

**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**

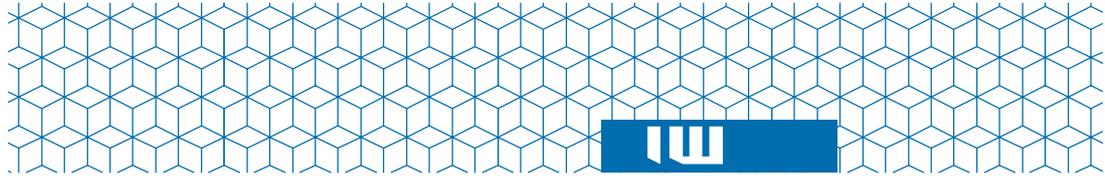
Projektpartner:

**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 B**

**Mechanisches Anströmkörper-Strömungsmesssystem,  
Entwicklung des Trägersystems und der Tauchgehäuse**

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](mailto:office@iw.uni-hannover.de)

[reimche@iw.uni-hannover.de](mailto:reimche@iw.uni-hannover.de)

[scheer@iw.uni-hannover.de](mailto:scheer@iw.uni-hannover.de)



## Inhaltsverzeichnis

	Seite:
1	Einleitung ..... 4
2	Aufgabenstellung und Entwicklungsarbeiten..... 5
2.1	Stationäres 3D-Strömungsmesssystem und Trägersystem ..... 6
2.2	Anwendungsfall – Sturmflutsperrwerk in der Ems bei Gandersum ..... 8
3	Mechanisches Anströmkörper-Strömungsmesssystem ..... 10
3.1	Stand der Technik ..... 10
3.2	Anforderungsprofil ..... 10
3.3	Technische Umsetzung..... 12
3.3.1	Dehnungsmessung an der Stabverbindung ..... 12
3.3.2	Auslenkung des Anströmkörpers ..... 12
3.4	Konstruktive Ausführung ..... 13
3.4.1	Mechanisches Anströmkörper-Strömungsmesssystem mit DMS-Messtechnik ..... 13
3.4.2	Mechanisches Anströmkörper-Strömungsmesssystem mit Wegmesstechnik ..... 17
3.5	Weiterentwicklung des mechanischen Anströmkörper- Strömungsmesssystems mit DMS-Messtechnik ..... 21
3.6	Datenerfassungs- und Analysesystem ..... 22
4	Entwicklung des Trägersystems und der Tauchgehäuse ..... 25
5	Messungen mit dem Anströmkörper-Strömungsmesssystem am Emssperrwerk ..... 30
6	Zusammenfassung..... 34
7	Literatur ..... 36

## Abbildungsverzeichnis

	Seite:
Abb. 1-1 Zielsetzung des Projektes .....	5
Abb. 1-2 Entwicklungsarbeit im Projekt .....	6
Abb. 1-3 Particle-Image-Velocimeter .....	7
Abb. 1-4 Sturmflutsperrwerk in der Ems bei Gandersum .....	8
Abb. 2-1 Prinzip des mechanischen Strömungsmesssystems .....	11
Abb. 2-2 Anströmkörper-Strömungsmesssystem mit DMS-Messtechnik .....	14
Abb. 2-3 Kalibrierkurve des Anströmkörper-Strömungsmesssystems mit DMS-Messtechnik .....	15
Abb. 2-4 Vergleich Strömungsmesssystem mit DMS-Messtechnik – ADV Sonde, in Hauptströmungsrichtung .....	16
Abb. 2-5 Anströmkörper-Strömungsmesssystem mit Wegmesstechnik .....	17
Abb. 2-6 Kalibrierkurve des Anströmkörper-Strömungsmesssystems mit Wegmesstechnik .....	19
Abb. 2-7 Vergleich Strömungsmesssystem mit Wegmesstechnik – ADV Sonde, in Hauptströmungsrichtung .....	20
Abb. 2-8 Strömungsmesssystem mit DMS-Messtechnik und integrierten Verstärkern .....	22
Abb. 2-9 Bildschirmanzeige der Datenerfassung und Analyse .....	24
Abb. 3-1 Konzept des Trägersystems und Anordnung der Tauchgehäuse .....	26
Abb. 3-2 Tideneinfluss auf das Strömungsmesssystem .....	27
Abb. 3-3 Position des Messsystems am Emssperrwerk .....	28
Abb. 3-4 3D-Strömungsmesssystem am Emssperrwerk .....	28
Abb. 3-5 Tauchgehäusekomponenten des PIV-Systems .....	29
Abb. 4-1 Anströmkörper-Strömungsmesssystem am Emssperrwerk .....	30
Abb. 4-2 Strömungsmessung am Emssperrwerk in 1m Wassertiefe .....	31
Abb. 4-3 Strömungsmessung am Emssperrwerk in 1,5m Wassertiefe .....	31
Abb. 4-4 Vergleich der Strömungsmessungen mit der Simulation .....	32
Abb. 4-5 Messung mit dem PIV-Systems .....	33



## 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 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.

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 Aufgabenstellung und Entwicklungsarbeiten

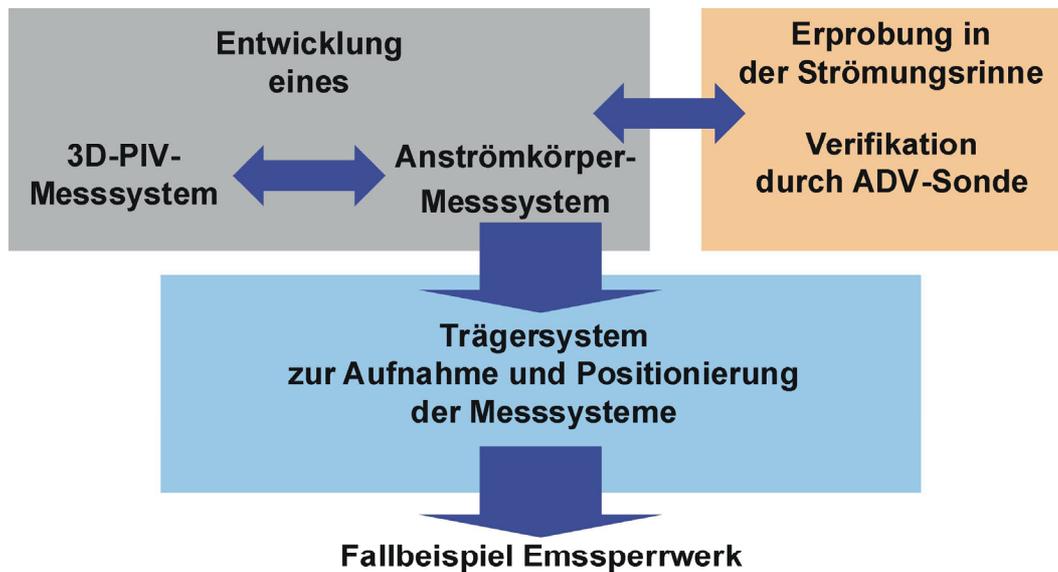
In der Vergangenheit vermehrt aufgetretene Schadensfälle an verschiedenen wasserbaulichen Strukturen unterstrichen die Notwendigkeit einer neuen Messtechnik und einer angepassten Numerik, um Betriebszustände im Voraus genauer zu simulieren und somit kritische Belastungen von vornherein ausschließen zu können. Die Anwendung numerischer Verfahren für die Beschreibung derartiger Strömungsvorgänge war zwar möglich, jedoch in ihrer Aussagefähigkeit begrenzt, da die notwendige Datengrundlage für eine Kalibrierung bzw. Validierung der zeitlich und räumlich hochaufgelösten Modelle weitestgehend fehlte. 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. 1-1: 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 Wasserstandsdifferenzen 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 Senkgeschwindigkeiten, zu verschiedenen Tidephasen, Seegangsbelastungen und binnenseitigen Oberwasserzuflüssen) zur Vermeidung von kritischen Betriebszuständen zu optimieren.



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

Abb. 1-2: Entwicklungsarbeit im Projekt

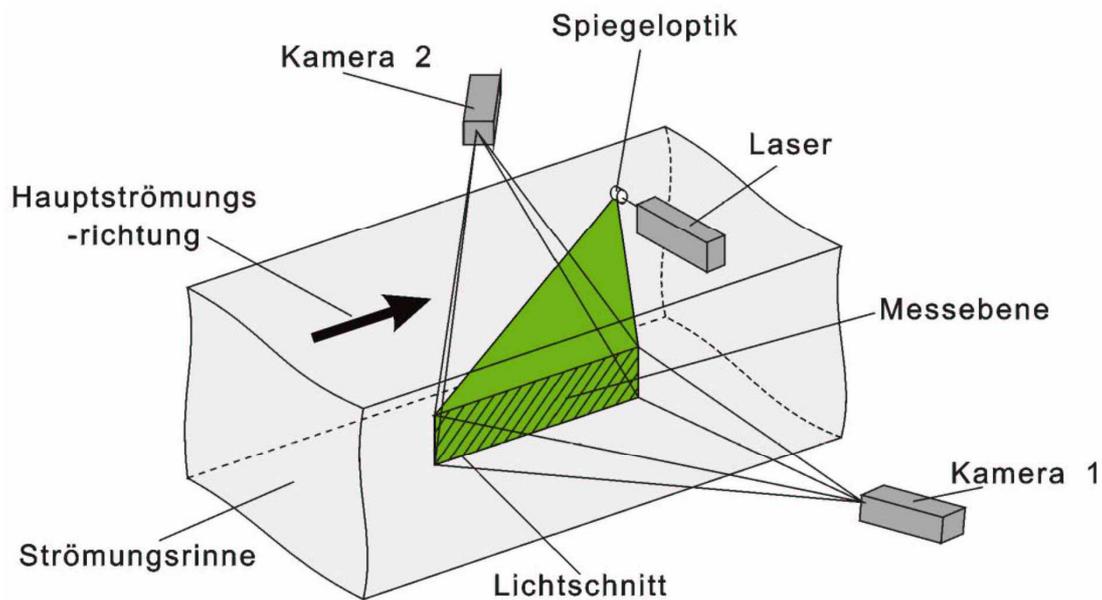
Aus diesen Voraussetzungen ergab sich die Zielsetzung des Forschungsprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“. Im Einzelnen waren dies die Abbildung der Strömungsverhältnisse an einem realen Fallbeispiel mit hochaufgelösten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

## 2.1 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 erprobt und die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten anhand einer ADV-Sonde (Acoustic-Doppler-Velocimeter) verifiziert. Um diese Strömungsmesssysteme am ausgewählten Fallbeispiel Emssperrwerk 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.

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 Belichtungsimpulsen berechnet. Die Voraussetzung für die Anwendbarkeit der PIV-Verfahren ist eine orthogonale Anordnung der Laserstrahl- und der Beobachtungsachse (Abb. 1-3). 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 zwei CCD-Kameras die Geschwindigkeitsvektoren in einem quasi-3D Bereich zu bestimmen.



© LZH

Abb. 1-3: Particle-Image-Velocimeter

Neben dem PIV-Messsystem wurde ein mechanisches Strömungsmesssystem für den Ganzjahreseinsatz entwickelt, das in verschiedenen Wassertiefen zusätzlich die Strömungsgeschwindigkeit ermittelt. Dieses Messsystem lieferte einerseits einen Referenzwert 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 durch Treibgut wurde eine kostengünstige Realisierung des mechanischen Sensors angestrebt.

Während der Entwicklungsphase des mechanischen Anströmkörper-Strömungsmesssystems wurde dieses zunächst unter Laborbedingungen getestet, um die optimale Konfiguration der einzelnen Komponenten und die Genauigkeit der Messergebnisse zu ermitteln. Hierfür wurden einzelne Versuchsanlagen des Franzius-Institutes ausgewählt. In einer späteren Phase des Projektes erfolgte die Erprobung des PIV-Systems und das Anströmkörper-Strömungsmesssystems an einem Anwendungsfall in der Natur.

## 2.2 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.



Abb. 1-4: Sturmflutsperrwerk in der Ems bei Gandersum



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.

### **3 Mechanisches Anströmkörper-Strömungsmesssystem**

#### **3.1 Stand der Technik**

Im Bereich der Meeresmesstechnik sind für die Messung von turbulenten Strömungen 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 Wertegeräten (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.

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 mechanische, elektrische, optische und akustische Verfahren unterteilen. 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 Meerestechnik werden speziell die akustischen Verfahren eingesetzt, da diese, mit einer entsprechenden Software ausgestattet, die Messung ganzer Strömungsprofile berührungslos ermöglichen. Sie sind jedoch laut Herstellerangaben nicht für den Bereich mit hoher Biomasseproduktion geeignet, da ein Bewuchs der Schallwandler zu einem Ausfall der Messung führt. 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 kommen bisher optische Sensoren, die in Laboren bereits erfolgreich eingesetzt werden, nicht zum Einsatz (KOLB, 1994 / GRIFFITHS, 1992 / KOLB, 1992 / FANGER, 1992).

