

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Jähne, Bernd; Köhler, Hans-Jürgen; Rath, Ralf; Wierzimok, Dietmar
Wellenamplitudenmessungen mittels videometrischer
Bildverarbeitung

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102789>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Jähne, Bernd; Köhler, Hans-Jürgen; Rath, Ralf; Wierzimok, Dietmar (1993):

Wellenamplitudenmessungen mittels videometrischer Bildverarbeitung. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 70. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 27-62.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Wellenamplitudenmessungen mittels videometrischer Bildverarbeitung

Measurement of the Water Wave Amplitude by Digital Image Processing
Mesurages des amplitudes d'ondes par traitement d'image videometrique

Измерения амплитуд волн при помощи видеометрической переработки
на экране



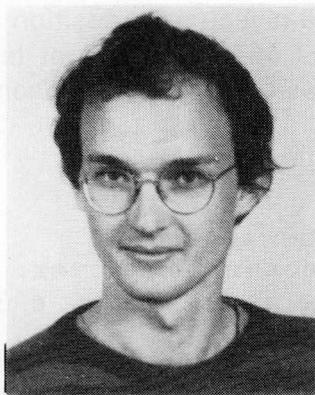
Bernd Jähne, Dr., Privat-Dozent an der Universität Heidelberg und seit 1988 Forschungsprofessor am Scripps Institut für Ozeanographie der Universität von Kalifornien, San Diego.

Geboren 1953, Studium der Physik an den Universitäten Saarbrücken und Heidelberg, 1980 Dissertation und 1985 Habilitation in Physik an der Universität Heidelberg, 1992 Habilitation in Angewandter Informatik an der Universität Hamburg-Harburg. Seit 1985 Privatdozent an der Fakultät für Physik der Universität Heidelberg und dort seit 1986 Aufbau der Lehre in Bildverarbeitung, mehrmals Gastprofessor am IWR der Universität Heidelberg.



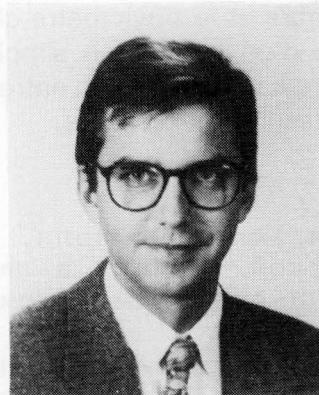
Hans-Jürgen Köhler, Dipl.-Ing., wissenschaftlicher Angestellter in der Bundesanstalt für Wasserbau.

Geboren 1941, Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Hochschule Darmstadt von 1963 bis 1970, Stellvertretender Leiter in der Baustoff- und Bodenprüfstelle Darmstadt von 1970 bis 1973, Wissenschaftlicher Mitarbeiter beim Ingenieurbüro für Grundbau und Bodenmechanik Hamburg von 1973 bis 1974, seit 1975 in der Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe, seit 1979 Lehrbeauftragter für Erd- und Grundbau an der FH Karlsruhe.



Ralf Rath, Dipl.-Phys., ab 1993 am Institut für Didaktik der Physik, Universität Gießen.

Geboren 1965, Studium der Physik an den Universitäten Freiburg und Heidelberg. Diplom-Arbeit am Institut für Umweltphysik mit dem Thema "Amplitudenmessung von Wasseroberflächenwellen mittels digitaler Bildanalyse".



Dietmar Wierzimok, Dr., Gastwissenschaftler am wissenschaftl. Zentrum der IBM in Heidelberg.

Geboren 1958, Studium der Physik an der Universität Heidelberg, 1990 Dissertation am Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg über die Entwicklung eines Verfahrens zur Strömungsmessung mit digitaler Bildfolgenanalyse. Von 1990 bis 1992 Leitung der Bildverarbeitungsgruppe Umweltphysik, Gastaufenthalte am Scripps Institute for Oceanography, San Diego. Seit 1993 bei IBM Deutschland in Heidelberg.

Inhaltsangabe

Es wird eine einfache videometrische Technik zur Erfassung von Wellenamplituden für den Einsatz im Feld oder Labor vorgestellt. Mit einer CCD-Kamera wird die Wasseroberfläche an drei Meßpunkten simultan aufgezeichnet. Die absolute Höhe des Wasserspiegelverlaufs wird mit Frequenzen von 50 Hz mit Hilfe eines Bildverarbeitungssystems über einen PC-AT abgetastet und mit Millimetergenauigkeit erfaßt. Die dabei verwendeten Algorithmen detektieren den Grauwertsprung zwischen der dunklen Wasseroberfläche und dem hellen Pegelhintergrund bzw. den Gradientensprung zwischen angestrahlten hellen und dunklen Wasserspiegelflächen. Die Kalibrierung erfolgt über eine einfache lineare Regression zwischen festliegenden Pegelmarken und den jeweiligen Bildpositionen der Bildschirmmatrix. Vergleichsmessungen mit der konventionellen Drahtsonde und mit Druckdosensonden erbrachten für die videometrischen Messungen exzellente Ergebnisse, die für praktische Messungen im Feld wie im Labor gleichermaßen erhebliche Verbesserungen der Meßergebnisse gegenüber den herkömmlichen Verfahren erzielen.

Summary

A simple videometric technique for field measurements of time series of the water waves amplitude is presented. The water surface is observed by a CCD-camera at up to three meter poles simultaneously. The absolute water level is calculated by a PC-AT based image processing system with a frequency of 50 Hz and an accuracy of up to a millimeter. The water surface level is detected by using various edge detectors and fuzzy logic.

Calibration is provided by a simple linear regression between two marks on the pole and their position in the picture matrix. A very good correlation between the measured time series with the new videometric technique, conventional wire and pressure gauges was found.

Résumé

Une méthode videométrique simple pour mesurer des amplitudes d'ondes in situ est présentée. La surface d'eau est enregistrée simultanément à trois points de mesure avec un caméra CCD. Le niveau absolu du plan d'eau est calculé par un système de traitement d'images à l'aide d'un PC-AT. Les algorithmes employés recherchent ce niveau par la différence entre la surface d'eau sombre et le fluviomètre claire. Le calibrage entre ce niveau et la position sur l'écran se produit d'une corrélation simple entre deux points fixes du fluviomètre et leurs position sur l'écran. La comparaison entre les méthodes traditionnelles et la méthode videométrique donne des résultats excellents.

Резюме

Для измерения амплитуд волн, применяется простейший способ видеометрической техники в лабораториях или в водных ёмкостях. При помощи ЦЦД-видеокамеры симулируется водяная поверхность в 3 пунктах измерения.

Абсолютная высота течения водяной поверхности с фреквенцией в 50 герц обшупывается компьютером ПЦ-АТ до миллиметровой точности и документируется с помощью экранного изображения.

В этом случае применённые алгоритмы показывают разницу между водяной поверхностью и светлым фоном.

Уточнения производятся через простую линеальную регрессию, между неподвижно лежащими отметками воды и экранной матрицы.

Сравнительные измерения шнуровым зондом и зондом давления, принесли для видеометрических измерений оптимальные результаты, что позволило значительно улучшить практические измерения в лаборатории и в поле, в сравнении со способами, применяемыми раньше.

INHALT	Seite
1 Vorbemerkung	30
2 Konventionelle Wellenhöhenmeßmethoden	31
2.1 Drahtsonden und Drucksonden	31
2.2 Anforderungen an ein Wellenhöhenmeßsystem	32
3 Videometrisches Meßprinzip	33
3.1 Überblick über das Meßverfahren	33
3.2 Datenaufnahme	35
3.3 Bildanalyse	36
3.4 Kalibrierung	37
4 Bildverarbeitung	38
4.1 Offset-Gain-Einstellung und Glättungsfilter	38
4.2 Wasseroberflächendetektion	39
4.2.1 Kantendetektoren	40
4.2.2 Fuzzy Logic	43
4.2.3 Differenzzeilenalgorithmen	44
4.2.4 Subpixelgenaue Lagebestimmung	44
5 Ergebnisse der Wellenmessungen	46
5.1 Messungen an der Weser	46
5.2 Messungen in der Böschungsversuchsgrube der BAW Karlsruhe	49
5.3 Messungen am Stichkanal Osnabrück (SKO)	52
5.4 Messungen am Main-Donau-Kanal (MDK)	55
6 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	61
7 Literatur	61

1 Vorbemerkung

Für die Durchführung von Natur- und Modellversuchen sind Messungen der Wellenhöhen an schiffahrtsbelasteten Uferböschungen ein wichtiger Bestandteil zur Beurteilung von Belastungsgrößen und deren Reaktionen im Untergrund. Mit Hilfe der Video- und Bildverarbeitungstechnik bieten sich heute sehr genaue Meßverfahren an, die mit wenig konstruktivem Aufwand an Binnenschiffahrtsstraßen zusammen mit der Sensortechnik zum Einsatz kommen können.



Bild 1 Wasserspiegelabsenk und Wellen an schiffbaren Wasserstraßen

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes der Bundesanstalt für Wasserbau ein Verfahren entwickelt und getestet, das sowohl für Labor- als auch Feldversuche einsetzbar ist.

Das Ziel des Projektes war die Entwicklung eines auf der Bildanalyse beruhenden, einfachen Meßsystems auf PC-Basis, mit dem auch im Feld zuverlässig gemessen werden kann. Es ist damit mobiler und einfacher zu handhaben als bisherige Meßmethoden.

Erste Testmessungen wurden im Jahre 1989 an der Unterweser durchgeführt /1/. Dabei betrug die Meßfrequenz für die Erfassung der Wellenamplituden an einem Meßpunkt 16,7 Hz (schritt haltende Echtzeitverarbeitung). Die Ergebnisse wurden mit parallelen Messungen von Druck- und Drahtsonden verglichen und zeigten sehr gute Übereinstimmung. Daraufhin wurden gezielt Algorithmen zur Echtzeitverarbeitung entwickelt, mit der die Pegelhöhe an einer Meßlatte bei einer Meßfrequenz von 25 Hz (Echtzeitverarbeitung im Videotakt) bestimmt werden kann /2/.

Im Oktober 1989 wurden zusätzliche Messungen in der Böschungsversuchsgrube der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe durchgeführt, mit dem Ziel, an mehreren Punkten mit mehreren Kameras gleichzeitig im doppelten Videotakt von 50 Hz die Wellenhöhen zu bestimmen /3/. Die Algorithmen wurden in einem anwenderfreundlichen Programm mit Fensteroberfläche zusammengefaßt. Bei den anschließenden Meßkampagnen am Osnabrücker Seitenkanal im November 1991 und Rhein-Main-Donau-Kanal im Mai 1992 hat sich das Meßsystem bewährt. Auch hier wurden Vergleichsmessungen mit Drucksonden durchgeführt.

2 Konventionelle Wellenhöhenmeßmethoden

Seit etwa 1950 werden Sonden zur Messung der Wellenhöhe eingesetzt. Sie haben inzwischen ein hohes Maß an Stabilität erreicht und haben sich als Standardverfahren bei Feldmessungen etabliert. Dabei wird zwischen Draht- und Drucksonden unterschieden.

2.1 Drahtsonden und Drucksonden

Bei Drahtsonden wird eine Drahtanordnung senkrecht zur Wasseroberfläche ins Wasser eingebracht. Man unterscheidet Widerstandssonden und kapazitive Sonden. Mit der Veränderung des Wasserspiegels über die Eintauchtiefe der Drahtsonde wird sowohl der elektrische Widerstand als auch die Kapazität dieser Meßsysteme beeinflusst, wobei das Wasser als Kurzschlußwiderstand bzw. als Dielektrikum wirkt. Die Änderung des Widerstandes oder die der Kapazität werden über eine Brückenschaltung meßtechnisch bis zu Frequenzen von 100 Hz mit Meßgenauigkeiten im Mikrometerbereich bestimmbar.

Um die Wechselwirkung zwischen Meßvorrichtung und dem auf sie einwirkenden Medium möglichst klein zu halten, werden besonders dünne Sonden bevorzugt. Zusätzliche Einwirkungen auf die Genauigkeit dieses Meßverfahrens wie sie z. B. in tideabhängigen Gewässern durch den unterschiedlichen Salzgehalt auftreten und damit zu einer Veränderung der spezifischen Leitfähigkeit oder Änderung der Dielektrizität führen, können bei diesem Verfahren meßtechnisch kompensiert werden.

Ebenfalls gute Meßresultate sind durch den Einsatz von Drucksensoren zu erreichen. Das Meßprinzip der zur Wellenhöhenerfassung einsetzbaren Drucksonden beruht ebenfalls auf der Veränderung des elektrischen Widerstandes, der über die Verformungseigenschaften von sehr dünnen Membranen durch die auf sie jeweils einwirkenden Druckzustände kontinuierlich erfaßt wird. Der Vorteil der Drucksonden liegt im wesentlichen in ihrer einfachen Handhabbarkeit und den vielfältigen Einsatzmöglichkeiten in unterschiedlichen Medien. Besonders deutlich wird dieser Vorteil bei der Erfassung von Druckpotentialen im Boden. In der Bundesanstalt für Wasserbau werden zur Erfassung der unter Schiffsbelastung entstehenden Druckreaktionen im Untergrund ausschließlich Drucksonden eingesetzt /4/, /5/, /6/. Die im Boden gemessenen Druckpotentiale werden hierbei auf die im freien Wasser wirkenden Druckveränderungen bezogen, die durch Änderungen der Wasserspiegellagen in Form von Wellen, Sunkerscheinungen und hydraulischen Druckänderungen auf das Gewässerbett einwirken. Dabei muß die Überlagerung der dynamischen und statischen Anteile aus Druck- und Wasserspiegellagenänderung beachtet werden. Diese Wechselwirkungen werden in ihrem Meßergebnis um so mehr verfälscht, je größer die Störfaktoren aus den für die Messungen eingesetzten Sensoren und Meßtechniken werden. Die Druck- und Drahtsonden zeigen eine Tiefpaßfilterung der Wellenamplitude. Drahtsonden zeigen Kapillareffekte am Draht, da bei schnellen Wasserstandsänderungen ein träger Kapillarfilm die Sonde umgibt. Drucksonden lösen geringe Drucksignale bei kleinen Wellen nicht mehr auf. Bei Drahtsonden ist im Feld eine absolute Kalibrierung umständlich, da zum Bezugspunkt die Wasserhöhe bekannt sein muß. Eine Kompensation von Fremdeinflüssen (z. B. Salzgehalt) erfordert einen schaltungstechni-

schen Mehraufwand, ist aber zuverlässig. Insgesamt haben sich diese Sonden bei Feldmessungen sowie bei Labormessungen bewährt und sind deshalb als weitverbreitete Standardmeßverfahren einzustufen.

technische Daten von Wellenhöhensonden		
Sonde	Auflösung	erfaßbare Wellenfrequenz
kapazitive Drahtsonden	1 μm	100 Hz
Widerstandssonden	25 μm	100 Hz
eingesetzte Drucksonden *	3 mm	25 Hz
Zeilenkamera Grosser /8/	50 μm	255 Hz
Bildanalyse	0,2 - 2 mm	25 Hz

* Das hier eingesetzte und speziell für Porenwasserdruckmessungen der BAW entwickelte Meßwerterfassungssystem arbeitet mit einer maximalen Abtastrate von 50 Hz, wodurch die meßbaren Frequenzen auf 25 Hz begrenzt bleiben. Mit größeren Abtastraten sind jedoch mit den hier eingesetzten Drucksonden (Transamerica) auch höhere Wellenfrequenzen erfaßbar.

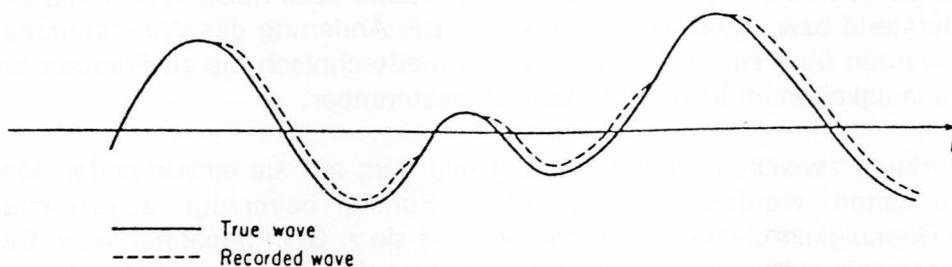


Bild 2 Gemessene Wellen und reale Wellenform an einer dünnen Drahtsonde /7/

2.2 Anforderungen an ein Wellenhöhenmeßsystem

Aus der Beschreibung der konventionellen Methoden leiten sich die Anforderungen ab, die jedes Meßsystem in geeigneter Weise erfüllen muß:

- hohe Ortsauflösung
Jedes System sollte eine hohe Ortsauflösung besitzen, um auch kleine Wellenamplituden zu messen.
- absolute Kalibrierung
Das System sollte leicht und schnell kalibriert werden können, die Änderungen anderer Parameter (wie z. B. Salzgehalt, Beleuchtung) sollten keinen Einfluß auf die Kalibrierung haben.
- Feldtauglichkeit
Das System sollte mit einem minimalen Aufwand installiert werden können und mobil sein.
- Wechselwirkungsfreiheit
Die Meßsonden sollten wechselwirkungsfrei die Wellenamplituden messen bzw. der Einfluß aus einer Wechselwirkung sollte klein oder korrigierbar sein.

- Frequenzbereich
Der interessierende Frequenzbereich sollte alle relevanten Wellenlängen einschließen.
- Komponenten
Es sollten nur gängige und leicht beschaffbare Systemkomponenten eingesetzt werden.

3 Videometrisches Meßprinzip

3.1 Überblick über das Meßverfahren

Das Meßsystem basiert auf einer bildanalytischen Meßmethode, bei der die Wasseroberfläche mit Videokamera beobachtet wird und ein Rechner das Videosignal auswertet und die Höhe des Wasserstandes registriert. Das System ist über die serielle Rechnerschnittstelle RS-232 ansteuerbar und kann deshalb auch im Verbund mit den in der Bundesanstalt für Wasserbau speziell für Porenwasserdruckmessungen entwickelten Meßwerterfassungsprogrammen für vergleichende Simultanmessungen eingesetzt werden.

