

**Fachhochschule
Münster University of
Applied Sciences**



Abschlussbericht AZ 19180

**„Bau und Erprobung eines verkleinerten Prototypen eines
laserunterstützten optischen Abwassermengenmessgerätes
auf Basis der Ergebnisse des Projektes AZ 05807/01-/03“**



Autor: R. Diehl FH Münster FB Elektrotechnik und Informatik

Steinfurt, März 2003



Abschlussbericht AZ 19180

„Bau und Erprobung eines verkleinerten Prototypen eines laserunterstützten optischen Abwassermengenmessgerätes auf Basis der Ergebnisse des Projektes AZ 05807/01-/03“

Autor: R. Diehl FH Münster FB Elektrotechnik und Informatik



Inhalt:

1.	Veranlassung zu dem Projekt / Stand der Technik	2
1.1.	Förderung	2
1.2.	Veranlassung	2
1.3.	Stand der Technik	2
2.	Ziel des Vorhabens	3
3.	Grundlagen des Laufzeitkorrelations-Verfahrens	4
3.1.	Wirkungsweise des Laufzeitkorrelationsverfahrens	4
3.2.	Varianten des Laufzeit-Korrelationsverfahrens	5
3.2.1	Optische Absorption	5
3.2.2	Optische Rückstreuung	6
3.2.3	Messparameter	7
4.	Aufbau der verwendeten Messapparatur	9
4.1.	Mechanischer / optischer Aufbau	9
4.2.	Elektronik	11
5.	Software	13
5.1.	Entwicklungsumgebung	13
5.2.	Aufbau der Software	13
5.2.1	Steuerung der Messdatenerfassung	13
5.2.2	Digitale Filterung der Messsignale	13
5.2.3	Berechnung der Kreuzkorrelationsfunktion und Bestimmung der Korrelationsverschiebung	13
5.2.4	Dynamisches Histogramm	13
5.2.5	Parametereinstellungen	14
5.2.6	Simulations- und Hilfe-Funktion	15
5.2.7	Ausgabe des Ergebnisses	15
6.	Ergebnisse	17
6.1.	Justierung	17
6.2.	Laborgerinne	18
6.3.	Messungen im Zulauf der Kläranlage Loddenbach	21
6.4.	Messungen im Auslauf der Kläranlage Warendorf	28
7.	Fazit und Ausblick	31
7.1.	Zusammenfassung des Ergebnisses und mögliche Verbesserungen	31
7.2.	Ökologische und ökonomische Bilanzierung	32
7.3.	Maßnahmen zur Verbreitung des Vorhabensergebnisses	33
8.	Literaturhinweise	34



Veranlassung zu dem Projekt / Stand der Technik

1.1. Förderung

Dieses Projekt wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Titel *Entwicklung eines Verfahrens zur Messung der Abwassermenge in teilgefüllten Gerinnen und Freispiegelleitungen* in mehreren Phasen gefördert (AZ 05807/01-/03). Das aktuelle Projekt läuft unter AZ 19180.

1.2. Veranlassung

Die wachsenden Anforderungen an die Abwasserbehandlung im Zuge eines wirksamen Umweltschutzes erfordern für Dimensionierung, Betrieb und Überwachung von Abwasseranlagen entsprechende Durchfluss- und Mengemessverfahren. An den Einleitungsstellen und im Kanalnetz werden über die Durchflussmessungen hauptsächlich die Abwassergebühren bzw. die Kostenumlagen ermittelt. In Kanalnetzen mit Regenabflüssen können über die Durchflussmessungen an kritischen Stellen die Leistungsfähigkeit des Kanalnetzes ermittelt werden sowie Daten für die Steuerung von Rückhaltebecken gewonnen werden. In Kläranlagen dienen Durchflussmessungen zur Eigenkontrolle der Belastung, zur Steuerung von Anlagenteilen und zur Ermittlung statistischer Durchflusswerte.

1.3. Stand der Technik

Die zugelassenen Verfahren zur Durchflussmessung von Abwässern in offenen Gerinnen und Freispiegelleitungen mit ihren Vor- und Nachteilen sind in der DIN 19559, Teil 1 ausführlich dargestellt. Die dort beschriebenen Verfahren sind prinzipiell für die Messungen geeignet, nachteilig sind jedoch die häufige Notwendigkeit von baulichen Maßnahmen, Anfälligkeit gegenüber Ablagerungen sowie Abhängigkeit von Umgebungsparametern wie Druck, Temperatur und Konsistenz des Abwassers, geringe Messdynamik. Größere Messgenauigkeiten sind keine Seltenheit. Das im Rahmen dieses Projektes untersuchte Korrelationsverfahren zur Messung des Durchflusses in offenen Gerinnen steht natürlich in Konkurrenz zu anderen, teilweise eingeführten Verfahren, wie Ultraschall-Doppler-Verfahren und magnetisch-induktive Durchflussmessung. Diese Verfahren besitzen, wie bereits erwähnt, Stärken und Schwächen. Ein wesentlicher Nachteil der genannten Verfahren besteht darin, dass sie nicht völlig berührungslos arbeiten. Der eigentliche Sensor (Ultraschallwandler oder Elektrode) muss im Kontakt zum Abwasser stehen. Ein weiterer Schwachpunkt ist die nicht sehr hohe Messdynamik, die insbesondere bei stark schwankendem Abwasseraufkommen gefordert ist.



2. Ziel des Vorhabens

Bei dem geschilderten Projekt wird ein **optisches, berührungsloses** Verfahren untersucht, mit dem es möglich ist, ohne größere bauliche Eingriffe in das Rohrleitungsnetz bei unterschiedlichsten Füllhöhen und Strömungsgeschwindigkeiten und unabhängig von Druck, Temperatur und sonstiger Beschaffenheit des Abwassers den Durchfluss mit hoher Genauigkeit zu bestimmen.

Die Messung der Abwassermenge besteht dabei aus

- der Ermittlung des Gerinnequerschnittsprofils
- der Messung der Fließgeschwindigkeit
- der Bestimmung der Füllhöhe

Die Ermittlung des Querschnittsprofils ist für jeden Messort einmal oder in größeren Zeitabständen erforderlich. Nach Unterbrechung des Durchflusses – z. B. durch Verwendung eines Kanaldichtungskissens – wird das Profil des trockenen Gerinnes abgetastet und digital gespeichert. Sie ist nicht Gegenstand des laufenden Projektes. Der vorliegende Bericht bezieht sich teilweise auf Ergebnisse früherer Phasen dieses Projektes (Lit 1). Um dem Leser die Beschaffung dieser Berichte zu ersparen, werden im folgenden die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeiten, soweit für diesen Bericht relevant, noch einmal erläutert.



3. Grundlagen des Laufzeitkorrelations-Verfahrens

3.1. Wirkungsweise des Laufzeitkorrelationsverfahrens

Zur Messung der Fließgeschwindigkeit wird eine Messmethode angewandt, bei der die Strömungsgeschwindigkeit laufend mit Hilfe eines Korrelationsverfahrens gemessen wird (Lit 2, Lit 3).

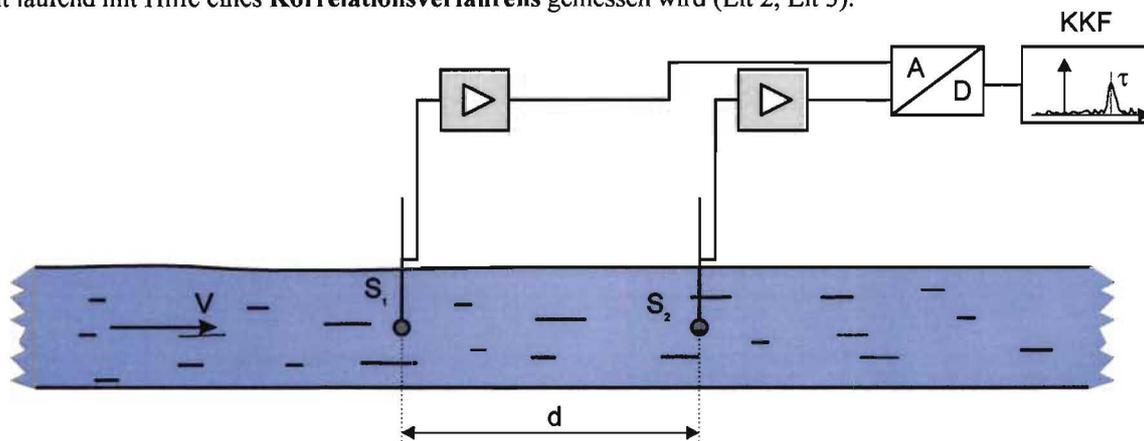


Abb. 1: Prinzip des Laufzeit-Korrelations-Verfahrens

Bei solchen Verfahren werden üblicherweise geringfügige, vorzugsweise zufällige Schwankungen eines Parameters in Längsrichtung der Strömung zur Laufzeitbestimmung über eine bekannte Entfernung herangezogen (Abb. 1) (Lit 4). Man erkennt zwei, in Strömungsrichtung räumlich versetzte Sensoren S_1 und S_2 , die einen Parameter wie z. B. Temperatur, Leitfähigkeit, Extinktion etc. als Funktion der Zeit messen. Es gibt auch Systeme, bei denen durch eine gezielte Zugabe eines sog. Tracers oberhalb der Sensoren ein veränderlicher Parameter künstlich erzeugt wird, was jedoch nur bei sehr homogenen Strömungsmedien erforderlich ist. Die Bandbreite der so erhaltenen Messsignale hängt von der räumlichen Auflösung der Sensoren und der Ausdehnung der Inhomogenitäten sowie der Strömungsgeschwindigkeit ab. Die Signale werden digitalisiert und in einem Prozessor verarbeitet. Der wesentliche Teil der Signalverarbeitung besteht in der Berechnung der Kreuzkorrelationsfunktion der beiden Eingangssignale. Die Korrelation ist ein stochastisches Verfahren, das sehr robust gegenüber Störungen und sogar Abweichungen von den Modell-Annahmen ist. Die Modell-Annahme lautet hier:

$$s_1(t) = a \cdot x(t) + n_1(t) \quad \text{und} \quad s_2(t) = b \cdot x(t - t_L) + n_2(t)$$

Hierbei sind $x(t)$ die zeitliche Schwankung des Mess-Parameters, $s_1(t)$ und $s_2(t)$ die an Sensoren 1 und 2 gemessenen Signale und $n_1(t)$ und $n_2(t)$ beliebige Störsignale. Die Größen a und b sind beliebige Skalierungskonstanten. Die Zeit t_L ist die Zeit, die die Inhomogenitäten benötigen, um vom Ort des ersten zum Ort des zweiten Sensors zu gelangen. Ist die oben angeführte Modell-Annahme erfüllt, weist die Kreuzkorrelationsfunktion einen „Peak“ an der Stelle t_L auf. Die Kreuzkorrelationsfunktion ist als der zeitlicher Mittelwert des Produktes von s_1 und s_2 für einen Verschiebungsparameter τ definiert: $KKF(\tau) = \overline{s_1(t) \cdot s_2(t - \tau)}$.