#### **3.2 Anforderungsprofil**

Grundsätzlich existieren verschiedene Möglichkeiten, die Strömungsgeschwindigkeit in Fluiden durch ein mechanisches Strömungsmesssystem zu ermitteln, wobei gegenüber den üblicherweise in der Meerestechnik eingesetzten Verfahren Vorteile zu erreichen waren:

- robuste Ausführung für den Einsatz in rauer Umgebung
- unempfindlich gegen Verschmutzung, Sedimente, Ablagerungen und Bewuchs sowie eine einfache Reinigung und Wartung
- kostengünstig

Ausgewählt wurde das in Abb. 2-1 dargestellte Prinzip, da dieses den genannten Anforderungen im Langzeiteinsatz weitgehend genügt. Die Kraft einer mehrdimensionalen Strömung wirkt auf einen „Anströmkörper“. Dieser ist kugelförmig ausgeführt, um einerseits einen iden-

tischen Strömungswiderstand in den drei Raumrichtungen zu gewährleisten und andererseits eine Verschmutzung bzw. Bewuchs zu verhindern. Die Messung der Strömungskräfte kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen:

- Möglich ist die Aufhängung des Anströmkörpers an einem elastischen Stab, der fest an einem Fixpunkt eingespannt ist. Entsprechend der Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit ( $v_S$ ) bzw. -kraft ( $F_S$ ) kommt es zu einer Beeinflussung des mehrachsigen Spannungszustandes im Verbindungsstab. Diese Belastung des Stabes lässt sich empfindlich durch Dehnungsmessstreifen (DMS) erfassen.
- Eine andere Möglichkeit ist die Aufhängung des Anströmkörpers an einem starren Stab, welcher in der Übertragungseinheit kardanisch aufgehängt und elastisch gelagert ist. Durch die Strömungsrichtung und -geschwindigkeit ( $v_S$ ) bzw. -kraft ( $F_S$ ) kommt es zu einer Auslenkung des Stabes, die messtechnisch zu erfassen ist. Dies erfolgt durch ein entsprechendes Wegmesssystem in der Übertragungseinheit, wobei die Auslenkung des Stabes durch ein Feder-Dämpfer-System vorgegeben wird.

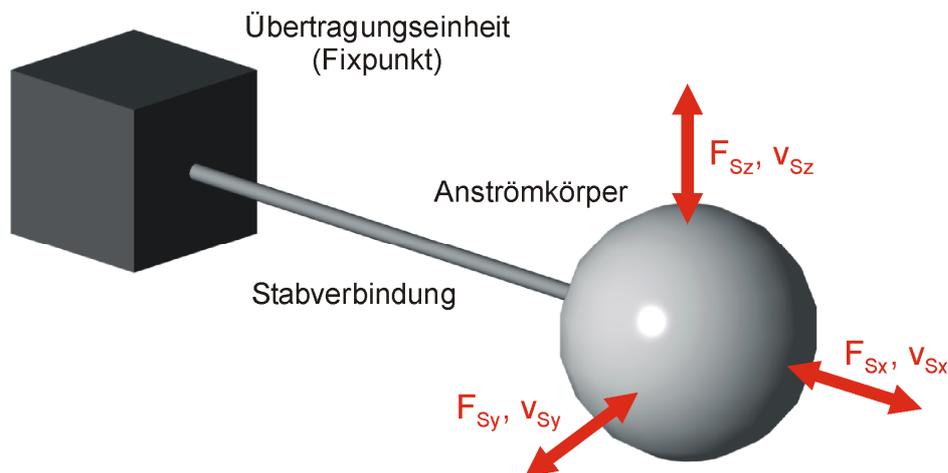


Abb. 2-1: Prinzip des mechanischen Strömungsmesssystems

Der Durchmesser der Stabverbindung war im Vergleich zum Anströmkörper „klein“ zu halten, um eine nachhaltige Beeinflussung der Messergebnisse zu minimieren. Das generelle Anforderungsprofil ergab sich aus den Vorgaben des Einsatzortes im Bereich des Emssperrwerkes:

- Die maximale Strömungsgeschwindigkeit liegt bei ca. 8 m/s.
- Die maximale Tauchtiefe beträgt ca. 15 m.
- Erforderlich war eine robuste Konstruktion, unempfindlich gegen Bewuchs, Korrosion, Treibgut und Sedimentlasten, wobei eine einfache Reinigungsmöglichkeit zu berücksichtigen war.
- Eine flexible Anpassung an größere Wassertiefen unter Berücksichtigung des Wasserdrucks, unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten (bis 18 m/s) und den Einsatz in Meerwasser war erforderlich.
- Der Anströmkörper ist kugelförmig mit einem Durchmesser von ca. 40...100 mm, um eine genügende Auflösung zu gewährleisten.



- Die erforderliche Messgenauigkeit bezüglich der Strömungsgeschwindigkeit in den drei Raumrichtungen sollte in der Größenordnung von einigen cm/s (5...10 cm/s) liegen.
- Eine kostengünstige Auslegung der Sensorik als Basissystem in Mehrfachanordnung zur Bestimmung von Strömungsprofilen war gefordert. Trotz der robusten Konstruktion musste bei einer eventuellen Beschädigung eine wirtschaftliche Austauschbarkeit bzw. Instandsetzung möglich sein.
- Die Konzeption und Auslegung der Messtechnik erfolgte im Hinblick auf eine spätere kommerzielle Nutzung.
- Eine hermetische, beständige Abdichtung des Messsystems war unbedingt erforderlich.

### 3.3 Technische Umsetzung

#### 3.3.1 Dehnungsmessung an der Stabverbindung

Eine Möglichkeit der Umsetzung dieses Wirkprinzips war die Bestückung der Stabverbindung mit Dehnungsmessstreifen (DMS), um dessen Verformung durch die am Anströmkörper angreifende Strömungskraft zu messen. Dazu muss der Stab an der Übertragungseinheit eine feste Einspannung besitzen. Die DMS ermöglichen die Umsetzung der entstehenden Dehnungen am Stab in elektrische Signale mittelbar über Widerstandsänderungen. Hierbei wird die Dehnung des Stabes durch ein isolierendes Trägermaterial direkt auf ein Widerstandselement übertragen, welches seinen elektrischen Widerstand proportional zur Dehnung ändert (HBM). Eine entsprechende Anordnung der DMS ermöglicht durch bestimmte Rechenoperationen die Strömungskräfte in den drei Raumrichtungen zu ermitteln. Um eine Temperaturkompensation zu erreichen, ist eine Vollbrückenschaltung mehrerer DMS notwendig. Die DMS können gut zugänglich außen am Stab montiert werden, was jedoch eine entsprechende Abdichtung erfordert. Konstruktiv anspruchsvoller ist die Innenmontage der DMS bei Verwendung eines Rohres. Dabei kann auf eine zusätzliche Abdichtung verzichtet werden.

#### 3.3.2 Auslenkung des Anströmkörpers

Alternativ ließ sich die Auslenkung des Anströmkörpers bestimmen. Da eine direkte Messung aufgrund der damit verbundenen Störung der Strömung nicht möglich ist, muss die Stabverbindung schwenk- und axial verschiebbar in der Übertragungseinheit gelagert werden. Die Auslenkung des freien Stabendes lässt sich über dreidimensional angeordnete Wirbelstrom-Wegaufnehmer ermitteln, die den Luftspalt zwischen Aufnehmerspitze und einem metallischen Zielobjekt messen können. Anwendung finden diese bei der berührungslosen Messung des relativen und absoluten Weges von bewegten Maschinenteilen, insbesondere der relativen Schwingungen und der absoluten Axialposition von rotierenden Maschinenwellen wie in Dampf-, Gas- und Wasserturbinen, Alternatoren, Pumpen, usw. Sie besitzen einen Messbereich von bis zu 4 mm bei einer Empfindlichkeit von 4 mV/μm (VIBRO-METER).

### 3.4 Konstruktive Ausführung

Basierend auf diesen Messprinzipien erfolgte am Bereich Zerstörungsfreie Prüfverfahren des Instituts für Werkstoffkunde der Aufbau und Test von Prototypen in modularer Bauweise, um einerseits den fertigungstechnischen Aufwand gering zu halten und unterschiedliche Detaillösungen innerhalb der Konzepte zu übertragen. 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 an, wobei hinsichtlich der Messgenauigkeit eine ADV-Sonde (NORTEK AS) als Referenz-Strömungsmesssystem diente. Bei einem konstanten Pumpendurchsatz wurden zeitgleich mit den unterschiedlichen Messsystemen Daten aufgezeichnet und die über eine Messzeit von 60 s gemittelten Strömungsgeschwindigkeiten sowie deren zeitlicher Verlauf miteinander verglichen. Nachfolgend werden die durchgeführten Untersuchungen mit dem mechanischen Anströmkörper-Strömungsmesssystem und die erzielten Messergebnisse mit der installierten DMS- sowie Wegmesstechnik im Vergleich mit der ADV-Sonde dargestellt.

#### 3.4.1 Mechanisches Anströmkörper-Strömungsmesssystem mit DMS-Messtechnik

Das mechanische Anströmkörper-Strömungsmesssystem mit DMS-Messtechnik besteht aus einer Kugel als Anströmkörper sowie einem Stab, bestückt mit Dehnungsmessstreifen (DMS), um dessen Verformung durch die am Anströmkörper angreifenden Strömungskräfte zu bestimmen. Die DMS ermöglichen die Umsetzung der entstehenden Dehnungen am Stab in elektrische Signale mittelbar über Widerstandsänderungen. Eine geeignete Anordnung und Beschaltung der DMS erlaubt die Strömungskräfte in den drei Raumrichtungen empfindlich zu ermitteln.

Für erste Probemessungen und zur Kalibrierung des Anströmkörper-Strömungsmesssystems mit DMS-Messtechnik wurden die DMS gut zugänglich außen am Stab aufgeklebt. Für eine spätere Anwendung unter Wasser waren diese zu kapseln. Konstruktiv aufwendiger wäre es gewesen, diese in ein Rohr einzubringen, um sie gegenüber äußeren Einflüssen zu schützen. Erste Probemessungen wurden in der Strömungsrinne im Vergleich mit einer ADV-Sonde durchgeführt. Abb. 2-2 zeigt die symmetrische Anordnung der beiden Messsysteme in der Strömungsrinne, sowie die Anordnung der vier Dehnungsmessstreifen entsprechend der Instrumentierung eines Biegebalkens. Dabei sind für jede Messrichtung jeweils zwei DMS als Halbbrücke geklebt und geschaltet, um einerseits eine hohe Empfindlichkeit und andererseits eine Temperaturkompensation zu gewährleisten. Auf die Erfassung der z-Komponente wurde hier zunächst verzichtet. Diese sollte sich jedoch durch zusätzliche DMS erfassen lassen, die entsprechend der Instrumentierung eines Druckstabes geklebt und geschaltet sind.

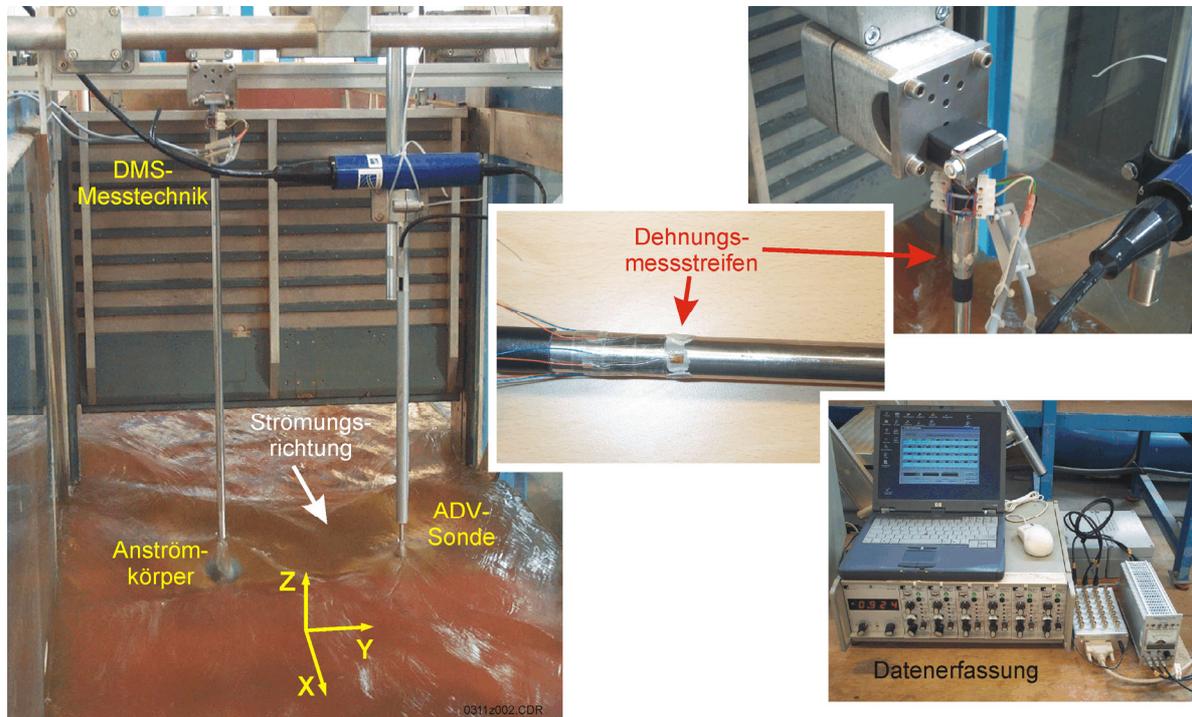


Abb. 2-2: Anströmkörper-Strömungsmesssystem mit DMS-Messtechnik

Zur Kalibrierung des Anströmkörper-Strömungsmesssystems mit DMS-Messtechnik wurden gezielt in den entsprechenden Messrichtungen gestuft definierte Kräfte aufgebracht, die in Abhängigkeit von der Größe des Anströmkörpers, der Dichte des Mediums und dem Widerstandsbeiwert bestimmten Strömungskräften und dadurch bestimmten Strömungsgeschwindigkeiten zuzuordnen sind. Die Strömungskraft ergibt sich anhand des ermittelten Kalibrierfaktors sowie eines Korrekturfaktors für die physikalischen Eigenschaften des Gesamtsystems (Einfluss des Hebelarms, des Stabdurchmessers, des Werkstoffs, der Stabwandstärke) aus der gemessenen DMS-Brückenspannung. Für das vorhandene System gilt:

$$F_s = \frac{U_B}{K_K} \cdot K_S$$

mit:

