobung eines Prototypen
5.1	AC	Aufbau des Prototypen am IW
5.2	ABC	Einbau und Erprobung des Prototypen am ausgewählten Bauwerk
5.3	ABC	Durchführung von Naturmessungen zur Feinkalibrierung (Auswahl des Turbulenzmodells) des numerischen HD-Modells
5.4	ABC	Feinkalibrierung des numerischen HD-Modells
5.5	ABC	Beurteilung der verwendeten Lösungsansätze hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit (Turbulenzmodell, Solverstabilität, Diskretisierung des Zeithorizonts)
5.6	ABC	Prognoserechnungen zur Optimierung des Bauwerkes und Erarbeitung konkreter Handlungsalternativen
6		Dokumentation und Abschlußbericht
6.1	AC	Technische Dokumentation des entwickelten Messsystems
6.2	B	Dokumentation der numerischen Modelluntersuchungen und abschließende Beurteilung der angewandten Methodik
6.3	ABC	Abschlußbericht des Forschungsvorhabens

Bearbeiter:

A – Institut für Werkstoffkunde

B – Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen

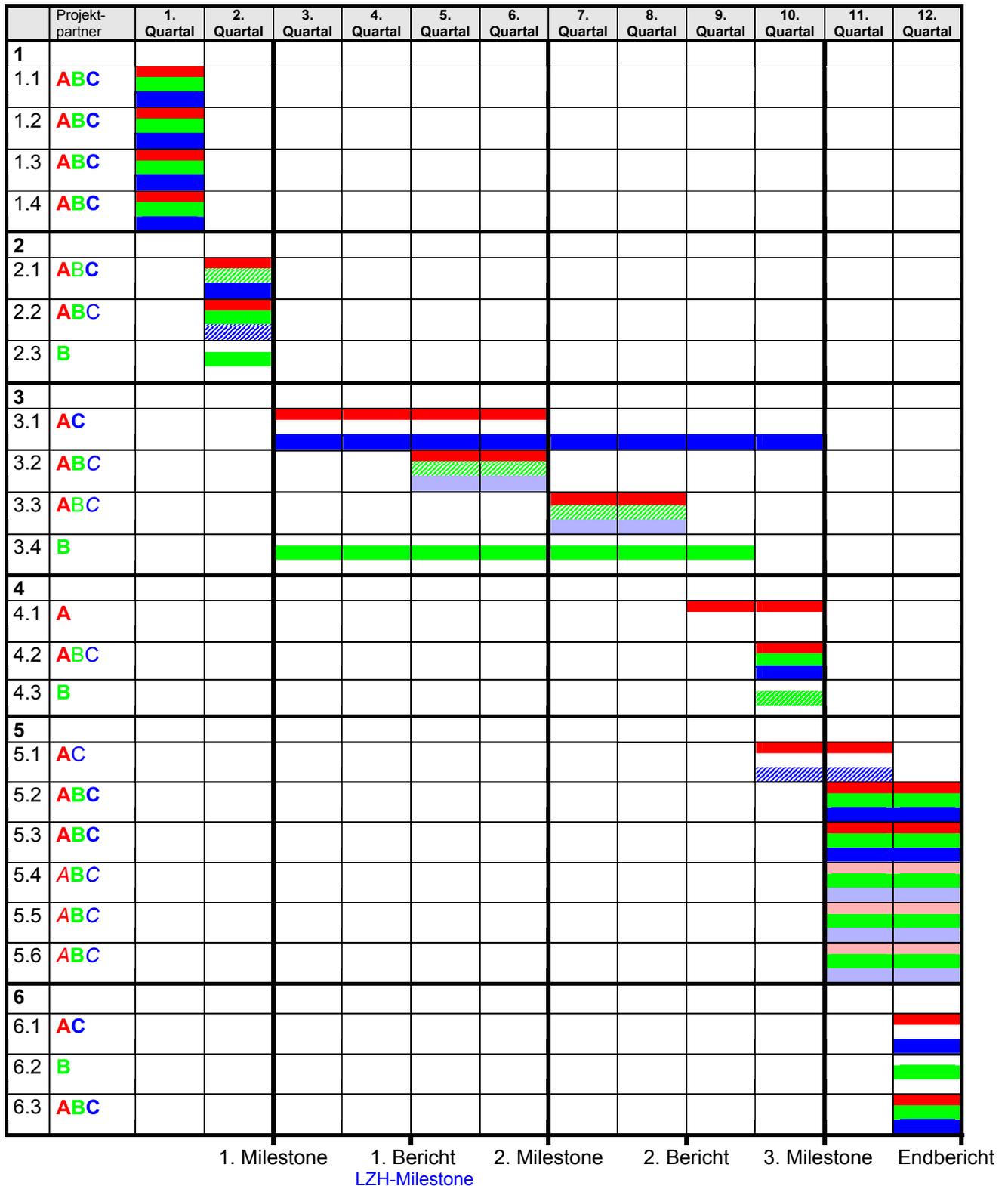
C – Laser-Zentrum Hannover e.V.

Fett: Hauptbearbeitung

Normal: Teilbearbeitung

Kursiv: Beratung / Abstimmung

Tab. 5-1: Arbeitsschritte des Projektes



1. Milestone 1. Bericht 2. Milestone 2. Bericht 3. Milestone Endbericht
LZH-Milestone

Bearbeiter:

A – Institut für Werkstoffkunde

B – Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen

C – Laser-Zentrum Hannover e.V.

Fett: Hauptbearbeitung

Normal: Teilbearbeitung

Kursiv: Beratung / Abstimmung

Tab. 5-2: Zeitplan des Projektes

5.2 Stationäres 3D-Strömungsmesssystem und Trägersystem

Die Entwicklung eines stationären 3D-Strömungsmesssystems wurde aufgeteilt in die Realisierung eines Particle-Image-Velocimeter (PIV) und eines mechanischen Anströmkörper-Strömungsmesssystems für hochturbulente Strömungszustände. Diese Strömungsmesssysteme wurden in der Strömungsrinne bzw. Umlaufrinne des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen sowie im Großen Wellenkanal (GWK) des Forschungszentrums Küste (FZK) erprobt und die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten anhand einer ADV-Sonde (Acoustic-Doppler-Velocimeter) verifiziert. Um diese Strömungsmesssysteme am ausgewählten Fallbeispiel Emssperwerk zu erproben, war die Entwicklung und der Aufbau eines Trägersystems zur Aufnahme und Positionierung der Messsysteme erforderlich. Die Strömungsmessungen am ausgewählten Fallbeispiel ermöglichten eine Verifikation der hochaufgelösten 3D-Strömungssimulationen, die eine neue Basis zur Erfassung und Vermeidung kritischer Betriebszustände liefern.