Die Strömungsgeschwindigkeit v berechnet sich in einfacher Weise aus

$$v = \frac{d}{t_L}$$

Die Größe d ist dabei durch den Abstand der beiden Messvolumen der beiden Sensoren gegeben und lässt sich in der Regel sehr genau bestimmen. Die Korrelationsverschiebung t_L ist im Prinzip ebenfalls sehr genau messbar, da es sich um eine Zeitmessung handelt, die bei den verwendeten quarzstabilen Taktgebern nahezu fehlerfrei erfolgen kann. Voraussetzung für diese Aussage sind allerdings eine unendliche Integrationszeit und ebenfalls unendliche Abtastfrequenz. In der Realität kann jedoch nur mit einer endlichen Zahl von Abtastwerten gearbeitet werden, was erfordert, dass sowohl Abtastfrequenz als auch Integrationszeit endlich sind. Das Arbeiten mit zeitbegrenzten Signalen ist auch erforderlich, wenn die Strömungsgeschwindigkeit zeitlichen Änderungen unterworfen ist, was bei den meisten praktischen Anwendungen der Fall ist. Der ideale Mittelungseffekt der Korrelation wird daher in der Praxis nur näherungsweise erreicht. Um bei vertretbarem Aufwand zu möglichst genauen Ergebnissen zu kommen, sind folgende Maßnahmen zu ergreifen:

- Arbeiten mit begrenzter Blocklänge
- Interpolation der Lage des Korrelationsmaximums

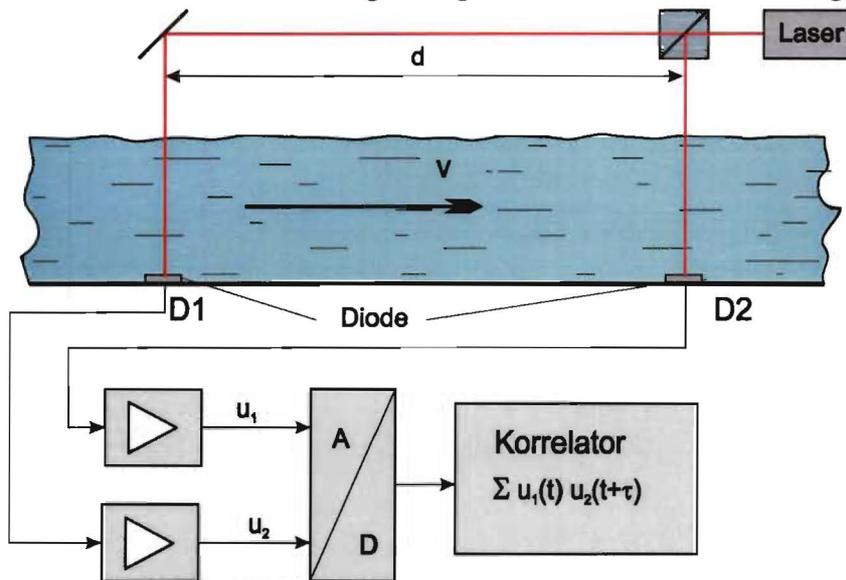


- Nachträgliche Tiefpass-Filterung der errechneten Geschwindigkeit

3.2. Varianten des Laufzeit-Korrelationsverfahrens

3.2.1 Optische Absorption

Ein Nachteil der Anordnung von Abb. 1 besteht darin, dass die Sensoren bei stark schwankendem Füllstand des Gerinnes nahe am Gerinneboden angebracht sein müssten. Dieser Ort ist jedoch strömungstechnisch ungünstig. Außerdem ist bei dieser Anordnung eine eigentlich wünschenswerte berührungslose Messung nicht möglich.



In Abb. 2 ist eine Variante des Messverfahrens gezeigt, die schon eher mit der Problematik schwankender Füllhöhen zurechtkommt. Dabei wird an zwei Orten von oben mit einer starken Lichtquelle (meist Laser) in das fließende Medium eingestrahlt und die Absorption des Lichts in einem schmalen, vertikalen Zylinder durch jeweils eine, am Gerinneboden angebrachte Fotodiode gemessen. Unter der Voraussetzung, dass im wesentlichen die gleichen Inhomogenitäten die Mess-

Abb. 2: Korrelationsverfahren / Transmissionsmethode

volumina in jeweils gleichem, zeitlichen Abstand passieren, sind die Ausgangssignale

der beiden Dioden bis auf eine, durch die Strömungsgeschwindigkeit verursachte Zeitverschiebung sehr ähnlich. Liegt die Verbindungslinie der beiden Messkanäle genau in Strömungsrichtung, sollte die Korrelationsfunktion daher ein um die Laufzeit verschobenes Maximum aufweisen. Voraussetzung ist dabei, dass die Transmissionsverluste durch das Medium auch bei maximaler Füllhöhe das eingestrahlte Licht nicht unter die Empfindlichkeitsschwelle der Fotodioden abschwächen. Dies kann bei Abwässern mit hohem Feststoffanteil problematisch sein. Eine zu große Streuung an den Inhomogenitäten weitet außerdem das Messvolumen in unzulässiger Weise auf. Hinzu kommt, dass die Absorption über die gesamte Höhe der Wassersäule gemessen wird. Um zu einem ausgeprägten Korrelationsmaximum zu kommen, dürfen sich aber die Strömungsgeschwindigkeiten in unterschiedlichen Höhen nur wenig unterscheiden. Da jedoch die Strömungsgeschwindigkeit zum Boden hin abnimmt und dort sogar den Wert null erreicht, ist diese Bedingung kaum erfüllbar. Ein weiterer Nachteil dieser Methode ist die große Empfindlichkeit gegen Oberflächenwellen des strömenden Mediums. Da der einfallende Lichtstrahl dann abgelenkt wird, entsteht eine Modulation des Empfangssignals, was insbesondere bei periodischen Vorgängen ebenfalls zu einem korrelierten Anteil der beiden Empfangssignale, aber mit einer falschen Korrelationsverschiebung, führt.



3.2.2 Optische Rückstreuung

Eine tatsächlich berührungslose Methode, die die Nachteile der Absorptionsmessung vermeidet ist in Abb. 3 skizziert. Das Verfahren wurde im Rahmen der Projektphase 3 als Patent angemeldet (Lit 5).

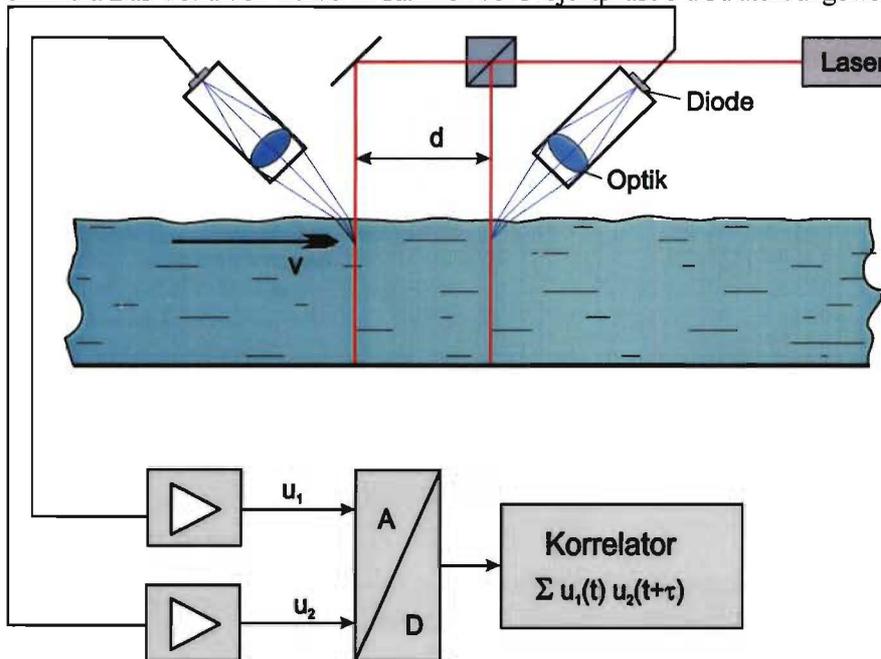


Abb. 3: Korrelationsverfahren / Rückstremethode

Auch hier dringen zwei parallele, um den Abstand d versetzte Laserstrahlen senkrecht in das strömende Medium ein. Statt der Transmission bzw. Absorption wird jetzt jedoch das an Inhomogenitäten des Mediums rückgestreute Licht als Messsignal verwendet. Dabei wird die Strömungsgeschwindigkeit in einer durch den Strahlengang der abbildenden Optik bestimmten Schicht bestimmt. Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass die Geschwindigkeit einzelner Partikel oder Inhomogenitäten in dieser Schicht wesentlich weniger streut als bei dem Transmissionsverfahren, das zwangsläufig alle Schichten erfasst. Der

Einfluss von Oberflächenwellen des Mediums ist wesentlich geringer als beim Transmissionsverfahren und kann, wie später genauer beschrieben, durch eine Hochpassfilterung der Empfangssignale eliminiert werden. Darüber hinaus lassen sich durch Höhenverstellung des Empfangsteils oder durch die Verwendung von Mehrfachdioden (Abb. 4) einzelne Punkte des Profils der Strömungsgeschwindigkeit in einer vertikalen Ebene bestimmen.

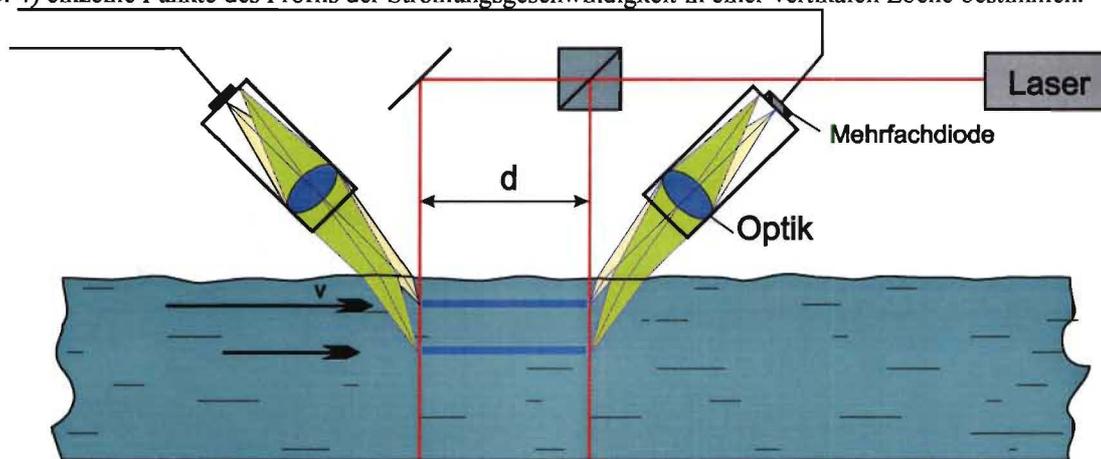


Abb. 4: Messung nach der Rückstremethode in zwei verschiedenen Tiefen

Eine Ermittlung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit kann dann durch Extrapolation auf ein Gesamtprofil und Mittelung geschehen. Im Gegensatz zu Ultraschall-dopplerverfahren, die ebenfalls eine Mittelung durchführen, ist nach dem hier vorgeschlagenen Verfahren die Mittelwertbildung unabhängig von den Rückstreuereigenschaften des Abwassers. Eine falsche Gewichtung der einzelnen Anteile wird grundsätzlich vermieden. Die Reichweite bei stark getrübbtem Medium ist zwar geringer als bei dem Transmissionsprinzip, es werden aber immer Messwerte zumindest der oberen Schichten zugänglich sein. Die Geschwindigkeit im oberen Teil des Profils ist immer am größten und geht daher auch am stärksten in die Berechnung des Durchflusses ein. Um die Baugröße der Messapparatur zu verringern wurde in der aktuellen Projektphase eine Variante entwickelt, bei der die Empfangsoptik seitlich angebracht ist. In diesem Fall ist es möglich, die beiden Empfangssignale über eine einzige Empfangsoptik zu gewinnen. Abb. 5 zeigt eine solche Lösungsmöglichkeit.