$U_B$  : Brückenspannung [V]

$F_s$  : Strömungskraft [N]

$K_S$  : Korrekturfaktor für die physikalischen Eigenschaften des Gesamtsystems

$K_K$  : Kalibrierfaktor (0,12 mV/N)

Anhand der Strömungskraft ist die Strömungsgeschwindigkeit wie folgt zu ermitteln:

$$v_s = \sqrt{\frac{2 \cdot F_s}{\rho \cdot c_w \cdot A_K}}$$

mit:

$v_S$  : Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

$F_S$  : Strömungskraft [N]

$\rho$  : Dichte [g/cm<sup>3</sup>]

$c_w$  : Widerstandsbeiwert (hier  $c_w=0,47$  für laminare Strömung)

$A_K$  : Stirnfläche des Anströmkörpers [mm<sup>2</sup>]

Für unterschiedliche Brückenspannungen ergeben sich so beispielhaft folgende Strömungskräfte bzw. Strömungsgeschwindigkeiten:

Brückenspannung $U_B$ [mV]	Strömungskraft $F_S$ [N]	Strömungsgeschwindigkeit $v_S$ [m/s]
2	16,7	3,40
1,5	12,5	2,94
1	8,3	2,40
0,5	4,2	1,70
0	0	0

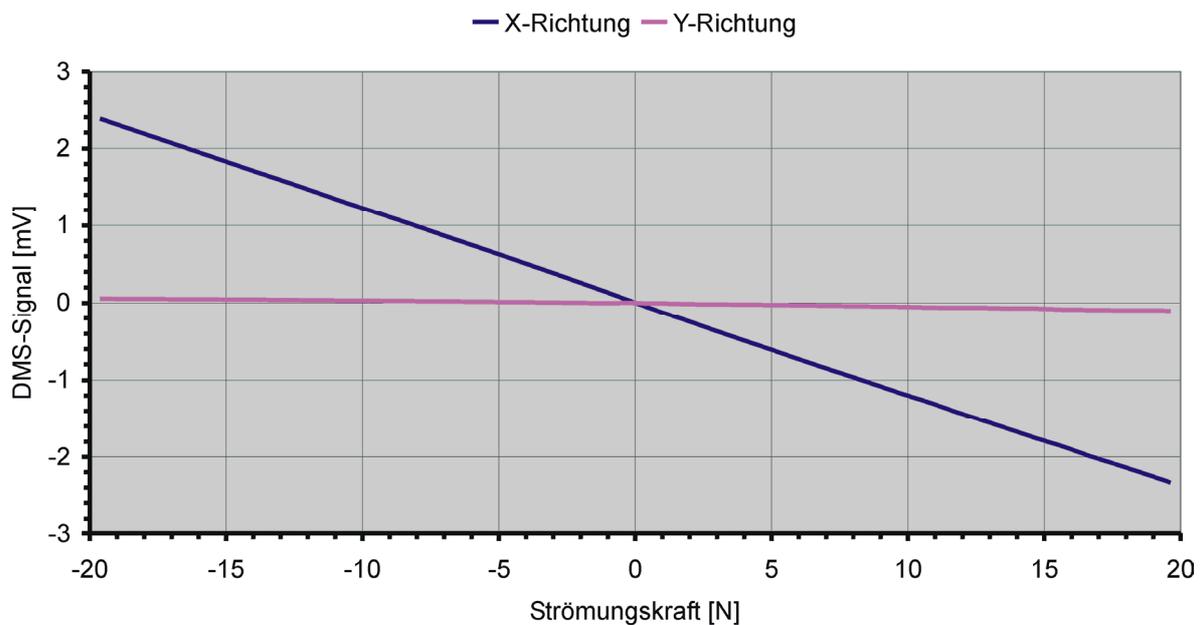


Abb. 2-3: Kalibrierkurve des Anströmkörper-Strömungsmesssystems mit DMS-Messtechnik

In Abb. 2-3 ist die Kalibrierkurve des Anströmkörper-Strömungsmesssystems mit DMS-Messtechnik bezüglich der Strömungskraft in x-Richtung dargestellt. Über den Strömungswiderstand des Anströmkörpers, einen Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften und die wirkende Strömungskraft in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit erfolgt die Kalibrierung des Gesamtsystems. Die Kurve zeigt über den gesamten Messbereich einen linearen Verlauf, wobei bei einem Anströmkörper mit einem Durchmesser von  $\varnothing 88,5$  mm der Bereich  $\pm 20$  N ca.  $\pm 4$  m/s entspricht. Zum Vergleich ist die Kurve für die y-Richtung mit aufgetragen, die nur eine sehr geringe Beeinflussung durch die in x-Richtung aufgebrachte Last zeigt. Anhand dieser Kurve erfolgte die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeiten, die bei den Probemessungen im Vergleich mit der ADV-Sonde ermittelt wurden. Die Kalibrierung in den anderen Richtungen erfolgte entsprechend.

Erste Testmessungen mit dem Anströmkörper-Strömungsmesssystem mit DMS-Messtechnik im Vergleich zur ADV-Sonde wurden wie in Abb. 2-2 gezeigt in der Strömungsrinne des Franzius-Instituts durchgeführt, wobei der Auftrieb des Anströmkörpers zu kompensieren war, da sich dieser als konstante Abweichung in den Messwerten widerspiegelte. Dies lässt sich durch einen Anströmkörper mit der Dichte von Wasser ausgleichen.

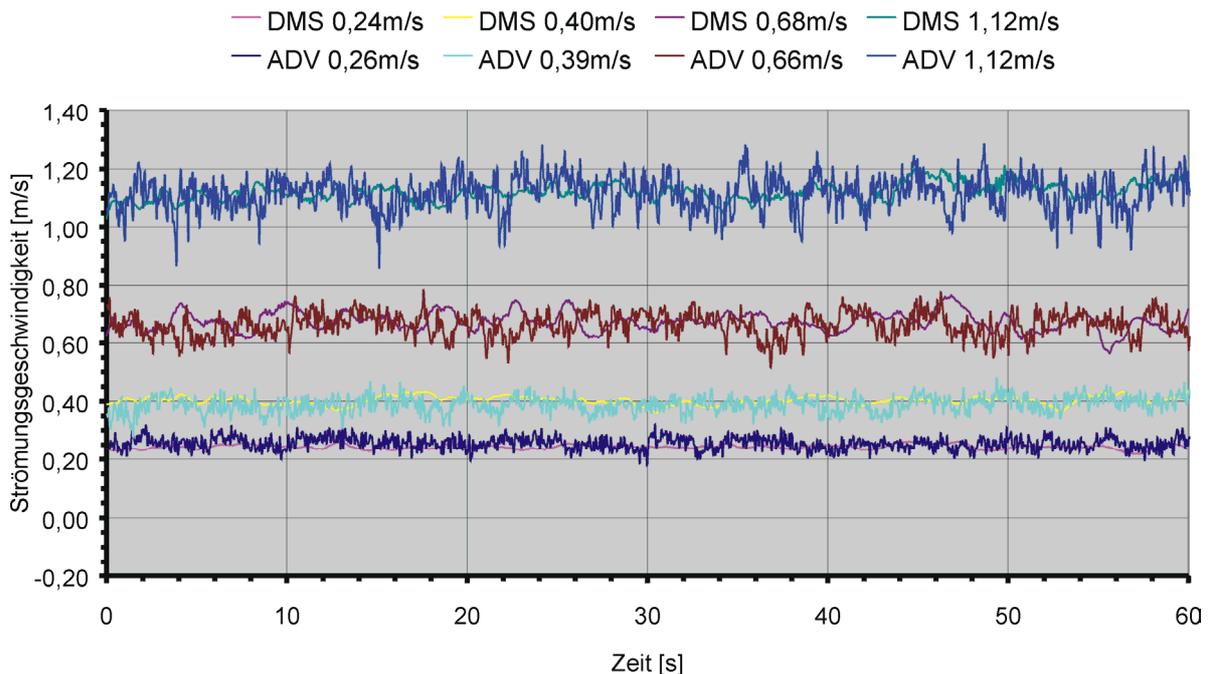


Abb. 2-4: Vergleich Strömungsmesssystem mit DMS-Messtechnik – ADV-Sonde, in Hauptströmungsrichtung

In Abb. 2-4 sind Signale des DMS-Messsystems, aufgrund der hohen Empfindlichkeit gemittelt, zusammen mit Signalen der ADV-Sonde über eine Messzeit von 60 s aufgetragen. Hierbei handelt es sich um die Hauptströmungsrichtung in der Strömungsrinne. Die zeitgleich durchgeführten Messungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit einer ähnlichen Schwankungsbreite, die infolge von Turbulenzen mit der Strömungsgeschwindigkeit zunimmt. Im einzelnen ergeben sich im Vergleich folgende gemittelte Geschwindigkeiten, die Standardabweichung vom Mittelwert und die relative Standardabweichung (Standardabweichung bezogen auf den Mittelwert):

Geschwindigkeit ADV [m/s]	Geschwindigkeit DMS [m/s]	Standard- abweichung ADV [m/s]	Standard- abweichung DMS [m/s]	relative Standard- abweichung ADV [%]	relative Standard- abweichung DMS [%]
0,26	0,24	0,02	0,01	±9	±3
0,39	0,40	0,03	0,01	±7	±4
0,66	0,68	0,04	0,03	±6	±5
1,12	1,12	0,06	0,03	±5	±3

### 3.4.2 Mechanisches Anströmkörper-Strömungsmesssystem mit Wegmesstechnik

Eine Messung der Strömungsgeschwindigkeit mittels Anströmkörper-Strömungsmesssystem mit Wegmesstechnik erfolgt über die Auslenkung des Anströmkörpers. Diese Auslenkung wird über einen frei beweglich aufgehängten Stab in das eigentliche Wegmesssystem übertragen. Am freien Ende des Stabes befindet sich ein Messzylinder über den die Auslenkung des Anströmkörpers am anderen Ende des Stabes erfasst wird. Die Messwerterfassung erfolgt mit linearisierten Wirbelstrom-Wegaufnehmern in den drei Messrichtungen x, y und z. Die Empfindlichkeit und Dämpfung des Messsystems ist über den Durchmesser des Anströmkörpers, die Stablängen sowie die Auswahl und Anordnung der Federn und Dämpfer im Messsystem gegenüber dem Messzylinder in den drei Messrichtungen einstellbar.