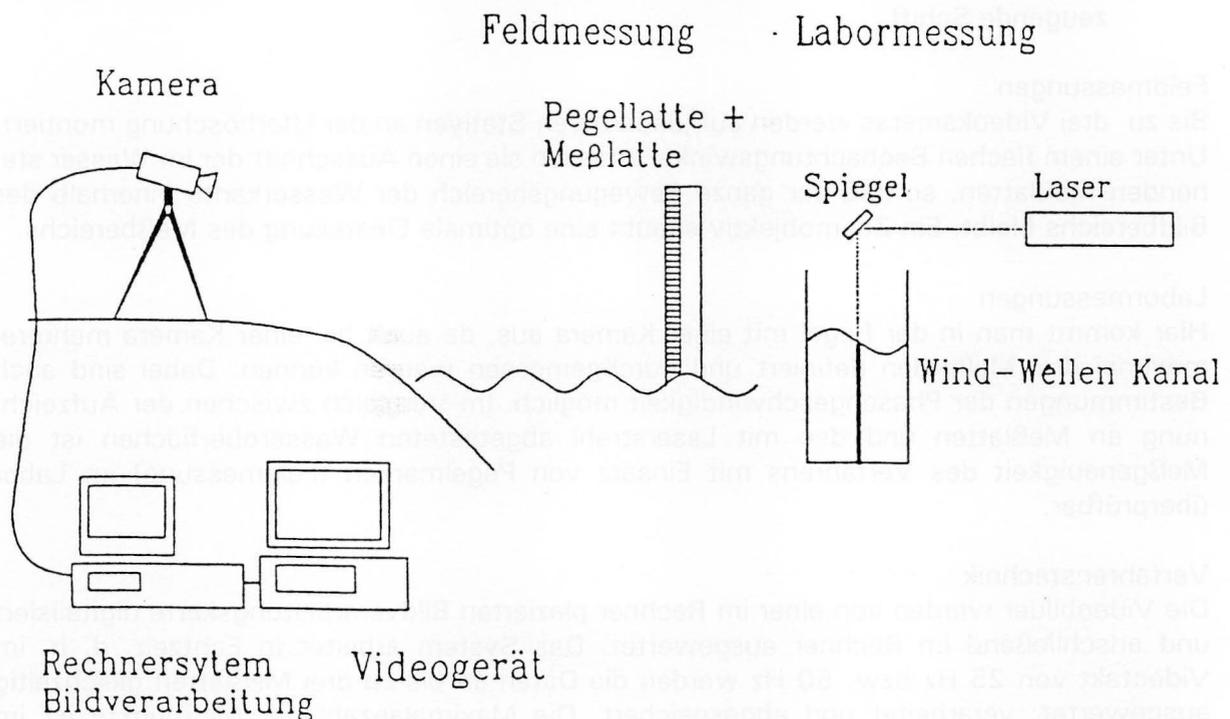


Bild 3.1 Aufbau des Meßsystems

Bild 3.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Systems. Es sind zwei verschiedene Verfahren zu unterscheiden: Zum einen ist die Feldmessung zu nennen, bei der eine im Wasser stehende, weiße Meßplatte beobachtet wird, zum anderen strahlt bei Labormessungen ein Laserstrahl von oben in das mit Fluoreszein eingefärbte Wasser. Durch die Streuung wird der Laserstrahl für die seitlich angebrachte Kamera auf der Wasseroberfläche sichtbar. In diesem Fall wird die Wellenhöhe wechselwirkungsfrei bestimmt.

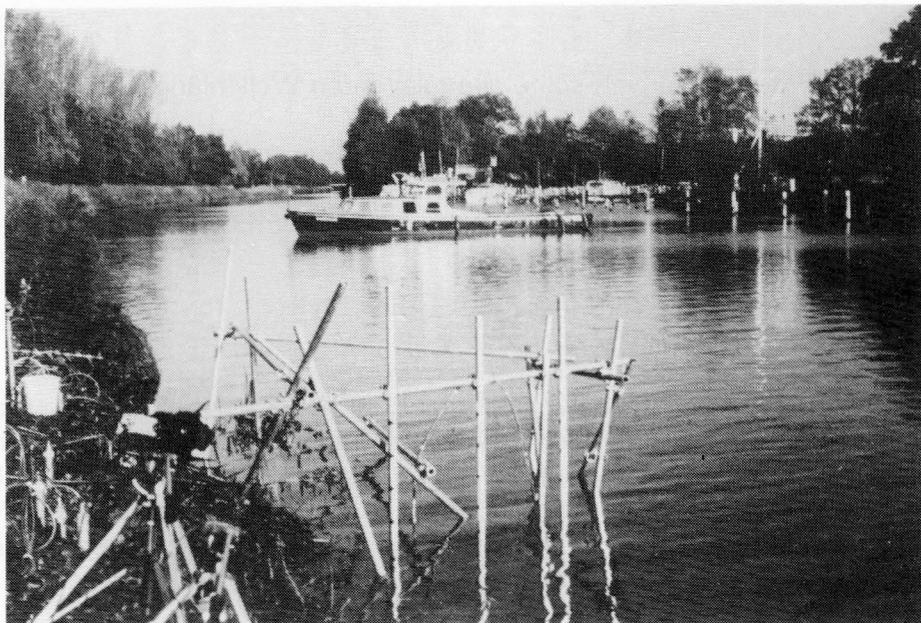


Bild 3.2 Messungen am Osnabrücker Seitenkanal, vorn links die Kameras auf Stativen, links daneben die Druckgeber im Deckwerk, in der Bildmitte die drei ins Wasser ragenden Meßplatten, die durch die Kamera beobachtet werden, im Hintergrund das wellenerzeugende Schiff

- Feldmessungen
Bis zu drei Videokameras werden auf justierbaren Stativen an der Uferböschung montiert. Unter einem flachen Beobachtungswinkel erfassen sie einen Ausschnitt der im Wasser stehenden Meßplatten, so daß der ganze Bewegungsbereich der Wasserkante innerhalb des Bildbereichs bleibt. Ein Zoomobjektiv erlaubt eine optimale Einstellung des Meßbereichs.
- Labormessungen
Hier kommt man in der Regel mit einer Kamera aus, da auch bei einer Kamera mehrere, maximal drei Meßzeilen definiert und durchgemessen werden können. Dabei sind auch Bestimmungen der Phasengeschwindigkeit möglich. Im Vergleich zwischen der Aufzeichnung an Meßplatten und den mit Laserstrahl abgetasteten Wasseroberflächen ist die Meßgenauigkeit des Verfahrens mit Einsatz von Pegelmarken (Feldmessung) im Labor überprüfbar.
- Verfahrenstechnik
Die Videobilder werden von einer im Rechner plazierten Bildverarbeitungskarte digitalisiert und anschließend im Rechner ausgewertet. Das System arbeitet in Echtzeit, d. h. im Videotakt von 25 Hz bzw. 50 Hz werden die Daten an bis zu drei Meßplatten gleichzeitig ausgewertet, verarbeitet und abgespeichert. Die Maximalanzahl der Meßpunkte ist im wesentlichen von den verwendeten Algorithmen und der Schnelligkeit des Rechners abhängig.

Die Eichung der Absolutlage des Wasserpegels wird bei Feldmessungen mit Hilfe der sichtbaren Meßskala auf der Latte interaktiv durchgeführt. Bei Labormessungen wurde einerseits die Wasserhöhe verändert und die relative Lage im Bild dadurch absolut geeicht, andererseits wurde ein Referenzmuster aufgenommen und so die Eichung parallel zur Wasseroberfläche durchgeführt.

Im Bild 3.3 wird der Datenfluß als Übersicht gezeigt.

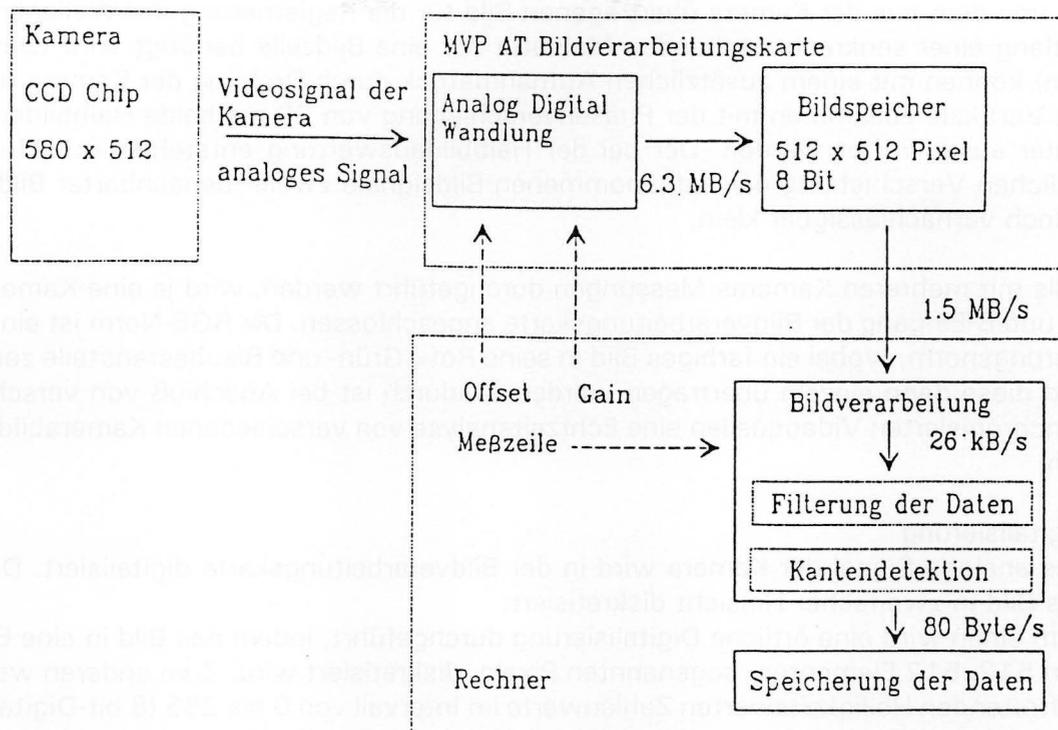


Bild 3.3 Datenfluß des Meßsystems. Bei Messung mit drei verschiedenen Kameras bzw. Meßzeilen erhöht sich die Datenmenge um das Dreifache.

3.2 Datenaufnahme

- Kamera

Die Kamera besteht im wesentlichen aus einem CCD-Chip (Charge-Coupled Devices), einer Photodiodenmatrix und einer Ausleseelektronik für diese Matrix. Es wurden verschiedene Kameras (Siemens K-210, Sony AVC D7CE) eingesetzt. Der CCD-Chip ist bei diesen Kameras nicht quadratisch, sondern besteht aus 580x512 Elementen. Weil die quadratische Grauwertmatrix der Bildverarbeitungskarte mit 512x512 Bildpunkten arbeitet, kann ein Teil des übertragenen Videobildes nicht digitalisiert werden, d. h. dieser Teil des Bildes wird abgeschnitten.

Die Video-Kamera wurde in einem flachen Winkel auf die Meßplatte ausgerichtet, um die Verzerrungen durch die nichtlineare Abbildung möglichst klein zu halten. Zur Kontrasterhöhung zwischen der dunklen Wasseroberfläche und der hellen Meßzeile wurden Rotfilter eingesetzt. Die Messungen ungünstig beeinflussende Reflexionen auf der Wasserfläche können mit Hilfe eines Polarisationsfilters vermindert werden.

- Videonorm

Das Videosignal von der Kamera wird nach der CCIR-Norm übertragen. Das Bild wird als analoges Signal Zeile für Zeile im sogenannten "interlaced"-Modus gesendet. Alle Bildzeilen mit gerader Zuordnung, z. B. Bildzeilen 2, 4, 6 usw., werden über einen Zeitraum von 20 ms zuerst übertragen, erst danach werden die Bildzeilen mit ungerader Numerierung 20 ms gesendet. Das Bild setzt sich also aus zwei Halbbildern zusammen. Damit besteht zwischen benachbarten Bildzeilen eine zeitliche Aufnahmedifferenz von 20 ms. Zeiten für das Senden von Synchronisationssignalen und Überschneidungen bleiben hierbei unberücksichtigt, sie liegen etwa in der Größenordnung von 2 ms /2/.

Da von dem aus der Kamera übertragenen Bild für die Registrierung der Wellenamplituden entlang einer senkrecht stehenden Meßplatte nur eine Bildzeile benötigt wird (Datenreduktion) können mit einem zusätzlichen Aufnahmetrick durch Drehung der Kamera um 90° in die Vertikale zusammen mit der Phasenverschiebung von 20 ms beide Halbbilder nacheinander ausgewertet werden. Der bei der Halbbildauswertung entstehende Fehler aus der örtlichen Verschiebung der aufgenommenen Bildsignale zweier benachbarter Bildzeilen ist jedoch vernachlässigbar klein.

Falls mit mehreren Kameras Messungen durchgeführt werden, wird je eine Kamera am R-, G- und B-Eingang der Bildverarbeitungskarte angeschlossen. Die RGB-Norm ist eine Farbkodierungsnorm, wobei ein farbiges Bild in seine Rot-, Grün- und Blaubestandteile zerlegt wird und diese dann einzeln übertragen werden. Dadurch ist bei Anschluß von verschiedenen, synchronisierten Videoquellen eine Echtzeitanalyse von verschiedenen Kamerabildern möglich.

- Digitalisierung

Das analoge Signal der Kamera wird in der Bildverarbeitungskarte digitalisiert. Dabei wird das Bild in zweifacher Hinsicht diskretisiert:

Zum einen wird eine örtliche Digitalisierung durchgeführt, indem das Bild in eine Bildmatrix von 512×512 Elementen, sogenannten Pixeln, diskretisiert wird. Zum anderen werden den auftretenden Helligkeitswerten Zahlenwerte im Intervall von 0 bis 255 (8 bit-Digitalisierung) zugeordnet. Niedrige Werte entsprechen dabei einem dunklen Grauwert aus dem Videobild. Mit einem einstellbaren "Offset" und "Gain" (Verstärkungsbereich) kann die Zuordnung verändert werden.

Aus der im Rahmen des Projektes durchgeführten Fehlerabschätzung ergibt sich für die Feldmessungen ein Gesamtfehler von

$$\Delta x = 7 \text{ mm} \left(\frac{\Delta x}{x} \sim 1\% \right).$$

Dieser setzt sich zusammen aus dem Übertragungsfehler durch die Phasenverschiebung von 40 ms, dem Digitalisierungsfehler und einem algorithmischen Verfahrensfehler.

Bei Labormessungen mit Einsatz der Lasertechnik reduziert sich dieser Gesamtfehler /8/ auf

$$\Delta x = 0,2 \text{ mm} \left(\frac{\Delta x}{x} = 0,2\% \right).$$

3.3 Bildanalyse

Aus dem Bildspeicher der Bildverarbeitungskarte wird ein 64 kByte Segment direkt über den PC-Bus in den RAM-Speicher des Rechners eingeblendet. Es wird nun eine vorher auf die Meßplatte bzw. den Laserstrahl ausgewählte Bildmatrixzeile ausgelesen und aus Zeitgründen nur diese Zeile weiter bearbeitet.

In dieser Zeile tritt an der Stelle der Wellenoberfläche ein Grauwertsprung, d. h. eine Kante auf, dessen Lage von den Kantendetektionsalgorithmen gesucht wird. Bei Feldmessungen hat man einen Übergang von der hellen Meßplatte zum dunklen Wasser, bei Lasermessungen einen Sprung vom dunklen Hintergrund zum fluoreszierenden Wasser (siehe Bild 3.4).

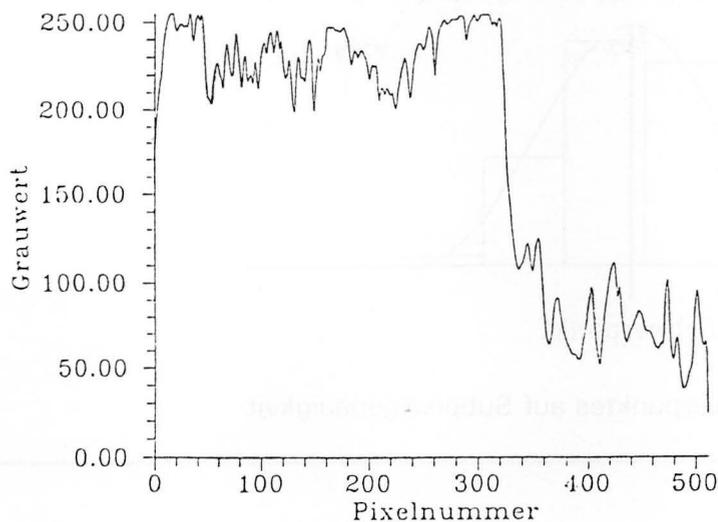


Bild 3.4 Typischer Grauwertverlauf in einer Zeile bei Feldmessungen

Bei den Feldmessungen treten Probleme durch eine Verschmutzung der Meßlatte auf, die durch die Auswerte-Algorithmen nicht als Kante interpretiert werden dürfen. Zudem treten große Reflexionen im Bereich der Wasserwellen auf, die ebenfalls eine Komplizierung der Algorithmen bedingen. Alle Bedingungen können sich schnell ändern, die Algorithmen müssen also sehr zuverlässig sein.

Die für Lasermessungen geeigneten Algorithmen können bei gleicher Zuverlässigkeit erheblich einfacher realisiert werden, da der Übergang vom dunklen Hintergrund zum fluoreszierenden Wasser sehr scharf ist. Es genügt hier ein einfacher, schneller Grauwertschwellenalgorithmus (unter 2 ms).

Falls nun im 50 Hz-Takt gemessen werden soll, wird eine Nachbarzeile nach 20 ms ausgelesen und diese dann analog der ersten bearbeitet. Diese Nachbarzeile gehört somit zu einem anderen Halbbild und ist deshalb örtlich und zeitlich verschoben (doppelter Videotakt).

3.4 Kalibrierung

Die Algorithmen geben als Lage des Wasserstandes nur die Position in der Bildmatrix an. Zur Kalibrierung der Lage in absoluten Höheneinheiten werden sogenannte Paßpunkte verwendet, deren Weltkoordinatenhöhe (z. B. Dezimeter über NN) und deren Position in der Bildmatrix bekannt sind. Anschließend kann eine lineare Regression durchgeführt und so für jedes Pixel der Höhenwert berechnet werden. Messungen haben gezeigt, daß die Angabe zweier Paßpunkte ausreicht und die Genauigkeit durch Angabe mehrerer Punkte nicht entscheidend verbessert werden kann (vorausgesetzt, die Paßpunkte werden korrekt eingegeben). Die Eingabe der Paßpunkte wird interaktiv vom Rechner vorgenommen. Im Bild werden die Punkte markiert und dann die Höhenwerte eingegeben. Der Rechner ermittelt die Lage in der Bildmatrix auf Subpixelgenauigkeit, d. h. die Lage wird auf Bruchteile eines Bildpunktes berechnet.