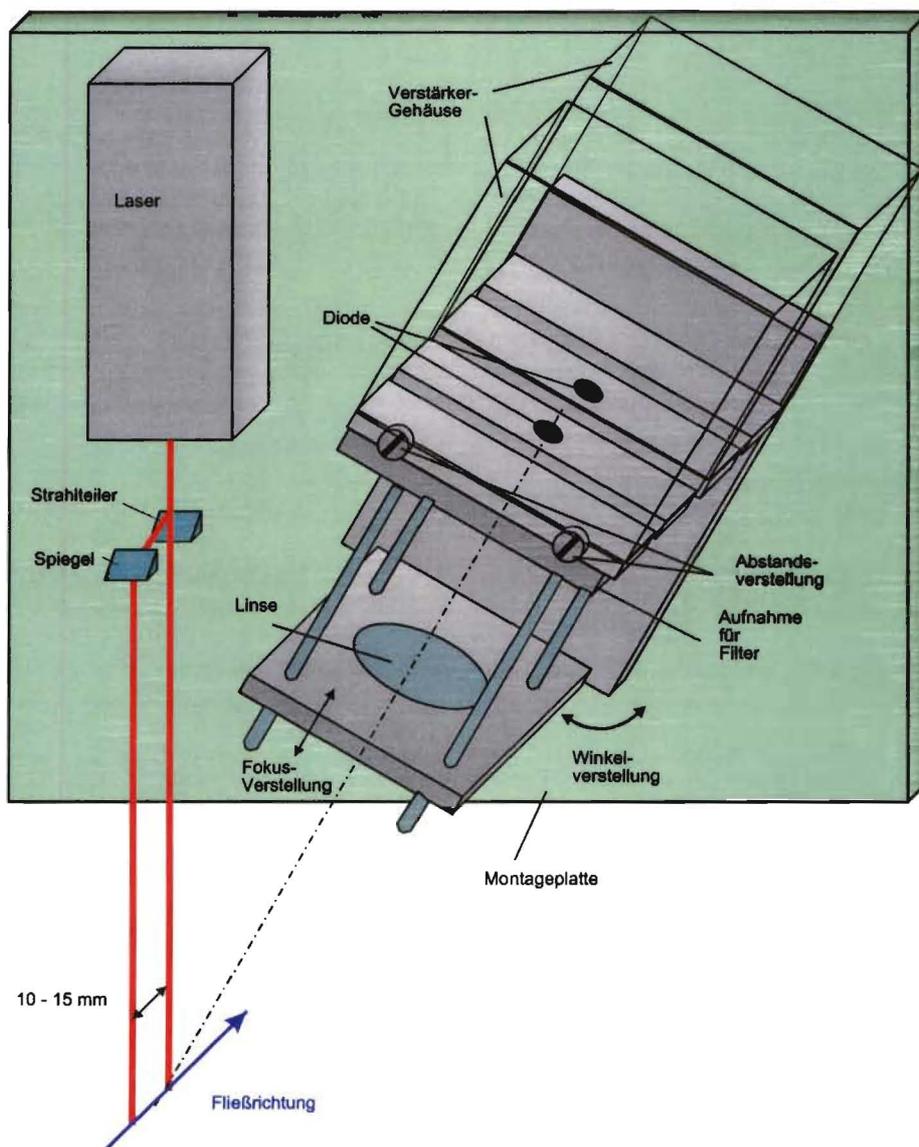


Abb. 5: Seitliche Anordnung der Empfangsoptik

Man erkennt die sehr kompakte Anordnung der einzelnen Komponenten der Messanordnung. Die Einstellung der Messtiefe geschieht hier durch Schwenken des Empfangsmoduls kombiniert mit einer Fokussierung durch Änderung des Linsenabstandes. Im einfachsten Fall arbeitet man bei einer konstanten Eindringtiefe. Das Gerät muss dann einmal für diese Tiefe justiert werden. Außerdem muss der Abstand der Messapparatur zur Oberfläche des Mediums konstant bleiben. Dies kann über eine geregelte Nachführung geschehen. Der dazu benötigte Füllstandssensor ist ohnehin für die Bestimmung der jeweiligen Querschnittsfläche erforderlich. Eine ganz simple Lösung ist die Verwendung eines Schwimmers. Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde aus Aufwandsgründen dieses Verfahren bei Messungen im Klärwerk verwendet.

Aus dem bisher Gesagten geht eindeutig hervor, dass die Rückstrommethode von den hier beschriebenen Varianten der Korrelationsmessung am ehesten geeignet ist, die Anforderungen an eine Durchflussmessung im offenen Gerinne zu erfüllen. Wegen der dadurch erzielbaren kompakten Bauweise ist eine seitliche Anbringung der Empfangsoptik die beste Lösung.

3.2.3 Messparameter

Im folgenden wird der Einfluss und Auslegung der wichtigsten Messparameter diskutiert.

Abstand d der Laserstrahlen

Der Abstand der Laserstrahlen, die vorzugsweise parallel geführt werden, ist nach den Kriterien

- Richtungsselektivität



- Turbulenzgrad der Strömung
- Maximal messbare Strömungsgeschwindigkeit
- mittlere Partikelgröße
- Oberflächenwellen
- Messgenauigkeit

auszuwählen. Bis auf den letzten Punkt sprechen alle Gesichtspunkte für einen möglichst kleinen Abstand. Da die Messgenauigkeit von grundlegender Bedeutung ist, ist hier ein sinnvoller Kompromiss anzustreben. Verwendet man eine Kombination aus einem Strahlteiler und einem Spiegel, die bei kleinen Stückzahlen preiswerter als ein Spezial-Prisma ist, ist der Abstand aus strahlgeometrischen Gründen ohnehin nach unten auf ca. 10 mm begrenzt.

Leistung des Lasers

Bei den bisherigen Projektphasen hat sich gezeigt, dass bei nur geringfügig verschmutztem Wasser, wie es zum Beispiel am Auslauf einer Kläranlage zur Verfügung steht, der Streukoeffizient relativ klein ist. Um ggfs. auch im Auslauf messen zu können, sollte daher mit einer höheren Sendeleistung des Lasers gearbeitet werden. Bei den Messungen, deren Ergebnisse im Kapitel 6 dargestellt sind, wurde ein Laser mit einer Leistung von ca. 20 mW der Sicherheitsklasse 3B verwendet.

Strahlquerschnitt beim Messvolumen

Der Strahlquerschnitt beeinflusst neben der Abbildungsgeometrie der Empfangsoptik und der aktiven Diodenfläche die räumliche Auflösung. Der Strahlquerschnitt für die Anwendung Abwasser sollte daher kreisförmig mit einem Durchmesser von weniger als 1 mm sein. Eine Fokussierung des Laserstrahls auf das Messvolumen kann von Vorteil sein, um die Rückstreu-Leistung zu steigern. Die Richtungsselektivität wächst jedoch mit abnehmendem Strahldurchmesser. Bei einem Strahlabstand der beiden Laserstrahlen von etwa 10 bis 15 mm sollte der Durchmesser aus diesem Grunde nicht kleiner als 0,5 mm sein. Dies entspricht einer Richtungsselektivität von etwas mehr als 2°.

Brennweite und Abbildungsmaßstab der Empfangsoptik

Um eine günstige Leistungsbilanz zu erhalten, sollten die Verluste durch geometrische Ausbreitung gering sein. Es bietet sich daher an, einen Abbildungsmaßstab von etwa eins zu wählen. Der Abstand des Messvolumens von der Optik ist dann gleich der doppelten Brennweite. Es wurde eine Brennweite der Empfangsoptik von $f = 50$ mm gewählt. Da nur die monochromatische Laserstrahlung ausgewertet wird, erübrigt sich eine Farbkorrektur der Optik und es kann mit einem einlinsigen System gearbeitet werden. Wegen des relativ geringen Abstandes der beiden Laserstrahlen lassen sich beide Messvolumina mit *einer* Optik abbilden.

Aktive Fläche der Dioden

Bei einem Abbildungsmaßstab der Empfangsoptik von eins muss die aktive Fläche der Dioden aus den eben erwähnten Gründen in der Größenordnung der Querschnittsfläche der Laserstrahlen von 0,1 bis 1 mm² liegen.

Bandbreite der Verstärker und Abtastfrequenz

Um eine aufwändige Offset-Kompensation zu vermeiden, wurden die Vorverstärker mit einer unteren Grenzfrequenz von 1,3 Hz ausgeführt. Die obere Grenzfrequenz der gesamten Signalverarbeitung hängt von der maximalen Strömungsgeschwindigkeit und der Partikelgröße ab. Geht man von $v_{\max} = 3$ m/s und einer Partikelgröße von 1 mm aus, so erhält man eine obere Grenzfrequenz von etwa 1500 Hz. Die Abtastfrequenz muss dann theoretisch mindestens den doppelten Wert haben. Sind jedoch im Signal z. B. nur Anteile mit einer maximalen Frequenz von 400 Hz enthalten, also auch kein breitbandiges Rauschen, so kann auch mit einer kleineren Abtastfrequenz gearbeitet werden. Bei den Experimenten wurde meist $f_A = 1300$ Hz gewählt. Versuchsweise Messungen mit größerer oder kleinerer Abtastfrequenzen haben keine signifikanten Unterschiede des Messergebnisses erbracht.

Störlicht / Filter

Um Störungen durch externes Tageslicht oder Kunstlicht zu vermeiden, sind auf die verwendete Wellenlänge des Lasers abgestimmte, schmalbandige Interferenzfilter zu verwenden. Die geometrische Abschattung, die durch das Messgehäuse entsteht, sorgt zusätzlich dafür, dass eine Beleuchtung des Messvolumens durch störendes Tages- oder Kunstlicht vermieden wird. Außerdem bedingt diese Anordnung, dass nicht direkt oder indirekt in den Laserstrahl gesehen werden kann. Dadurch ist eine Augenschädigung auch bei Laserstrahlung der Klasse 3B praktisch ausgeschlossen. Eine elektronische Trennung von Nutz- und Störlicht ist durch Modulation des Lasers und angepasste Filterung der Empfangssignale möglich. Dieses Verfahren wurde in Phase 3 des vorliegenden Projektes angewandt. Aus den zuvor erwähnten Gründen erübrigte sich diese Methode in Phase 4.



4. Aufbau der verwendeten Messapparatur

4.1. Mechanischer / optischer Aufbau

Der gesamte mechanisch optische Aufbau des Sensors wurde mit Hilfe einer 3-D-Software entworfen und konstruiert (Lit 6). Man erkennt in Abb. 6 die Montageplatte (grün-gelb) und darauf auf der rechten Seite angebracht den schwenkbaren Empfangsteil mit den beiden Verstärkergehäusen (blau). Links auf der Montageplatte befindet sich der Laser mit Strahlteiler und Spiegel zur Erzeugung der beiden parallelen Laserstrahlen. Auf dem grünen Zylinder sind drei Einstellschrauben zur Positionierung des Spiegels zu sehen.