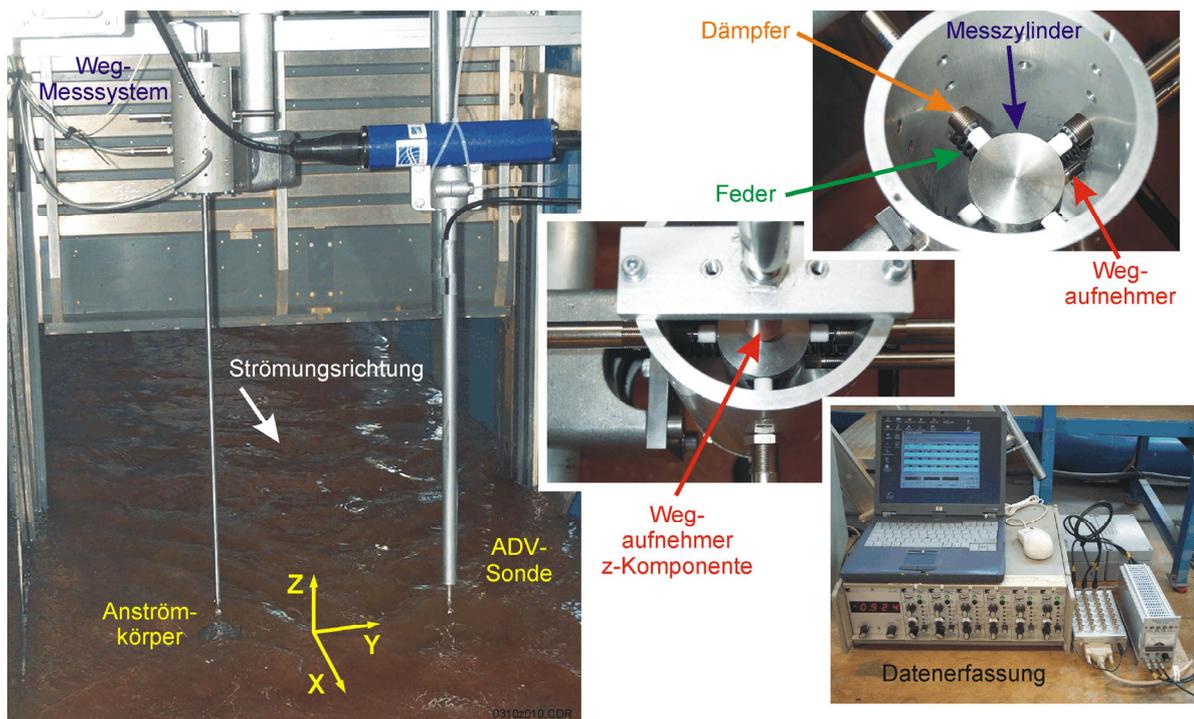


Abb. 2-5: Anströmkörper-Strömungsmesssystem mit Wegmesstechnik

Die Testmessungen wurden in der Strömungsrinne im Vergleich mit einer ADV-Sonde durchgeführt. Abb. 2-5 zeigt die symmetrische Anordnung der beiden Messsysteme in der Strömungsrinne sowie die Position der drei Wegaufnehmer für die x-, y-, und z-Komponenten der Strömungsgeschwindigkeit. Neben den Federn, welche die Rückstellung des Systems in Nulllage gewährleisten, sind zusätzlich einstellbare Dämpfer montiert, um strömungsinduzierte Eigenschwingungen des Messsystems zu minimieren. Erste Testmessungen ohne Dämpfer zeigten bei Strömungsgeschwindigkeiten oberhalb von 0,3 m/s deutliche Anregungen der Systemeigenfrequenz durch die Ablösung von Kármán-Wirbeln.

Zur Kalibrierung des Anströmkörper-Strömungsmesssystems mit Wegmesstechnik wurden ebenfalls gezielt in den entsprechenden Messrichtungen gestuft definierte Kräfte aufgebracht, die in Abhängigkeit von der Größe des Anströmkörpers, der Dichte des Mediums und dem Widerstandsbeiwert bestimmten Strömungskräften und dadurch bestimmten Strömungsgeschwindigkeiten zuzuordnen sind. Dabei gelten die gleichen Zusammenhänge zwischen der Strömungskraft und der Strömungsgeschwindigkeit, wie beim Anströmkörper-Strömungsmesssystem mit DMS-Messtechnik (vgl. 2.4.1). Die Strömungskraft ergibt sich anhand des ermittelten Kalibrierfaktors sowie eines Korrekturfaktors für die physikalischen Eigenschaften des Gesamtsystems (Einfluss des Hebelarms, der Federrate) aus der gemessenen Ausgangsspannung des Wegmesssystems. Für das vorhandene System gilt in x- und y-Richtung:

$$F_s = -\frac{10,5V + U_w}{K_K} \cdot K_S$$

mit:

$U_w$  : Ausgangsspannung des Wegmesssystems [V]

$F_s$  : Strömungskraft [N]

$K_S$  : Korrekturfaktor für die physikalischen Eigenschaften des Gesamtsystems

$K_K$  : Kalibrierfaktor (0,60 V/N)

Für unterschiedliche Ausgangsspannungen des Wegmesssystems ergeben sich so beispielhaft folgende Strömungskräfte bzw. Strömungsgeschwindigkeiten:

Ausgangsspannung $U_w$ [V]	Strömungskraft $F_s$ [N]	Strömungsgeschwindigkeit $v_s$ [m/s]
-8	-4,2	-1,70
-10	-0,8	-0,76
-12	2,5	1,32
-14	5,8	2,01
-16	9,2	2,52

Die Kalibrierkurve des Anströmkörper-Strömungsmesssystems mit Wegmesstechnik ist in Abb. 2-6 bezüglich der Strömungskraft in x-Richtung dargestellt. Über den Strömungswiderstand des Anströmkörpers und die wirkende Strömungskraft in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit erfolgt dann die Kalibrierung des Gesamtsystems. Die Kurve zeigt über den gesamten Messbereich einen linearen Verlauf. Der „Knick“ bei -10 N ist durch einen Anschlag bedingt, der durch eine Begrenzung des Messbereichs eine Beschädigung des Aufnehmerkopfes verhindert. Bei einem Anströmkörper mit einem Durchmesser von  $\varnothing 88,5$  mm entspricht der Bereich  $\pm 12$  N ca.  $\pm 3$  m/s. Für einen anderen Messbereich sind Anströmkörper und/oder Feder-Dämpfer-Einheiten auszutauschen. Zum Vergleich ist die Kurve für die y-Richtung mit aufgetragen, die nur eine sehr geringe Beeinflussung durch die in x-Richtung aufgebraachte Last zeigt, während die Kurve für die z-Komponente eine Beeinflussung zeigt, die auf eine Verkipfung und Verschiebung der z-Messfläche bei Beanspruchung in x-y-Richtung zurückzuführen ist. Dieser Einfluss auf die Messzylinder-Stirnfläche ist durch eine entsprechend gewölbte Oberfläche zu minimieren. Anhand dieser Kurve erfolgte die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeiten, die bei den Probemessungen im Vergleich mit der ADV-Sonde ermittelt wurden. Die Kalibrierung in den anderen Richtungen erfolgte entsprechend.

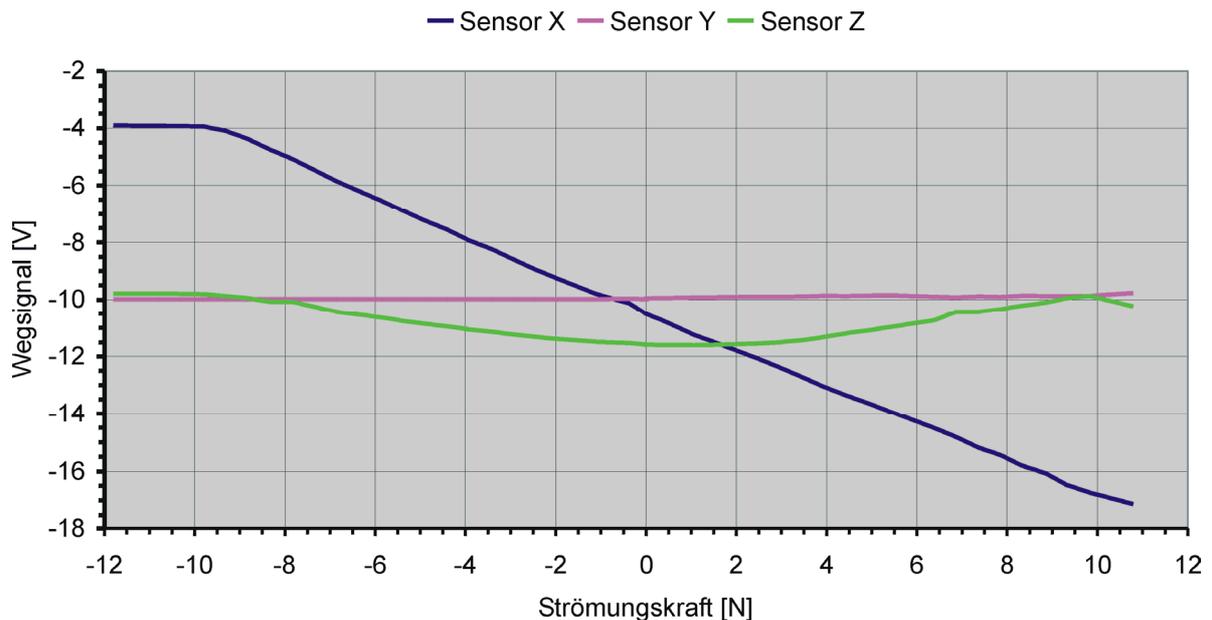


Abb. 2-6 Kalibrierkurve des Anströmkörper-Strömungsmesssystems mit Wegmesstechnik

Beispielhaft sind die Ergebnisse erster Testmessungen des Anströmkörper-Strömungsmesssystems mit Wegmesstechnik im Vergleich mit der ADV Sonde bei vier unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten dargestellt. Dies sind ebenfalls zeitgleich durchgeführte Messungen der Hauptströmungsrichtung in der Strömungsrinne. Im einzelnen ergeben sich im Vergleich folgende gemittelte Geschwindigkeiten, die Standardabweichung vom Mittelwert und die relative Standardabweichung (Standardabweichung bezogen auf den Mittelwert):

Geschwindigkeit ADV [m/s]	Geschwindigkeit Weg [m/s]	Standard- abweichung ADV [m/s]	Standard- abweichung Weg [m/s]	relative Standard- abweichung ADV [%]	relative Standard- abweichung Weg [%]
0,33	0,22	0,02	0,01	±7	±5
0,61	0,62	0,03	0,01	±5	±2
0,67	0,70	0,04	0,02	±6	±2
1,01	1,00	0,05	0,02	±5	±2

Die Rohdaten des Wegmesssystems sind zusammen mit den Daten der ADV-Sonde über eine Messzeit von 60 s in Abb. 2-7 dargestellt. Aufgrund der höheren Dämpfung gegenüber dem Strömungsmesssystem mit DMS-Messtechnik erfolgte bei dieser Darstellung keine Mittelung der Daten, was den direkten Vergleich erleichtert.

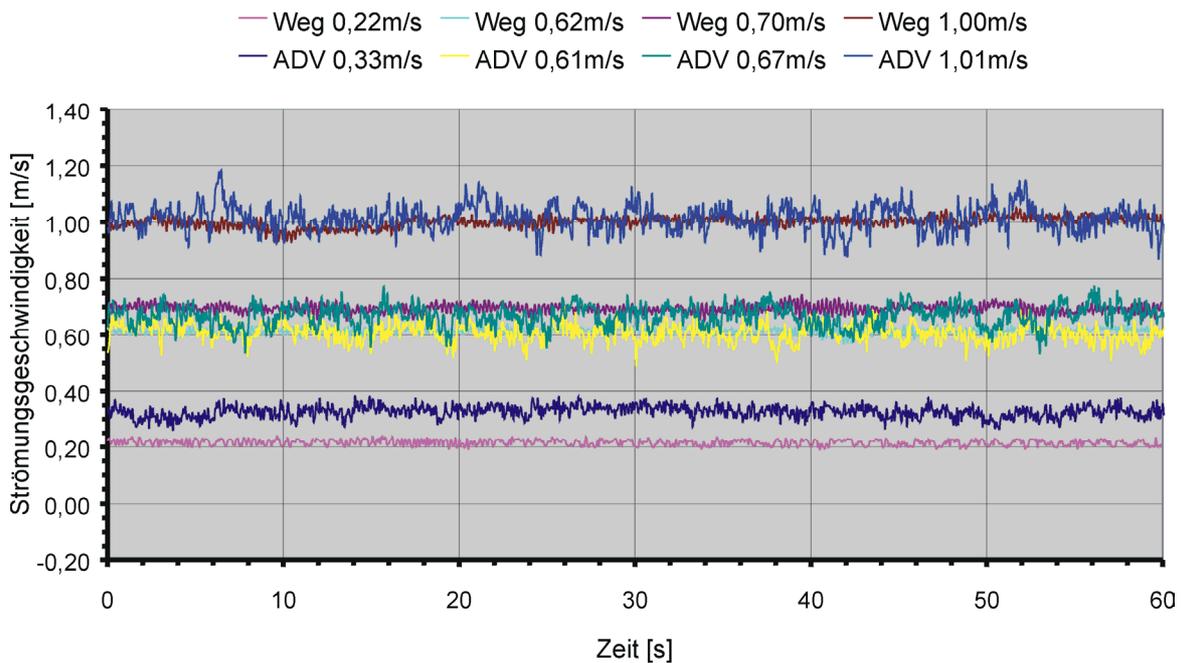


Abb. 2-7: Vergleich Strömungsmesssystem mit Wegmesstechnik – ADV-Sonde, in Hauptströmungsrichtung

Das Wegmesssystem zeigt im Bereich von 0,5 bis 1,2 m/s Strömungsgeschwindigkeit eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten der ADV-Sonde. Wobei die Schwankungsbreite der Messwerte des Wegmesssystems geringer ist als bei der ADV-Sonde, deutlich abzulesen im Vergleich der Standardabweichungen. Bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten ist die Abweichung zwischen ADV-Sonde und Wegmesssystem deutlich größer, was auf Hystereseeffekte des mechanischen Feder-Dämpfer-Systems im Bereich des Nulldurchgangs zurückzuführen ist, da zur Auslenkung des Messsystems zunächst die Haftreibung innerhalb der Dämpfer zu überwinden ist.