Die erfaßten Grauwerte der Bildmatrix werden im jeweils interessierenden Bildbereich über eine Häufigkeitsverteilung gewichtet und der daraus ermittelte Schwerpunkt wird als Ordinatewert übergeben (vgl. Bild 3.5).

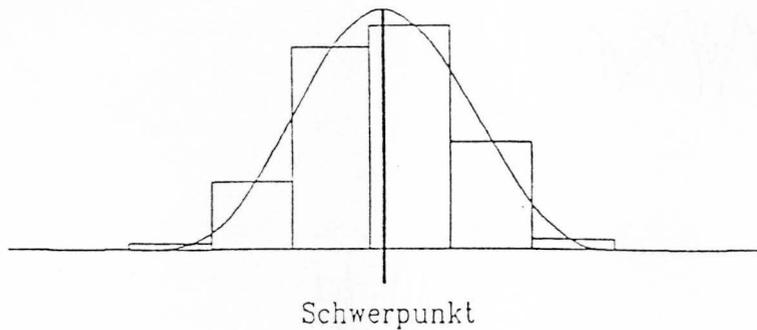


Bild 3.5 Berechnung des Schwerpunktes auf Subpixelgenauigkeit

Daten des Meßsystems	
Auflösung	1/512tel des Kameraausschnittes
Fehler	statisch 0,2 %, dynamisch 1 %
meßbare Wellenfrequenzen	0 - 25 Hz
Meßfrequenz	25 Hz oder 50 Hz
maximale Meßdauer	11 h
Meßpunktanzahl	≤ 3
Kameraanzahl	≤ 3
steuerbar über serielle Schnittstelle	RS 232

4 Bildverarbeitung

4.1 Offset-Gain-Einstellung und Glättungsfilter

Nach der Blendeneinstellung der Kamera wird bei einer Messung der Offset und der Gain der Bildverarbeitungskarte eingestellt. Mit diesen Parametern kann die Digitalisierung der Helligkeitswerte, d. h. welchem Helligkeitswert welcher Wert im Intervall von [0,255] zugewiesen wird, in einem kleinen Rahmen verändert werden. Die Einstellung der Parameter ist sehr wichtig, da die Detektion entscheidend verbessert werden kann, wenn der Kontrastumfang der hellen Meßplatte zum dunklen Wasser hoch ist. Dabei ist es dann unerheblich, ob andere Bildausschnitte über- oder unterbelichtet sind. Die genaue Optimierung dieser Parameter übernimmt dabei der Rechner, der auf der vorher eingestellten Meßzeile die Grauwertverteilung (Histogramm) berechnet und Offset und Gain so einstellt, daß dem minimalen Grauwert der Wert 0 und dem maximalen Grauwert der Wert 255 zugeordnet wird. Dadurch ist das Histogramm maximal ausgedehnt.

Durch eine zusätzliche, manuelle Übersteuerung des Offsets können darüber hinaus auch kleinere Schmutzeffekte auf der Meßplatte eliminiert werden, indem diese in den Sättigungsbereich geschoben werden (siehe Bild 4.1). Damit wird eine erste "Low-Level" Aufbereitung vorgenommen.

Die unterste Kurve zeigt den Verlauf bei optimalem Offset-Wert. Die aus Schmutzeffekten hervorgerufenen Grauwertänderungen zwischen Pixelnummer 0 und 320 werden erst durch die Verschiebung der Kurve (untere Kurve) sichtbar bzw. durch Verschiebung des Offsets nach oben eliminiert.

Zur Vorverarbeitung der Daten wird die Zeile mittels Filter geglättet. Kleinere Störungen bzw. sogenanntes Rauschen werden damit eliminiert. Geeignet sind vor allem Glättungsfilter bzw. Tiefpaßfilter. Hier gibt es zwei prinzipiell verschiedene Möglichkeiten: Zum ersten die Realisierung mit Hilfe einer Filtermaske, bei der die Grauwerte gefaltet werden (Finite Impulse), zum zweiten die rekursive Filterung der Daten (Infinite Impulse Response, IIF-Filter), bei der die

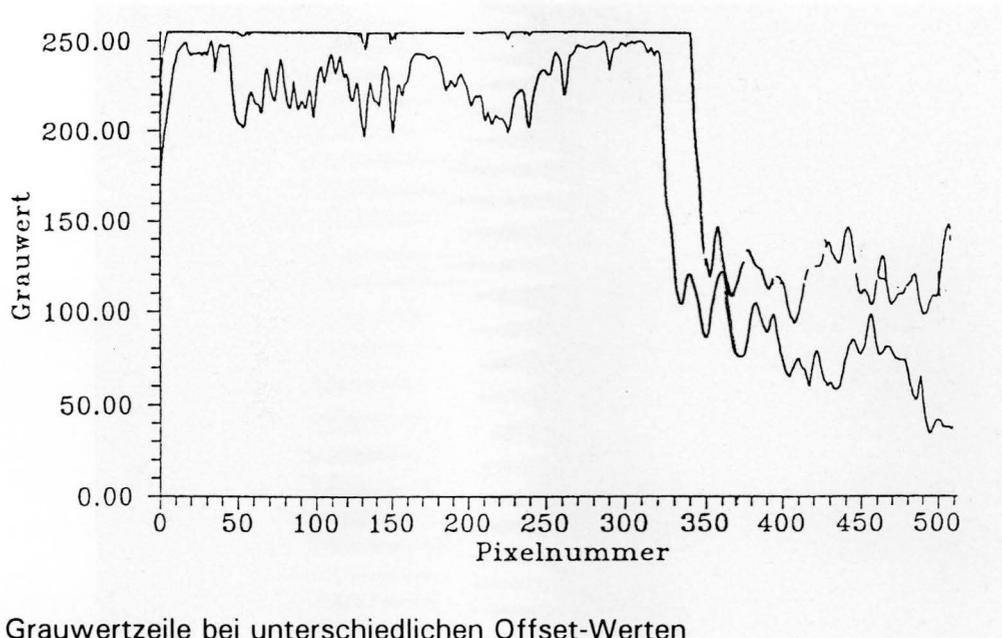


Bild 4.1 Grauwertzeile bei unterschiedlichen Offset-Werten

Punktantwort nicht auf die Filterlänge begrenzt ist. Welche der dafür zur Verfügung gestellten Filterfunktionen beim jeweiligen Meßvorgang letztendlich eingesetzt werden, hängt von den örtlichen Verhältnissen ab und ist vom Bediener bei der PC-Auswertung nach Optimierungsgrundsätzen frei wählbar bzw. auch automatisch einstellbar /8/.

4.2 Wasseroberflächendetektion

Aus zeitlichen Gründen wird die Detektion des Grauwertsprunges, d. h. die Suche des Helligkeitsunterschiedes von der hellen, weißen Meßplatte zum dunklen Wasser, im wesentlichen nur in einer Zeile des Videobildes durchgeführt. Bei Labormessungen, z. B. im Windkanal, liegt fast ein Binärbild vor, bedingt durch den intensiven Laserstrahl und den dunklen Hintergrund. Es treten keine Probleme bei der Kantenerkennung (Segmentierung) auf und die Detektion kann sehr schnell (< 2 ms) durch eine Grauwertschwelle fehlerfrei durchgeführt werden. Deshalb wird im folgenden nur der für die Bildverarbeitung anspruchsvollere Fall der Feldmessung behandelt. Hier treten wechselnde Bedingungen auf, angefangen von Beleuchtungsänderungen bis hin zu brechenden Wellen. Bei Feldmessungen ist man auf eine hohe Zuverlässigkeit angewiesen, damit die Fehlerrate klein gehalten wird und die Lage häufig ermittelt werden kann.

Bei der Kantendetektion in Videoechtzeit ist es nicht möglich, die gemessenen Daten gleichzeitig darzustellen. Es ist daher keine Überprüfung der Algorithmen in Echtzeit möglich. Bei der Entwicklung der Algorithmen wurden deshalb drei Verfahren angewandt, um die Zuverlässigkeit und die Bearbeitungszeit zu optimieren. Neben der Analyse von Einzelbildern wurden Grauwertverläufe mit einer von Rauschen überlagerten Kantenfunktion simuliert. Zum anderen dient ein sogenanntes Orts-Zeit-Bild zum Test und zur Auswahl eines Algorithmus. Dabei wird in Videoechtzeit die komplette Meßzeile abgespeichert und anschließend werden nach 512 Speicherungen alle Zeilen untereinander zu einem neuen Bild zusammengesetzt. Es trägt in einer Zeile die örtliche und in einer Spalte die zeitliche Information. Dadurch kann die zeitliche Änderung der Wasserhöhe visualisiert werden. Die Algorithmen tragen bei der Bearbeitung des Bildes in jeder Zeile die gefundene Kante ein. So ist eine genaue Überprüfung und Wahl eines geeigneten Algorithmus durch den Anwender möglich, weil anhand des gewonnenen Orts-Zeit-Bildes (siehe Bild 4.2 und Bild 4.3) die gefundene Kante als Funktionswert der Wellenhöhe als Vergleichswert eingetragen wird.

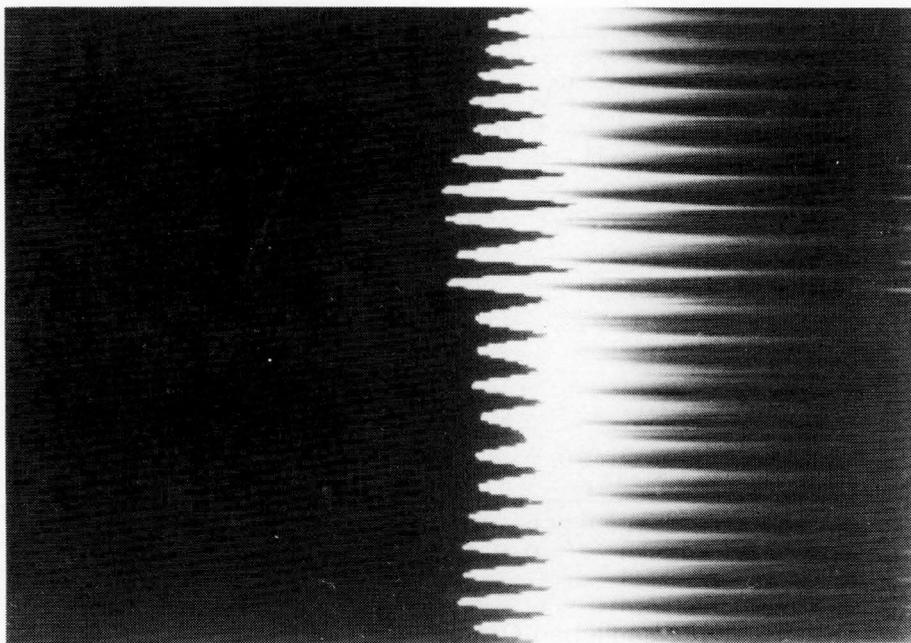


Bild 4.2 Orts-Zeit-Bild einer Messung am Windwellenkanal des Instituts für Umweltphysik. Das Bild ist um 90° gedreht.

Alle Algorithmen geben zusätzlich zur Kantenlage einen Bestimmtheitswert von 0 bis 10 aus, der angibt, wie gut die Kante detektiert werden konnte. Hier wird zum Beispiel die Höhe der Ableitung herangezogen. Eine hohe Ableitung ergibt einen hohen Bestimmtheitswert, allerdings hat eine sehr hohe, scharfe Ableitung (durch Reflexionen oder Verschmutzungen) keinen hohen Gebrauchswert. Der Bestimmtheitswert dient also zur Auswahl des optimalen Algorithmus bei Feldmessungen.

Bei allen Verfahren ist man zur Optimierung auf teilweise heuristische Ansätze angewiesen. Das schlägt sich in der Wahl der Schwellwerte nieder, die durch den Test unter vielen Bedingungen optimiert wurden, und darin, daß die Algorithmen die Wasserkante detektieren, indem sie die Zeilen von oben nach unten auf der Meßplatte absuchen.

Es werden zur Verminderung des Rechenaufwandes Intervallmethoden eingesetzt, d. h. es wird nur ein Intervall von [-20, 20] Pixeln um den letzten gefundenen Höhenwert abgesucht.

4.2.1 Kantendetektoren

Aus der Signaltheorie sind seit langem Algorithmen bekannt, die auf verrauschten Signalen eine Kantendetektion durchführen [9/10]. Allen Verfahren ist gemeinsam, daß sie bekannte Merkmale des Signals ausnutzen, um zuverlässig die Flanke des Signals zu bestimmen. Auch alle Standardverfahren in der Bildverarbeitung arbeiten merkmalsorientiert. Als Merkmal dienen zum Beispiel der Grauwert, der Gradient oder die Standardabweichung vom Grauwert u. a. [11/12]. Bei der Detektion werden die Merkmale eingesetzt, wobei durch die Zielsetzung, in Videoechtzeit die Kantenlage zu bestimmen, enge zeitliche Grenzen gesetzt wurden und daher nur einfachste Algorithmen eingesetzt werden können. Um die Zuverlässigkeit zu erhöhen, wurden diese Standardverfahren leicht modifiziert und untereinander kombiniert.

- Grauwertalgorithmen

1. Der Grauwert wird in einem Intervall gemittelt. Wenn dann ein Wert unter 2/3 des Mittelwertes abfällt, wird diese Stelle als Kante interpretiert. Verschmutzungen sind im wesentlichen gleichmäßig auf der Meßplatte verteilt, so daß sie mit diesem Algorithmus

herausgemittelt werden können.

2. Beim Durchsuchen der Zeile wird fortlaufend der Mittelwert berechnet. Dieser Algorithmus arbeitet im Gegensatz zum ersteren schneller und ist ebenso zuverlässig.



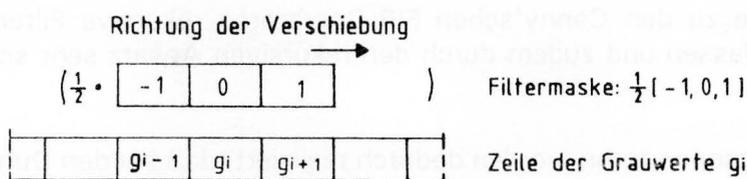
Bild 4.3 Orts-Zeit-Bild einer Messung am Stichkanal Osnabrück und Eintrag der detektierten Wasserkante. Das Bild ist um 90° gedreht. Die Zeitachse verläuft von oben nach unten.

- Gradientenalgorithmien

Ableitungsoperatoren können auf einem diskreten Gitter nicht so leicht wie bei Glättungsfiltern approximiert werden. Erste Ableitungen einer zweidimensionalen Matrix sind nicht isotrop. Durch die Beobachtung von nur einer Bildzeile bleibt sie jedoch bei dem hier vorgestellten Meßverfahren isotrop. Eine einfache Approximation der ersten Ableitung ergibt sich aus der Formel

$$\frac{\partial g(i)}{\partial i} \approx \frac{g(i+1) - g(i-1)}{2} .$$

Realisiert wird diese Berechnung durch eine Faltung der Bildzeile mittels eines symmetrischen Filters mit der Maske $\frac{1}{2} [-1, 0, 1]$. Durch Verschieben der gewählten Filtermaske entlang der Bildzeile mit den Pixelwerten g_i erfolgt für jeden Pixelschritt eine Wichtung der jeweiligen Grauwerte g_i mit den zugehörigen Werten der Filtermaske durch Multiplikation und anschließender Aufsummierung entsprechend der Formel $\frac{1}{2} (-g_{i-1} + g_{i+1}) = h_i$, was den gesuchten Werten der ersten Ableitung der jeweiligen Grauwerte g_i entspricht.



- Klassische Ableitungsoperatoren

Durch Faltung der Zeile mit einer $[-1,1]$ -Maske wird die erste Ableitung des Grauwertes berechnet. Dabei wird der Ableitung ein Zwischengitterplatz zugeordnet.

Es wird dann das Maximum der ersten hohen, negativen Ableitung detektiert. Um die Zuverlässigkeit zu erhöhen, wurde keine feste Schwelle implementiert, sondern die Schwelle aus dem Histogramm der negativen Ableitung berechnet. Bei hellem Licht entstehen hohe Ableitungen, bedingt durch Lichtreflexe auf dem Wasser. Der Kontrast zwischen Latte und Wasser nimmt aber auch zu und daher wird eine hohe Schwelle angesetzt. Bei diffusem Licht sind alle Ableitungen niedrig, es wird mit einer kleineren Schwelle gearbeitet. Kleinere Verschmutzungen der Latte, die im Vergleich zu den Reflexen im Wasser kleine Ableitungen besitzen, werden so nicht berücksichtigt.

Laplacefilter wurden nicht eingesetzt, da die Untersuchung der Nullstelle der zweiten Ableitung auf Vorliegen eines echten Grauwertsprunges zu rechenintensiv ist. Es hätte zusätzlich die erste Ableitung berechnet oder die Umgebung der zweiten Ableitung untersucht werden müssen. Das Ergebnis kann genauso zuverlässig mit der Maximumsmethode der ersten Ableitung erreicht werden.

- Ableitungsoperatoren höherer Ordnung

Canny beschrieb in mehreren Artikeln Kriterien für Ableitungsoperatoren, aus denen er einen optimalen eindimensionalen FIR-Kantenoperator ableitet /13/.

Erstens sollten nur echte Kanten detektiert werden, also das Signal-Rauschverhältnis (SNR) maximiert werden. Zweitens sollte die Kantenlage gut detektierbar sein, daher sollte der Operator die Kante nicht örtlich verschieben. Drittens sollte eine Kante keine mehrfachen Signale verursachen, dies ist nicht in dem ersten Kriterium enthalten und muß zusätzlich gefordert werden.