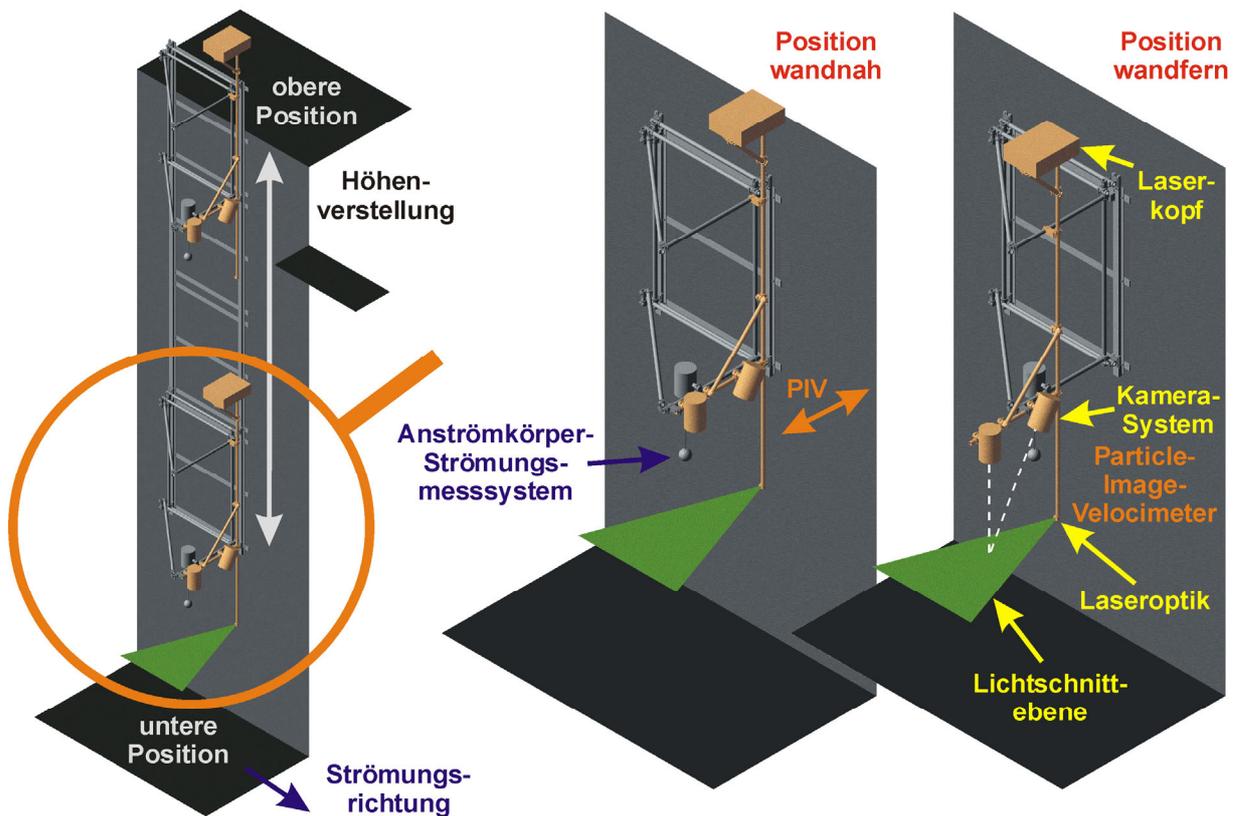


Abb. 5-4: Komponenten des 3D-Strömungsmesssystems und Trägersystems

Neben dem PIV-Messsystem, welches eine simultane Aufnahme einer Vielzahl von Punkten durch die Analyse von Partikeln reflektierter Strahlung ermöglicht, wurde ein mechanisches Strömungsmesssystem für den Ganzjahreseinsatz entwickelt, das in verschiedenen Wassertiefen zusätzlich die Strömungsgeschwindigkeit ermittelte. Dieses Messsystem lieferte einerseits Referenzwerte für die Auswertesoftware, andererseits stellt es eine kostengünstige Alternative dar, die auch unabhängig vom PIV-System die Datenbasis für das numerische Modell ergänzte. Mit Blick auf die wirtschaftliche Austauschbarkeit bei möglichen Beschädigungen

gen durch Treibgut wurde eine kostengünstige Realisierung des mechanischen Sensors angestrebt. Die einzelnen Komponenten der Messsysteme sowie die Anordnung am ausgewählten Fallbeispiel sind in Abb. 5-4 dargestellt, aus der auch die flexible Positionierung des Gesamtsystems ersichtlich ist.

5.3 Vergleichsuntersuchungen unter realistischen Betriebsbedingungen

Die Erprobung der Prototypen unter realen Betriebsbedingungen hinsichtlich der Messgenauigkeit und Widerstandsfähigkeit gegenüber Umgebungseinflüssen, Anpassung und Qualifizierung erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen im Vergleich mit Referenz-Strömungsmesssystemen unter realistischen Einsatzbedingungen. Zur Erprobung boten sich die Strömungsrinne bzw. die Umlaufrinne sowie der Große Wellenkanal an (Abb. 5-5), wobei hinsichtlich der Messgenauigkeit eine ADV-Sonde (NORTEK AS) als Referenz-Strömungsmesssystem diente.



Abb. 5-5: Erprobung unter realistischen Betriebsbedingungen

Die optimale Konfiguration des PIV-Systems und seiner Komponenten wurde ermittelt und getestet, indem ein Vergleich der Messergebnisse in quantitativer und qualitativer Hinsicht mit den Messergebnissen anderer Messverfahren und den Ergebnissen der numerischen Simulationen erfolgte. Der Schwerpunkt der Versuche in der Umlaufrinne Marienwerder lag auf der Handhabung des PIV-Systems und der qualitativen Bewertung der Messdaten unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses von variierenden Strömungsgeschwindigkeiten und variierenden Trübungen. In der Strömungsrinne Schneiderberg lag der Schwerpunkt der Versuche auf der Messung bei strömendem, bzw. schießendem Abfluss und der Beeinflussung der Messungen durch Luftblasen im Wasser. Im Großen Wellenkanal dagegen steht Wasser aus dem nahe liegenden Mittellandkanal zur Verfügung, das eine natürliche Partikel-



trübung aufweist. Hier zeigte sich, dass die im natürlichen Gewässer enthaltenen Partikel für das PIV-Verfahren ausreichend sind.

Während der Entwicklungsphase des mechanischen Anströmkörper-Strömungsmesssystems wurde dieses ebenfalls zunächst unter Laborbedingungen getestet, um die optimale Konfiguration der einzelnen Komponenten und die Genauigkeit der Messergebnisse zu ermitteln. In der Strömungsrinne des Franzius-Institutes wurden bei einem konstanten Pumpendurchsatz zeitgleich mit dem Anströmkörper-Strömungsmesssystem und der ADV-Sonde Daten aufgezeichnet und die ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten sowie deren zeitlicher Verlauf miteinander verglichen. In einer späteren Phase des Projektes erfolgte die Erprobung des PIV-Systems und des Anströmkörper-Strömungsmesssystems an einem Anwendungsfall in der Natur.

5.4 Anwendungsfall – Sturmflutsperrwerk in der Ems bei Gandersum

Bei der Auswahl des Anwendungsfalles waren neben den durch die im Antrag definierten Randbedingungen eines zu entwickelnden Strömungsmessgerätes auch das Vorhandensein von zur Entwicklung heranzuziehenden bestehenden Untersuchungen an einem relevanten exemplarischen Anwendungsfall ausschlaggebend. Aus diesem Grunde wurde für den Anwendungsfall das Sturmflutsperrwerk in der Ems zwischen Gandersum und Nendorp ausgewählt.

Dieses vom Land Niedersachsen, vertreten durch das Projektteam „Emssperrwerk“ des Niedersächsischen Landesbetriebes für Wasserwirtschaft und Küstenschutz (NLWK) in Norden, als Träger des Vorhabens in den Jahren 1999 bis 2002 errichtete Bauwerk dient im Rahmen von Küstenschutzmaßnahmen als Alternative zur Erhöhung und Verstärkung der Deiche des Emsästuars als Sturmflutschutzbauwerk. Zusätzlich wurde durch das Sperrwerk, bei gleichzeitiger Staufunktion nach oberstrom, eine höhere Flexibilität des Schifffahrtsweges Unterems erreicht.

An diesem Bauwerk fanden sich alle geforderten Randbedingungen für das zu entwickelnde Strömungsmessgerät:

- hohe Strömungsgeschwindigkeiten infolge Ebb- und Flutstrom,
- stark variierende Wasserstände innerhalb einer Tide,
- variierender Salzgehalt infolge der Tide,
- in der Zusammensetzung und Trübung des Wassers variierende Schwebstofffracht und
- verschiedene Durchflusszustände beim Öffnen und Schließen der Sperrwerkstore.

In Zusammenarbeit mit dem NLWK-Projektteam „Emssperrwerk“ wurde daher der Installationsort des Strömungsmesssystems ausgewählt, um einen Anbau und Betrieb ohne Behinderung des Sperrwerkbetriebs zu gewährleisten. Als Installationsort des Strömungsmesssystems wurde der Pfeiler 1 Nordseite in Nebenöffnung 1 ausgewählt, gegenüber der Betriebskanzel. Diese Position ist von der Betriebskanzel aus gut einsehbar und für Montage und Wartungsarbeiten schnell und sicher zu erreichen. An dieser Stelle wurde ein Schienensystem installiert, auf dem ein Trägersystem die Strömungsmesssysteme flexibel in unterschied-

lichen Wassertiefen und Abständen von der Pfeilerwand positionieren kann. Um einen geringen Strömungswiderstand und nur geringen Auftrieb zu erreichen und damit geringe Kräfte, die auf das Schienensystem wirken, wurden nur das mechanische Anströmkörper-Strömungsmesssystem sowie die beiden Kameras in entsprechenden kompakten Tauchgehäusen versenkt. Der empfindliche Laserkopf blieb über Wasser, was die Erzeugung der Lichtschnittebene unter Wasser über ein Periskop und eine entsprechende Optik bedingt.