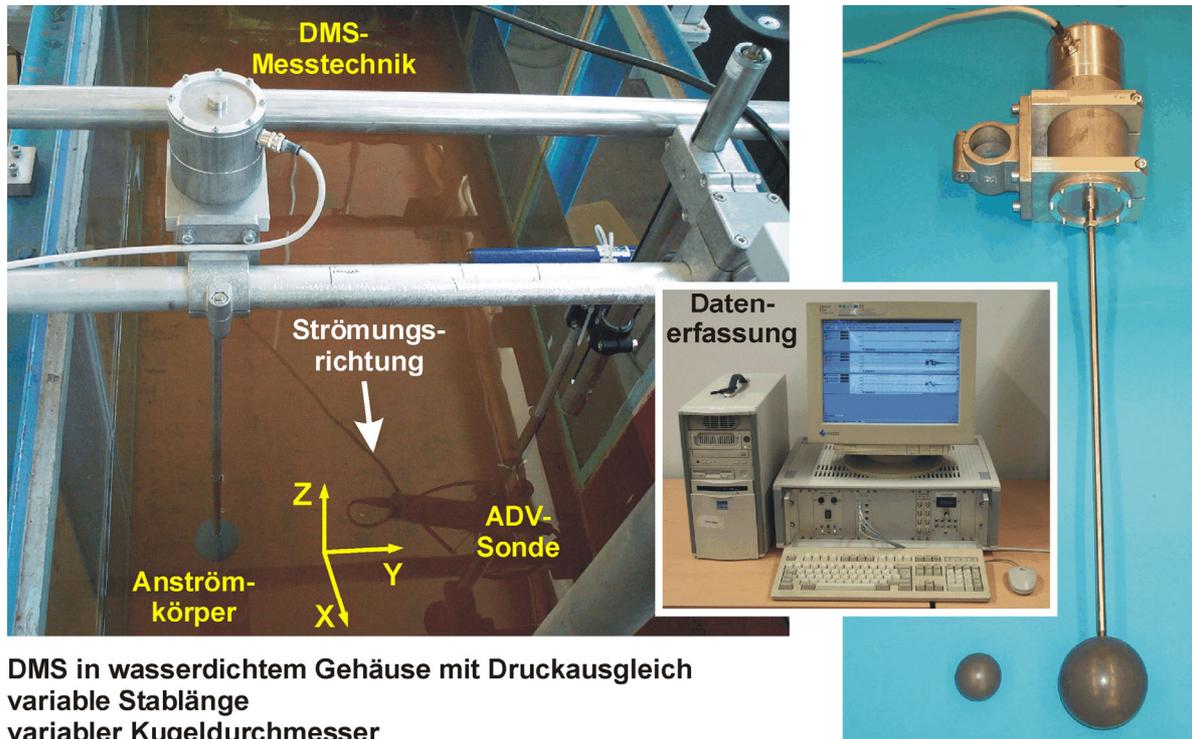
Im Vergleich zeigt das Anströmkörper-Strömungsmesssystem mit DMS-Messtechnik unter Betrachtung der gemittelten gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten eine bessere Übereinstimmung mit den Messwerten der ADV-Sonde. Es zeigt bei entsprechender Mittelung bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten eine ähnliche Schwankungsbreite wie die ADV-Sonde, während das Wegmesssystem in diesem Bereich aufgrund der höheren Eigendämpfung eine geringere Schwankungsbreite zeigt, mit dem Nachteil der größeren Abweichungen bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten. Da sich beim Wegmesssystem die Hystereseeffekte des mechanischen Feder-Dämpfer-Systems im Bereich des Nulldurchgangs nicht minimieren ließen, wurde auf die Weiterentwicklung dieses Systems verzichtet und das System mit DMS-Messtechnik weiterentwickelt sowie um eine Erfassung der z-Komponente erweitert.

### 3.5 Weiterentwicklung des mechanischen Anströmkörper-Strömungsmesssystems mit DMS-Messtechnik

Da sich die Hystereseeffekte beim Nulldurchgang des Anströmkörper-Strömungsmesssystems mit Wegmesstechnik nicht beseitigen ließen, wurde dieses Messsystem nicht mehr weiterentwickelt. Stattdessen wurde das System basierend auf DMS-Messtechnik um die zusätzlich benötigte Messkomponente in z-Richtung erweitert und das komplette Messsystem in ein wasserdichtes, robustes Gehäuse integriert.

Die zusätzliche Integration der Messung der Strömungskomponente in z-Richtung ließ sich, wie zunächst vermutet, nicht durch eine einfache zusätzliche Instrumentierung des Stabes auf Zug-Druck-Beanspruchung lösen. Generell lässt sich zwar die Anordnung und Verschaltung der DMS so wählen, dass die Messung einer reinen Zug-Druck-Beanspruchung mit einer Kompensation der Biegebeanspruchung möglich ist. Dies gilt jedoch nur, wenn die Biegebeanspruchung im Verhältnis klein gegenüber der Zug-Druck-Beanspruchung ist. In dem Konzept des Anströmkörper-Strömungsmesssystems mit senkrechter Positionierung des Messsystems und den Hauptströmungsrichtungen in x- und y-Richtung ist dies jedoch nicht gegeben. Die z-Komponente ist aufgrund der Zug-Druck-Beanspruchung die messtechnisch unempfindlichste Strömungsrichtung, wobei eine Beeinflussung der Strömungsgeschwindigkeit durch das Gehäuse des Messsystems in dieser Strömungsrichtung durch eine entsprechende Stablänge minimiert ist.

Eine empfindliche Erfassung der z-Komponente der Strömung ließ sich durch die Implementation eines zusätzlichen Biegebalkens realisieren, der nur auf Auslenkungen des Stabes in z-Richtung reagiert. In der Abb. 2-8 ist die Endversion des Anströmkörper-Strömungsmesssystems dargestellt, während der Kalibrierung in der Strömungsrinne des Franzius-Instituts. Das Gehäuse ist hermetisch abgedichtet und die Messverstärker sind zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses in dem Gehäuse integriert. Die DMS-Messstellen befinden sich ebenfalls alle geschützt innerhalb des Gehäuses und sind für Wartungsarbeiten durch entsprechende Öffnungen zugänglich. Durch eine variable Stablänge und Anströmkörpern mit unterschiedlichen Durchmessern lässt sich die Empfindlichkeit des Messsystems flexibel an unterschiedliche Einsatzbedingungen anpassen. Die Kompensation des Auftriebs des Anströmkörpers erfolgte durch eine Anpassung der Dichte an die Dichte von Wasser. Eine Druckbeeinflussung der Gehäusemembranen konnte durch eine entsprechende Kapselung minimiert werden.



**DMS in wasserdichtem Gehäuse mit Druckausgleich  
variable Stablänge  
variabler Kugeldurchmesser**

*Abb. 2-8: Strömungsmesssystem mit DMS-Messtechnik und integrierten Verstärkern*

Nach der Kalibrierung und Erprobung im Vergleich mit einem Referenz-Messsystem am Franzius-Institut erfolgte der Einsatz unter realen Betriebsbedingungen am ausgewählten Fallbeispiel, dem Emssperwerk. Mit dem dort angebrachten Trägersystem zur Aufnahme der Messsysteme, siehe auch Kapitel 3, ließ sich das Anströmkörper-Strömungsmesssystem flexibel in unterschiedlichen Wassertiefen und in verschiedenen Abständen zum Pfeiler positionieren, um Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten in den drei Raumrichtungen durchzuführen.

### 3.6 Datenerfassungs- und Analysesystem

Das mechanische Anströmkörper-Strömungsmesssystem mit DMS-Messtechnik liefert über eine entsprechende Beschaltung der DMS und Verstärkung der DMS-Signale, da sich die Änderung der Brückenspannung der DMS im Bereich von einigen mV bewegt, eine der Strömungsgeschwindigkeit entsprechende Ausgangsspannung. Die Aufgabe der Datenerfassung und Analyse ist die Umrechnung der Signale auf die Strömungsgeschwindigkeit, um eine online-Anzeige zu ermöglichen sowie die Aufzeichnung dieser Signale auf ein entsprechendes Speichermedium, üblicherweise auf Festplatte, zur späteren Auswertung.

Zur Erfassung, Speicherung und Analyse der durch das mechanische Anströmkörper-Strömungsmesssystem gewonnenen Daten wurde ein PC-gestütztes Messsystem aufgebaut. Es erfolgte eine Anpassung der Hard- und Software an die vorhandene Prüfaufgabe. Im Einzelnen ergab sich folgendes Anforderungsprofil an die aufzubauende automatische Signalerfassung:



- Online Anzeige der durch das mechanische Anströmkörper-Strömungsmesssystem gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in den drei Raumrichtungen, x-, y- und z-Komponente in m/s.
- Transiente zeitgleiche Aufzeichnung der Strömungsgeschwindigkeiten mit Abtastraten im Bereich von 0,1 Hz bis 25 Hz.
- Zusätzliche Kanäle zur Aufzeichnung weiterer Signale, so dass eine zeitgleiche Aufzeichnung von zusätzlichen Messsignalen möglich ist.
- Kalibrier-, Auswerte- und Darstellungsroutinen für das mechanische Anströmkörper-Strömungsmesssystem.

Zur Realisierung dieses Anforderungsprofils kommt eine Datenerfassungskarte BMC PCI-BASE1000 mit einem analogen Eingangsmodule MAD16 für 16 zeitgleich aufzuzeichnende Kanäle in Kombination mit einem üblichen PC zum Einsatz. Durch die Anpassung der Datenerfassungs- und Analysesoftware BMC NextView an das vorhandene Anforderungsprofil lassen sich nun bis zu 16 Kanäle mit einer Summenabtastrate von 500kHz aufzeichnen (BMC). Dieses können Strömungsgeschwindigkeiten sein, auch von zusätzlichen mechanischen Anströmkörper-Strömungsmesssystemen in Array-Anordnung, oder zusätzliche Betriebsdaten, die zeitgleich aufgezeichnet werden sollen um sich ändernde Strömungsverhältnisse ihren Ursachen zuordnen zu können, z.B. bei einer Strömungsmessung an einem Wehr die gleichzeitige Erfassung der Position des Wehres.

Das Datenerfassungs- und Analysesystem ermöglicht gleichzeitig eine Online-Anzeige des aktuellen Strömungszustandes sowie die Speicherung der Daten auf Festplatte, bzw. ein Ausdrucken der Daten. Die Bildschirmanzeige der Bedieneroberfläche ist in Abb. 2-09 dargestellt. In dem oberen Fenster sind die ungemittelten Rohdaten dargestellt, während im unteren Fenster die gefilterten Analysedaten sichtbar sind. Links ist der jeweils aktuelle Wert in Form eines Digitalmultimeters dargestellt. Darunter ist noch Platz vorhanden zur Anzeige weiterer Fenster.

Abschlussbericht des Verbundprojektes

„Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“  
 Teil B: „Mechanisches Anströmkörper-Strömungsmesssystem, Entwicklung des Trägersystems und der Tauchgehäuse“