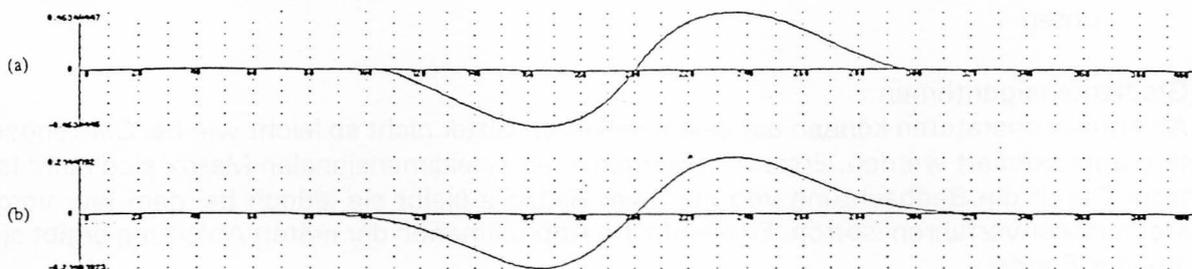


Bild 4.4 a) optimaler Kantenoperator ähnlich einer ersten Ableitung eines Gaußfilters;
b) aus Canny /13/

Die Filtermasken sind sehr groß, teilweise haben sie Ausmaße von 100 Werten. Dies konnte hier so nicht implementiert werden, da sonst durch das Randproblem nur ein Bereich von $[100, 400]$ zur Kantendetektion zur Verfügung steht und zudem die Rechenzeit immens ansteigt. Der nachfolgende Ansatz über rekursive Filter gestattete jedoch die Implementierung eines optimalen Canny-Filters.

- Rekursive Ableitungsoperatoren

Deriche entwickelte zu den Canny'schen FIR-Operatoren rekursive Filter, die sich sehr effizient einsetzen lassen und zudem durch den rekursiven Ansatz sehr schnell sind /14/, /15/.

Rekursive Ableitungsoperatoren werden dadurch realisiert, daß bei den Durchläufen in jede Richtung ein durch ein Vorzeichen anderer Operator die Werte filtert und dann beide

Filterantworten addiert und normiert werden. Konkret sieht der Canny-Filter im eindimensionalen Fall rekursiv wie folgt aus:

$$1. \text{ Lauf } g'_1(i) = g(i-1) + e^{-\alpha} g'_1(i-1) \quad \text{für } i = 1, \dots, 511$$

$$2. \text{ Lauf } g'_2(i) = -g(i+1) + e^{-\alpha} g'_2(i+1) \quad \text{für } i = 510, \dots, 0$$

$$\text{Addition } g'(i) = -(1 - e^{-\alpha}) (g'_1(i) + g'_2(i)) .$$

Mit α wird die Stärke der Glättung der Grauwertfunktion vor der Ableitung eingestellt. Es hat sich ein Wert von $8/9$ für $e^{-\alpha}$ bewährt. Erst durch die Implementierung des rekursiven Filters war es im vorliegenden Fall möglich, den Canny-Ansatz auch für die Echtzeitmessung zu nutzen.

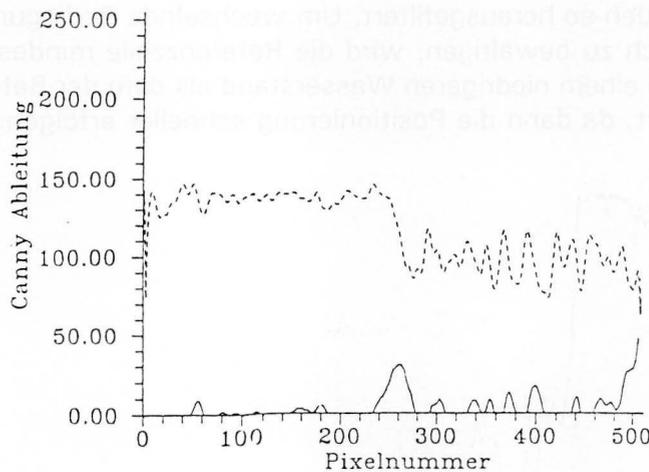


Bild 4.5 Grauwertfunktion und der Betrag der negativen Canny-Ableitung

4.2.2 Fuzzy Logic

Bei der Kantendetektion hat ein menschlicher Beobachter in der Regel keine Schwierigkeiten und lässt sich nicht so leicht von falschen Kanten, durch Schmutz etc. täuschen. Um diese zuverlässige Beurteilung in einem Algorithmus zu implementieren und um verschiedene Merkmale gegeneinander schwellenwertfrei abzuschätzen, ähnlich dem menschlichen Erkennungsprozeß, wird Fuzzy Logic eingesetzt.

Die Fuzzy Logic wird auf verschiedene Merkmale wie Grauwert, Gradient des Grauwertes für jedes einzelne Pixel angewendet. Dann werden durch Fuzzyregeln die Merkmale kombiniert und der "Kantenwert" für jedes Pixel berechnet. Der maximale Kantenwert in der Pixelzeile entspricht dann der Wasserkante. Im einzelnen werden folgende Merkmale benutzt:

- letzte Kante
- erste Ableitung
- Ableitung höherer Ordnung
- heuristisches Wissen, das auf der Meßplatte von oben nach unten abgesucht wird.

In einer "Look-Up-Table" mit Werten zwischen 0 und 511 werden die für jeden Pixel durch Fuzzy Logic berechneten Zuordnungswerte für die Objektklassen "Kante" oder "keine Kante" eingetragen. Das Maximum in dieser Tabelle wird als Kantenlage interpretiert.

4.2.3 Differenzzeilenalgorithmen

- Benachbarte Bildzeilen

Der Algorithmus, der die Differenz der Grauwerte zweier benachbarter Bildzeilen bildet, war bei ruhigem Wasserstand mit nur minimalen Schwankungen der Wasserkante nicht einsetzbar, weil durch die Fluktuation der Lichtreflexe auf der Wasseroberfläche leicht falsche Werte detektiert werden können.

- Referenzzeile

Bei einem niedrigen Wasserstand wird die negative Ableitung des Grauwertes einer Zeile gespeichert und von den aktuellen Ableitungen der Zeile subtrahiert:

$$h_{ij}(t) = g'_{ij}(t) - g'_{ij}(t_0) \quad \text{für alle } i.$$

Stationäre Verunreinigungen werden so herausgefiltert. Um wechselnde Bedingungen und neue Verschmutzungen erfolgreich zu bewältigen, wird die Referenzzeile mindestens alle 30 s neu aufgenommen, bzw. bei einem niedrigeren Wasserstand als dem der Referenzzeile. Die Ableitung wird gespeichert, da dann die Positionierung schneller erfolgen kann als bei einer Grauwertspeicherung.

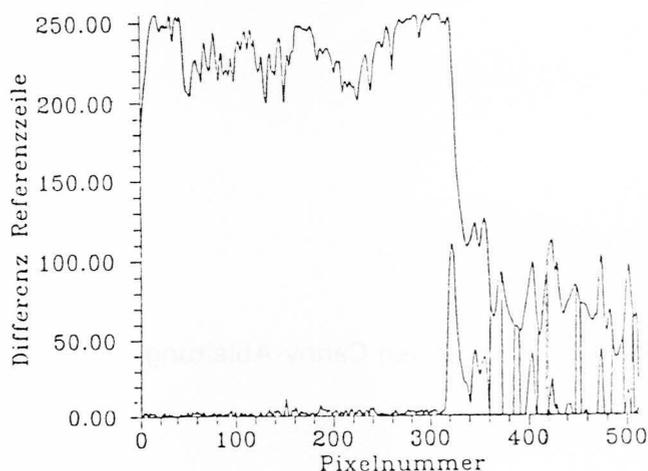


Bild 4.6 Grauwertfunktion und Differenz mit den Werten der Referenzzeile

Es wird nur der positive Teil der Differenz betrachtet, da auch eine Detektion erfolgen muß, falls die aktuelle Wasserkante unter die der Referenzzeile fällt. Mit diesem Algorithmus konnten gute Ergebnisse auch bei starken Grauwertschwankungen der Meßlatte und bei schnellen Beleuchtungsänderungen erzielt werden. In dem nachfolgenden Bild 4.7 ist der für die eingesetzten Filter- und Detektionsalgorithmen benötigte Zeitbedarf aufgelistet. Abhängig von der Rechengeschwindigkeit sind die Zeiten in den Spalten 1 (386 SX 20 MHz-Rechner) und 2 (386 25 MHz-Rechner) deutlich zu unterscheiden.

4.2.4 Subpixelgenaue Lagebestimmung

Die Lage der Paßpunkte bei der Kalibrierung wird auf Subpixelgenauigkeit berechnet. Die Kante eines Eichstriches auf der Meßlatte wird in der Bildmatrix markiert und die Höhenwerte werden eingegeben. Dann wird das Intervall vom linken und rechten lokalen Minimum der Ableitung untersucht. Da sich Grauwerte im Bild nicht additiv überlagern, wird nur in dem Bereich die Lage durch Schwerpunktbestimmung der Ableitung berechnet, wo die Ableitung größer ist als das maximale Minimum /16/17/. Die Bilder 4.8 und 4.9 zeigen die praktische Anwendung.

Spalte	1	2
Algorithmus	t in ms	t in ms
Bildsegment einblenden	1,5	1,2
Zeile lesen	1,8	1,3
rekursives Tiefpaßfilter	7,8	4,8
Binominalfilter [1,4,6,4,1]	8,4	7,6
Binominalfilter [1,2,1]	6,1	5,0
Medianfilter 1×3	8,0	6,6
Absolutwert Ableitung [-1,1]	7,3	5,7
negative Ableitung [-1,1]	5,3	4,2
Histogramm 256 Werte	5,0	4,2
Kontrastaufbesserung	26,0	18,7
Ableitungsalgorithmus	12,5	9,3
Intervallableitung	4,1	3,5
Mittelwertalgorithmus	16,2	11,5
rekursive Canny Ableitung	13,5	9,0
Fuzzy Algorithmus	9,5	6,5
Referenzzeile Algorithmus	23,0	17,0

Bild 4.7 Zeitbedarf der eingesetzten Algorithmen, Spalte 1 mit PC 386 SX (20 MHz); Spalte 2 mit PC 386 (25 MHz)

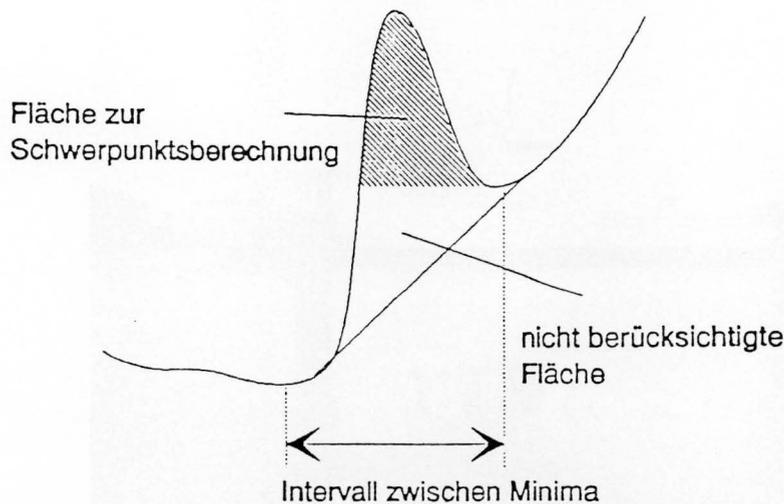


Bild 4.8 Bereich, der für die subpixelgenaue Lagebestimmung gewählt wird. Es wird nicht der gesamte Bereich zwischen den beiden Minima zur Berechnung herangezogen

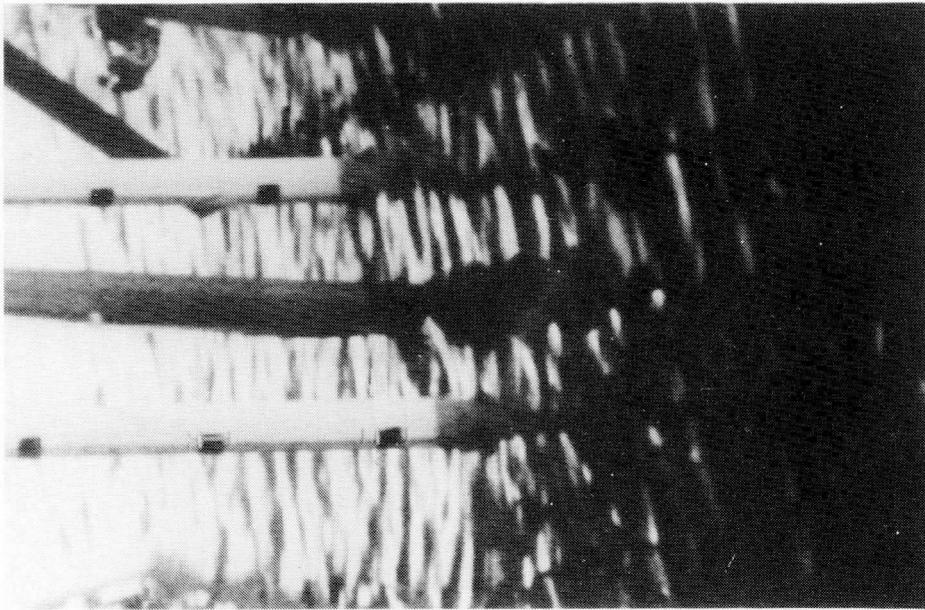


Bild 4.9 Kennzeichnung der Paßpunkte auf dem Videomonitor mit rot dargestelltem Intervall und gelb dargestelltem Gradienten

5 Ergebnisse der Wellenmessungen

5.1 Messungen an der Weser

1988 fanden Messungen an der Wesermündung statt, wobei mit dem auf Bildanalyse beruhenden Meßsystem erste Tests vor Ort durchgeführt wurden.

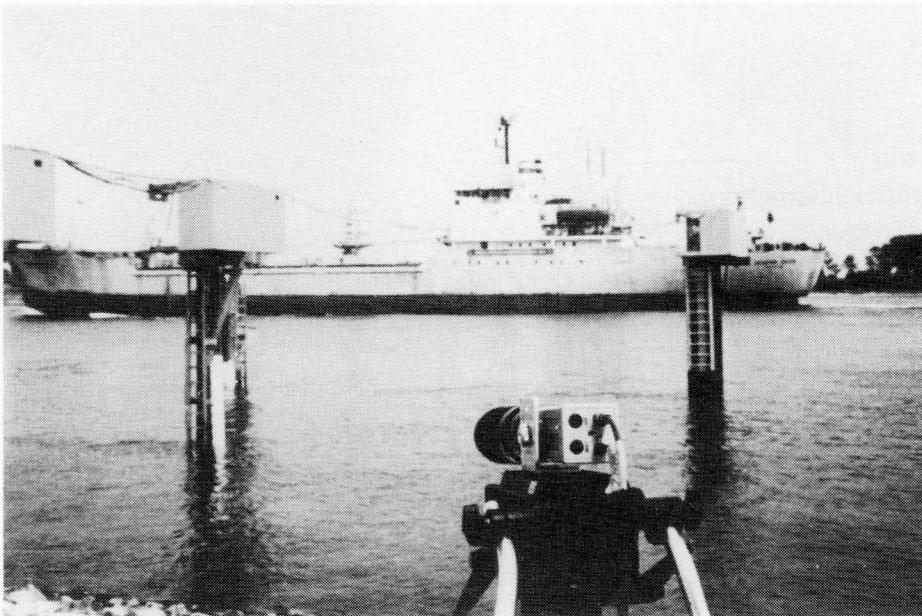


Bild 5.1 Meßaufbau an der Weser

Zweidimensionale Bilder können nicht nur durch eine Abbildung entstehen, die ein Objekt in einem gewissen Spektralbereich der elektromagnetischen Strahlung zeigt. Jede zweiparametrische Funktion kann als zweidimensionales Bild dargestellt und dann analog zu Bildern mit Ortskoordinaten weiterverarbeitet werden. Durch diese Verallgemeinerung erweitert sich die Anwendbarkeit der Bildverarbeitung besonders im naturwissenschaftlichen Bereich erheblich.

Zur Veranschaulichung ein Beispiel von den an der Unterweser durchgeführten ersten Testmessungen.

Bild 5.1 zeigt die Meßanordnung, die zur Messung der Wellenhöhe an der Weser in einem ersten gemeinsamen Projekt zwischen der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe und dem Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg eingesetzt wurde /1/. Eine Videokamera beobachtet aus etwa 16 m Entfernung eine 20 cm breite senkrechte Latte, die ins Wasser eintaucht. Dadurch ist die Wasseroberfläche als ein deutlicher Grauwertsprung zu erkennen (Bild 5.2, linker Bildteil).

Zur Bestimmung des zeitlichen Verlaufs der Wellenhöhe wird aus dem Bild eine Spalte herausgegriffen, die den Meßpfahl zeigt, und aus der Zeitabfolge dieser Spalte ein neues Bild geformt, das eine Orts- und Zeitkoordinate hat (Bild 5.2 rechter Bildteil). Das so entstandene Bild bezeichnet man als ein Orts-Zeit-Bild. Es macht den zeitlichen Verlauf der Wellenhöhe sichtbar /17/.

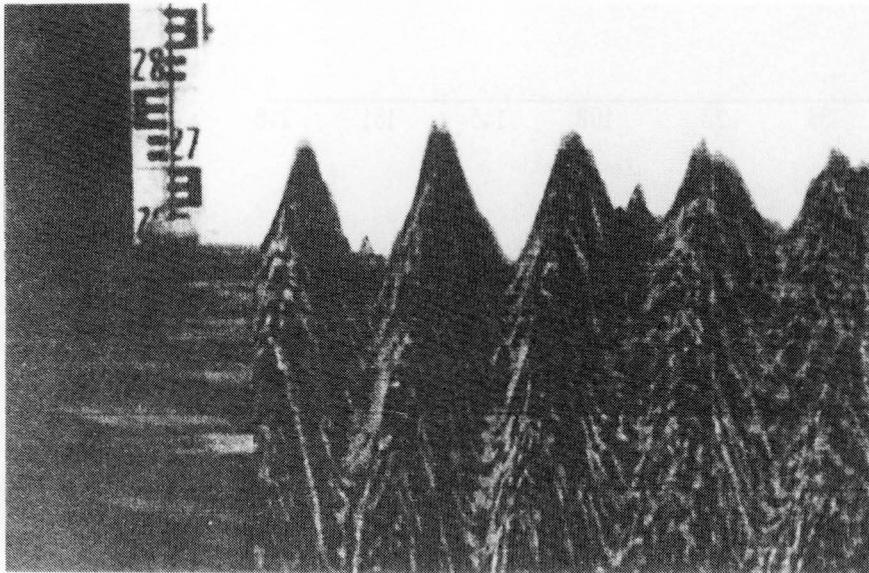


Bild 5.2 Videobild der Pegellatte (linker Bildteil); Orts-Zeit-Bild, entstanden durch Aneinanderreihung des Zeitverlaufs der markierten Bildspalte zur Bestimmung der Wellenhöhe als Funktion der Zeit (rechter Bildteil)

Das Aufzeichnen der Meßsequenzen auf Videoband gestattete es, nachträglich noch eine Auswertung vorzunehmen. Anhand dieser Aufnahmen fand eine erste Optimierung des Systems statt. Parallelmessungen mit Drahtsonden zeigten die Genauigkeit der Bildanalyse. Es traten drei charakteristische Periodenlängen von $T_1 = 82$ s, $T_2 = 3,2$ s und $T_3 = 1,5$ s hervor. Die höchsten Frequenzen wurden nur mit Drahtsonden und mit der Bildverarbeitungsmethode gemessen, Drucksonden lösen die Frequenzen wegen ihrer Tiefpaßeigenschaft nicht mehr auf. Die Drahtsonden zeigten im Vergleich zum bildanalytischen Verfahren große Störanfälligkeit. Die Auflösung lag bei 1,36 mm bei einem dynamischen Fehler in der gleichen Größenordnung. Der statische Fehler wurde zu 4 mm bestimmt /1/.