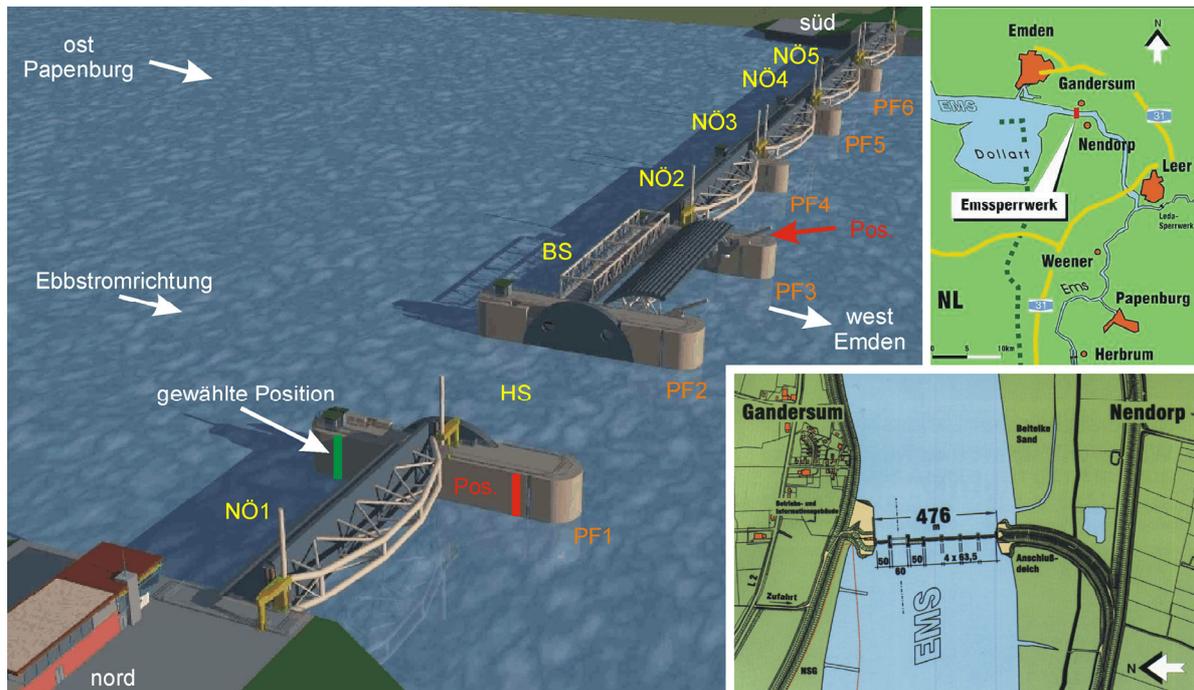


Abb. 5-6: Sturmflutsperrwerk in der Ems bei Gandersum

Für einen Vergleich der innerhalb des Projektes durchzuführenden Messungen mit dem PIV-System und numerischen Simulationen standen die Ergebnisse von am Franzius-Institut durchgeführten Untersuchungen zu verschiedenen Bauteilen und Problemstellungen des Emssperrwerkes und die in den Versuchen zum Einsatz gekommenen Versuchsanlagen und Ausschnittmodelle des Emssperrwerkes zur Verfügung.

Für den Vergleich mit numerischen Simulationen standen Daten aus drei physikalischen Versuchen zur Verfügung. Einerseits das physikalische Ausschnittmodell eines beweglichen Hubtores, wobei der Schwerpunkt der Simulationen auf der exakten Abbildung der Strömungsverhältnisse während der Bewegung des beweglichen Hubtores unter Berücksichtigung der freien Wasseroberfläche lag sowie das physikalische Modell eines kleineren Flussabschnittes mit dem Schwerpunkt der Simulation und der durchgeführten Vergleiche mit den Ergebnisdaten der physikalischen Modellversuche zur Bestimmung des optimalen Netzaufbaus für Simulationen mit freier Oberfläche. Beim hydraulischen Tidemodell des Emssperrwerkes bei Gandersum erfolgte im Rahmen von Simulationen und Vergleichen die Bestimmung der Genauigkeit bei der Ermittlung von Strömungsgeschwindigkeiten.

5.5 Mechanisches Messsystem und Trägersystem, IW

Die Arbeiten am IW-ZfP hatten zum Ziel, den Prototypen eines mechanischen Anströmkörper-Strömungsmesssystems zu entwickeln sowie ein Trägersystem mit Tauchgehäusen zur Installation der Messsysteme am ausgewählten Fallbeispiel. Daher wurden Modelle des mechanischen Anströmkörper-Strömungsmesssystems sowohl mit Wegmesstechnik, als auch mit DMS-Messtechnik aufgebaut und unter realistischen Bedingungen in der Strömungsrinne und Umlaufrinne des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen (FI) erprobt. Strömungsmessungen im Vergleich mit einer ADV-Sonde als Referenz ergaben für die Hauptströmungsrichtung eine sehr gute Übereinstimmung der Messwerte der unterschiedlichen Systeme. Lediglich das Strömungsmesssystem mit Wegmesstechnik zeigte aufgrund von Hystereseeffekten beim Nulldurchgang bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten Abweichungen.

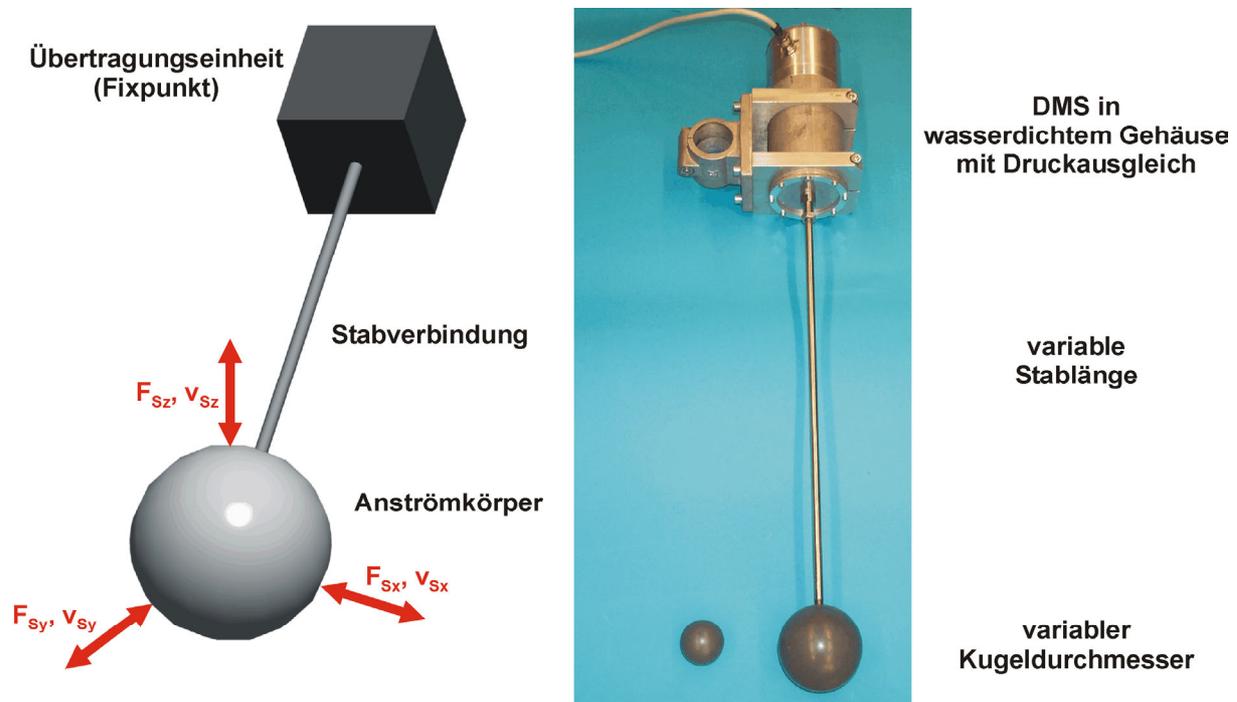


Abb. 5-7: Messprinzip des mechanischen Anströmkörper-Strömungsmesssystems

Das Strömungsmesssystem mit DMS-Messtechnik wurde daher für den Einsatz der Erfassung mehrdimensionaler Strömungen zu einem Prototyp weiterentwickelt, um am ausgewählten Fallbeispiel Emssperrwerk eingesetzt zu werden. Das Messprinzip des mechanischen Anströmkörper-Strömungsmesssystems ist in Abb. 5-7 dargestellt. Die Kraft einer mehrdimensionalen Strömung wirkt auf einen „Anströmkörper“. Dieser ist kugelförmig ausgeführt, um einerseits einen identischen Strömungswiderstand in den drei Raumrichtungen zu gewährleisten und andererseits eine Verschmutzung bzw. Bewuchs zu verhindern. Dieser ist an einem elastischen Stab aufgehängt, der fest an einem Fixpunkt eingespannt ist. Entsprechend der Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit kommt es zu einer Beeinflussung des mehrachsigen Spannungszustandes im Verbindungsstab. Diese Belastung des Stabes lässt sich empfindlich durch Dehnungsmessstreifen (DMS) erfassen.

Zur Datenerfassung und Analyse wurde ein PC-gestütztes Messsystem aufgebaut, welches eine transiente Aufzeichnung der Messdaten zur anschließenden offline Analyse ebenso ermöglicht, wie die online Anzeige der aktuellen Strömungsgeschwindigkeiten in den drei Messrichtungen.



Abb. 5-8: Anströmkörper-Strömungsmesssystem am Emssperwerk

Parallel zu den Messungen mit dem PIV-System fanden ebenfalls Messungen mit dem mechanischen Anströmkörper-Strömungsmesssystem am Emssperwerk statt (Abbildung 5-8), um einen Vergleich der beiden Messsysteme durchzuführen und auch um eine Verifizierung der Simulation der Strömungsgeschwindigkeiten am Emssperwerk zu ermöglichen. Abbildung 5-9 zeigt beispielhaft Strömungsmessungen am Emssperwerk am Pfeiler 1 in der Nebenöffnung 1 bei ablaufendem Wasser. Deutlich sind niederfrequente Schwankungen in der Hauptströmungsrichtung x zu erkennen, überlagert von Turbulenzen in der x - y -Ebene zu erkennen. Im Mittel liegt die Strömungsgeschwindigkeit in der Hauptströmungsrichtung x bei ca. $-0,3$ m/s. In der y -Richtung, quer zum Pfeiler, schwankt die Strömungsgeschwindigkeit um 0 m/s. Die senkrechte z -Richtung ist geprägt durch eine relativ konstante Strömungsgeschwindigkeit von ca. $0,25$ m/s mit geringer Schwankungsbreite, wobei diese konstante aufsteigende Strömung durch die Umströmung des Pfeilers bedingt ist. In der Simulation dieses Einsatzfalles wurden die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten bestätigt. Das mechanische

Anströmkörper-Strömungsmesssystem ist daher in der Lage auch turbulente Strömungen in allen drei Raumrichtungen empfindlich zu messen (Siehe auch Abbildung 6-1).