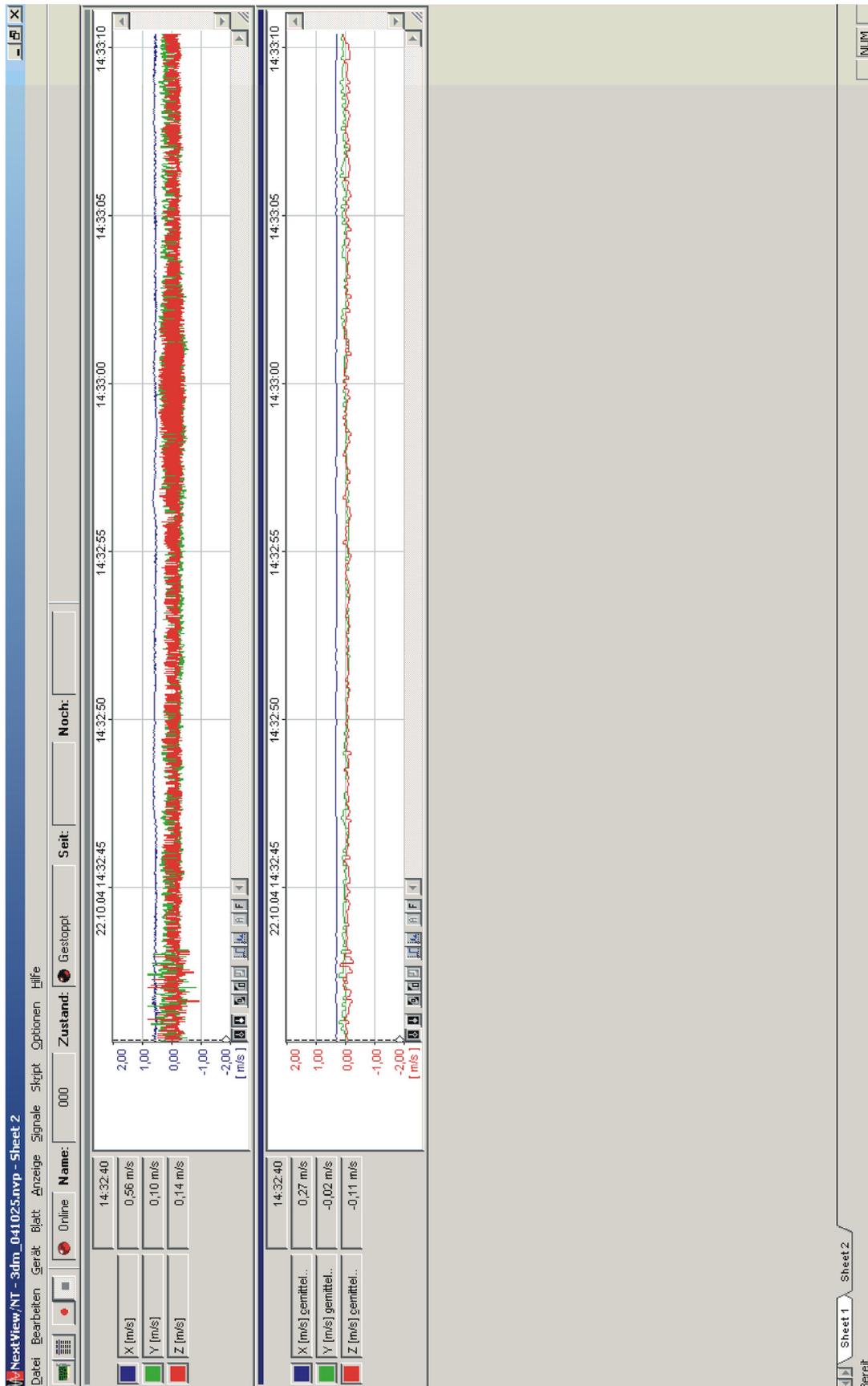


Abb. 2-9: Bildschirmanzeige der Datenerfassung und Analyse

## 4 Entwicklung des Trägersystems und der Tauchgehäuse

Neben der Entwicklung des stationären 3D-Strömungsmesssystems, bestehend aus Particle-Image-Velocimeter und mechanischem Anströmkörper-Strömungsmesssystem war ein Trägersystem mit Tauchgehäusen zu konstruieren, um einen Einsatz am ausgewählten Fallbeispiel Emssperrwerk zu ermöglichen. Hinsichtlich der geforderten Randbedingungen wurde ein Pfeiler des Emssperrwerks ausgewählt, an dem diese weitestgehend erfüllt sind:

- hohe Strömungsgeschwindigkeiten infolge Ebb- und Flutstrom,
- stark variierende Wasserstände innerhalb einer Tide,
- variierender Salzgehalt aufgrund der Tide,
- die Trübung des Wassers variierende Schwebstofffracht sowie
- verschiedene Betriebszustände beim Öffnen und Schließen der Sperrwerkstore.

Die Anforderungen an das Trägersystem sowie an das Tauchgehäuse orientierten sich an den Erfordernissen des sicheren Betriebs des Messsystems sowie an den Bedingungen am Einsatzort. Dies bedeutet für das Emssperrwerk eine robuste, sichere Befestigung des Trägersystems am Pfeiler sowie eine weitgehende Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Einflüssen, wie Strömung, Treibgut, etc. Weiterhin ist eine flexible Positionierung des Strömungsmesssystems notwendig, um bei gleich bleibenden Betriebsbedingungen des Sperrwerkes Strömungsmessungen in unterschiedlichen Wassertiefen und Entfernungen von der Pfeilerwand durchführen zu können. Auch ist die Position des Strömungsmesssystems an unterschiedliche Betriebsbedingungen wie Tidenhub und Öffnen bzw. Schließen der Sperrwerkstore anzupassen.

Da sich das PIV-System aus mehreren Komponenten, einer Laser- und Ablenkeinheit und zwei CCD-Kamera-Einheiten, zusammensetzt, wurden verschiedene Lösungen diskutiert. Der erste Ansatz war die Entwicklung von drei separaten Gehäusen für die entsprechenden Einheiten. Darüber hinaus lagen auch Entwürfe für verschiedene „Ein-Gehäuse-Lösungen“ vor. Diese wurden verworfen, da eine „Ein-Gehäuse-Lösung“ einen großen Strömungswiderstand bietet, wodurch zu hohe Strömungskräfte vom Trägersystem aufzunehmen sind. Außerdem ist der Auftrieb durch das umschlossene Volumen sehr groß und nur durch zusätzliche große Ausgleichsgewichte zu kompensieren, was zusammen mit der baulichen Größe die Handhabbarkeit des Messsystems stark einschränkt.

Daher wurde eine einfache Lösung bestehend aus verstreuten Einzelgehäusen konzipiert. Bei diesem Konzept werden nur noch das mechanische Anströmkörper-Strömungsmesssystem sowie die beiden Kameras unter Wasser gebracht, während der empfindliche Laserkopf über Wasser verbleibt. Hierzu ist eine Verbindung des Laserkopfes über ein Periskop mit einer unter Wasser befindlichen Optik notwendig, die nach der Umlenkung des Laserstrahls durch ein Prisma die Lichtschnittebene aufspannt. Die Anordnung der einzelnen Gehäuse bzw. Tauchgehäuse des PIV-Systems und des Anströmkörper-Strömungsmesssystems ist aus Abb. 3-1 ersichtlich.

Hierdurch reduziert sich der konstruktive Aufwand auf nur noch zwei einzelne kompakte Gehäuse für die beiden Kameras und eines für das mechanische Anströmkörper-Strömungsmesssystem. Diese relativ kleinvolumigen Kamergehäuse besitzen einen geringen Strömungswiderstand und nur wenig Auftrieb. Zur Justage der Komponenten sind keine

zusätzlichen Öffnungen notwendig, wie bei einem Einzelgehäuse. Da jede Komponente mit ihrem Gehäuse eine Einheit bildet, können zum Einrichten sämtliche Komponenten zueinander verstellt werden. Nach der Justage der Laseroptik und der Kameras zueinander, lässt sich die komplette Anlage an andere Positionen verschieben, ohne die Notwendigkeit einer Neuausrichtung der Komponenten. Als Austrittsöffnungen für den Laserstrahl aus der Optik und als Sichtöffnungen für die CCD-Kameras sind plane Glasscheiben vorgesehen. An das Glas gibt es keine besonderen optischen Anforderungen, außer der Reflexarmut. Zur Erleichterung der Inbetriebnahme und Wartung am Einsatzort gibt es wasserdicht verschließbare Öffnungen zum Einrichten der Komponenten. Entsprechende Kabeldurchführungen für die Stromversorgung, die Datenkabel und die Kühlung des Lasers sind vorhanden. Das Gehäuse wird mit Überdruck beaufschlagt, um bei kleinen Undichtigkeiten einen Wassereintrich zu verhindern.

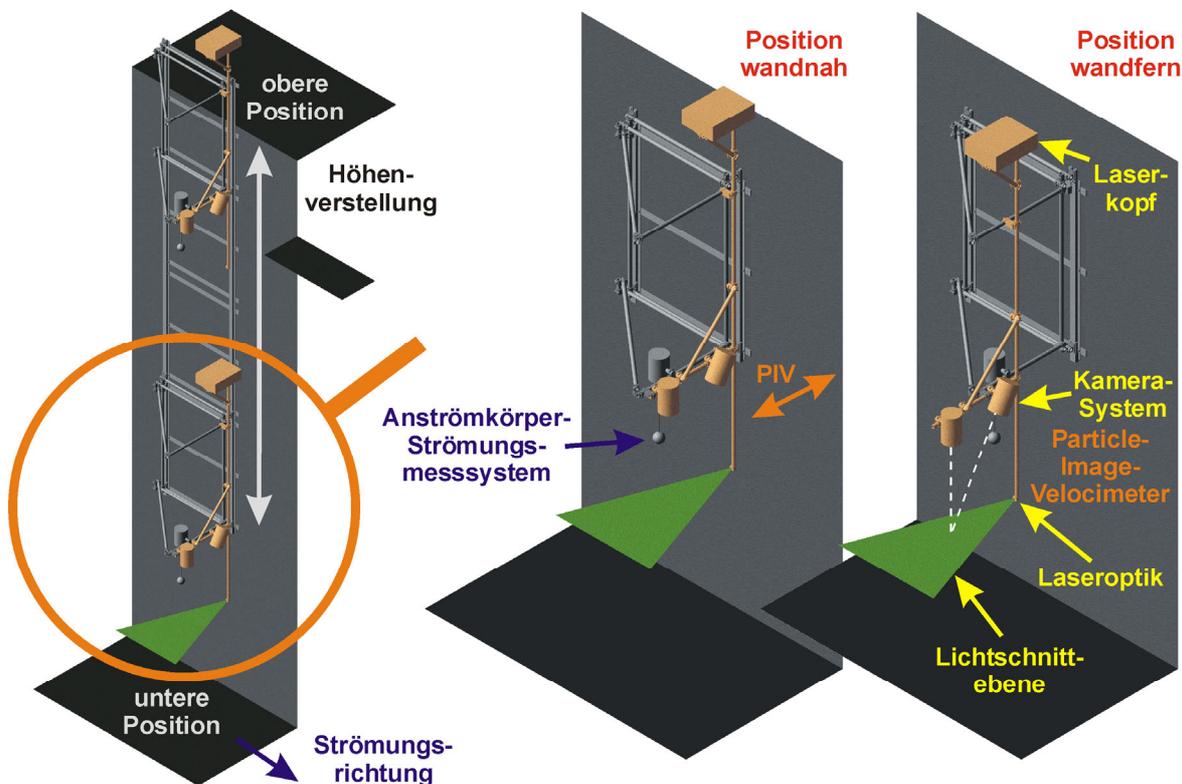


Abb. 3-1 Konzept des Trägersystems und Anordnung der Gehäuse

Eine Beeinflussung der Strömungsverhältnisse im Bereich des Messvolumens ist nicht vorhanden, da die Lichtebeine des Lasersystems abhängig von der Trübung des Wassers in einer Entfernung von ca. 2 m vom Gehäuse entfernt aufgespannt wird und somit außerhalb des Bereichs der Strömungsbeeinflussung liegt. Die einzelnen Komponenten sind zur einfachen Bearbeitung und Handhabbarkeit aus Aluminium gefertigt und hinsichtlich einer Korrosionsbeständigkeit eloxiert. Sie sind unempfindlich gegenüber Bewuchs, Verschmutzung und mechanischen Beschädigungen, lediglich die Glasscheiben der Kamergehäuse sind gelegentlich zu reinigen.

Auch für die Befestigungsmöglichkeiten an der Pfeilerwand wurden unterschiedliche Möglichkeiten diskutiert. Die hohen auftretenden Strömungskräfte und eine sichere Verankerung

erforderten schließlich das Konzept einer massiven Befestigung des Trägersystems mit einer trotzdem flexiblen Positionierung, wie es in Abb. 3-1 dargestellt ist. Das Messsystem ist auf einem Schlitten positioniert, dessen Höhenverstellung auf einem Schienensystem über eine angekoppelte Winde erfolgt. Das Schienensystem mit einer Spurweite von 2 m zur Aufnahme der hohen zu erwartenden Strömungskräfte ist fest mit der Pfeilerwand verdübelt und verschraubt. Die Datenerfassungssysteme sowie die Versorgungseinheiten für das PIV-System sind innerhalb des Pfeilers in einem Betriebsraum positioniert. Sowohl das PIV-System, als auch das Anströmkörper-Strömungsmesssystem lassen sich so über die Höhenverstellung und Abstandsvariation zur Pfeilerwand flexibel positionieren.

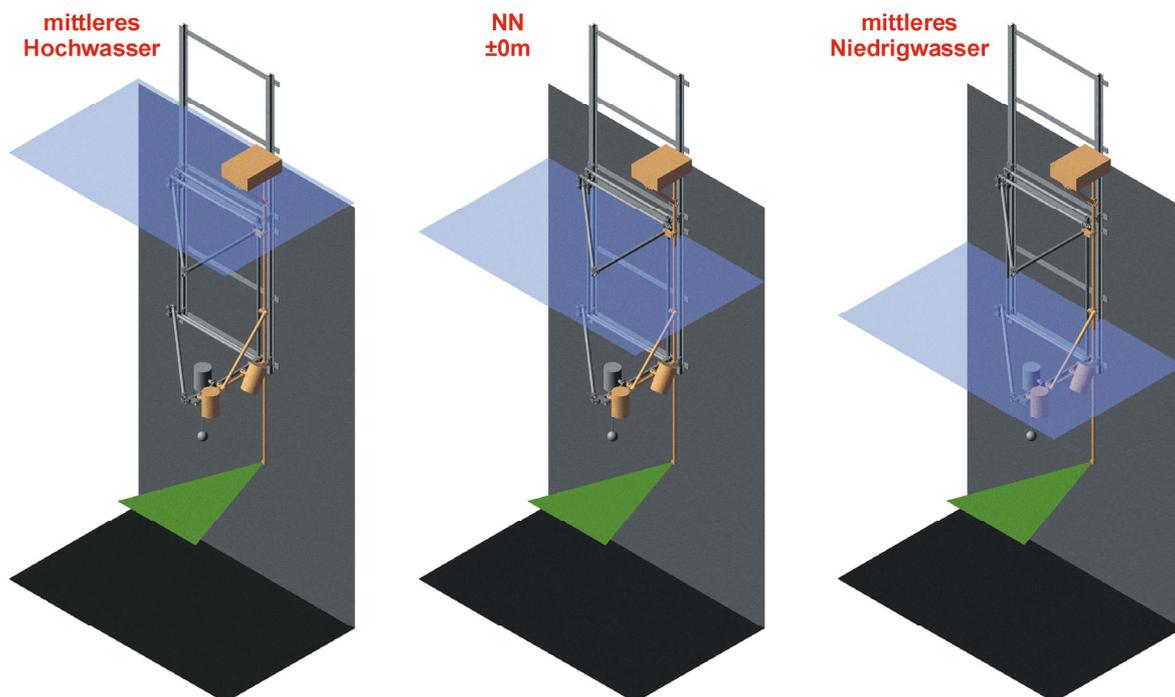


Abb. 3-2 Tideneinfluss auf das Strömungsmesssystem

Durch die Positionierung des Laserkopfes oberhalb der Wasseroberfläche ist die maximale Tauchtiefe des PIV beschränkt. Die skizzierte Anordnung ermöglicht eine Erzeugung der Lichtschnittebene bis ca. 4 m Tiefe unterhalb der Wasseroberfläche. Dadurch ergeben sich je nach Tide unterschiedliche Positionierungsmöglichkeiten des Strömungsmesssystems, wie in Abb. 3-2 dargestellt.