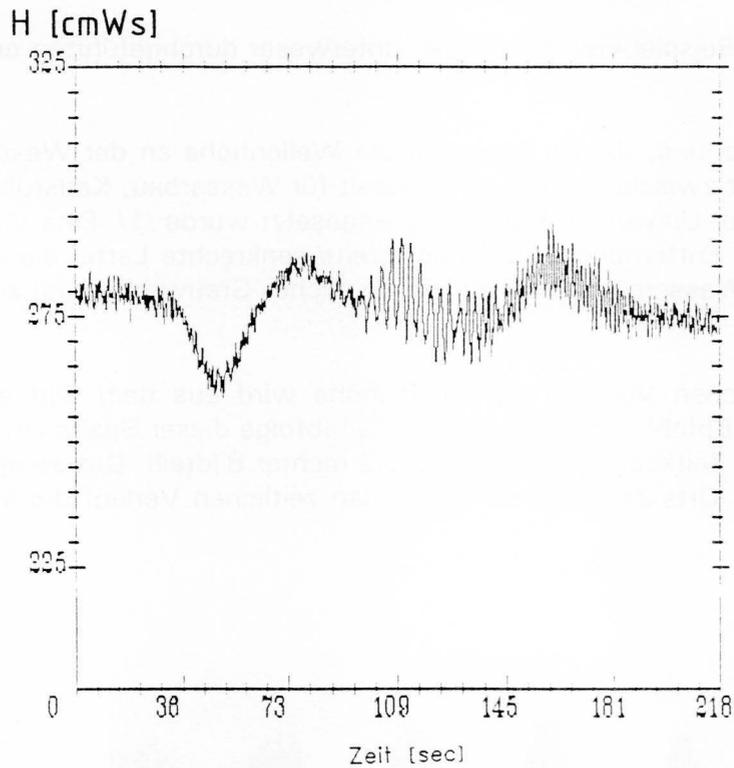


Bild 5.3 Messung einer Schiffsvorbeifahrt mit der Bildverarbeitung

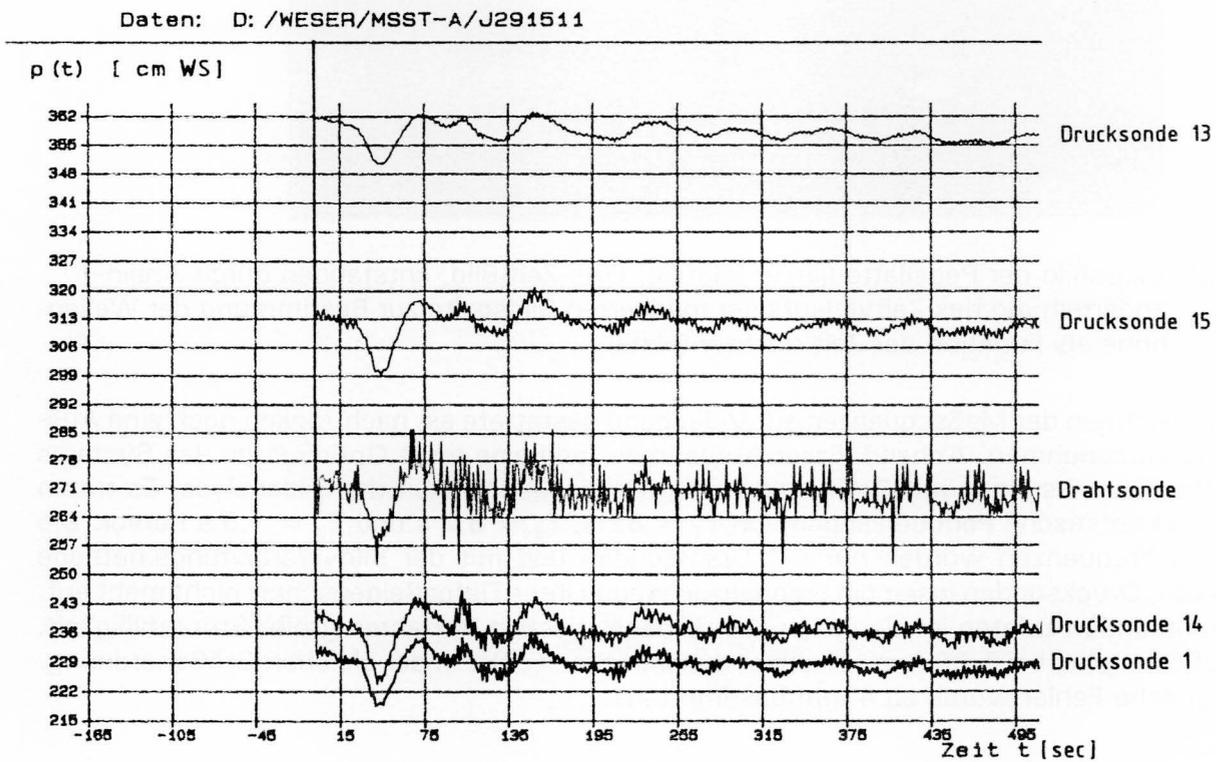


Bild 5.4 Vergleichsergebnisse von Druck- und Drahtsonden

5.2 Messungen in der Böschungsversuchsgrube der BAW Karlsruhe

In der Böschungsversuchsgrube der BAW Karlsruhe wurden im Oktober 1989 weitere Vergleichsmessungen zwischen drucksensorischer und videometrischer Wellenaufzeichnung durchgeführt. Der Schwerpunkt dieser Messungen lag hierbei in der Anwendung des Verfahrens bei brechenden Wellen mit Amplituden bis zu 70 cm Höhe. Die Sequenzen wurden auf Videoband aufgezeichnet und nachträglich ausgewertet.

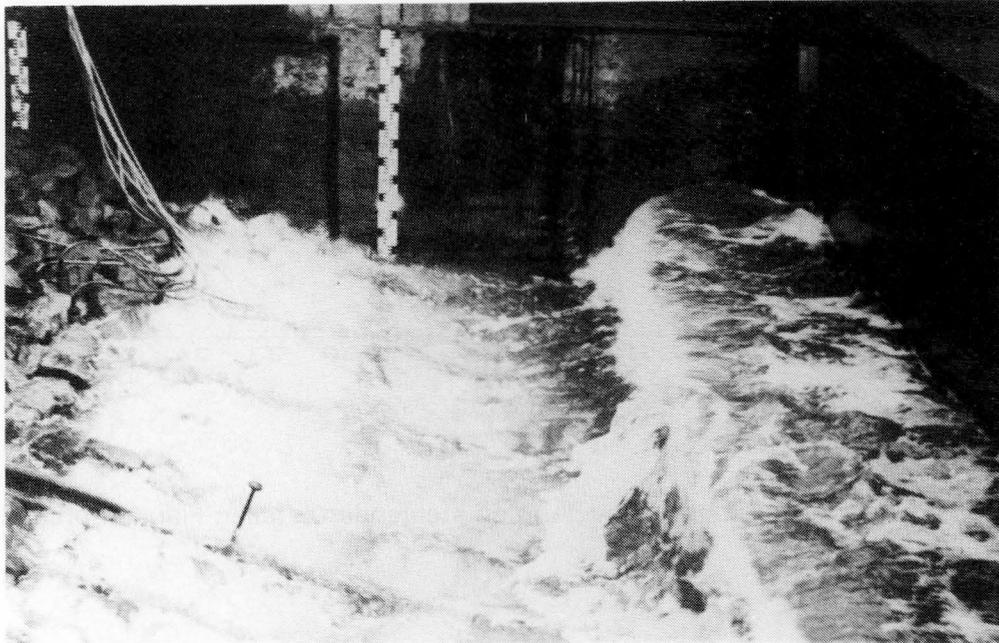


Bild 5.5 Wellenmessungen in der Böschungsversuchsgrube der BAW, Oktober 1989

Die von einem Verdrängungskörper erzeugten Wellen mit einer Periodenlänge von etwa 11 sec wurden beim Auflaufen auf die mit einem Steinschüttdeckwerk geschützte, 1 : 3 geneigte Böschung gebrochen. Durch die Wirkung des Verdrängungskörpers wurde im Wechsel der Lastspiele der Wasserspiegel angehoben und abgesenkt. Dieser Vorgang wurde durch die sich dabei brechenden Wellen überlagert (Bild 5.6) /18/.

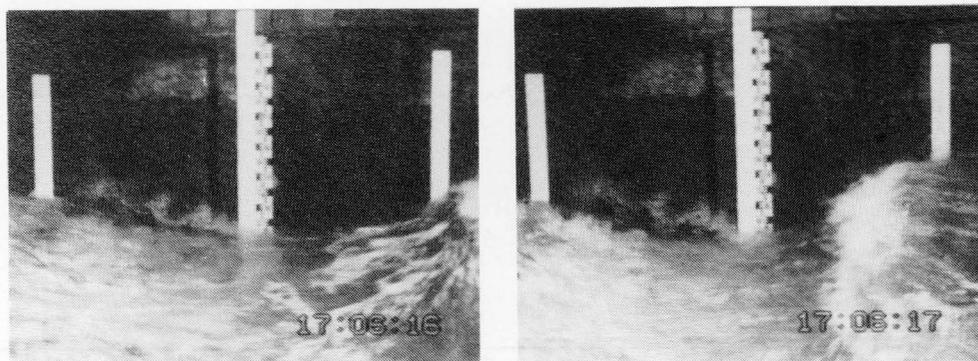


Bild 5.6 Auf- und ablaufendes Wasser mit brechender Welle

Im Moment des Brechens ist eine visuelle Wellenmessung besonders kritisch, da hier der Kontrast zwischen weißer Meßplatte und dem schaumigen Wasser sehr niedrig ist. Die Eignung der verschiedenen bildanalytischen Kantendetektoren wurde anhand solcher Bedingungen bewertet. Die Auswertungen dieser Messungen bestätigen jedoch die Anwendbarkeit der videometrischen Wellenaufzeichnung auch für brechende Wellen.

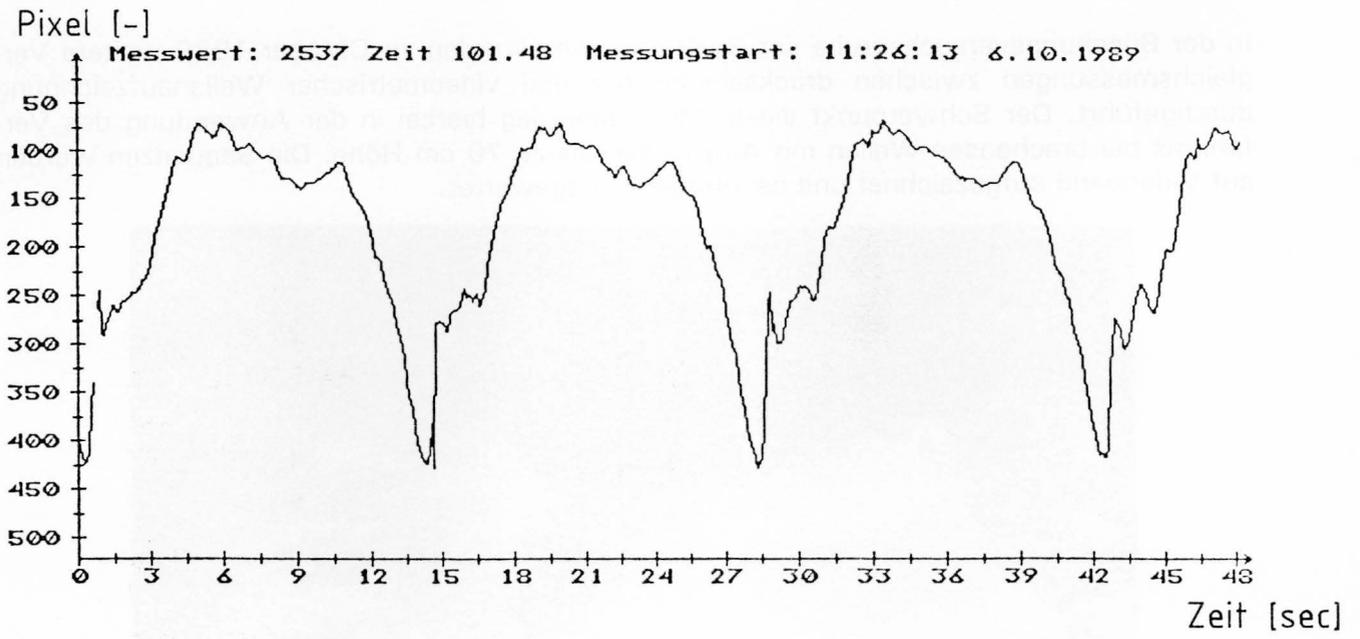


Bild 5.7 Messung in der Versuchsrube. An den steigenden, steilen Flanken brechen die Wellen

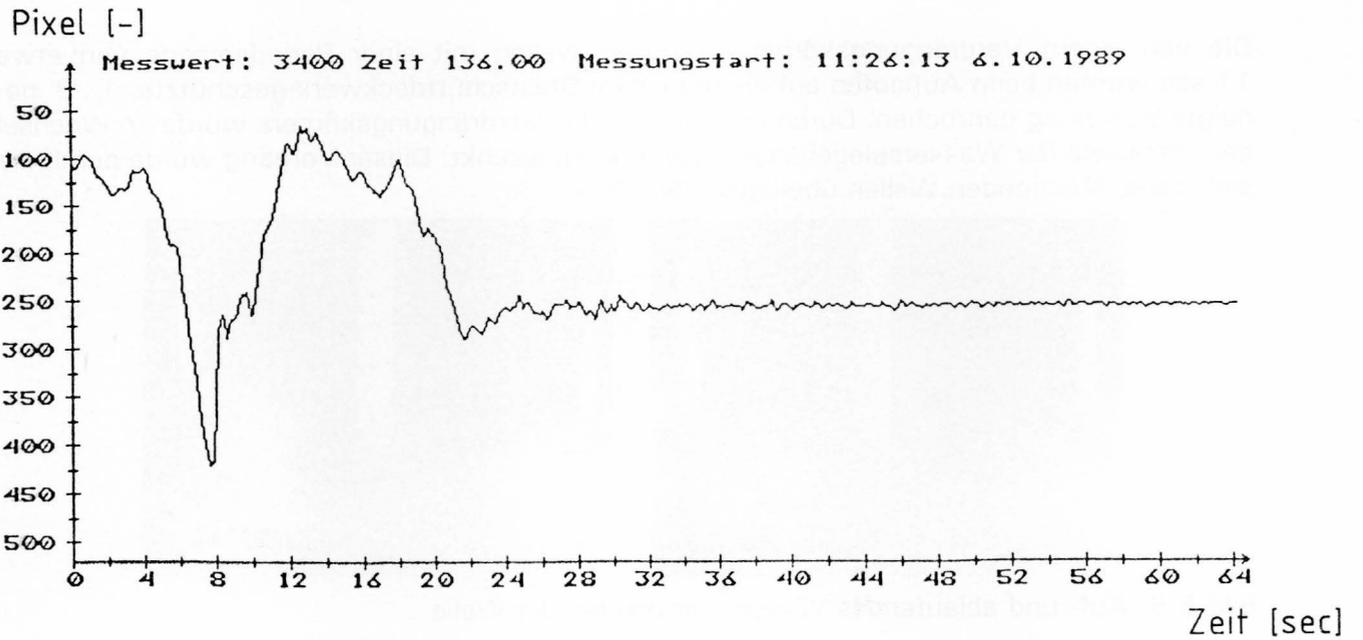


Bild 5.8 Messung in der Versuchsrube mit Ruhewasserspiegel

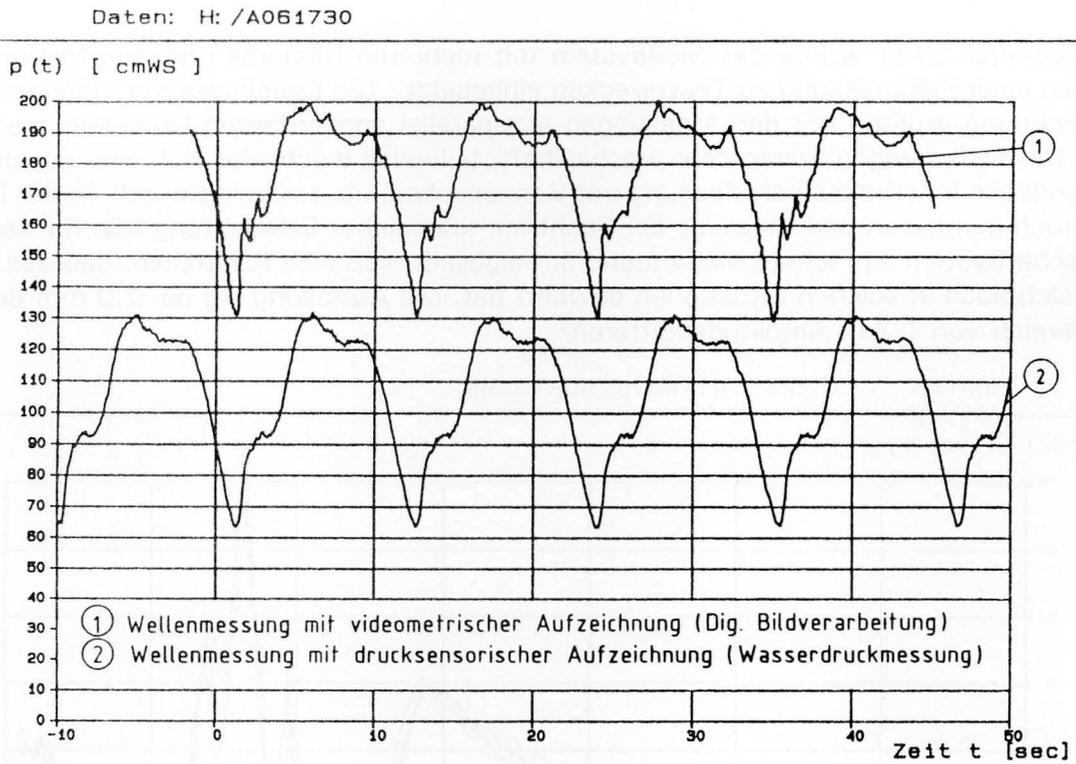


Bild 5.9 Vergleich des Wellenbildes von Drucksonden und videometrischer Analyse /19/