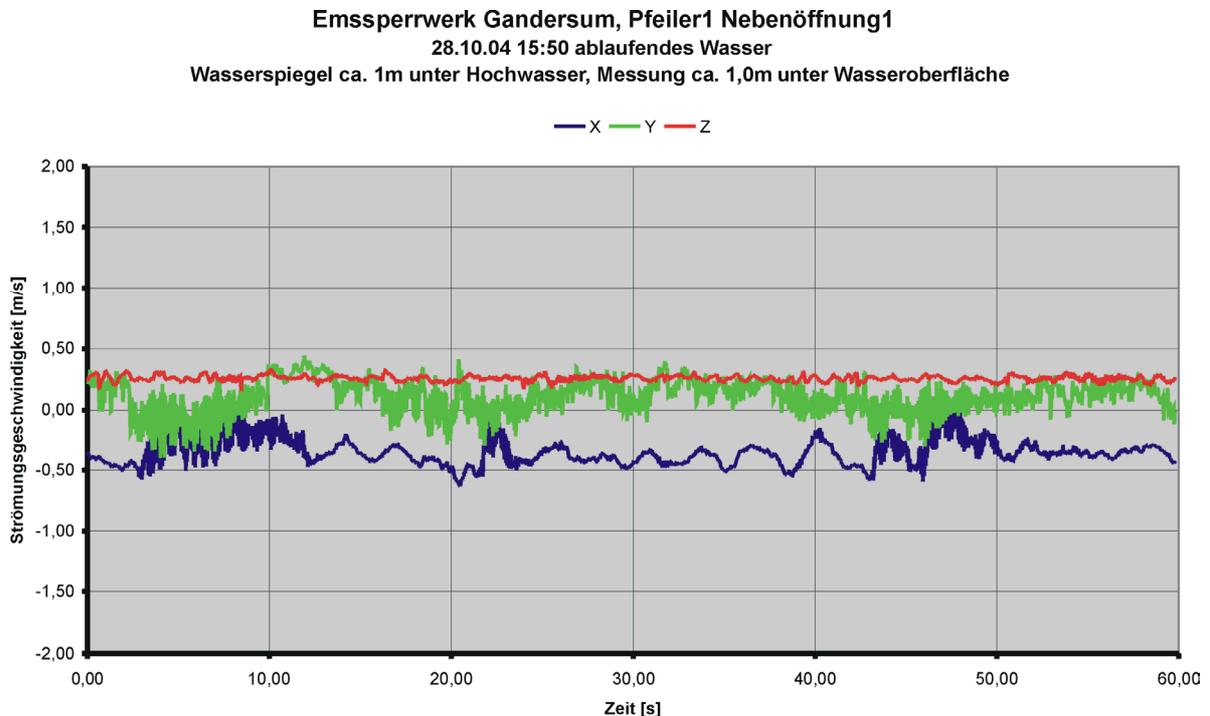


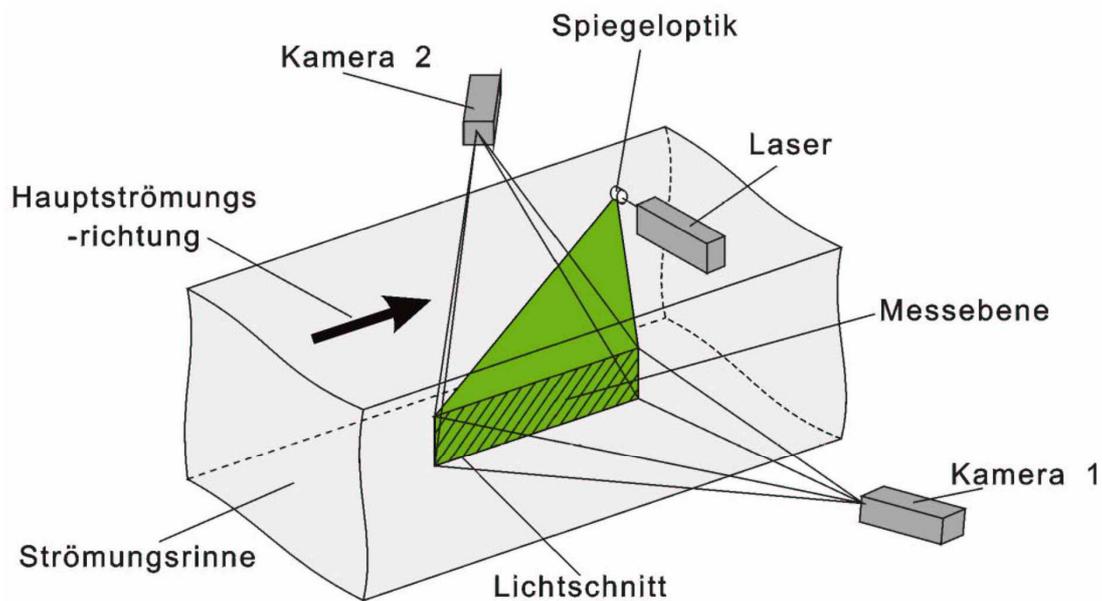
Abb. 5-9: Signale des Anströmkörper-Strömungsmesssystems

5.6 Particle-Image-Velocimeter (PIV-System), LZH

PIV-Messungen erlauben die simultane Aufnahme einer Vielzahl von Punkten durch die Analyse des von den Partikeln reflektierten Laser-Lichtes. Die Geschwindigkeit wird durch die statische Auswertung des Partikelversatzes, der mittels CCD-Kameras (Charge-Coupled Device) aufgenommen wird, innerhalb der Zeitspanne zwischen zwei Laser-Belichtungsimpulsen berechnet. Die Voraussetzung für die Anwendbarkeit der PIV-Verfahren ist eine orthogonale Anordnung der Laserstrahl- und der Beobachtungsachse (Abb. 5-10). Ferner muss die zu untersuchende Strömung eine ausreichende Partikel-Konzentration aufweisen. Durch eine fortschrittliche Hardware- und Softwaresteuerung kann auch bei Auftreten unterschiedlicher Partikelgrößen oder Blasen ein größtmöglicher Informationsgehalt extrahiert werden. PIV-Verfahren erlauben die Messung von Geschwindigkeiten im Bereich von einigen mm/s bis mehreren hundert m/s. Ferner bietet die PIV-Technik die Option mittels zweier CCD-Kameras die Geschwindigkeitsvektoren in einem quasi-3D Bereich zu bestimmen.

Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messdaten einer ADV-Sonde in der Strömungsrinne zeigte zufrieden stellende Übereinstimmungen. Dies lässt den Vergleich der Simulationsergebnisse mit den räumlich und zeitlich wesentlich höher aufgelösten PIV-Messdaten sinnvoll und sehr aussichtsreich erscheinen. Insbesondere ein Vergleich der sich bildenden Wirbelstrukturen wird mit den PIV-Messdaten möglich. Nach der Projektlaufzeit ist die Zusammenstellung und Abstimmung der Komponenten abgeschlossen. Die nötige mechani-

sche und steuerungstechnische Flexibilität des lasergestützten Gesamtsystems zur Anpassung an verschiedene Randbedingungen, wie Trübung, Platzbedarf und Beobachtungsfeldgröße, an unterschiedlichen Einsatzorten ist erreicht. Basierend auf umfangreichen Softwaretests erfolgte eine Auswahl von Parametersätzen, die die Konstellation im Praxisversuch berücksichtigen. Abbildung 5-11 zeigt beispielhaft das Strömungsfeld einer Welle. Deutlich lassen sich Geschwindigkeitskomponenten in z-Richtung, senkrecht zur Hauptströmungsrichtung (x-Richtung) erkennen, die ein Indiz für auftretende Turbulenzen sind. Ebenfalls erkennt man die gegenläufigen Vektoren von Wirbeln in der Messebene.



© LZH

Abb. 5-10: Particle-Image-Velocimeter

Je nach Aufgabenstellung bewährt sich das 3D-PIV-Messsystem im 2D- oder 3D-Modus zur Visualisierung von Geschwindigkeitsbereichen, Erstellung von Tiefenprofilen und Darstellung von Turbulenzen. Der Einsatz des Systems an Orten mit unterschiedlichen Strömungsbedingungen (Strömungsrinne und Umlaufrinne des Franzius-Institutes und Großer Wellenkanal (GWK) des Forschungszentrums Küste (FZK)) verifiziert die große Robustheit und Mobilität des Gesamtsystems. Die mechanische Flexibilität bei der Anordnung der Komponenten ist ein wesentlicher Vorteil bei der Anpassung an die jeweiligen baulichen bzw. geometrischen Randbedingungen. Weiterhin ermöglicht die flexible Positionierung des Strömungsmesssystems, bei gleich bleibenden Betriebsbedingungen des Sperrwerkes Strömungsmessungen in unterschiedlichen Wassertiefen und Entfernungen vom Einbauort (Abb.5-12).