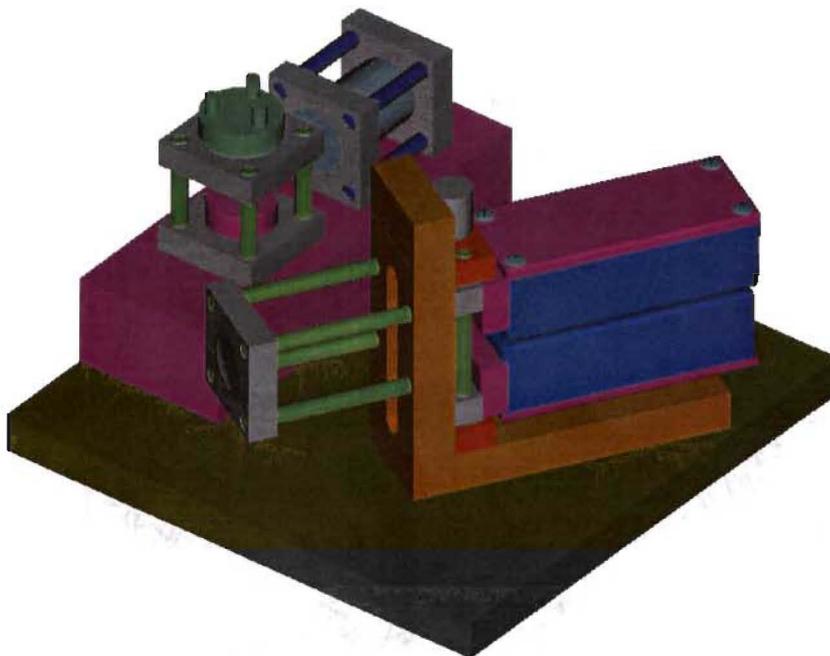


Abb. 6: 3-D-Entwurf des Sensors – Ansicht von vorn

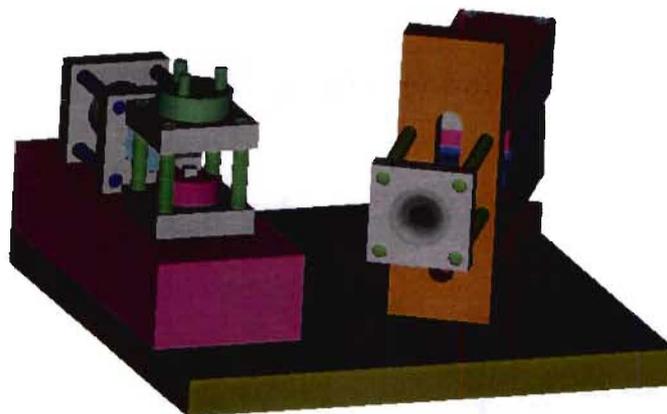


Abb. 7: 3-D-Entwurf des Sensors – Ansicht von unten

Abb. 7 zeigt den Entwurf aus einer anderen Perspektive. Der fertige Sensorkopf (ohne Abdeckhaube) ist in Abb. 8 zu sehen.

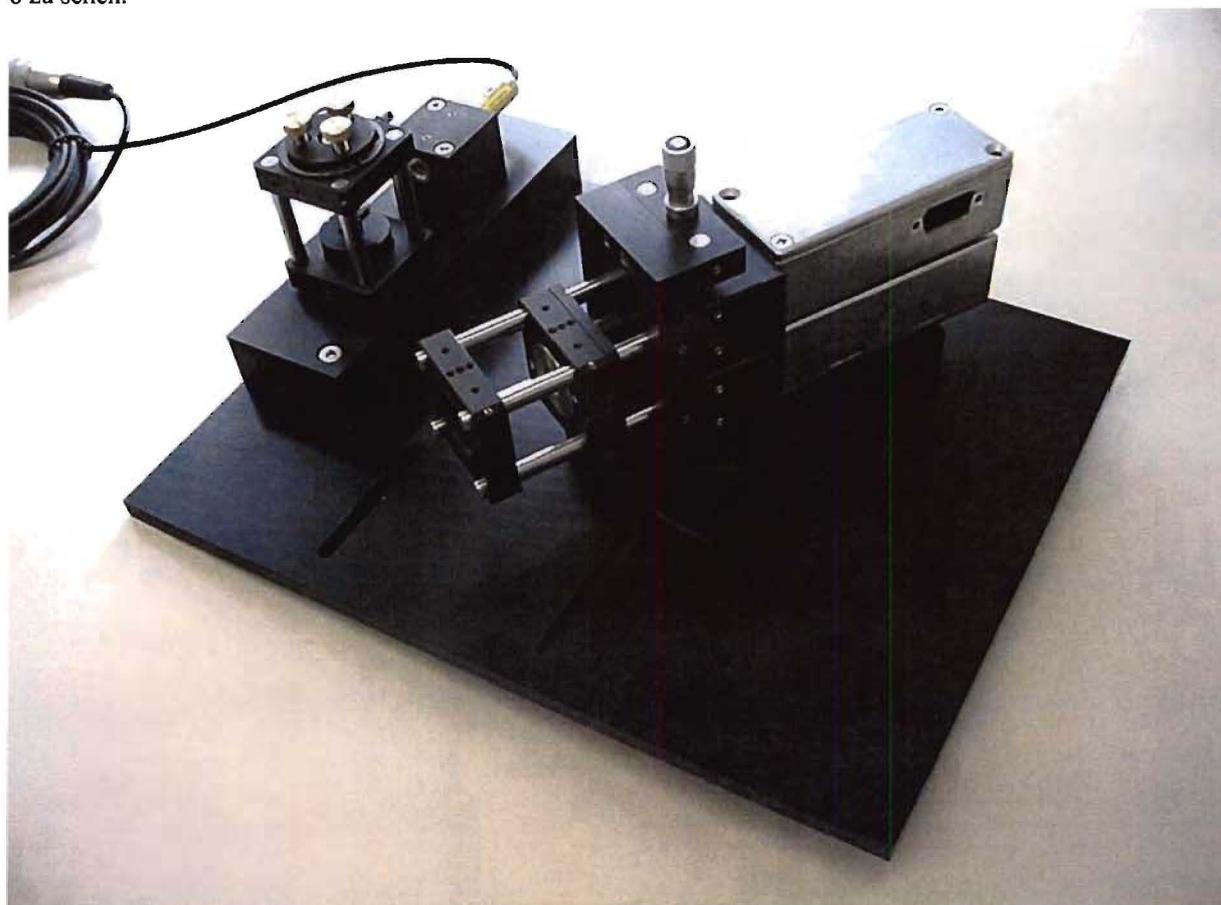


Abb. 8: Fertig montierter Sensorkopf



Außerdem wurde ein einfacher Schwimmer entworfen, um den Sensorkopf im festen Abstand zur Wasseroberfläche zu halten. Dabei war darauf zu achten, dass die Strömung im Messbereich nicht durch den Schwimmer beeinflusst wird. Das vollständige Gerät ist in Abb. 9 dargestellt.



Abb. 9: Schwimmer mit Laser-Mess-Apparatur

4.2. Elektronik

Um eine aufwändige Elektronikentwicklung zu vermeiden, wurden weitgehend Standard-Komponenten verwendet. Lediglich die Vorverstärker mussten an die vorhandene Aufgabe angepasst werden (Abb. 10).

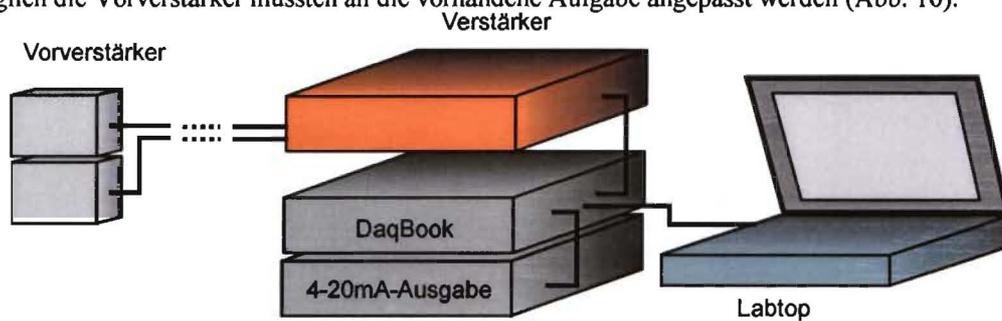


Abb. 10: Anordnung der Elektronik-Komponenten

Um die relativ schwachen Messsignale zu verstärken, wird ein Vorverstärker mit einer Verstärkung von 10^8 V/A verwendet, der sich in unmittelbarer Nähe der Empfangs-Dioden befinden muss. Die weitere Elektronik wird über ca. 5 m lange Messkabel angeschlossen. Sie besteht aus einem abgesetzten, weiteren Verstärker (Verstärkung schaltbar im Bereich von 0 bis 50 dB, das Gerät stammt aus Phase 2 des Projektes), das Messdatenerfassungsgerät DaqBook 120 der Firma IOtech, das über die Parallelschnittstelle an einen Laptop angeschlossen ist. Das DaqBook wurde durch eine Ausgabeeinheit mit 4-20mA-Stromschnittstelle ergänzt. Als maximale Gesamtverstärkung sind ca. $3 \cdot 10^{11}$ V/A erzielbar. Die verwendeten Dioden besitzen im verwendeten Wellenlängenbereich eine Empfindlichkeit von etwa 0,5 A/W. Daraus ergibt sich eine maximale Gesamtempfindlichkeit der Empfänger von 0,15 V/pW.

Für das vorliegende Projekt wurden die Vorverstärker für die Empfangsdioden neu entwickelt. Ziel war es, das Volumen zu verringern und eine AC-Kopplung zu realisieren.

Technische Daten der Vorverstärker:

Versorgung:	+/- 12V (+/-10%) max. 12mA
Abmessungen:	93 x 43 x 32 mm (L x B x H inkl. Gehäuse)
Verstärkung:	10^8 V/A
Grenzfrequenzen:	1,3 Hz (untere)



1,5 KHz (obere)

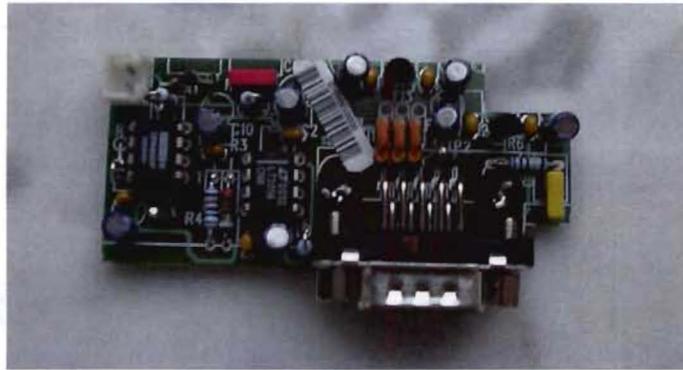


Abb. 11: Vorverstärker

Als Dioden wurde der Typ S 5973 der Firma Hamamatsu verwendet. Diese Dioden weisen eine aktive Fläche von 0.12 mm^2 (Durchmesser 0,4 mm) auf.



5. Software

5.1. Entwicklungsumgebung

Als Entwicklungsumgebung wurde das Software-System LabView (Lit 7) von National Instruments gewählt. Es handelt sich dabei um eine grafische Programmierumgebung, die besonders für die Messwerterfassung und -Verarbeitung geeignet ist. Durch Verwendung fertiger Moduln kann der Entwicklungsaufwand in Grenzen gehalten werden. Außerdem bieten nahezu alle Hersteller von Messwerterfassungs-Geräten Treiber für LabView an. Die in der Phase 3 erstellte Software wurde weiter verfeinert.

5.2. Aufbau der Software

Die für die vorliegenden Aufgabe erstellten Programme tragen den Name „COBRA“ (steht für Correlation of Backscattered Radiation of Laser Light).