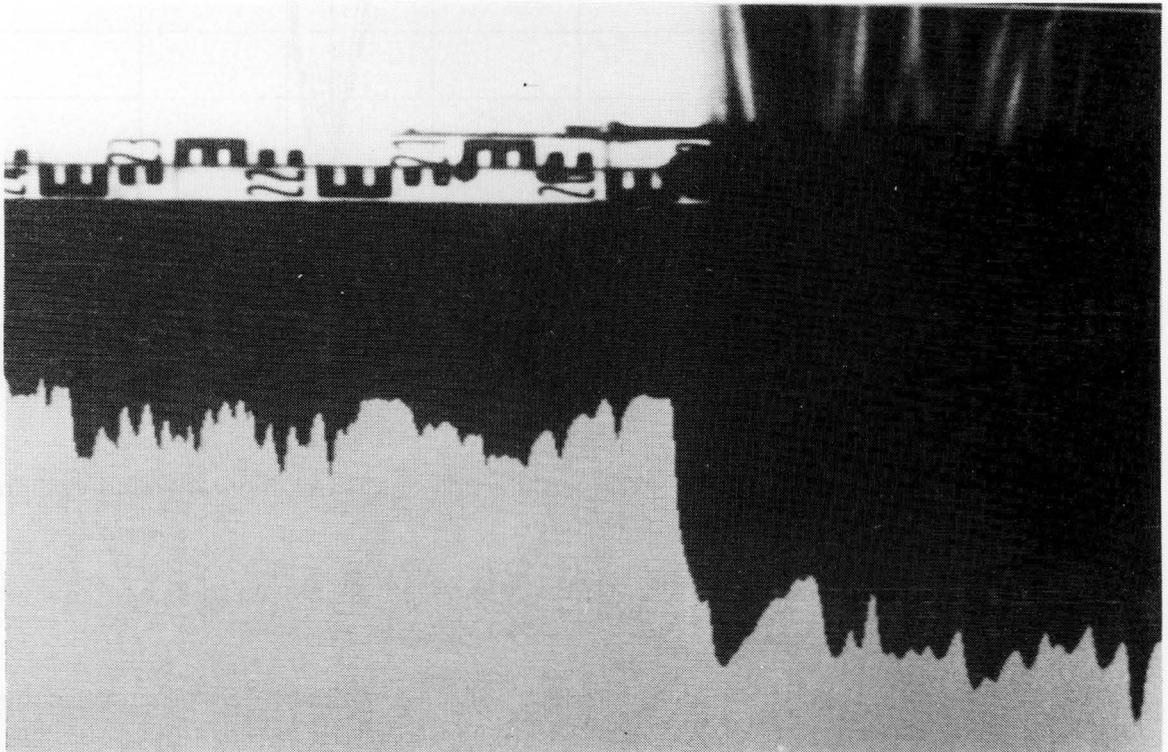


Bild 5.10 Beispiel für eine Kantendetektion zwischen weißem Lattenhintergrund und Wasseroberfläche (obere Bildhälfte) und algorithmische Auswertung (untere Bildhälfte)

5.3 Messungen am Stichkanal Osnabrück (SKO)

Im November 1991 wurde das Meßsystem mit mehreren Kameras und drei Meßpegeln im Rahmen einer Feldmessung zu Testzwecken eingesetzt. Die Ergebnisse der videometrischen Aufzeichnung wurden mit den Messungen aus parallel angeordneten Drucksensoren verglichen. Die Bedingungen waren sehr wechselhaft, teilweise wechselte sich eine geschlossene Wolkendecke innerhalb einer Messung mit Sonnenschein ab, teilweise wurde in der Dämmerung noch gemessen und teilweise bei Nacht mit künstlicher Beleuchtung (die für das videometrische System einfachste Meßsituation). Insgesamt ließ sich feststellen, daß das Meßsystem sich auch in solchen Situationen bewährt hat. Die Auflösung lag bei 2,0 mm bei einem Meßbereich von 1,2 m Amplitudendifferenz.

Daten: C: /SK061191/WAVE/S061339W

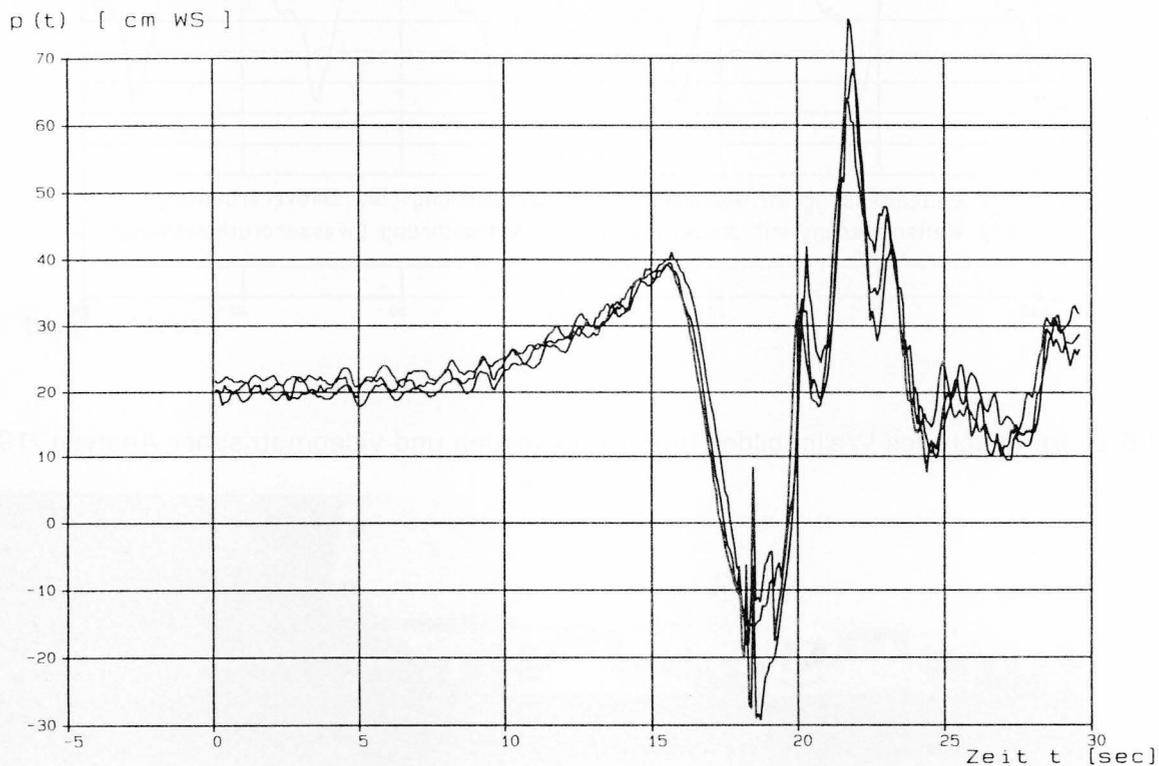


Bild 5.11 Messungen einer Schiffsvorbeifahrt mit drei Meßpegeln, wobei die Meßpegel senkrecht zur Uferlinie im jeweiligen Abstand von 50 cm angeordnet waren, videometrisches Meßverfahren (vgl. Bild 3.2)

Deutlich sichtbar ist in Bild 5.12 die Tiefpaßfilterung des Druckgebers: kleine Wellen werden ebenso wie Höhenpeaks nicht ganz erfaßt.

Sämtliche Messungen wurden auf Videoband gezeichnet, um ein späteres nochmaliges Durchmessen zu ermöglichen.

Die in den Bildern 5.11 und 5.12 aufgetragenen Meßkurven beschreiben die typische Wellenbelastung aus schnell und ufernah vorbeifahrenden Motorschiffen geringer Tonnage. Der Abstand zwischen passierendem Schiff und äußerstem Meßpegel betrug etwa 2 m. Es lassen sich verschiedene Phasen unterscheiden:

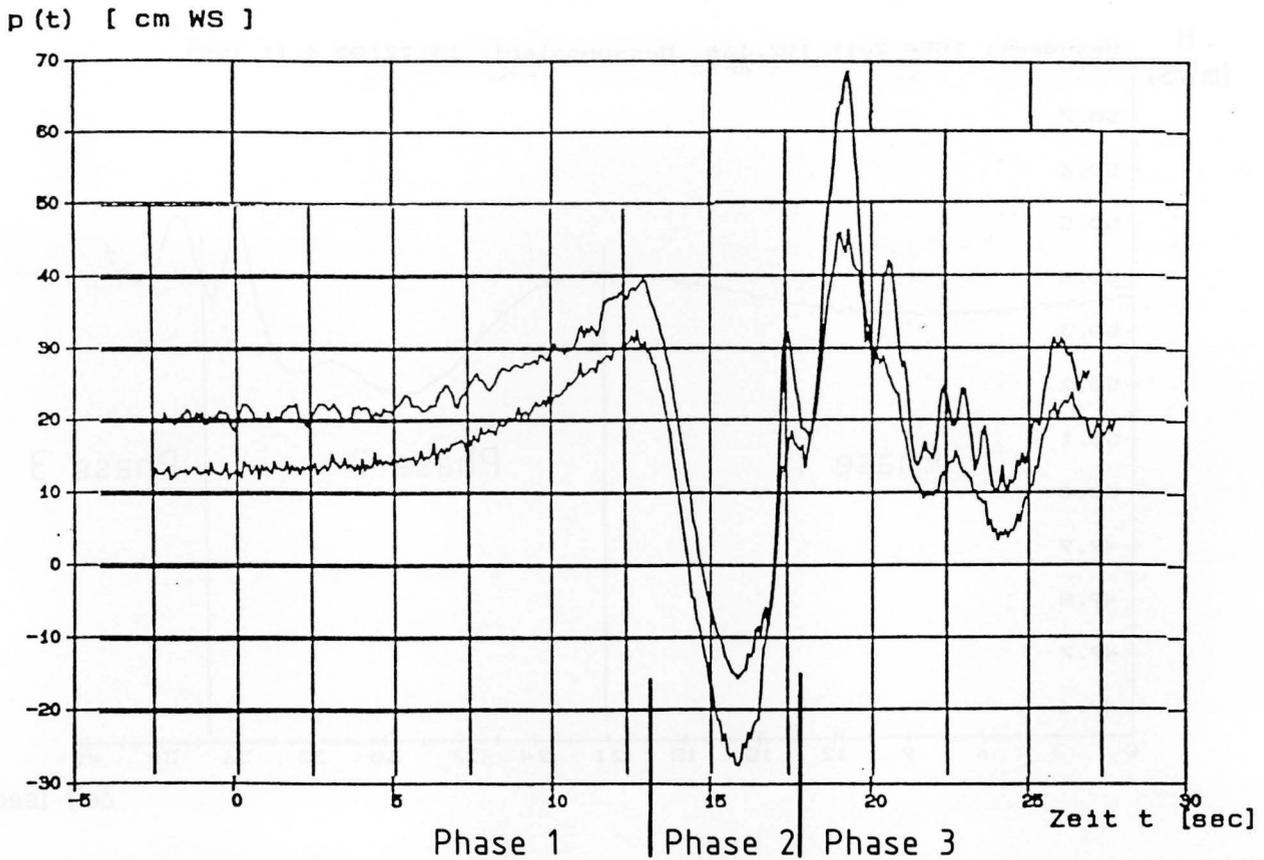


Bild 5.12 Vergleich der Messung mit Druckgeber (untere Meßkurve) und Meßpegel mit der bildanalytischen Meßmethode (obere Kurve)

Phase 1:

Der Wasserstand steigt durch die Verdrängung des Schiffes an, hier etwa 20 s vor der eigentlichen Schiffspassage beginnend.

Phase 2:

Die Bugwelle erreicht die Meßpegel, es entsteht ein schneller Absenk vor der ersten Welle. Hier tritt die größte Beeinflussung der Messung durch die entstehende Wasserströmung auf. Die erste Welle bricht im Bereich der Meßpegel entlang der Uferböschung.

Phase 3:

Nach Durchgang der Heckwellen mit mehr oder weniger sinusförmigem Verlauf tritt die Beruhigung der Wasseroberfläche in Abhängigkeit von der Schiffsgeschwindigkeit entweder schon kurz nach oder erst mit länger andauernder Unruhe nach dem Schiffsdurchgang ein. Größere und langsam fahrende Motorgüterschiffe erzeugen geringere Auslenkungen der Wasseroberfläche, die sich auch in geringeren Absenkgeschwindigkeiten äußern. Ein typisches Meßergebnis zeigt das Bild 5.13.

Der Phasenunterschied auf Bild 5.14 zeigt, daß zuerst eine Welle mit uferparalleler Geschwindigkeitskomponente auftritt und die eigentliche Bugwelle die größte Geschwindigkeitskomponente senkrecht zum Ufer besitzt, da kein Phasenunterschied auftritt.

Die jeweiligen Absenk- und Wellenhöhen ändern sich jedoch belastungsspezifisch. Das Spektrum aller möglichen Absenk- und Wellenformen besitzt daher maßgebliche Bedeutung bei der Dimensionierung von Wasserstraßen.

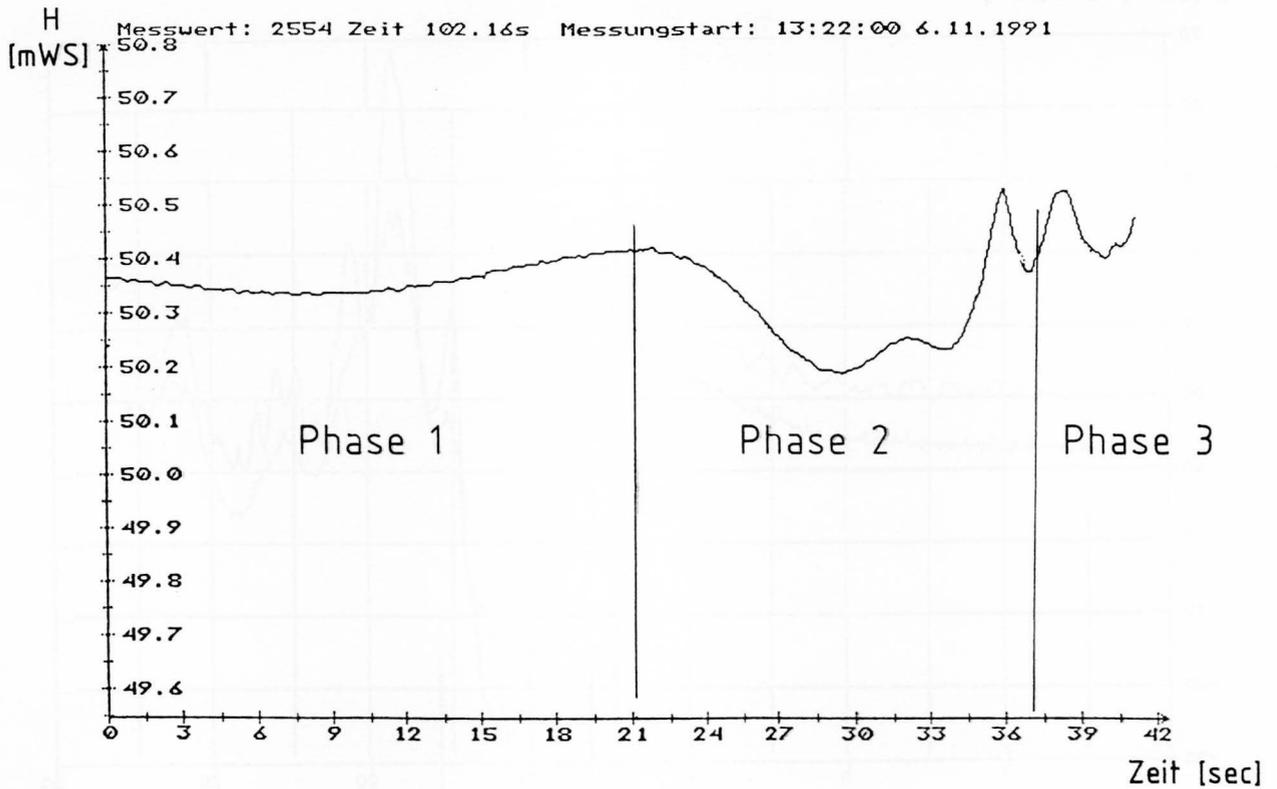


Bild 5.13 Messungen einer Schiffsvorbeifahrt mit einem langsam fahrenden Motorgüterschiff (videometrische Aufzeichnung)

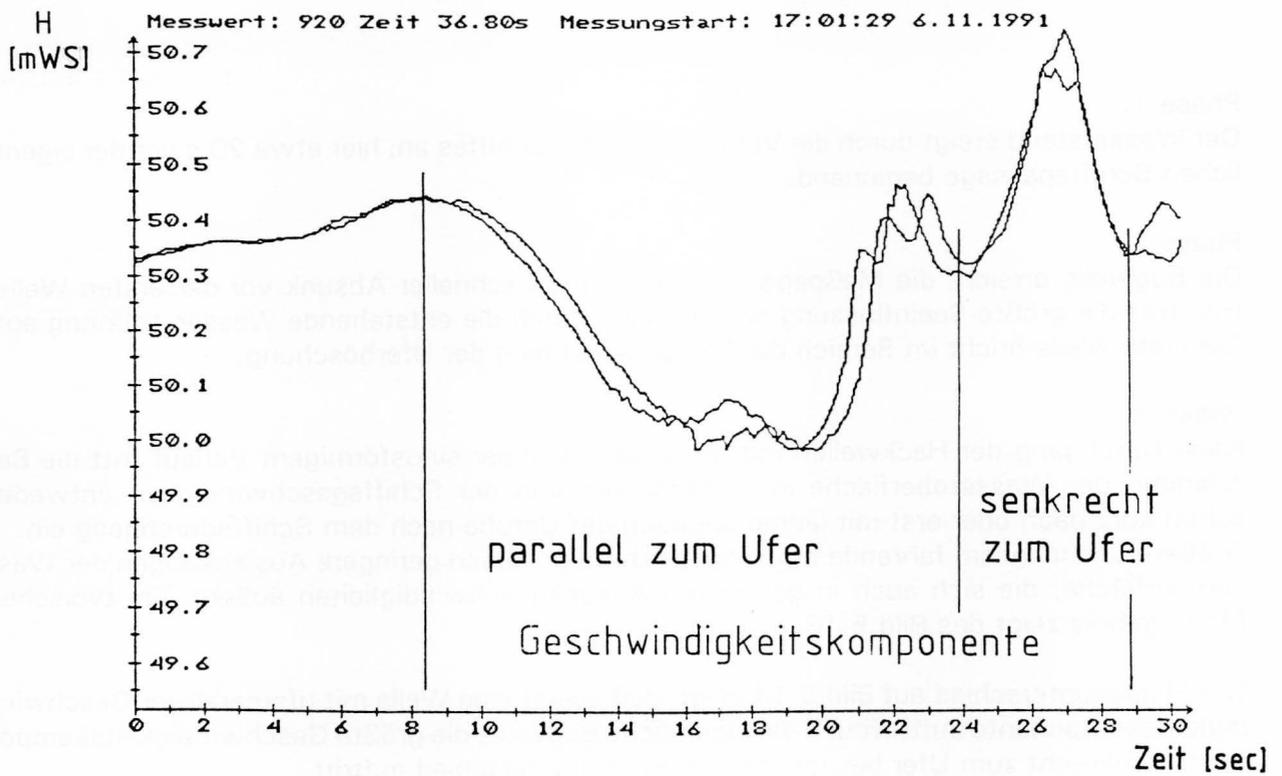


Bild 5.14 Absenk und anschließende Bugwelle an zwei, im Abstand von 50 cm senkrecht zum Ufer installierten Meßblättern

5.4 Messungen am Main-Donau-Kanal (MDK)

Im Rahmen der im Mai 1992 von der Bundesanstalt für Wasserbau durchgeführten Naturuntersuchungen am Rhein-Main-Donau-Kanal wurde das videometrische Meßsystem ebenfalls eingesetzt.