In Zusammenarbeit mit dem NLWK-Projektteam „Emssperrwerk“ (Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft und Küstenschutz) wurde der Installationsort des Strömungsmesssystems ausgewählt. Aufgrund des Abstandes der Halteschienen von 2 m schieben die Pfeiler 4 bis 6 aus, da dort wegen der Einbauten, wie Brücke, Hubtornische und Schütze vor den Pumpen der nötige Anbauraum nicht vorhanden ist. Ein Anbau ohne Behinderung des Sperrwerkbetriebs war daher nur an Pfeiler 3 Südseite in der Nebenöffnung 2 oder an Pfeiler 1 Nordseite in der Nebenöffnung 1 möglich. Hier bot sich die Position an Pfeiler 1 gegenüber der Betriebskanzle an. Diese Position ist von der Betriebskanzle aus gut einsehbar und für Montage und Wartungsarbeiten schnell, sicher und ebenerdig zu erreichen. Die Halteschienen wurden mittels Verbundankern am Pfeiler befestigt, wobei die un-

ersten Dübel bei Niedrigwasser auf ca. -2 m NN gesetzt wurden, um Unterwasserarbeiten zu vermeiden.

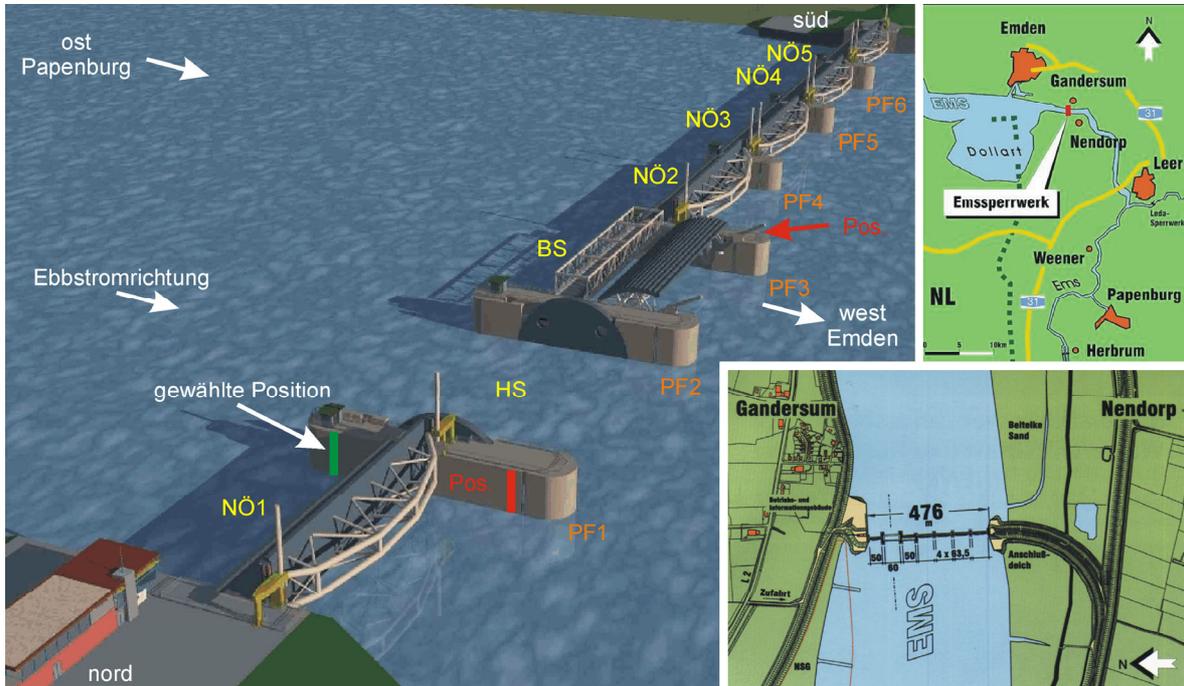


Abb. 3-3: Position des Messsystems am Emssperwerk



Abb. 3-4: 3D-Strömungsmesssystem am Emssperwerk

In Abb. 3-4 ist das am Emssperwerk montierte 3D-Strömungsmesssystem dargestellt. An der Brücke ist die Plattform zu erkennen, die den Zugang zum Wartungsgang unterhalb der Brücke ermöglicht und dem Strömungsmesssystem bei entsprechender Positionierung als Wartungsplattform dient. Angedeutet ist die Position des Betriebsraums innerhalb des Pfei-

lers in dem sich die Versorgungseinheiten des PIV-Systems sowie sämtliche Datenerfassungs- und Darstellungseinheiten befinden. Die linke Seite der Abb. 3-4 zeigt das Strömungsmesssystem in unterschiedlichen Tauchpositionen.

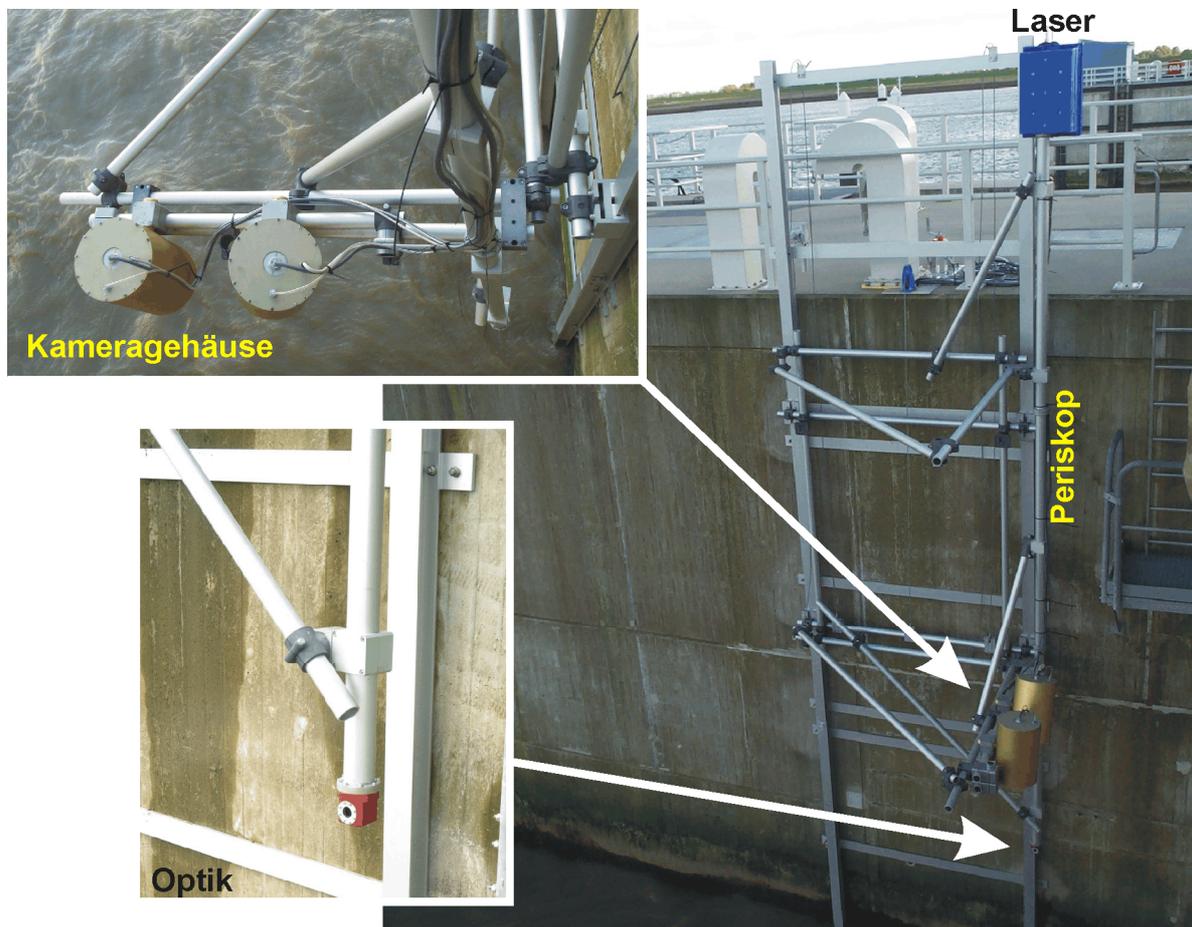


Abb. 3-5: Tauchgehäusekomponenten des PIV-Systems

Die einzelnen Tauchgehäusekomponenten des PIV-Systems sind in Abb. 3-5 abgebildet. Im Einzelnen sind dies das spritzwassergeschützte Gehäuse, das den auf das Periskop aufgesetzten Laserkopf umschließt, das wasserdichte Periskop selbst, welches zur besseren Handhabbarkeit aus mehreren Abschnitten zusammengesetzt ist und die Optik mit Umlenkprisma, die am unteren Ende des Periskops die Lichtschnittebene aufspannt. Links in Abb. 3-5 sind die Kameragehäuse sichtbar, welche hermetisch gegen Wasser abgedichtet sind und zusätzlich mit Druckluft beaufschlagt werden.

## 5 Messungen mit dem Anströmkörper-Strömungsmesssystem am Emssperrwerk

Parallel zu den Messungen mit dem PIV-System am Emssperrwerk fanden nach der Kalibrierung und Erprobung im Vergleich mit einem Referenz-Messsystem am Franzius-Institut ebenfalls Messungen mit dem mechanischen Anströmkörper-Strömungsmesssystem an dem ausgewählten Fallbeispiel statt, um einen Vergleich der beiden Messsysteme durchzuführen und auch um eine Verifizierung der Simulation der Strömungsgeschwindigkeiten am Emssperrwerk zu ermöglichen. Mit dem dort angebrachten Trägersystem zur Aufnahme der Messsysteme ließ sich das Anströmkörper-Strömungsmesssystem flexibel in unterschiedlichen Wassertiefen positionieren, um Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten in den drei Raumrichtungen durchzuführen. In Abb. 4-1 ist beispielhaft die Anbringung des mechanischen Anströmkörper-Strömungsmesssystems in einer Messposition am Emssperrwerk dargestellt. Für die hier durchgeführten Strömungsmessungen wurde das Messsystem direkt im Bereich der Laseroptik angebracht, um insbesondere in Wandnähe Strömungsmessungen in unterschiedlichen Wassertiefen durchzuführen.