Weitere wichtige Einsatzbereiche der beschriebenen Messtechnik sind Standorte, die einen ganzjährigen Betrieb erfordern und bei denen es durch Strömung, Tide und Wellengang in Ausnahmefällen zu einer kritischen Belastung kommen kann. Daher soll auch das Potenzial zum Einsatz des entwickelten Gesamtmesssystems in Bereichen des Küstenmonitoring und der Meerestechnik auf Schiffen und an Messstationen der Meeresforschung geprüft werden.

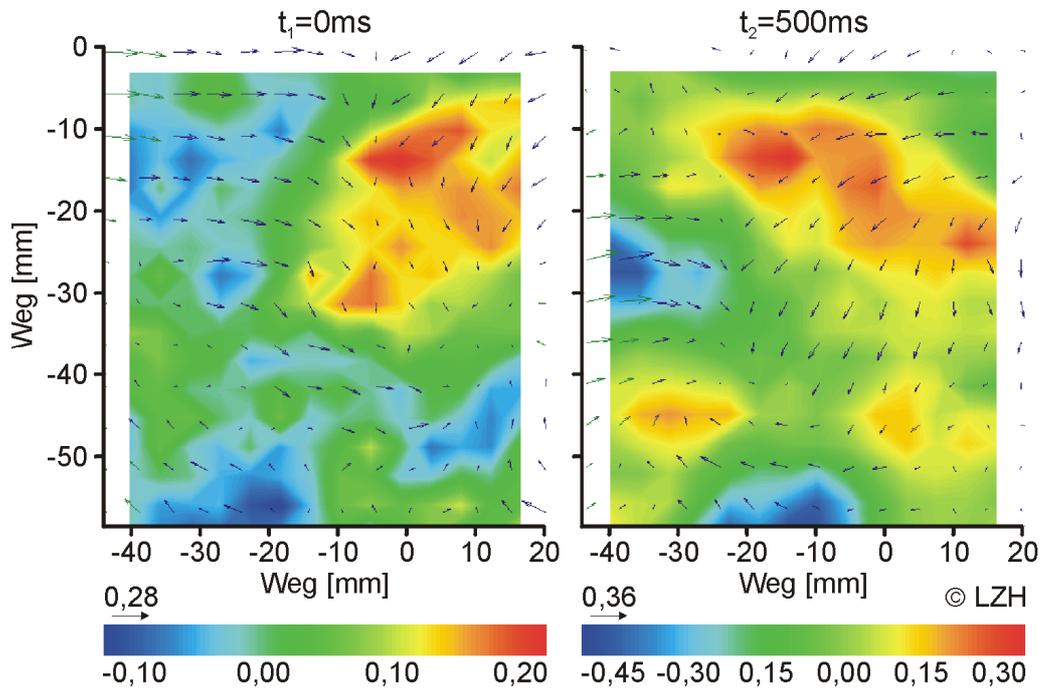


Abb. 5-11: Strömungsfeld einer Welle



© LZH

Abb. 5-12: PIV-Messungen am Emssperwerk

Aus den aufgenommen Einzelbildern des PIV-Systems lassen sich zusätzliche Informationen zum Sedimenttransport ermitteln. Die Aufnahmen der in Zeit und Ort genau definierten Streulichtreflexe des natürlichen Seedings bieten die Möglichkeit der Visualisierung der Se-



dimentbewegung. Eine Auswertung bezüglich Größe, Form und Zusammensetzung (organische bzw. anorganische Bestandteile) wird zur Zeit geprüft.

Die Weiterführung der bereits abgeschlossenen Arbeitsschritte kann mit der Planung von parallelen Versuchen der Systeme (PIV-System, mechanisches System und ADV-Sonde) erfolgen. Dazu besteht die Möglichkeit die Verfahren zeitgleich an unterschiedlichen Standorten für weiterführende Modell- und Praxisversuche zu installieren. Mit Blick auf mögliche Untersuchungen zum Sedimenttransport kann das PIV-System unabhängig von anderen Messsystemen genutzt werden.

5.7 Numerische Simulationen und physikalische Versuche, FI

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung einer angepassten Numerik, um Betriebszustände im Voraus genauer simulieren und kritische Betriebszustände ausschließen zu können, ein stationäres 3D-Strömungsmesssystem zur Verifizierung, bestehend aus Particle-Image-Velocimeter (PIV-System), mechanischem Strömungsmesssystem und Trägersystem, für hochturbulente Strömungszustände zu entwickeln, aufzubauen, im Wasserlabor zu testen und anhand eines ausgewählten Fallbeispiels zu erproben.

Die im physikalischen Modell gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten wurden zur Verifikation eines numerischen Modells für das gewählte Fallbeispiel genutzt. Für die numerischen Simulationen wurde das Programmsystem STAR-CD eingesetzt, um die Leistungsstärke bei der Berechnung von Strömungen mit freier Oberfläche und der Berücksichtigung von beweglichen Strukturen zu bestimmen.

Als Fallbeispiel wurde das Sturmflutsperrwerk in der Ems bei Gandersum ausgewählt, da hier für die Entwicklung der Messsysteme maßgebliche Randbedingungen, nämlich variierende Wasserstände, variierende Salz- und Sedimentkonzentrationen, Tideeinfluss, sowie verschiedene Lastfälle infolge des Schließens und Öffnen der Sperrwerksverschlüsse, vorhanden sind. Für dieses Fallbeispiel liegen am Franzius-Institut aus umfassenden Untersuchungen in physikalischen Modellen Ergebnisse zu verschiedenen Bauteilen und Fragestellungen des Emssperrwerkes vor, die für die Modellierung der einzelnen Simulationen genutzt wurden.

Zunächst wurden an einem unbeweglichen Hubtormodell die Strömungsgeschwindigkeiten unter Berücksichtigung der freien Oberfläche betrachtet. Ein Vergleich mit Messungen im physikalischen Modell zeigte sehr gute Übereinstimmungen. Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten wurden mit einer ADV-Sonde und dem in der Entwicklung befindlichen PIV-System durchgeführt. Die Übereinstimmung im strömenden Bereich oberhalb eines Hubtores war zwischen den Messungen der ADV-Sonde, des PIV-Systems und den Ergebnissen der numerischen Simulationen sehr gut. Unterhalb des Hubtores, wo ein hoher Luftblaseneintrag zu verzeichnen war und die ADV-Sonde nicht mit der geforderten Genauigkeit messen konnte, zeigten sich die Vorteile der numerischen Simulation. In diesen Bereichen wurden von der Simulation Strömungsgeschwindigkeiten bestimmt, wie sie aufgrund des sich unterhalb des Hubtores entwickelnden Schussstrahles zu erwarten waren.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde das Modell eines beweglichen Hubtores unter Berücksichtigung der freien Oberfläche aufgebaut und die Entwicklung der Strömungsge-

schwindigkeiten unterstrom während eines Schließ- und Öffnungsvorgangs betrachtet. Im Vergleich mit den Messungen der ADV-Sonde zeigte sich eine ebenfalls sehr gute Übereinstimmung bei der Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten. Auch im Schussstrahl und knapp (< 10 cm) unterhalb der freien Wasserspiegeloberfläche zeigten sich physikalisch richtige Ergebnisse.