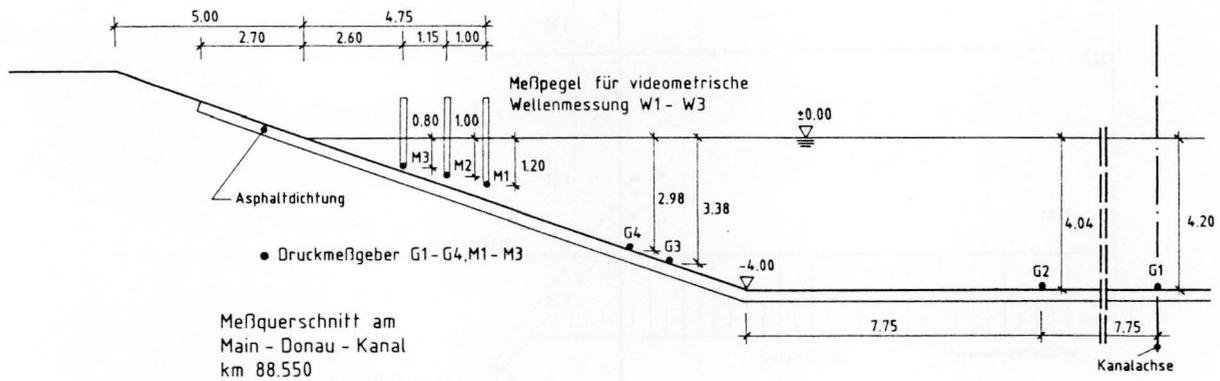


Bild 5.15 Wellenmessungen am Main-Donau-Kanal Mai, 1992, Meßquerschnitt mit Lage der Meßpunkte

Das Bild 5.15 zeigt den Meßquerschnitt bei km 88,550 mit Angabe der Meßpunkte, die für den Vergleich der Ergebnisse aus drucksensorischer (Meßgeber G1 - G4 und M1 - M3) und videometrischer Aufzeichnung (Meßpegel W1 - W3) eingesetzt wurden. Das Meßprogramm umfaßte Richtungs- und Begegnungsverkehr von Großmotorschiffen und Schubverbänden mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Abladetiefen. Über die Ergebnisse der Fahrversuche wird an anderer Stelle berichtet /20/. Die im Bild 5.15 beschriebenen Meßpunkte wurden speziell zum Vergleich der wellenoptischen und drucksensorischen Ergebnisse eingerichtet. Die hierbei aufgezeichneten Zeitreihen wurden völlig unabhängig von den übrigen im Rahmen der Fahrversuche eingesetzten Meßwerterfassungssystemen ermittelt. Ein typisches Ergebnis dieser zusätzlichen Vergleichsmessungen zeigen die nachfolgenden Bilder mit den aufgezeichneten Druckmeßdaten während einer Begegnung zweier Schubverbände am Meßquerschnitt km 88,550. Zur Erfassung der Meßdaten wurde eine Abtastrate von 20 ms über eine Gesamtmeßzeit von 600 sec verwendet. Bild 5.16 zeigt den Lageplan der Meßstelle mit dem Standort der videometrischen Meßvorrichtung und der im Vergleich dazu ausgewerteten Druckmeßgeber. Eine Gesamtübersicht zeigt Bild 5.17 mit den drucksensorischen Aufzeichnungen der Meßgeber G1 (Kanalachse), G2 (Mitte zwischen Böschungsfußpunkt und Kanalachse), G3 und G4 (unterer Böschungsbereich) sowie M1, M2, M3 (oberer Böschungsbereich) und S1 (oberer Böschungsbereich, jedoch 26,8 m von der Meßstelle entfernt). Die zeitliche Aufteilung der Gesamtmeßzeit von 600 sec erfolgt in eine dem Ereignis vorangehende Vorlaufzeit (0 bis 300 sec) und Nachlaufzeit von 0 bis 300 sec (vergleiche Bilder 5.17 und 5.18).

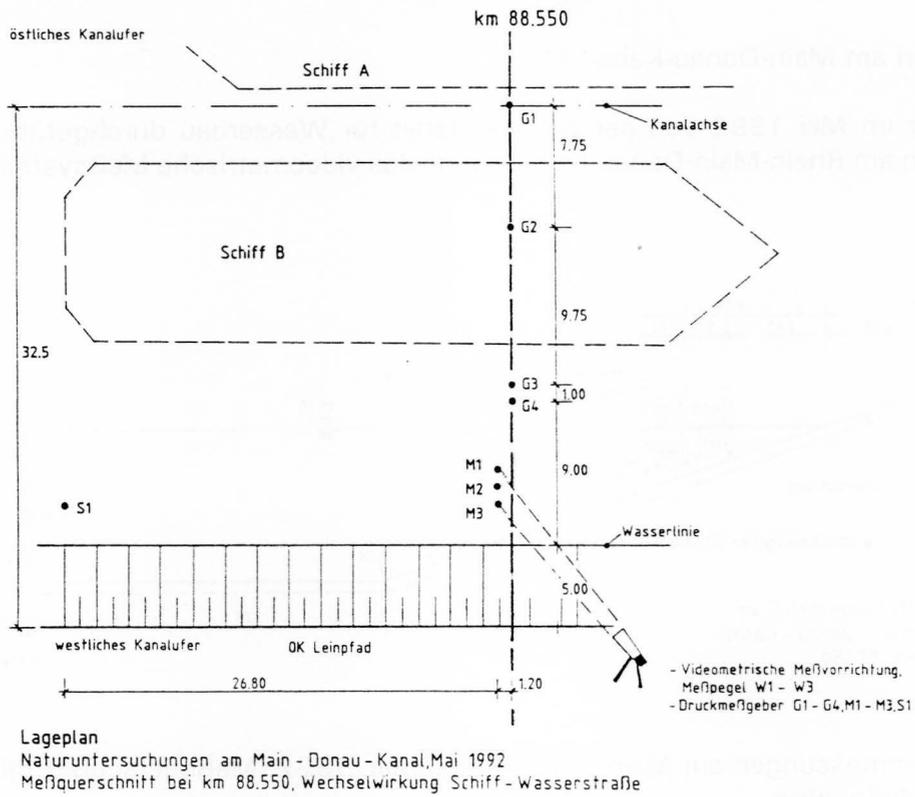


Bild 5.16 Meßquerschnitt km 88,550 - Lageplan

Daten: C: /MDK92/B071644

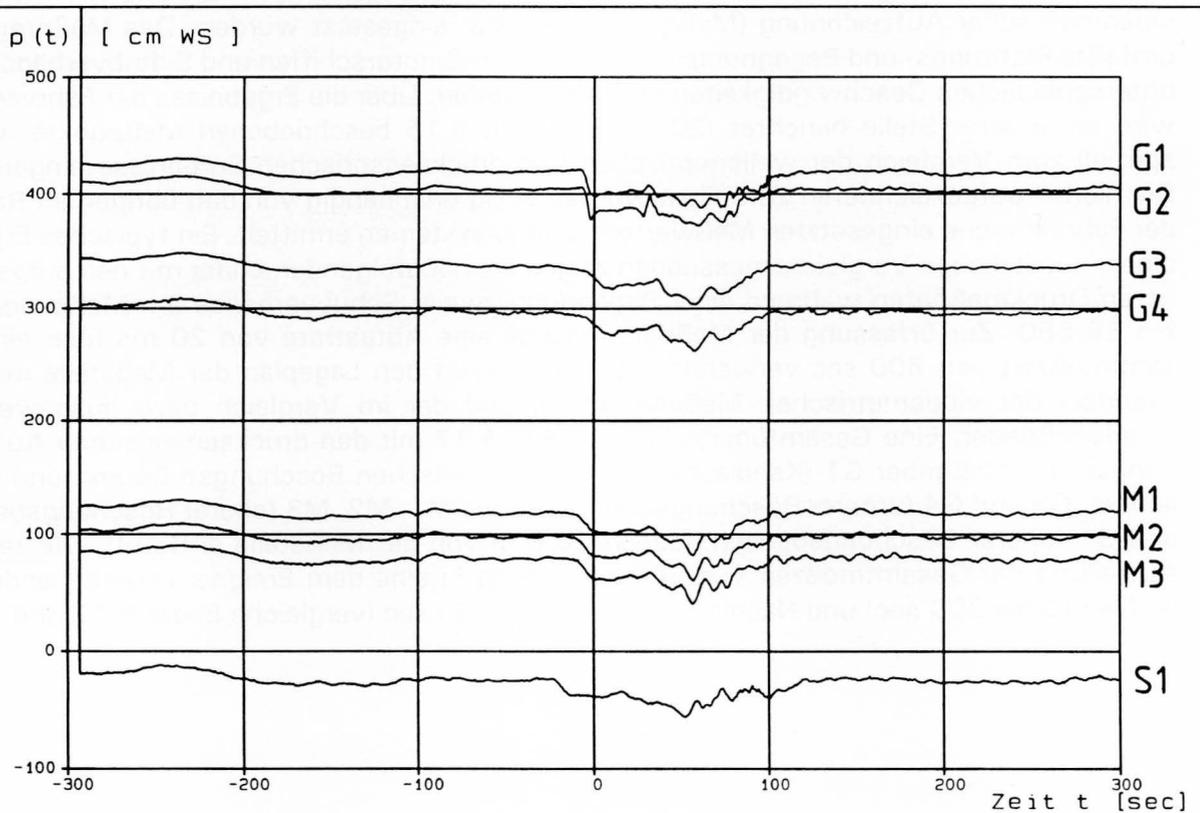


Bild 5.17 Meßergebnisse einer Schiffsbegegnung, Gesamtübersicht

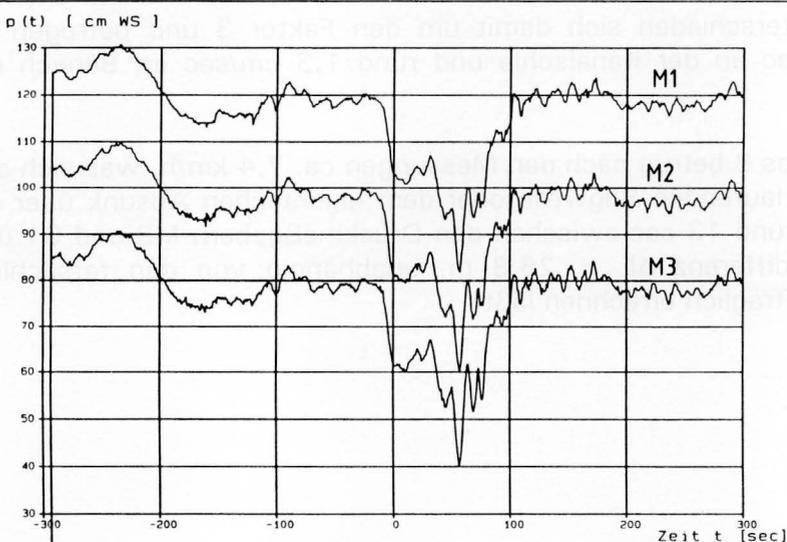
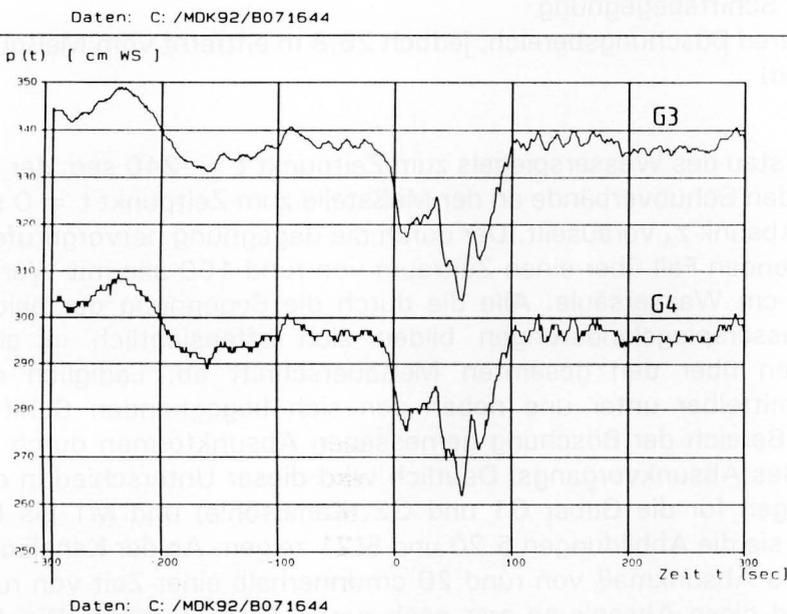
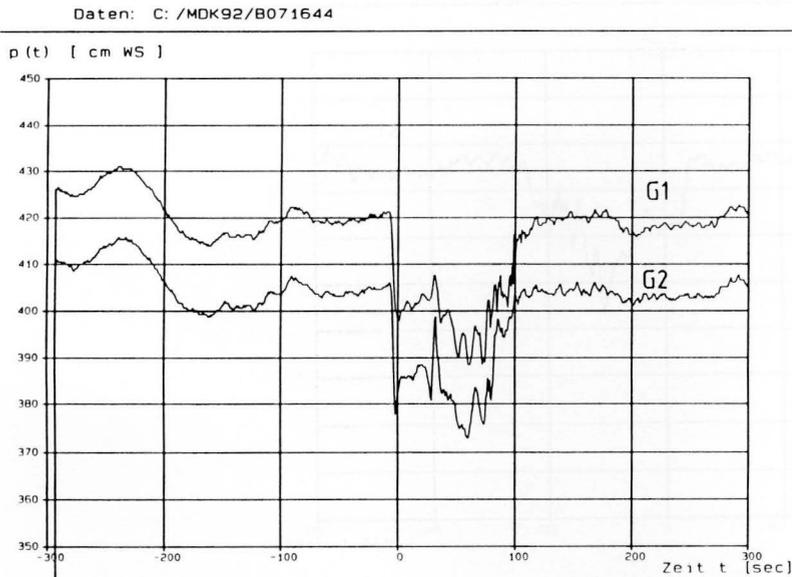


Bild 5.18 Meßergebnisse einer Schiffsbegegnung; Einzelergebnisse aufgedgliedert:
 a) an der Kanalsohle G1, G2
 b) im unteren Böschungsbereich G3, G4
 c) im oberen Böschungsbereich M1, M2, M3

Daten: C: /MDK92/B071644

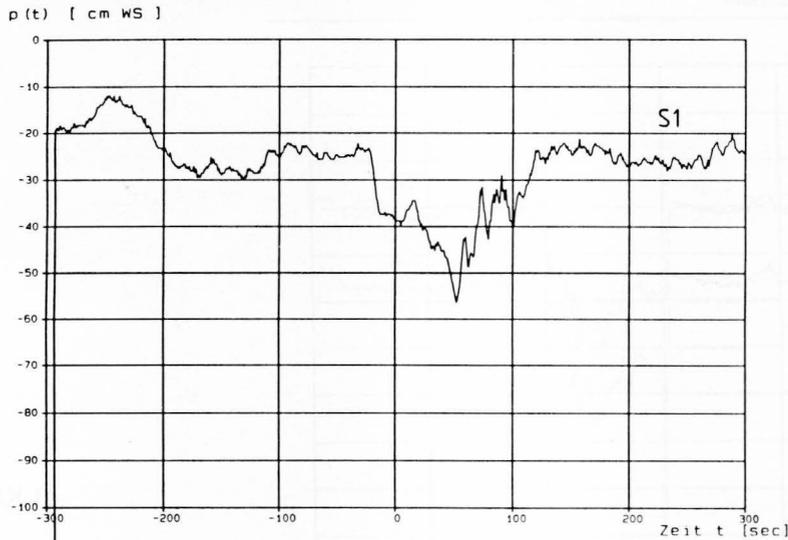


Bild 5.19 Meßergebnisse einer Schiffsbegegnung
 Einzelergebnis im oberen Böschungsbereich, jedoch 26,8 m entfernt vom Meßquerschnitt (vorausliegend)

Deutlich erkennbar wird der Aufstau des Wasserspiegels zum Zeitpunkt $t = -240$ sec, der der eigentlichen Begegnung der beiden Schubverbände an der Meßstelle zum Zeitpunkt $t = 0$ sec mit dem daraus resultierenden Absenk z_A vorausleilt. Der durch die Begegnung hervorgerufene Absenk z_A schwankt im vorliegenden Fall über einen Zeitraum von rund 100 sec mit Werten zwischen 20 und maximal 40 cm Wassersäule. Alle die durch die Begegnung der beiden Schubverbände erzeugten Wasserspiegeländerungen bilden sich offensichtlich in allen charakteristischen Eigenschaften über den gesamten Meßquerschnitt ab. Lediglich das eigentliche Absenkereignis unmittelbar unter und neben den sich begegnenden Schiffen unterscheidet sich von den im Bereich der Böschung gemessenen Absenkformen durch die Steilheit der Flanken während des Absenkvorgangs. Deutlich wird dieser Unterschied in den beiden Ausschnittsvergrößerungen für die Geber G1 und G2 (Kanalsohle) und M1 bis M3 (oberer Böschungsbereich), wie sie die Abbildungen 5.20 und 5.21 zeigen. An der Kanalsohle entsteht das anfängliche mittlere Absenkmaß von rund 20 cm innerhalb einer Zeit von rund 5 sec, an den Böschungen wird diese Absenkung erst nach rund 15 sec erreicht. Die Absenkgeschwindigkeiten V_{zA} unterschieden sich damit um den Faktor 3 und betragen im vorliegenden Fall rund 4 cm/sec an der Kanalsohle und rund 1,3 cm/sec im Bereich der Kanalböschung.