5.2.1 Steuerung der Messdatenerfassung

Als Messdatenerfassung wird das DaqBook120 von Iotech verwendet. Die zur Signalerfassung benötigten Parameter wie z. B. Abtastfrequenz, Kanalzahl, Messbereich und Blocklänge werden entweder als Konstante vorgegeben oder sind als von der Bedienoberfläche her einzustellende Parameter vorgesehen.

5.2.2 Digitale Filterung der Messsignale

Wie schon erwähnt, führen Oberflächenwellen zu niederfrequenten Störungen, die unter Umständen eine falsche Korrelationsverschiebung bedingen. Durch eine digitale Hochpassfilterung lassen sich diese Störungen problemlos herausfiltern. Zusätzlich zu dem analogen, im Verstärker realisierten Hochpass, wurde ein zweikanaliger, digitaler Hochpass höherer Ordnung implementiert. Bei den Messungen hat sich gezeigt, dass eine Grenzfrequenz von 40 bis 80 Hz Einflüsse von Oberflächenwellen weitgehend herausfiltert.

5.2.3 Berechnung der Kreuzkorrelationsfunktion und Bestimmung der Korrelationsverschiebung

Die Kreuzkorrelation liegt als fertiger Modul in LabView vor. Die Korrelationsverschiebung lässt sich aus der Lage des Maximums durch Interpolation genau berechnen. Dies setzt jedoch voraus, dass ein ausgeprägter „Peak“ vorliegt. Da es sich bei der Korrelation um ein statistisches Verfahren handelt, ist dies nicht immer der Fall. Es hat sich daher als sinnvoll erwiesen, die Berechnung der Korrelationsverschiebung nach einer im folgenden Abschnitt beschriebenen Mittelungsoperation durchzuführen, die als „dynamisches Histogramm“ bezeichnet wird.

5.2.4 Dynamisches Histogramm

Die Kreuzkorrelation zeitbegrenzter Vorgänge ist selbst auch eine stochastische Größe. Um die statistische Sicherheit des Ergebnisses zu erhöhen, werden die größten relativen Maxima der KKF in Form eines Histogramms gemittelt. Auf der Abszisse ist dabei die Korrelationsverschiebung aufgetragen. Bei einer zeitlichen Änderung der Korrelationsverschiebung ist dieser Mittelungsprozess natürlich einzuschränken. Es sollte lediglich eine gleitende Mittelwertbildung oder eine rekursive Filterung erfolgen. Hier wurde eine rekursive Filterung 1. Ordnung gewählt und das so erhaltene Histogramm als dynamisches Histogramm bezeichnet. Es sollte sich ein relativ schmales Hauptmaximum mit möglichst geringen Nebenmaxima ergeben (Abb. 12). Die Ordinate entspricht dem mittleren Korrelationsgrad. Wegen der Hochpassfilterung der Zeitsignale ist der Korrelationsgrad meist deutlich geringer als 1 (bei den vorliegenden Messungen meist zwischen 0,05 und 0,6). Entscheidend für die Güte der Messung ist jedoch nicht der Korrelationsgrad sondern das Verhältnis vom Hauptmaximum zu den Nebenmaxima. Hier ist als Parameter gut ein Signal-Stör-Verhältnis geeignet, das sich aus

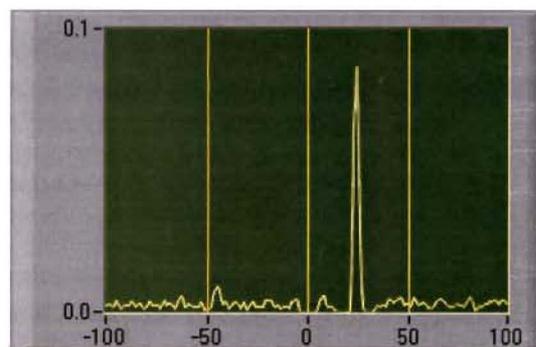


Abb. 12: Dynamisches Histogramm der Korrelationsverschiebung, Zeitkonstante 10 s



$$SNR = 10 \cdot \lg \left(\frac{\text{Signalleistung}}{\text{Störleistung}} \right) \quad (\text{Angabe in dB})$$

berechnet. Zur Ermittlung der Signalleistung werden hier der jeweils das Hauptmaximum und die beiden benachbarten Werte verwendet und der quadratische Mittelwert gebildet, die Störleistung ist der quadratische Mittelwert aller anderen Werte des Histogramms. Der Parameter SNR ist sehr gut zur Beurteilung einer Messung geeignet. Bei Werten über 10 dB kann man von verlässlichen Ergebnissen ausgehen, Werte zwischen 5 und 10 dB sind noch akzeptabel, unter 5 dB liegende Werte weisen auf eine fehlerhafte Messung oder zu große Turbulenzen der Strömung hin. Der jeweilige, aktuelle Wert von SNR wird auf der Bedienoberfläche der Programme COBRA Messen und COBRA Lesen angezeigt. Zusätzlich ist der zeitliche Verlauf dieser Größe in der graphischen Darstellung „Zeitverlauf“ zusammen mit der Strömungsgeschwindigkeit als gestrichelte Kurve zu sehen.

5.2.5 Parametereinstellungen

Die hier aufgeführten Parameter des Programms „COBRA Messen“ können vor oder während der Messung eingestellt werden. Die voreingestellten Standardwerte sind die für die aktuelle Messanordnung empfohlenen Einstellungen.

Vor der Messung sollten folgende Einstellungen überprüft und gegebenenfalls angepasst werden:

- Abstand der Laserstrahlen
Hier ist der genaue Abstand einzugeben
- Blocklänge
Diese Größe legt die Länge der für eine Korrelationsbestimmung verwendeten Datenblöcke in Abtastwerten fest. Sie wird in Potenzen von zwei im Bereich von 128 bis 4096 gewählt. Standardwert: 2048
- Abtastfrequenz
Dies ist die für die Analog-Digital-Wandlung verwendete Abtastfrequenz je Kanal, Standardwert: 1300 Hz
- Zeitkonstante für Mittelung
Dieser Wert wirkt sich auf das dynamische Histogramm und die Glättung des Zeitverlaufs aus, Standardwert: 10 s.
- maximale Korrelationsverschiebung rechts und links
Standardwerte: -100, 100
- Pfad für Speicherung der gemessenen Daten
- Schalter für Speichern der Messdaten
Bei Testmessungen kann auf das Speichern der Daten verzichtet werden.
- Schalter für Simulieren
Die Betriebsart „Simulieren“ dient zu Testzwecken, z. B. wenn keine Hardware angeschlossen ist.

Zum Start der Messung wird die pfeilförmige Taste oben links in der Menüleiste angeklickt. Während der Messung können folgende Einstellungen angepasst werden:

- Grenzfrequenz der Hochpass-Filter als Quotient f_G/f_A . Die sich daraus ergebende Frequenz wird daneben angezeigt.
- Schalter für Anzeige Dynamisches Histogramm oder Zeitverlauf
- Messbereichsendwert der Strömungsgeschwindigkeit, v_{MAX} .
Korrelationsverschiebungen, die Geschwindigkeiten $> v_{MAX}$ entsprechen, werden ausgeblendet. Der Messbereichsendwert entspricht einem Strom von 20 mA an der analogen Stromschnittstelle.
- Messung beenden

Das Programm „COBRA Lesen“ besitzt folgende einstellbaren Parameter:

- Suchpfad für Dateien (wie COBRA Messen)
- Grenzfrequenz der Hochpassfilter (wie COBRA Messen)
- 50 Hz- Sperre (wird hier nicht benötigt)
- Schalter mit/ohne Uhrzeit



Im Laufe des Projekts wurde das Format der gespeicherten Daten um die Uhrzeit erweitert. Um beide Formate (vor und nach dieser Änderung) lesen zu können, ist der Schalter entsprechend einzustellen.

- maximale Korrelationsverschiebung rechts und links (wie COBRA Messen)
- Zeitkonstante für Mittelung (wie COBRA Messen)
- Zahl der zurückliegenden Werte
in der Darstellung „Zeitverlauf“ und „Intensitätsgraph“ sind neben dem aktuellen Messwert jeweils eine einstellbare Zahl von zurückliegenden Werten zu sehen.
- Schalter für Anzeige Dynamisches Histogramm oder Zeitverlauf (wie COBRA Messen)
- Ausblenden
Hier können ähnlich wie bei COBRA Messen Korrelationsverschiebungen ausgeblendet werden. Dies ist erforderlich, wenn im Messsignal korrelierte Störungen, die auf beide Messkanäle einwirken, vorhanden sind. Der Eingabewert wird in eine Geschwindigkeit umgerechnet, die den Messbereichsendwert darstellt.
- Start und Ende Block-Nummer
Falls nicht alle gespeicherten Blöcke ausgewertet werden sollen, können hier Start und Ende eingegeben werden (Standardwert 1 bis 650)

5.2.6 Simulations- und Hilfe-Funktion

Zum Test des Online-Programmes „COBRA Messen“ ist eine Simulationsfunktion eingebaut, die synthetisch erzeugte Messsignale liefert. In diesen Signalen sind korrelierte Anteile enthalten, deren Zeitverschiebung langsam sinusförmig variiert (Abb. 13). Auf diese Weise ist es möglich, das Programmverhalten zu testen, ohne dass die Messwernerfassung angeschlossen ist. Eine einfache Hilfsfunktion lässt sich mit LabView problemlos realisieren. Dazu wird zu jedem Bedien- und Anzeige-Element der Bedienoberfläche eine Beschreibung eingegeben. Diese Beschreibung kann jederzeit durch Anklicken der rechten Maustaste oder durch Einschalten der Kontext-Hilfe abgerufen werden.

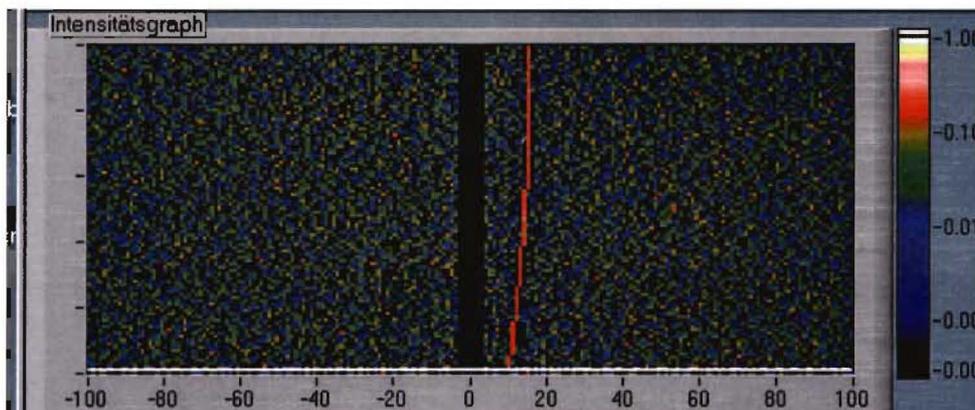


Abb. 13: Testfunktion

5.2.7 Ausgabe des Ergebnisses

Das Messergebnis ist vorerst nur die Strömungsgeschwindigkeit. Es steht eine Ausgabe als Zahlenwert und als Zeitverlauf auf der Bedienoberfläche zur Verfügung. Um den Messwert in weitere Durchflussberechnungen einfließen zu lassen, gibt es auch einen Stromausgang (4-20 mA-Schnittstelle) für diesen Wert. Dabei entspricht der Strom 4 mA dem Wert 0 und 20 mA dem als Parameter eingestellten Maximalwert der Strömungsgeschwindigkeit. Zur Kontrolle können die aktuellen Zeitfunktionen, die aktuelle Kreuzkorrelationsfunktion und das Signal-Stör-Verhältnis des dynamischen Histogramms abgelesen werden. Um eine nachträgliche Auswertung zu ermöglichen, werden die gemessenen Rohdaten (Zeitsignale) neben einigen wichtigen Parametern (Abstand der Laserstrahlen, Datum, Uhrzeit, Abtastfrequenz und Blocklänge) als Datei auf der Festplatte des PC gespeichert. Die gemessenen Daten können dann jederzeit mit Hilfe eines Offline arbeitenden Programmes „COBRA Lesen“ gelesen und verarbeitet werden. Die Oberfläche der beiden Programme „COBRA Messen“ und „COBRA Lesen“ ist fast identisch. Abb. 14 zeigt die Oberfläche des Programmes „COBRA Lesen“ bei der Verarbeitung von vorher gespeicherten Daten.