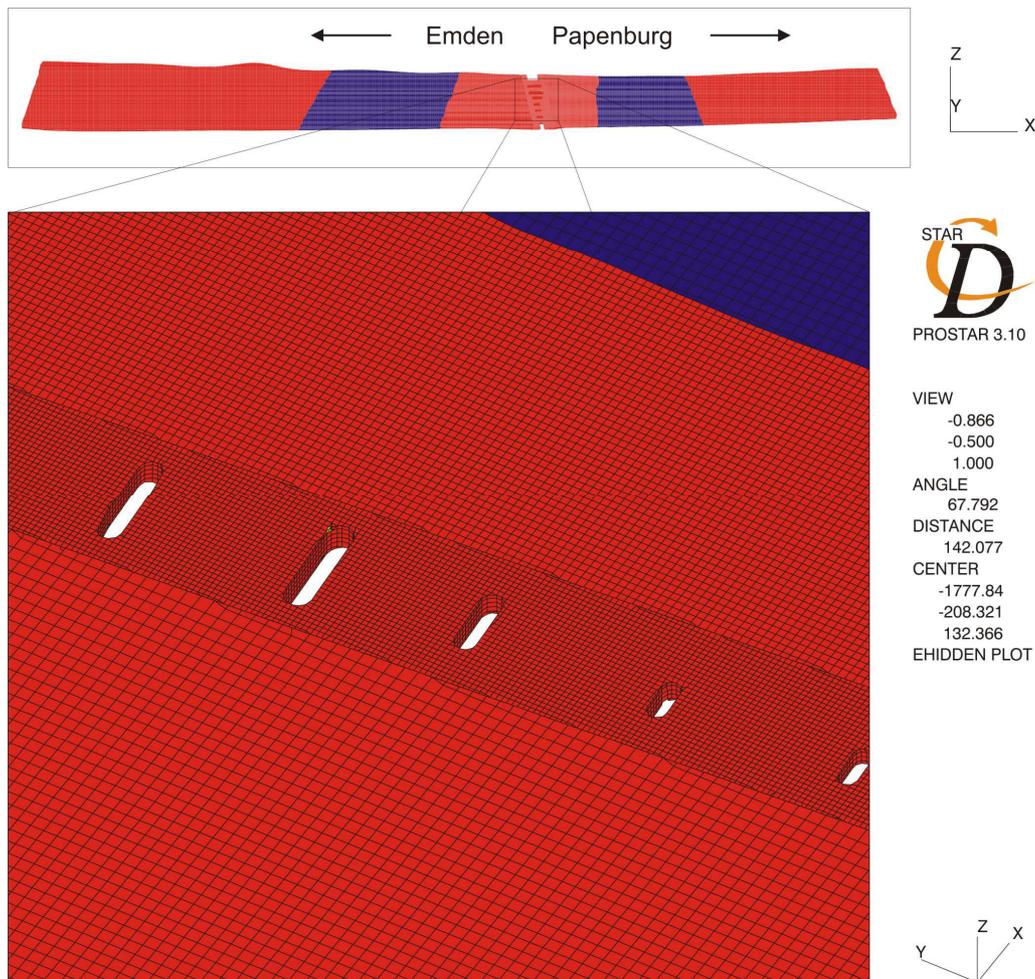


Abb. 5-13: Ausschnitt des numerischen Modells des Emssperwerkes

Anschließend wurde ein Modell des Emssperwerkes bestehend aus einem insgesamt ca. 2500 m langen Ausschnitts der Ems aufgebaut. Der Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten im numerischen Modell mit Schwimmeraufnahmen aus einem hydraulischen Tidemodell des Emssperwerkes zeigte im Zustrom (jeweils bei Ebb- und Flutstrom) Abweichungen unter 15%. Im Abstrom des Bauwerkes lagen die Abweichungen meist unterhalb von 15%. An dieser Stelle sei auf die teils schwierige Zuordnung Schwimmerpositionen hingewiesen. In den einzelnen Öffnungen des Sperrwerkes lagen die Abweichungen ebenfalls im Bereich von 15 bis 30%. Hier war die Datenlage aufgrund der wenigen oder gar nicht vorhandenen Schwimmer schlecht. Ein Vergleich im Fernfeld zeigt jedoch, dass die Strukturen des Zu- und Abflusses richtig simuliert wurden. Daher kann mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass die Strömungsgeschwindigkeiten zwischen den Sperrwerks Pfeilern qualitativ und quantitativ richtig sind.

Am Beispiel der sich schließenden Hauptschiffahrtsöffnung wurde gezeigt, dass dynamische Lastfälle und die sich hieraus ergebenden instationären Strömungszustände mit Hilfe der numerischen Simulation darstellen lassen.

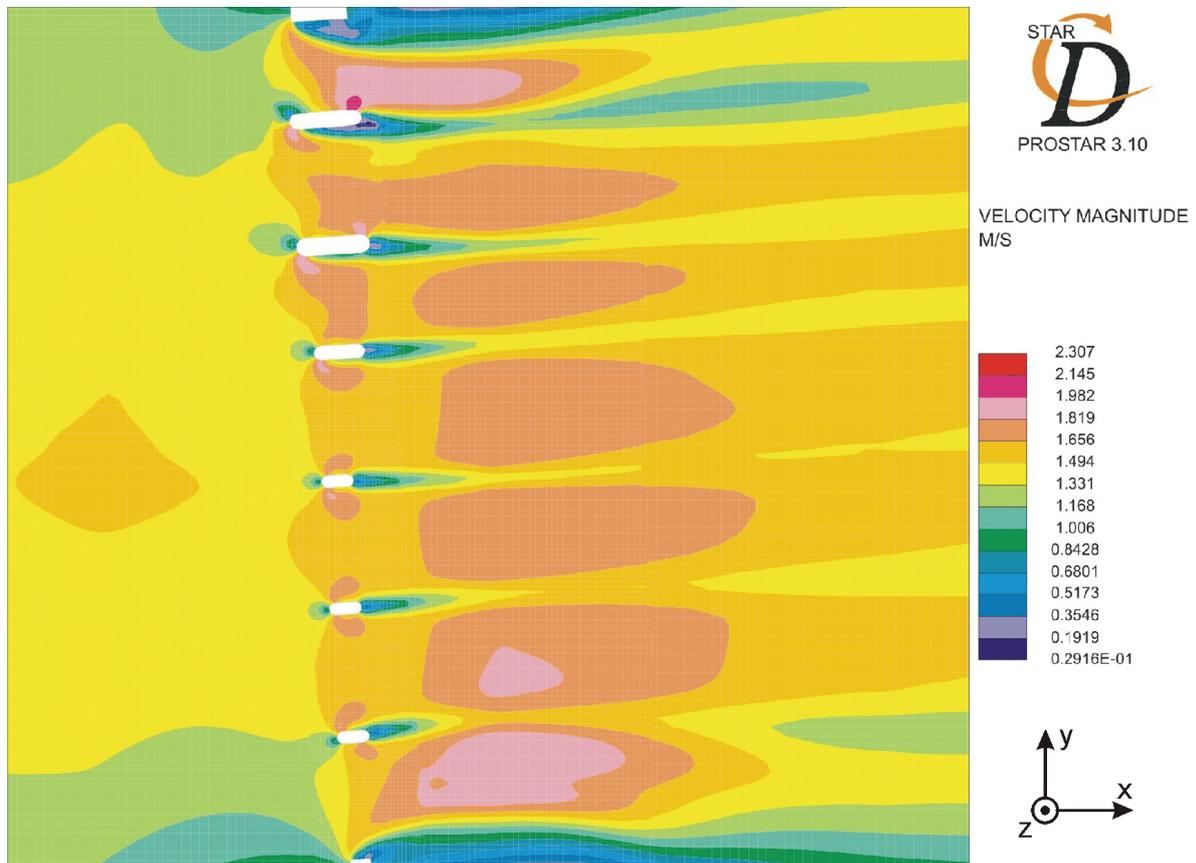


Abb. 5-14: Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten am Emssperrwerk

Die Anwendbarkeit des CFD-Programms STAR-CD kann hinsichtlich der Stabilität und der zu erreichenden Genauigkeit für kleinräumige Simulationen mit freier Oberfläche im Nahbereich von Strukturen als geeignet angesehen werden. Die hierbei mögliche räumliche und zeitliche Diskretisierung und die damit einhergehende Informationsdichte sind ausreichend. Bei der Simulation von großräumigen Strukturen mit freier Oberfläche ist diese Dichte auch gegeben, jedoch steigt mit der Ausdehnung des Modellgebietes die notwendige Rechenzeit stark an. Weitere Simulationen für andere Anwendungsfälle (Eidersperrwerk, Schleusen, Wehranlagen, etc.) sollten die Anwendbarkeit der gewählten Methodik weiter absichern.



6 Zusammenfassung

In Zusammenarbeit mit dem Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover und dem Laser Zentrum Hannover e.V. wurde das Vorhaben „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ erfolgreich abgeschlossen. Ziel des Vorhabens war es, ein stationäres 3D-Strömungsmesssystem, bestehend aus Particle-Image-Velocimeter (PIV), mechanischem Anströmkörper-Strömungsmesssystem und Trägersystem, für hochturbulente Strömungszustände zu entwickeln, aufzubauen, im Wasserlabor zu testen und anhand des ausgewählten Fallbeispiels Emssperrwerk zu erproben sowie die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten zur Verifizierung und Kalibrierung eines numerischen Modells für das gewählte Fallbeispiel zu nutzen.

Im Rahmen der Entwicklung des numerischen Modells wurden erfolgreiche Simulationen mit dem beweglichen Modell eines Hubtores durchgeführt. Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messdaten einer ADV-Sonde zeigte zufrieden stellende Übereinstimmungen. Dies ermöglichte die Validierung der Simulationsergebnisse mit den räumlich und zeitlich wesentlich höher aufgelösten PIV-Messdaten. Insbesondere ein Vergleich der sich bildenden Wirbelstrukturen wird mit den PIV-Messdaten möglich. Bei der Simulation der Strömungsgeschwindigkeiten im und am Emssperrwerk sind Vergleiche mit den Ergebnissen von durchgeführten physikalischen Modellversuchen qualitativ zufrieden stellend durchgeführt worden. Am Beispiel der sich schließenden Hauptschiffahrtsöffnung wurde gezeigt, dass sich dynamische Lastfälle und die sich hieraus ergebenden instationären Strömungszustände mit Hilfe der numerischen Simulation darstellen lassen

Die Anwendbarkeit des CFD-Programms STAR-CD kann hinsichtlich der Stabilität und der zu erreichenden Genauigkeit für kleinräumige Simulationen mit freier Oberfläche im Nahbereich von Strukturen als geeignet angesehen werden. Die hierbei mögliche räumliche und zeitliche Diskretisierung und die damit einhergehende Informationsdichte sind ausreichend. Bei der Simulation von großräumigen Strukturen mit freier Oberfläche ist diese Dichte auch gegeben, jedoch steigt mit der Ausdehnung des Modellgebietes die notwendige Rechenzeit stark an. Weitere Simulationen für andere Anwendungsfälle (Eidersperrwerk, Schleusen, Wehranlagen, etc.) sollten die Anwendbarkeit der gewählten Methodik weiter absichern.