Abb. 4-1: Anströmkörper-Strömungsmesssystem am Emssperrwerk

Die Abbildungen 4-2 und 4-3 zeigen beispielhaft Strömungsmessungen am Emssperrwerk am Pfeiler 1 in der Nebenöffnung 1 bei ablaufendem Wasser. Deutlich sind in Abb. 4-2 niederfrequente Schwankungen in der Hauptströmungsrichtung  $x$  zu erkennen, überlagert von Turbulenzen in der  $x$ - $y$ -Ebene zu erkennen im Bereich 4 – 10 s, bei ca. 22 s und von 44 –

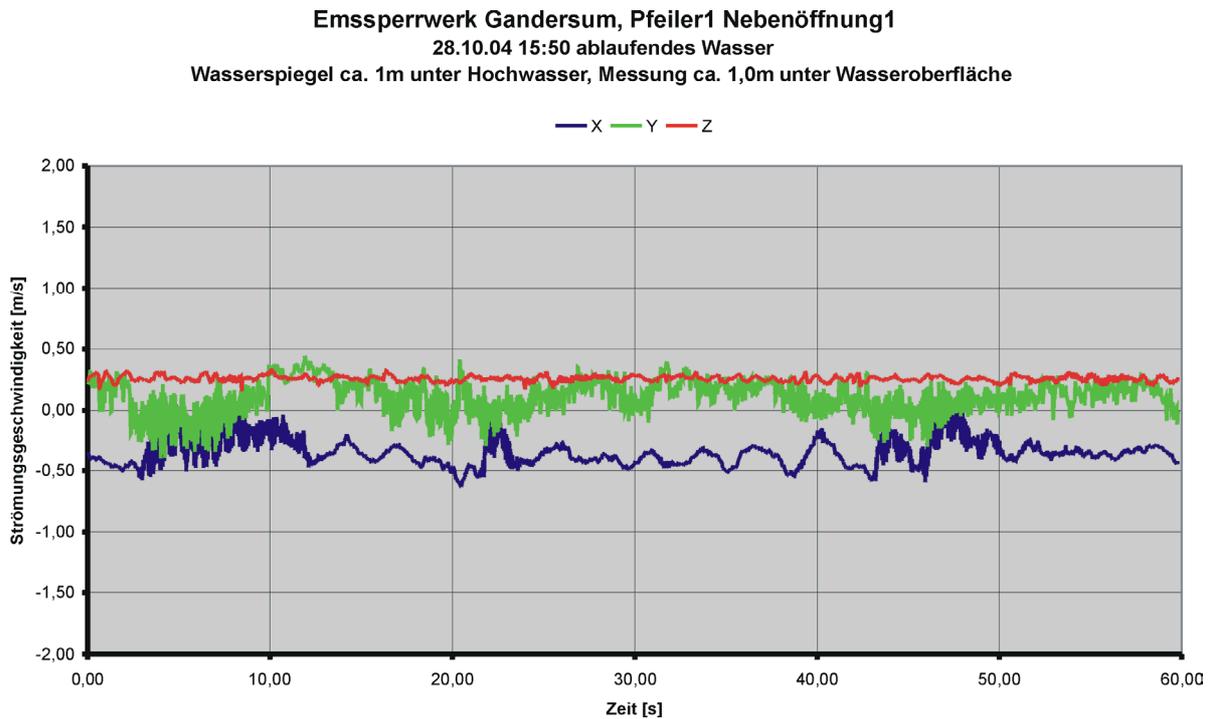


Abb. 4-2: Strömungsmessung am Emssperrwerk in 1m Wassertiefe

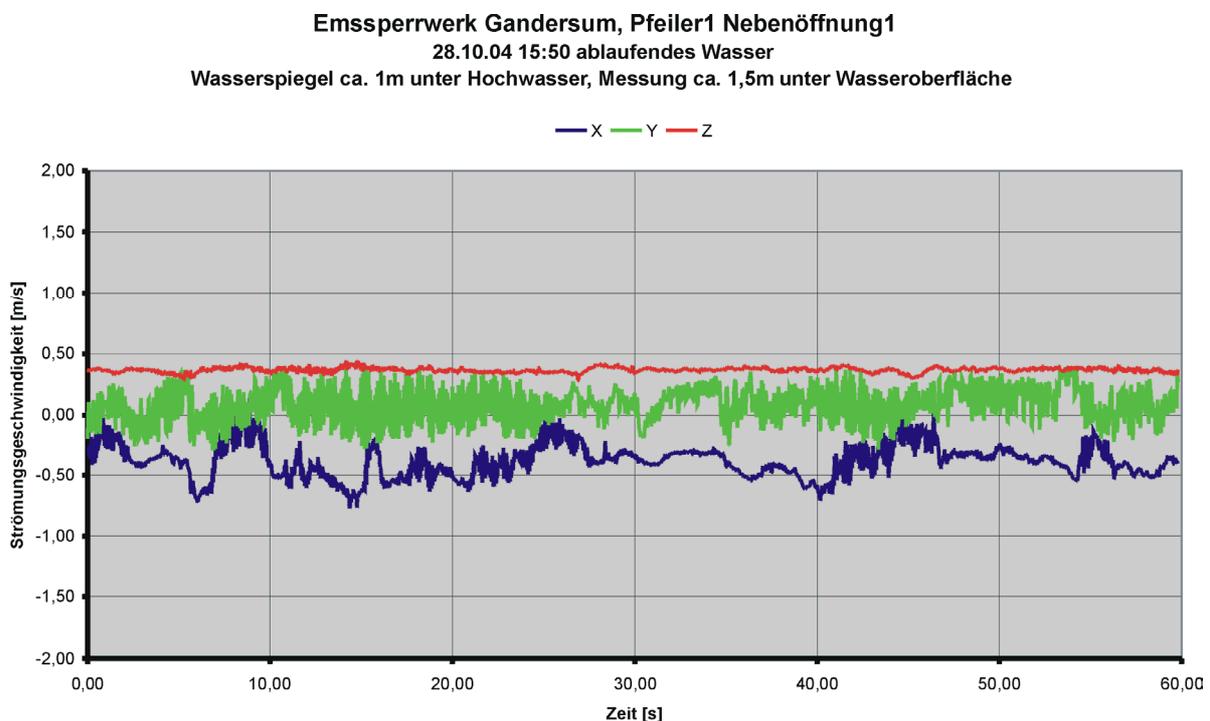


Abb. 4-3: Strömungsmessung am Emssperrwerk in 1,5m Wassertiefe

50 s. 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. 0,25m/s mit geringer Schwankungsbreite, wobei diese konstante auf-

steigende Strömung durch die Umströmung des Pfeilers bedingt ist. Abb. 4-3 zeigt eine Messung an der gleichen Position zum Pfeiler, jedoch in einer Wassertiefe von ca. 1,5 m. Hier ist eine geringe Erhöhung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in der Hauptströmungsrichtung x auf ca. -0,4 m/s mit einer gleichzeitigen Zunahme der Turbulenzen zu erkennen. Die aufsteigende Strömung z an der Pfeilerwand zeigt ebenfalls höhere Werte, wobei die y-Richtung, quer zum Pfeiler, wie bei der geringeren Tiefe um 0 m/s schwankt.

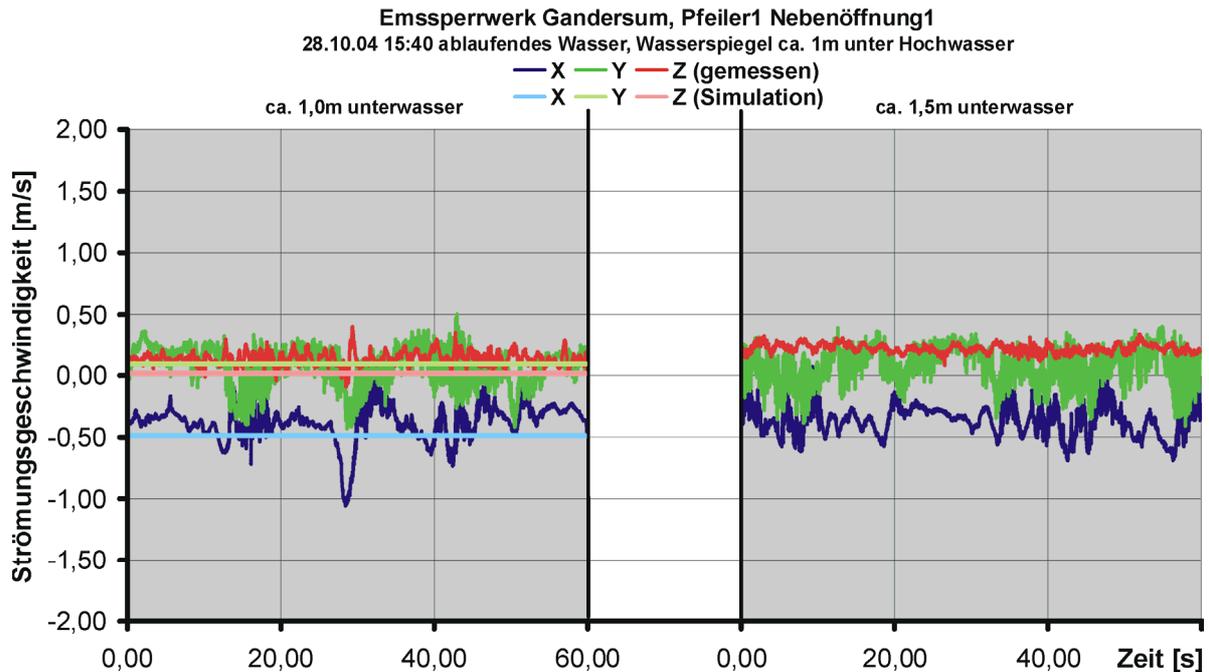


Abb. 4-4: Vergleich der Strömungsmessungen mit der Simulation

Einen Vergleich der am Emssperrwerk mit dem mechanischen Anströmkörper-Strömungsmesssystem durchgeführten Messungen in unterschiedlichen Wassertiefen und mit den simulierten Strömungsgeschwindigkeiten des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen zeigt die Abb. 4-4. 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 simulierte 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 höher aufgelöst ist, als in der Simulation mit 0,2 Hz, wodurch die vorhandenen Turbulenzen durch die Umströmung des Pfeilers in der Simulation nicht erfasst sind.

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 Abb. 4-5. In Hauptströmungsrichtung wurden auch hier ca. 0,5m/s gemessen. Zur besseren Darstellung der y-Komponente ist in Abb. 4-5 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 Richtungsände-

runger von positiver zu negativer x-Richtung. Durch die farbliche Skalierung ist die z-Komponente dargestellt. Ebenfalls sind Schwankungen zu erkennen, wie auch bei der Messung mit dem Anströmkörper-Strömungsmesssystem in 1m Wassertiefe.

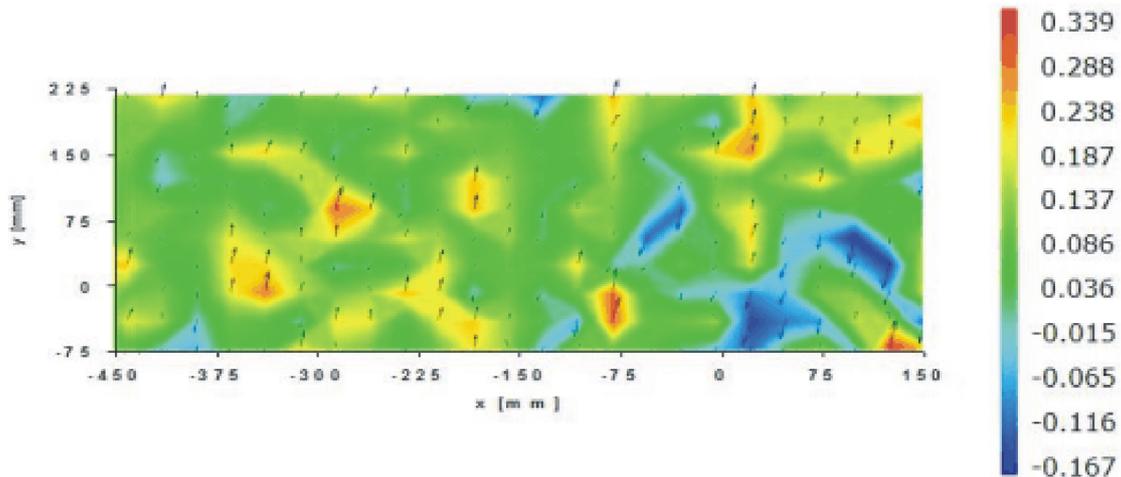


Abb. 4-5: Messung mit dem PIV-Systems

## 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. Am IW-ZfP 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. Das Strömungsmesssystem mit DMS-Messtechnik wurde daher für den Einsatz der Erfassung mehrdimensionaler Strömungen weiterentwickelt um am ausgewählten Fallbeispiel Emssperrwerk eingesetzt zu werden. 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.

In Zusammenarbeit mit dem NLWK-Projektteam Emssperrwerk wurde als Installationsort des Strömungsmesssystems der Pfeiler 1 Nordseite in Nebenöffnung 1 ausgewählt, gegenüber der Betriebskanzle. Diese Position ist von der Betriebskanzle 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 unterschiedlichen 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 eine entsprechende Optik bedingte.

Parallel zu den Messungen mit dem PIV-System am Emssperrwerk fanden ebenfalls Messungen mit dem mechanischen Anströmkörper-Strömungsmesssystem am Emssperrwerk statt, um einen Vergleich der beiden Messsysteme durchzuführen und auch um eine Verifizierung der Simulation der Strömungsgeschwindigkeiten am Emssperrwerk zu ermöglichen. Ein Vergleich der mit dem mechanischen Anströmkörper-Strömungsmesssystem durchgeführten Messungen am Emssperrwerk mit den simulierten Strömungsgeschwindigkeiten zeigte für den Mittelwert in den Hauptströmungsrichtungen eine gute Übereinstimmung. Genauso zeigten die Messungen mit dem PIV-System gute Übereinstimmungen in der Hauptströmungsrichtung und auch, wie das Anströmkörper-Strömungsmesssystem, eine gute Erfassung der Turbulenzen. Das mechanische Anströmkörper-Strömungsmesssystem ist daher in der Lage auch turbulente Strömungen in allen drei Raumrichtungen empfindlich zu messen.

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. 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
- VIBRO-METER Vibro-Meter SA, Condition Monitoring for Rotating Machinery on Land, Sea and Air, [www.vibro-meter.ch](http://www.vibro-meter.ch)
- HBM Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Messtechnische Systemlösungen vom Sensor bis zur Software, [www.hbm.de](http://www.hbm.de)
- BMC Messsysteme GmbH, NextView/NT, Benutzerhandbuch für Messdatenerfassungs- und Analysesoftware, 2001