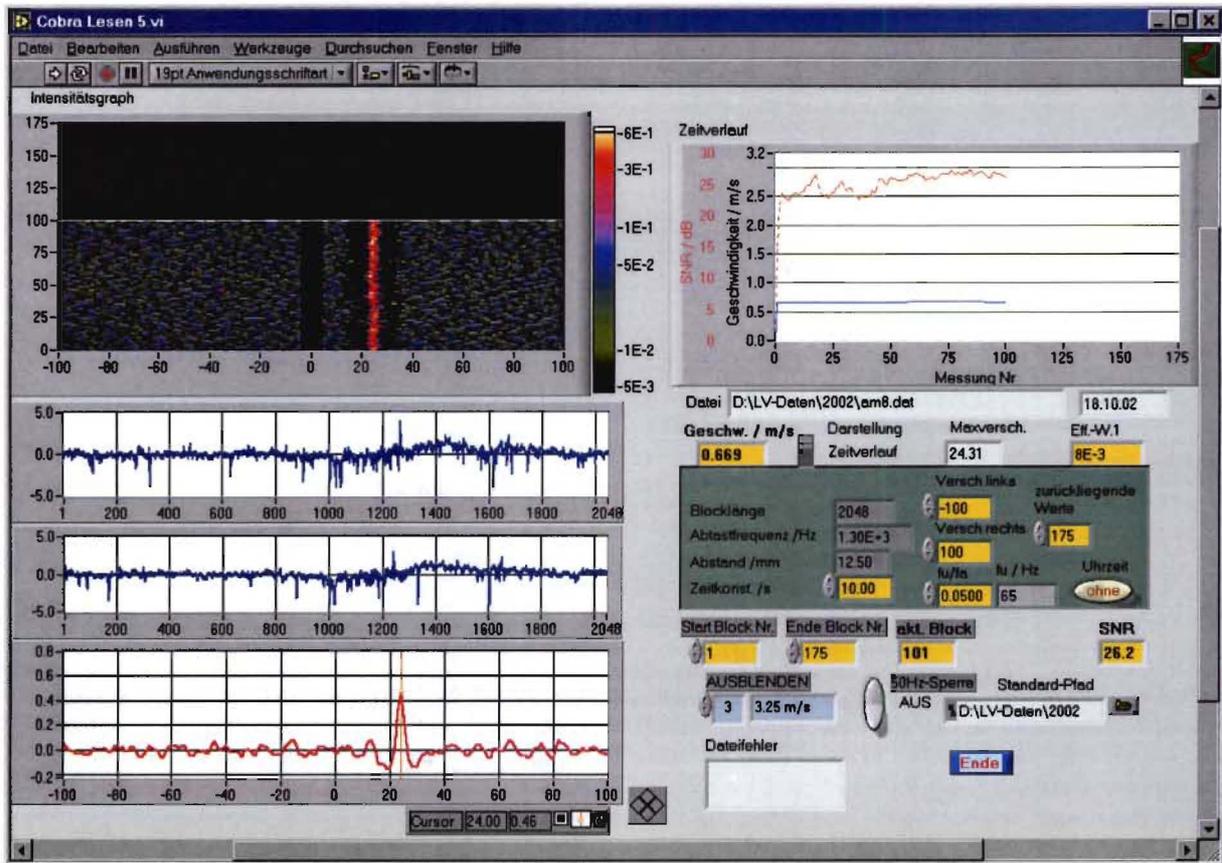


Abb. 14: Bedienoberfläche des Offline-Programms „COBRA LESEN“



6. Ergebnisse

6.1. Justierung

Wegen der vielen Verstellmöglichkeiten war vor Beginn der eigentlichen Messungen eine gründliche Justierung erforderlich. Der Abstand d der beiden Laserstrahlen sollte, durch die Konstruktion bedingt, konstant sein. Der Ablenkspiegel für den zweiten Teilstrahl ist schwenkbar, um die Parallelität der Strahlen einzustellen. Es ist zwar vom Prinzip her nicht zwingend, dass die Strahlen parallel sind, man kommt jedoch bei gegeneinander geneigten Strahlen im Falle von brechenden Medien zu sehr schwierigen Verhältnissen. Die Justierung kann in Luft erfolgen. Der durch die Konstruktion bedingte Abstand beträgt $d = 12,5 \text{ mm}$.

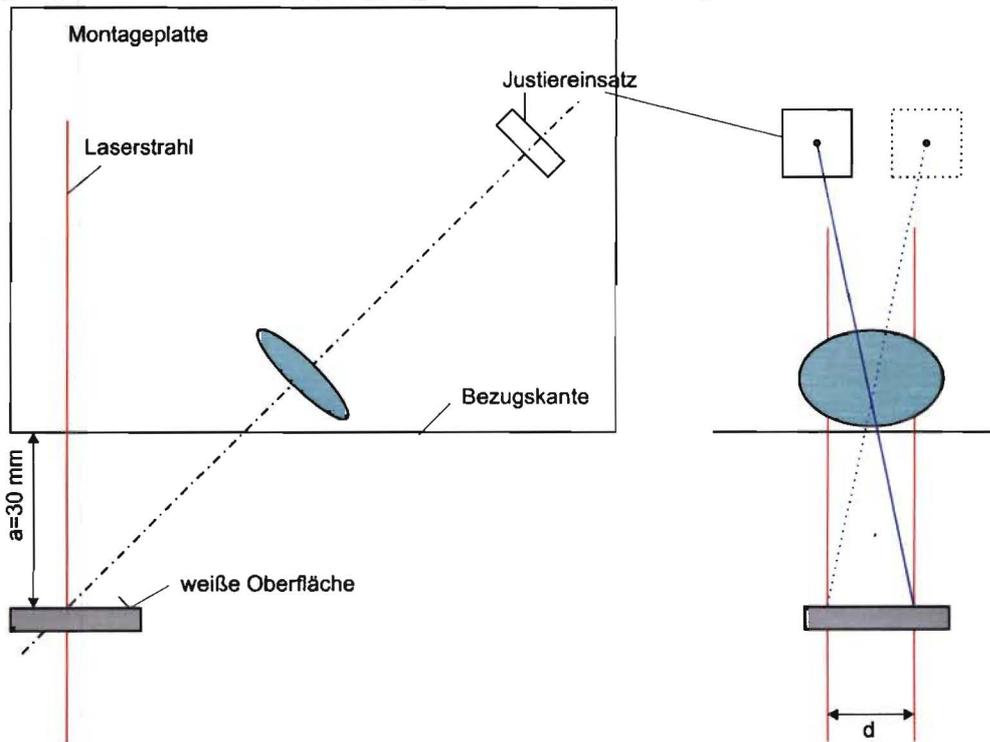


Abb. 15: Optische Justierung in Luft

Zum Einstellen der Empfänger wird zuerst mit einem Justiereinsatz aus Plexiglas, dessen Oberfläche aufgeraut ist, gearbeitet. Auf diesem Justiereinsatz ist die Lage der Empfangs-Diode durch eine kleine Bohrung markiert.

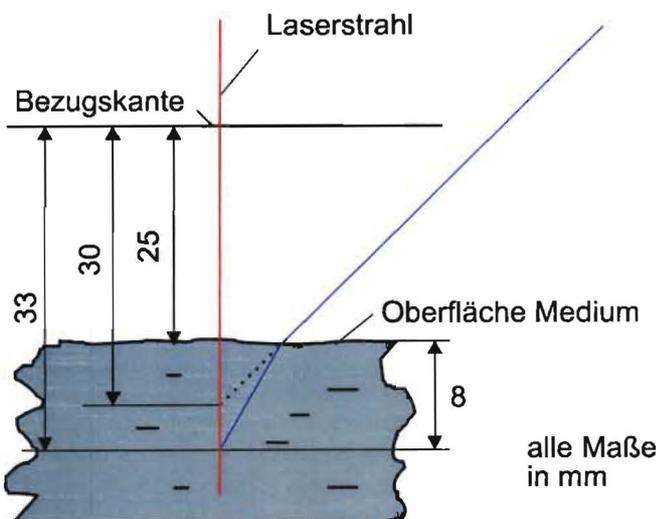


Abb. 16: Eindringtiefe bei vorgegebenem Oberflächenabstand zur Bezugskante

Die Aufgabe besteht nun darin, durch Schwenken der Empfangsoptik, Fokussierung der Optik und Verstellung des Empfängerabstandes die beiden Messpunkte auf die jeweiligen Empfangsdioden abzubilden. Um nicht noch weitere Freiheitsgrade einzubringen, sollte diese Justierung in Luft durchgeführt werden. Als Bezug für die Maße wurde die Unterkante der Montageplatte verwendet. Man bringt dann im gewünschten Abstand eine weiße Oberfläche in den Strahlengang der beiden Laserstrahlen. Das an dieser Oberfläche gestreute Licht kann dann direkt in der Diodenebene mit Hilfe des Justiereinsatzes sichtbar gemacht werden. Durch Verstellen des Schwenkwinkels, des Abstandes der Empfängermoduln und des Linsenabstandes muss die Streustrahlung als kleiner Punkt zentrisch zur jeweiligen Bohrung erscheinen.



Abb. 16 zeigt, welche Eindringtiefe bei der in Luft durchgeführten Justierung dann bei einem Abstand der Wasseroberfläche von 25 mm bis zur Bezugskante zu erwarten ist. Wegen der Brechung des Lichts bewirkt eine geringfügige Veränderung des Abstands a eine verstärkte Erhöhung bzw. Verringerung der Eindringtiefe. Die Einstellungen des Schwimmers wurden gemäß Abb. 16 so durchgeführt, dass sich ein Abstand von 25 mm zwischen Bezugskante und Wasseroberfläche ergibt.

6.2. Laborgerinne



Abb. 17: Laborgerinne mit verkleinertem Querschnitt

Um die Justierung und Funktionsfähigkeit der Messapparatur zu überprüfen, wurde zuerst mit einem einfachen Laborgerinne gemessen. Das vorhandene Gerinne aus Kunststoff und Acrylglas (Länge etwa 2,1 m) wurde mit einer einfachen Tauchpumpe betrieben. Die vorhandene Pumpleistung lässt bei dem vorliegenden Gerinnequerschnitt nur eine relativ langsame Fließgeschwindigkeit zu. Um zu eher an die im Einsatzfall zu erwartenden Strömungsgeschwindigkeiten und praktikablen Füllhöhen zu kommen, wurde der Querschnitt in zwei Schritten verringert. Dazu wurde zuerst der Gerinneboden durch Einbringen einer Holzleiste angehoben. Dabei ergab sich ein nahezu quadratischer Querschnitt mit einer Seitenlänge von 50 mm. Da sich hierbei mit der verwendeten Pumpe nur eine maximale Füllhöhe von ca. 20 mm realisieren ließ, wurde in einigen weiteren Versuchen auch die Breite durch eine weitere Holzleiste eingeengt. Damit stand ein Rechteck-Querschnitt von 37 mm Breite und 50 mm Höhe zur Verfügung (Abb. 17). Mit dieser Anordnung konnten Füllhöhen bis etwa 30 mm realisiert werden. Die Strömungsgeschwindigkeit ließ sich durch Neigungsverstellung und Drosselung der Pumpleistung um ca. 50 % variieren.