Ein Particle-Image-Velocimeter erlaubt die Messung von Strömungsgeschwindigkeiten zwei- bzw. dreidimensional über einen weiten Geschwindigkeitsbereich. Basierend auf der selektiven, getriggerten Beleuchtung einer geeigneten Ebene innerhalb eines Strömungsprofils mit speziell an die Aufgabe angepasster Laserstrahlung und der Erfassung des hierdurch erzeugten Bildes mittels einer CCD-Kamera, bzw. zwei CCD-Kameras zur quasi 3D-Darstellung, können durch die simultane Aufnahme einer Vielzahl von Punkten wesentliche Erkenntnisse hinsichtlich der Strömungsverhältnisse in Form von Geschwindigkeitsvektoren zeit- und ortsaufgelöst gewonnen werden. Die Geschwindigkeit wird durch die Auswertung des aufgenommenen Partikelversatzes innerhalb der Zeitspanne zwischen zwei Belichtungsimpulsen berechnet, wobei die zu untersuchende Strömung eine ausreichende Partikelkonzentration aufweisen muss.

Nach Zusammenstellung und Abstimmung der einzelnen Komponenten des PIV-Systems ist die nötige mechanische und steuerungstechnische Flexibilität des lasergestützten Gesamt-

systems zur Anpassung an verschiedene Randbedingungen, wie Trübung, Platzbedarf und Beobachtungsfeldgröße, an unterschiedlichen Einsatzorten erreicht. Basierend auf umfangreichen Softwaretests erfolgte eine Auswahl von Parametersätzen, die die Konstellation im Praxisversuch berücksichtigen. Es zeigt sich ein komplexer Zusammenhang zwischen vorgefundener Trübung, zusätzlichen oder natürlichen Seedings und der am Laser zu wählenden Intensität. Es besteht keine einfache mathematische Verknüpfung von einzustellender Intensität und Trübung. Die gefundenen Daten sind für den Standort spezifisch und ergeben jeweils eine individuelle Parametermatrix. Wie die Praxisversuche im Modellmaßstab zeigten, sind die in natürlichen Gewässern enthaltenen Partikel geeignet, ausreichend gute Streulichtreflexe zu generieren.

Je nach Aufgabenstellung bewährt sich das 3D-PIV-Messsystem im 2D- oder 3D-Modus zur Visualisierung von Geschwindigkeitsbereichen, Erstellung von Tiefenprofilen und Darstellung von Turbulenzen. Der Einsatz des Systems an Orten mit unterschiedlichen Strömungsbedingungen verifiziert die große Robustheit und Mobilität des Gesamtsystems. Die mechanische Flexibilität bei der Anordnung der Komponenten ist ein wesentlicher Vorteil bei der Anpassung an die jeweiligen baulichen bzw. geometrischen Randbedingungen.

Zusätzlich zum Particle-Image-Velocimeter (PIV) wurde ein robustes mechanisches Anströmkörper-Strömungsmesssystem entwickelt, welches die Strömungsgeschwindigkeit in den drei Raumrichtungen über die Auslenkung eines Stabes mit einem Anströmkörper ermittelt. Es wurden verschiedene Modelle des mechanischen Anströmkörper-Strömungsmesssystems mit unterschiedlicher Messtechnik aufgebaut und unter realistischen Bedingungen evaluiert. Strömungsmessungen im Vergleich mit einer ADV-Sonde als Referenz ergaben eine sehr gute Übereinstimmung der Messwerte auf das ausgewählte System.

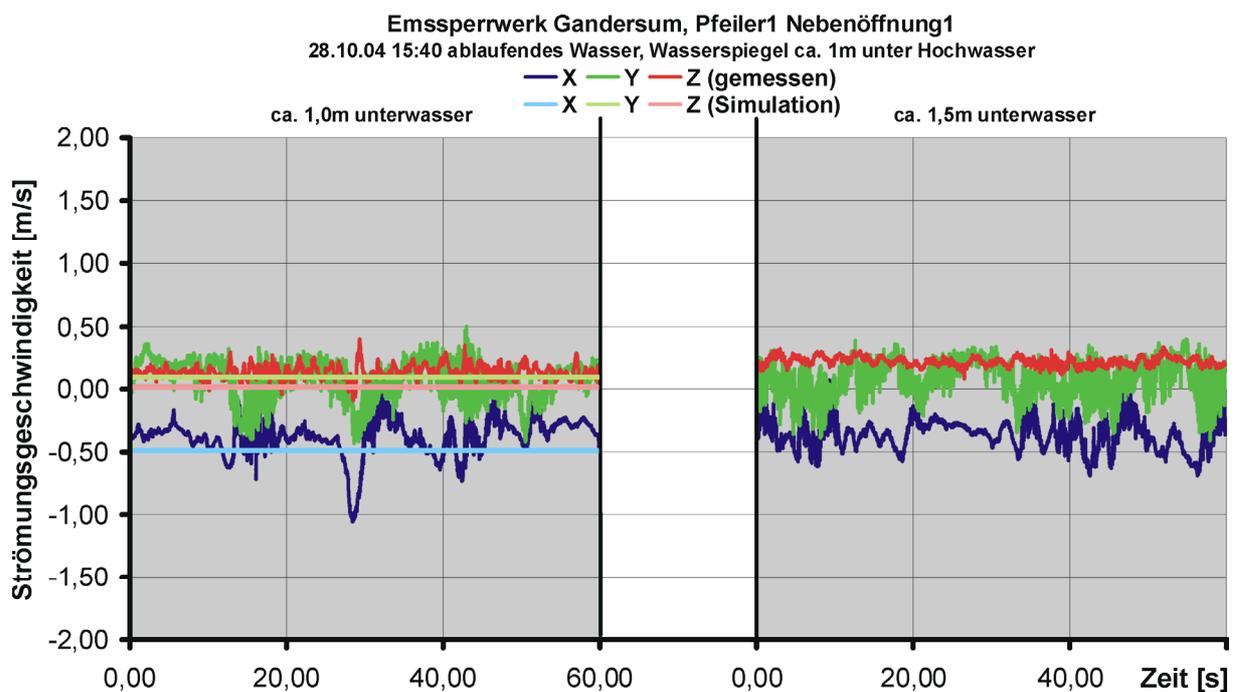


Abb. 6-1: Vergleich des Anströmkörper-Strömungsmesssystems mit der Simulation

Um die verschiedenen Messsysteme unter unterschiedlichen realen Betriebsbedingungen zu beurteilen, wurde hinsichtlich der geforderten Randbedingungen ein Pfeiler des Emssperrwerks ausgewählt. Dieser Einsatzort ist charakterisiert durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten und Turbulenzen infolge Ebb- und Flutstrom, stark unterschiedliche Wasserstände innerhalb einer Tide, variierenden Salzgehalt aufgrund der Tide, die Trübung des Wassers beeinflussende Schwebstofffracht sowie unterschiedliche Betriebszustände beim Öffnen und Schließen der Sperrwerkstore. In Zusammenarbeit mit dem NLWK-Projektteam Emssperrwerk wurde ein Installationsort des Strömungsmesssystems in der Nebenöffnung 1 des Emssperrwerks, gegenüber der Betriebskanzlel ausgewählt. An dieser Position ist mittlerweile ein Schienensystem angebracht, das es ermöglicht das Trägersystem mit den Messsystemen flexibel in unterschiedlichen Tauchtiefen und Abständen von der Pfeilerwand zu positionieren.

Einen Vergleich der am Emssperrwerk mit dem mechanischen Anströmkörper-Strömungsmesssystem durchgeführten Messungen in unterschiedlichen Wassertiefen und mit den simulierten Strömungsgeschwindigkeiten zeigt die Abb. 6-1. Deutlich sind auch in diesen Messungen die dynamischen Anteile durch Wirbelbildung zu erkennen sowie die unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten in den einzelnen Strömungsrichtungen. Für die Messung in 1,0 m Wassertiefe ist zusätzlich die aus numerischen Berechnungen bestimmte Strömungsgeschwindigkeit für diese Wassertiefe aufgetragen. Für den Mittelwert in den Hauptströmungsrichtungen, der x- und y-Komponente, zeigt sich eine gute Übereinstimmung. Hier kann lediglich der Mittelwert verglichen werden, da die Messung mit 25 Hz deutlich höherfrequent aufgelöst ist, als in den Simulationsberechnungen mit 0,2 Hz und daher die vorhandenen Turbulenzen durch die Umströmung des Pfeilers in der Simulation nicht erfasst sind.