Die Geschwindigkeit des Schiffes B betrug nach den Messungen ca. 7,4 km/h, was sich aus dem Zeitversatz der mitschiffs laufenden Bugwelle oder dem eigentlichen Absenk über die ermittelte Zeitdifferenz Δt von rund 13 sec zwischen den Druckmeßgebern M3 und S1 und der dazwischenliegenden Wegdifferenz $\Delta L = 26,8$ m, unabhängig von den tatsächlich gemessenen Werten, auch nachträglich errechnen läßt.

Daten: C: /MDK92/B071644

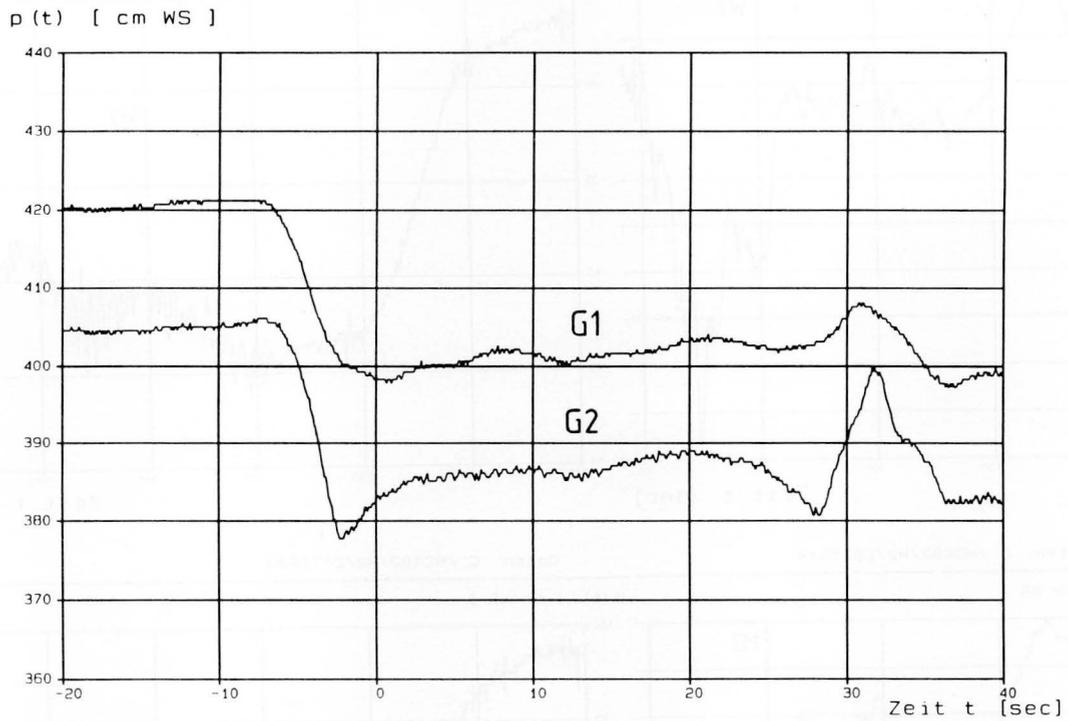


Bild 5.20 Absink z_A (Ausschnittsvergrößerung) an der Kanalsohle (G1, G2)

Daten: C: /MDK92/B071644

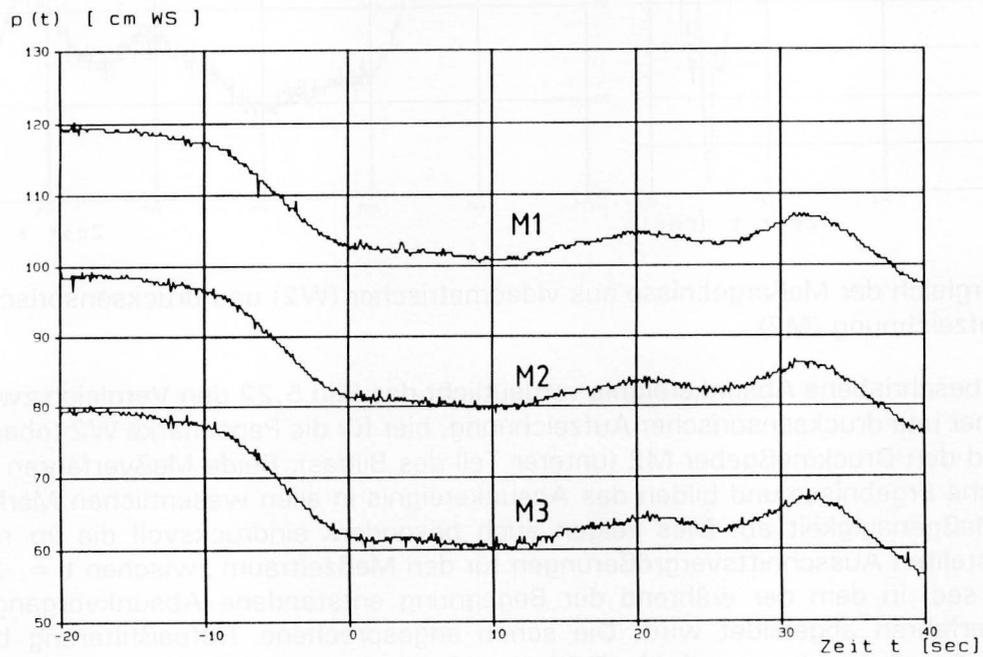


Bild 5.21 Absink z_A (Ausschnittsvergrößerung) im oberen Böschungsbereich (M1, M2, M3)

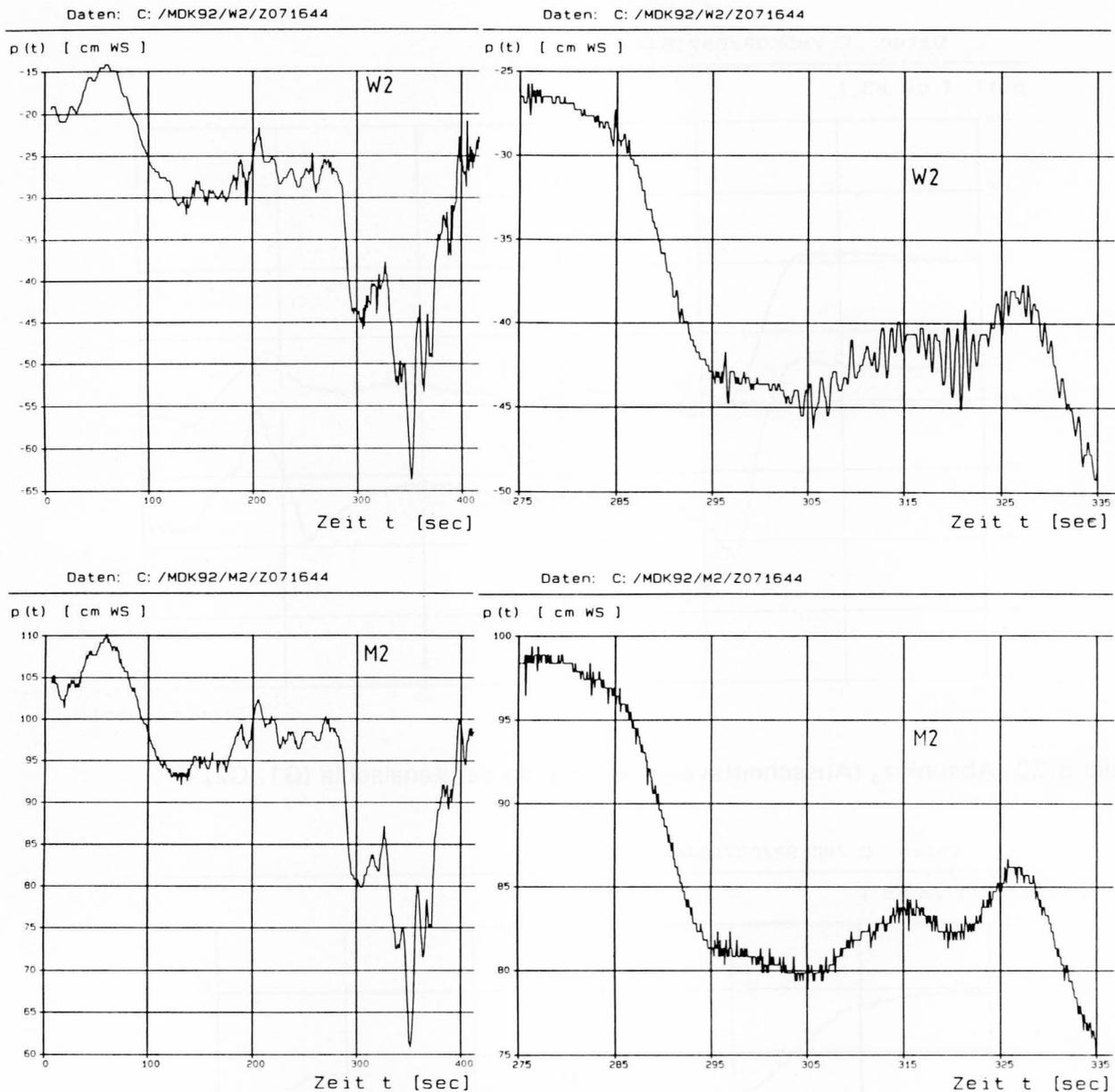


Bild 5.22 Vergleich der Meßergebnisse aus videometrischer (W2) und drucksensorischer Aufzeichnung (M2)

Für das oben beschriebene Absunkereignis verdeutlicht das Bild 5.22 den Vergleich zwischen videometrischer und drucksensorischer Aufzeichnung, hier für die Pegelmarke W2 (oberer Teil des Bildes und den Druckmeßgeber M2 (unterer Teil des Bildes). Beide Meßverfahren zeigen quasi identische Ergebnisse und bilden das Absunkereignis in allen wesentlichen Merkmalen mit großer Meßgenauigkeit ab. Dies zeigen auch besonders eindrucksvoll die im rechten Bildteil dargestellten Ausschnittsvergrößerungen für den Meßzeitraum zwischen $t = -25$ sec und $t = 35$ sec, in dem der während der Begegnung entstandene Absunkvorgang nach beiden Meßverfahren abgebildet wird. Die schon angesprochene Tiefpaßfilterung bei der drucksensorischen Aufzeichnung wird im Zeitintervall zwischen $t = 305$ sec und $t = 325$ sec deutlich erkennbar. Die vom videometrischen Meßpegel (W2) erfaßten höherfrequenten Oberflächenwellen von rund 5 cm Amplitudendifferenz bilden sich in der Aufzeichnung durch den Druckmeßgeber (M2) in rund 1 m Wassertiefe nicht mehr ab. Das Absunk- und Wellenereignis wird vom Druckmeßgeber bei gleicher Abtastfrequenz von 20 ms, wie sie auch für die videometrische Taktrate eingesetzt wurde, quasi als mittlere Ausgleichslinie erfaßt, um die die höherfrequenten Oberflächenwellen oszillieren.

6 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Auf der Basis einer PC-gestützten Auswertung wurde ein mobiles, bedienerfreundliches Meßverfahren entwickelt, das mit Hilfe der videometrischen Technik Wasseroberflächenwellen auf Millimetergenauigkeit erfassen kann. Mit Hilfe von bildanalytischen Auswerteverfahren wird die Höhe des Wasserspiegelverlaufs im doppelten Videotakt mit Frequenzen von 50 Hz aufgezeichnet. Das Verfahren ist sowohl für Feld- als auch Labormessungen einsetzbar. Das menügeführte Erfassungsprogramm verarbeitet mit Hilfe einer speziellen Bildverarbeitungs-karte über einen PC-AT ankommende Bildsignale von bis zu 3 gleichzeitig angeschlossenen CCD-Kameras. Digitale Bildverarbeitungsalgorithmen detektieren den Grauwertsprung der Wasseroberflächenkante aus der Bildschirmmatrix. Sowohl Echtzeitverarbeitung als auch nachträgliche Auswertungen der aufgezeichneten Videosequenzen sind möglich. In Kombination mit der Lasertechnik bietet dieses Verfahren darüberhinaus den Vorteil einer wechselwirkungsfreien Wellenamplitudenmessung, die durch die berührungsfreie Abtastung der Wasseroberfläche ermöglicht wird.

Nach zahlreichen Vergleichsmessungen in unterschiedlichen Einsatzbereichen (Windwellen und schiffahrtserzeugte Wellen) konnte das Forschungsprojekt erfolgreich abgeschlossen werden. Auch bei der Erfassung von brechenden Wellen hat sich das System bewährt.

Anhand der aus diesen Vergleichsmessungen gewonnenen Ergebnisse konnte darüberhinaus eindrucksvoll bestätigt werden, daß die von der Bundesanstalt für Wasserbau speziell für Porenwasserdruckmessungen eingesetzten Druckmeßgeber exakte Ergebnisse liefern, die für geotechnische und wasserbauliche Dimensionierungsverfahren eine solide Grundlage bilden.

Das im Rahmen dieses Projekts entwickelte Meßverfahren zur Erfassung von Oberflächenwellen mittels digitaler Bildverarbeitung konnte die von der Praxis gestellten Anforderungen voll erfüllen. In vielen Bereichen übertrifft es sogar die bisher eingesetzten Standardverfahren und ist in seiner Verfahrenstechnik zukunftsorientiert.

7 Literatur

- /1/ WIERZIMOK, D.; WAAS, S.; JÄHNE, B.: Ergebnisse der Testmessungen an Weser und Saar zur Bestimmung von Wellenamplituden und Bojengeschwindigkeiten mit Bildverarbeitung, Forschungsbericht, Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg, 1989
- /2/ RATH, R.; WIERZIMOK, D.; JÄHNE, B.; KÖHLER, H.-J.: Wave Manual (Programmbeschreibung), Wellenamplitudenmessung mittels videometrischer Echtzeitverarbeitung, Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg und Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 1991
- /3/ RATH, R.: Amplitudenmessung von Wasseroberflächenwellen mittels digitaler Bildanalyse, Diplomarbeit, Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg, 1992
- /4/ KÖHLER, H.-J.: Messung von Porenwasserdrücken im Untergrund. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (1989), Nr. 66, Karlsruhe, S. 155 - 174
- /5/ KÖHLER, H.-J.; HEIBAUM, M.: Measuring pore water pressures in the subsoil. In: Proc. 6th Intern. Congress Intern. Association of Engineering Geology, Amsterdam, 6. - 10. August 1990

- /6/ KÖHLER, H.-J.; FEDDERSEN, I.: Porenwasserdruckmessungen in Böden, Mauerwerk und Beton. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (1991), Nr. 68, Karlsruhe
- /7/ KINSMAN, B.: Wind Waves - Their Generation and Propagation on the Ocean Surface, Dover, Publications, New York, 1965
- /8/ GROSSER, K.-H.: Entwicklung eines Verfahrens zur optischen Messung der Wellenhöhe von Wasseroberflächenwellen, Diplomarbeit, Institut für Umweltphysik Heidelberg, 1989
- /9/ TAGARE, H.; de FIGUEIREDO, R.: On the Localisation Performance Measure and Optimal Edge Detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 12, No. 12, December 1990
- /10/ TRAHANIAS, P.; SKORDALAKIS, E.: Syntactic Pattern Recognition of the ECG, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 12, No. 7, July 1990
- /11/ BERGHOLM, F.: Edge Focusing, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-9, No. 6, November 1987
- /12/ ZHOU, Y; VENKATEWSWAR, V.; CHELLAPPA, R.: Edge Detection and Linear Feature Extraction Using a 2-D Random Field Model, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 11, No. 1, January 1989
- /13/ CANNY, J.: A Computational Approach to Edge Detection, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-8, No. 6, November 1986
- /14/ DERICHE, R.: Fast Algorithms for Low-Level Vision. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 12, No. 1, January 1990
- /15/ LANSER, S.; ECKSTEIN, W.: Eine Modifikation des Deriche-Verfahrens zur Kantendetektion, 13. DAGM Symposium München, Heidelberg: Springer, 1991
- /16/ WIERZIMOK, D.: Messung turbulenter Strömungen unterhalb der wind-wellenbewegten Wasseroberfläche mittels Bildanalyse, Dissertation, Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg, 1990
- /17/ JÄHNE, B.: Digitale Bildverarbeitung, 2. Auflage, Heidelberg: Springer, 1991
- /18/ KÖHLER, H.-J.: Stabilität loser Steinschüttungen. In: Tätigkeitsbericht der Bundesanstalt für Wasserbau, 1989, Seite 91 - 93, Karlsruhe
- /19/ KÖHLER, H.-J.: Digitale Bildverarbeitung. In: Tätigkeitsbericht der Bundesanstalt für Wasserbau, 1990, Seite 100 - 101, Karlsruhe
- /20/ SÖHNGEN, B.; JURISCH, R.; ZÖLLNER, J.; BROß, H.: Gemeinsame Stellungnahme zu den Ergebnissen der Fahrversuche auf dem Main-Donau-Kanal bezüglich der Gleichwertigkeit von R- und T-Profil, Gutachten der Bundesanstalt für Wasserbau und der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau, Dezember 1992 (unveröffentlicht)