Abb. 18: Messung mit Laborgerinne

Abb. 19 zeigt ein typisches Ergebnis bei leicht verunreinigtem Wasser. Die Pumpleistung wurde während des Versuchs verändert, um eine variable Strömungsgeschwindigkeit zu erhalten. Da hier kein Schwimmer verwendet wurde, variierte die Eindringtiefe bei sich veränderndem Füllgrad des Gerinnes. Die Eindringtiefe betrug etwa 1 bis 5 mm. Zu Anfang war das SNR relativ niedrig (ca. 10 dB), was auf eine sehr geringe Eindringtiefe beidem entsprechenden Füllgrad zurückzuführen ist. Trotzdem sind keine Fehlmessungen zu verzeichnen. Bei Block Nr. 54 und Nr. 97 wurde die Pumpleistung jeweils etwas erhöht. Die gesamte Messzeit beträgt knapp 4 Minuten. Die Strömungsgeschwindigkeit erhöht sich schrittweise von etwa 0,6 m/s bis auf ca. 0,8 m/s. Der Zeitverlauf ist im oberen rechten Teil der Abbildung zu sehen. Auf dem links befindlichen Intensitätsgraphen erkennt man, dass die Korrelationsmaxima gegen Ende ausgeprägter werden. Dies ist auf die bei dieser Geschwindigkeit mehr laminare Strömung zurückzuführen.

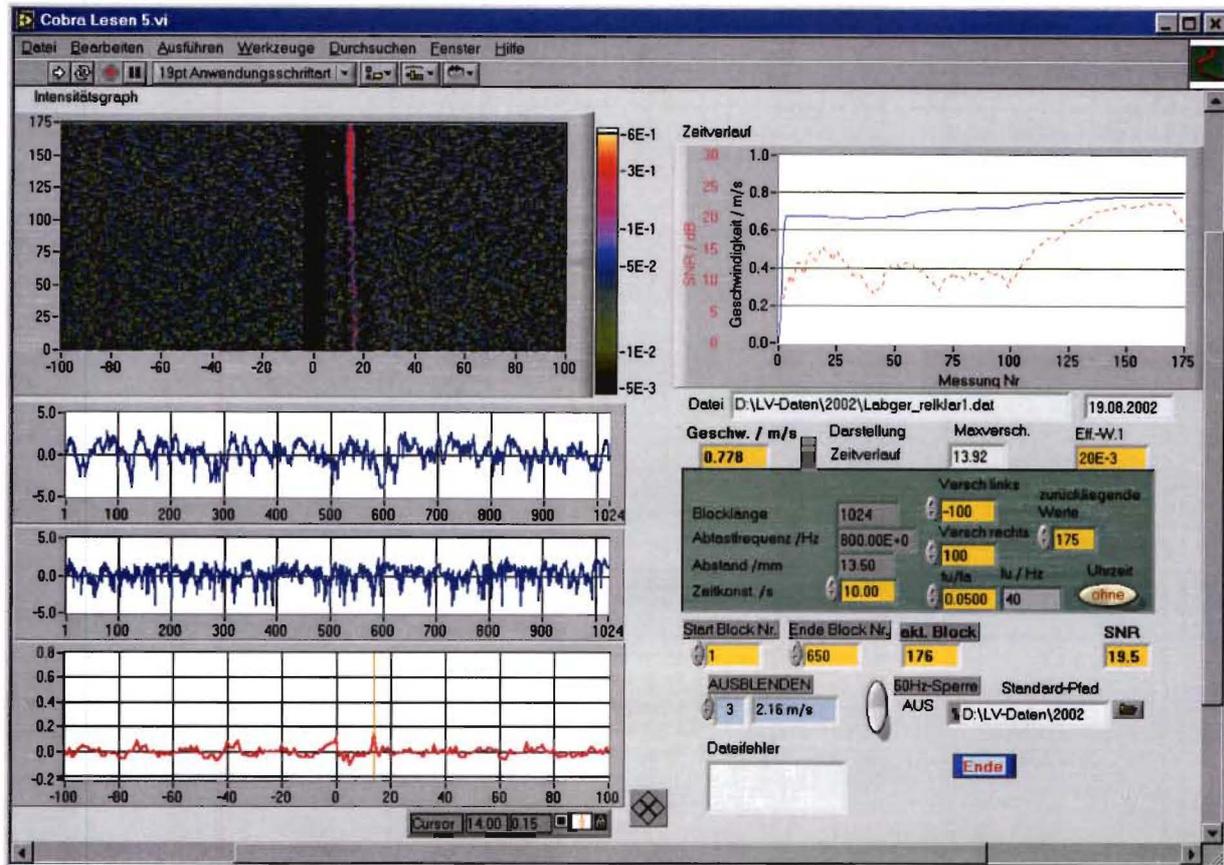


Abb. 19: Messergebnis Laborgerinne 50 x 50, Wasser leicht verunreinigt

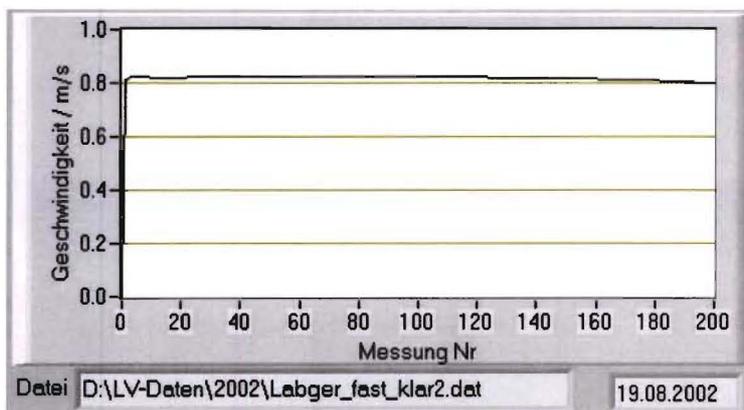


Abb. 20: Messergebnis Laborgerinne 50 x 50, Wasser kaum verunreinigt

In Abb. 20 ist eine weitere Messung mit geringer verunreinigtem Wasser gezeigt. Bei dieser Messung wurde die Pumpleistung bei Block Nr. 110 etwas verringert. Die gemessene Strömungsgeschwindigkeit liegt bei etwas über 0,8 m/s und verringert sich zum Ende der Messung hin. Die gesamte Messzeit beträgt etwas über 4 Minuten.

Die nächste Messung (Datei: Labgerschmal1.dat) geht bewusst an die Grenze des Verfahrens. Durch Verringern der Pumpleistung wurde eine Füllhöhe erreicht, bei der das Messvolumen an der Oberfläche des strömenden Mediums liegt. Diese Auswertung wurde, wie alle,

bei denen hierzu keine weiteren Angaben gemacht wurden, mit einer Zeitkonstanten von 10 s durchgeführt. Als Vergleich ist in Abb. 22 eine Auswertung der gleichen Rohdaten mit einer Zeitkonstanten von 2 s gezeigt. Man erkennt im Bereich Block Nr. 60 bis 116 fehlerhafte Werte. Diese Werte kommen durch die in diesem Bereich zu geringe Wassertiefe zu Stande, weil die Eindringtiefe etwa 0 betrug. Man sieht jedoch, dass durch die Mittelung (Abb. 21) mit einer Zeitkonstanten von 10 s auch diese, nur hin und wieder korrelierten Signale, selbst bei diesen schwierigen Verhältnissen noch ein brauchbarer Zeitverlauf der Strömungsgeschwindigkeit erreicht wird.

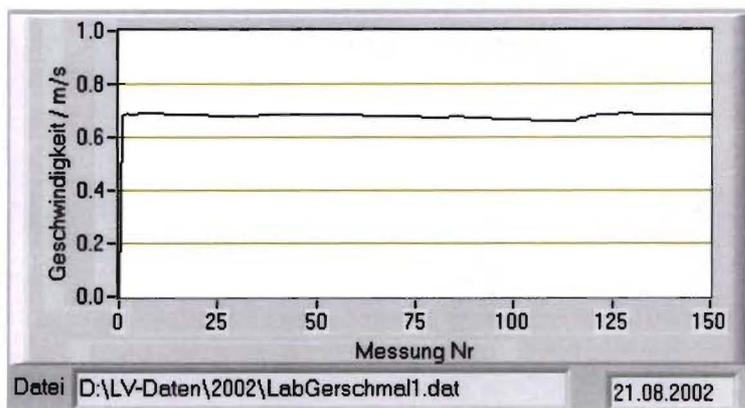


Abb. 21: Laborgerinne 37 x 50, Zeitkonstante 10 s

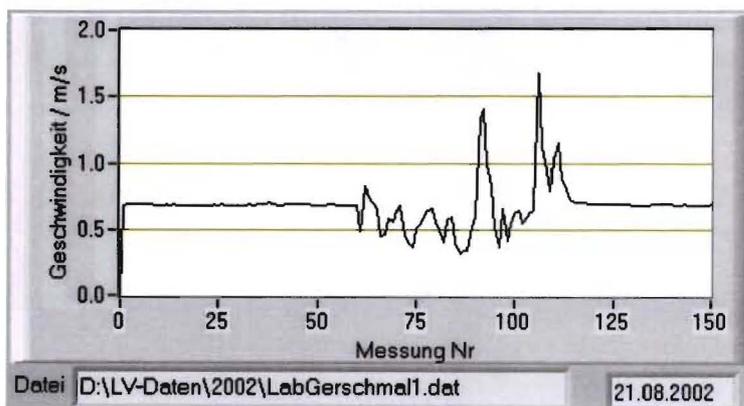


Abb. 22: Laborgerinne 37 x 50, Zeitkonstante 2 s



6.3. Messungen im Zulauf der Kläranlage Loddenbach



Abb. 23: Messgerät im Zulauf der KA Loddenbach

Der vorher in seinen Schwimmeigenschaften getestete Schwimmer wurde erstmals im Zulauf der Kläranlage Loddenbach der Stadt Münster im Ortsteil Gremmendorf eingesetzt. Der Schwimmer wurde in den Zulauf hinter dem Rechen eingebracht. Aus Abb. 23 sind etwa die dort herrschenden Strömungsverhältnisse ersichtlich. Man erkennt die schwarze Box, in deren Inneren der Laser und die Empfangsoptik untergebracht ist. Die Box ist nach unten offen. Die Längsachse des mit einem Seil befestigten Schwimmers richtet sich automatisch parallel zur Strömung aus. Das Messvolumen befindet sich vor den durch den Schwimmer hervorgerufenen Kopfwellen. Während der Messungen änderte sich die Füllhöhe und Strömungsgeschwindigkeit bedingt durch die vorgeschaltete Rechenautomatik laufend. Die Ergebnisse sind von Abb. 24 bis Abb. 30 dargestellt. Man erkennt ein durchgängig gut ausgeprägtes Korrelationsmaximum. Die SNR-Werte liegen fast alle über 20 dB. Deutlich sind die Umschaltunkte beim Herausfahren des Rechens zu sehen. Die Strömungsgeschwindigkeit liegt im ersten Versuch bei etwa 0,6 m/s und steigt jeweils nach der Entleerung des Rechens an. Die Füllhöhe des Gerinnes schwankte während der Messungen zwischen ca. 20 cm und 40 cm.