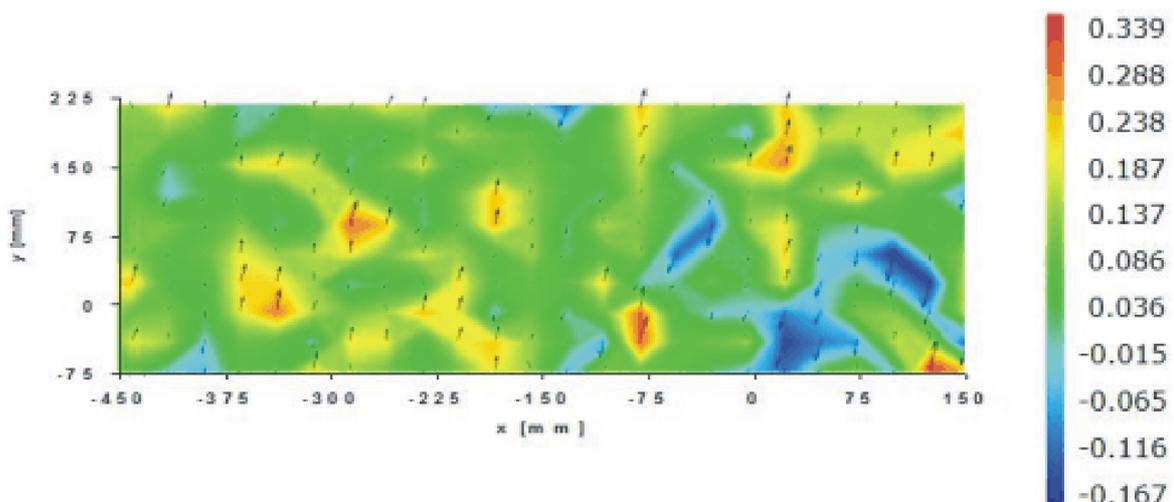


Abb. 6-2: Messung des PIV-Systems

Ein ähnliches Ergebnis, wie die Strömungsmessungen mit dem mechanischen Anströmkörper-Strömungsmesssystem, zeigt auch das PIV-System. Eine Aufnahme des PIV-Systems unter vergleichbaren Bedingungen zeigt Abbildung 6-2. In Hauptströmungsrichtung wurden auch hier ca. 0,5m/s gemessen. Zur besseren Darstellung der y-Komponente ist in Abbil-



dung 6-2 die x-Komponente herausgefiltert. So zeigt auch hier die y-Richtung, dargestellt durch die schwarzen Pfeile, ein ähnliches Verhalten wie bei der Messung mit dem Anströmkörper-Strömungsmesssystem. Deutlich sind Turbulenzen zu erkennen in Form von Richtungsänderungen von positiver zu negativer x-Richtung. Durch eine farbliche Skalierung ist die z-Komponente dargestellt. Ebenfalls sind Schwankungen zu erkennen, wie auch bei der Messung mit dem Anströmkörper-Strömungsmesssystem in 1m Wassertiefe. Insgesamt zeigt sich sowohl beim mechanischen Anströmkörper-Strömungsmesssystem sowie beim PIV-System eine gute Übereinstimmung der Messungen mit der Simulation und auch dem Referenz-Messsystem.

Mit den im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführten Arbeiten wurde, basierend auf innovativen Lösungsansätzen und neuartigen Messtechniken, ein 3D-Strömungsmesssystem bestehend aus Particle-Image-Velocimeter (PIV-Messsystem), mechanischem Anströmkörper-Strömungsmesssystem und Trägersystem zur lokalen Bestimmung von hochturbulenten Strömungszuständen in Naturströmungen entwickelt und am Fallbeispiel Emssperrwerk bei Gandersum im Dauereinsatz erprobt. Damit bestehen erstmals Möglichkeiten hochturbulente Strömungszustände in der Natur im Bereich von Küstenschutzbauwerken exemplarisch im Dauereinsatz zu erfassen, zu überwachen und damit die Ergebnisse von numerischen Berechnungen anhand von Naturmessungen zu kalibrieren und zu verifizieren

Eine Weiterführung der abgeschlossenen Arbeitsschritte kann mit der Planung von parallelen Versuchen der Systeme erfolgen. Dazu besteht die Möglichkeit die Verfahren zeitgleich an unterschiedlichen Standorten für weiterführende Modell- und Praxisversuche zu installieren. Mit Blick auf mögliche Untersuchungen zum Sedimenttransport kann das PIV-System unabhängig von anderen Messsystemen genutzt werden. Eine enge Zusammenarbeit mit interessierten Instituten, Forschungslaboren, Behörden und mit öffentlichen Aufgaben beauftragten Betrieben ist dabei angestrebt.



7 Literatur

- KOLB, M. Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen des Flachwasser-ADCP, Deutsche Hydrografische Gesellschaft e.V., Hamburg, 1994
- GRIFFITHS, G. Shipboard ADCP Observations during RRS Charles Darwin Cruise 51, Inst. of Oceanographic Sciences, Deacon Laboratory, 1992
- KOLB, M.;
WITTE, G. Transport Monitoring by ADCP of Material dredged up in the Port of Hamburg after its down-river disposal, GKSS-Forschungszentrum GmbH, Geesthacht, 1992
- FANGER, H.-U.;
KOLB, M. Hydrographische Messtechnik zur Untersuchung von Transportvorgängen in der Elbe, GKSS-Forschungszentrum GmbH, Geesthacht, 1992
- NORTEK NORTEK AS 10 MHZ ADV Precise Measurements of 3-D Fluid Flow, NORTEK, 1998.
- TSI, 1998 Flow Visualization, TSI Incorporated GmbH, 1998.
- DANTEC Particle Image Velocimetry Instrumentation for Towing Tanks, DANTEC Measurement Technology A/S, 1998.
- CHEN, Y.S.;
KIM, S.W. Computation of turbulent flows using an extended $k-\varepsilon$ turbulence closure model. NASA Report CR-179204, 1987.
- FORKEL, C. Die Grobstruktursimulation turbulenter Strömungs- und Stoffausbreitungsvorgänge in komplexen Geometrien. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau der RWTH Aachen, Heft 102 Aachen, 1995.
- LAUNDER, B.E.;
SPALDING, D.B. The numerical computation of turbulent flows. Comp. Math. In Appl. Mech. & Eng., Vol. 3, S. 269, 1974.
- RHODI, W. Experience with two-layer models combining the $k-\varepsilon$ model with a one equation model near the wall. Final Report: AIAA91-0216, 1991.
- YAKHOT, V.;
ORSZAG, S.A. Renormalization group analysis of turbulence, I. Basic Theory. Journal of Scientific Computing, Vol. 1, S. 1-51, 1986.
- YAKHOT, V.;
ORSZAG, S.A.;
THANGAM, S.;
GATSKI, T.B.;
SPEZIALE, C.G. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. Phys. Fluids, A4, No. 7, S. 1510-1520, 1992.



8 Veröffentlichungen

- MATHEJA, A.;
SCHEFFERMANN, J.;
ZIMMERMANN, C. Entwicklung eines stationären 3D-Strömungsmesssystems für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss, 4. FZK-Kolloquium „Küsten-Morphodynamik und Küstenschutzbauwerke“, Hannover, 20.03.2003
- STURE, U.;
WALTER, J.;
BARCIKOWSKI, S.;
BUNTE, J.;
HAFERKAMP, H. Development of an in-situ 3D-particle image velocimeter (PIV) for coastal and river monitoring, 1st Workshop Coastal Zone, Ghent, Belgium, 5-7th June 2003
- WALTER, J.;
BUNTE, J.;
HAFERKAMP, H. Konzept eines stationären 3D-PIV-Strömungsmesssystems für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss, 10. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, S.14.1-14.7, Rostock 10.-12.09. 2002
- WALTER, J.;
BARCIKOWSKI, S.;
BUNTE, J.;
HAFERKAMP, H. Entwicklung eines stationären in-situ 3D-PIV-Strömungsmesssystems für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss, 11. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, S. 42.1-42.10, Braunschweig 09.-11.09. 2003
- WALTER, J.;
BUNTE, J.;
HAFERKAMP, H. „PIV Messsystem für hochturbulente Strömungszustände in der Praxis, PIV/LIF User Meeting (Dantec Dynamics), 18.-19. Mai 2004 in Wolfsburg
- WALTER, J.;
BUNTE, J.;
HAFERKAMP, H. Einsatz eines stationären 3D-PIV-Strömungsmesssystems für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss, 12. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, S.35.1-35.11, Karlsruhe 07.-09.09. 2004
- WALTER, J.;
BARCIKOWSKI, S.;
BUNTE, J.;
HAFERKAMP, H. „Stationäres 3D-PIV-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände, Hrsg. Laser Zentrum Hannover e.V., LZH-aktuell Ausgabe 40, Mai 2002
- WALTER, J.;
BARCIKOWSKI, S.;
HAFERKAMP, H. Anwendung der Lasertechnik für Messungen von Strömungen und Transportprozessen in der Natur und im GWK, 5. FZK-Kolloquium "Seegang, Küsten- und Offshorebauwerke", S. 141-148, Hrsg. Forschungszentrum Küste (ISSN 1610-5249), Hannover, 08.03.2005



REIMCHE, W.; Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss, 9. KFKI-Seminar zur Küstenforschung, Bremerhaven, November 2004
SCHEFFERMANN, J.;
MATHEJA, A.;
ZIMMERMANN, C.;
WALTER, J.;
BARCIKOWSKI, S.;
BUNTE, J.;
HAFERKAMP, H.;
SCHEER, C.;
BACH, FR.-W.

REIMCHE, W.; Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss, NOKIS, Nord- und Ostsee KüstenInformations System, 2003, <http://nokis.baw.de/npublic/research/PTJ/03KIS036.htm>
SCHEFFERMANN, J.;
MATHEJA, A.;
ZIMMERMANN, C.;
WALTER, J.;
BARCIKOWSKI, S.;
BUNTE, J.;
HAFERKAMP, H.;
SCHEER, C.;
BACH, FR.-W.