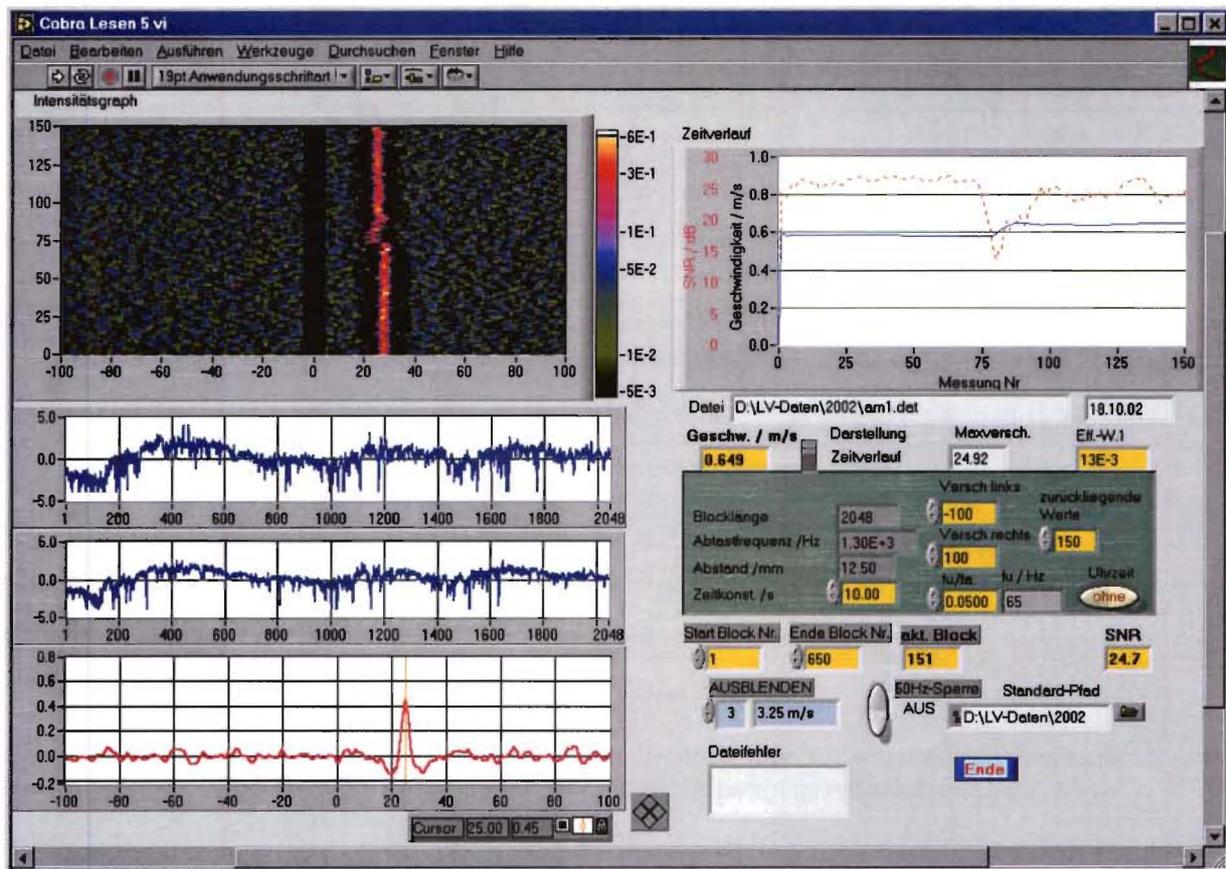


Abb. 24: Messung KA Loddenbach 1

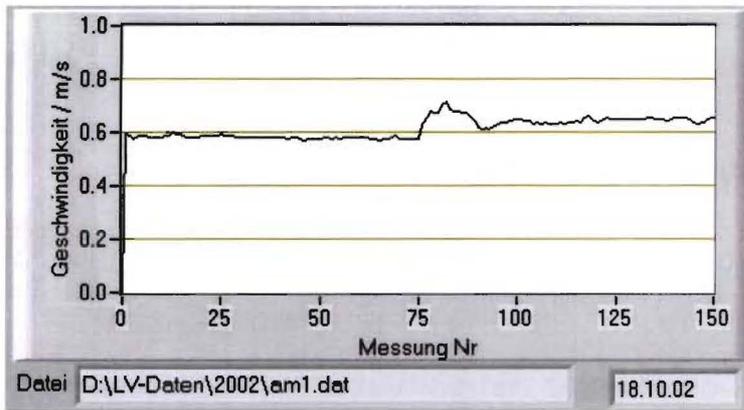


Abb. 25: KA Loddenbach 1 hier mit Zeitkonstante 2 s

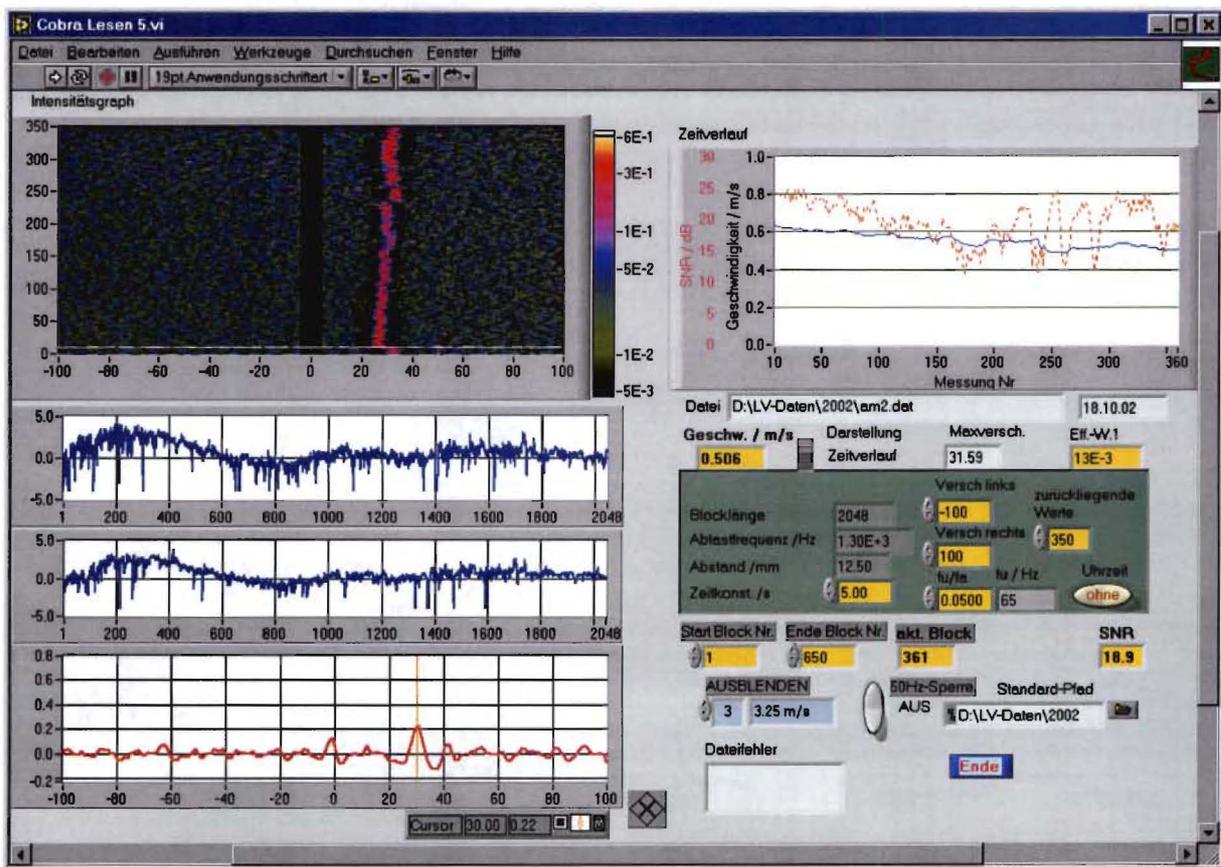


Abb. 26: Messung KA Loddenbach 2

Abb. 26 zeigt eine weitere Messung. Hierbei wurde mit der Zeitkonstanten 5 s ausgewertet. Man erkennt auch hier deutlich die Änderungen der Strömungsverhältnisse beim Herausfahren des Rechens.

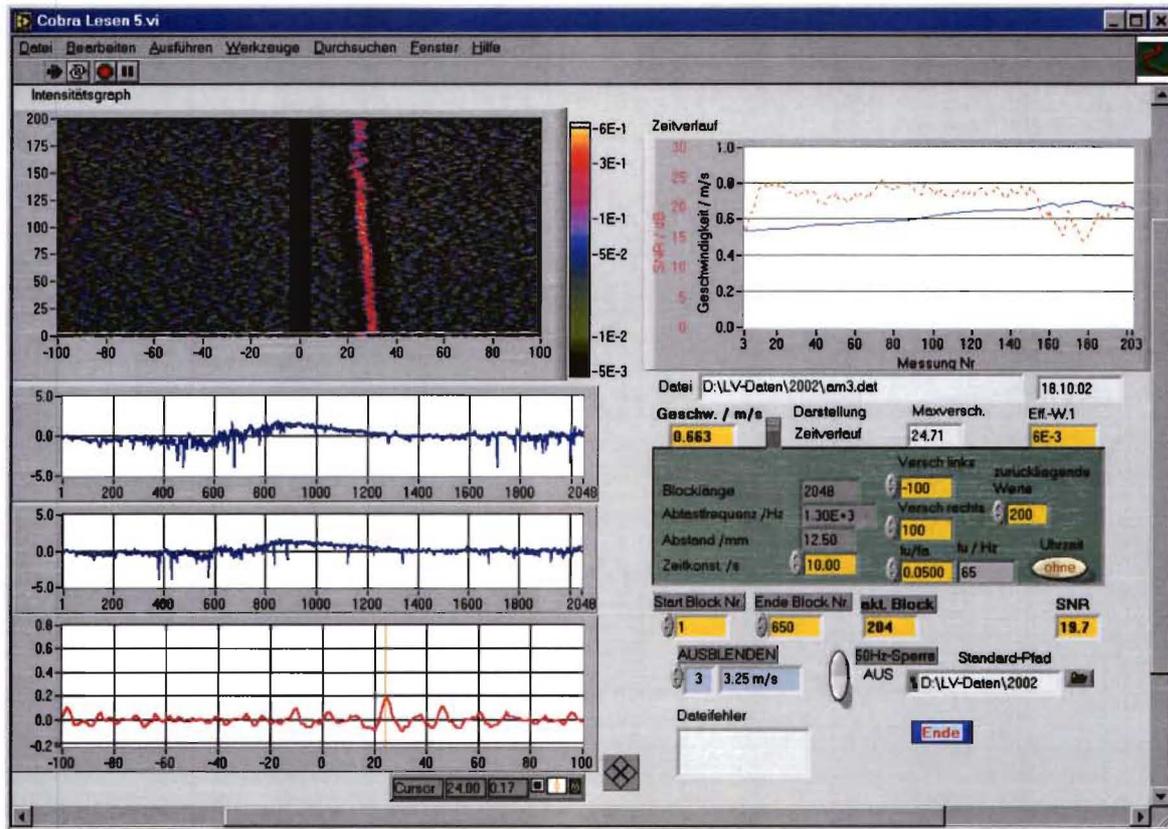


Abb. 27: Messung KA Loddenbach 3

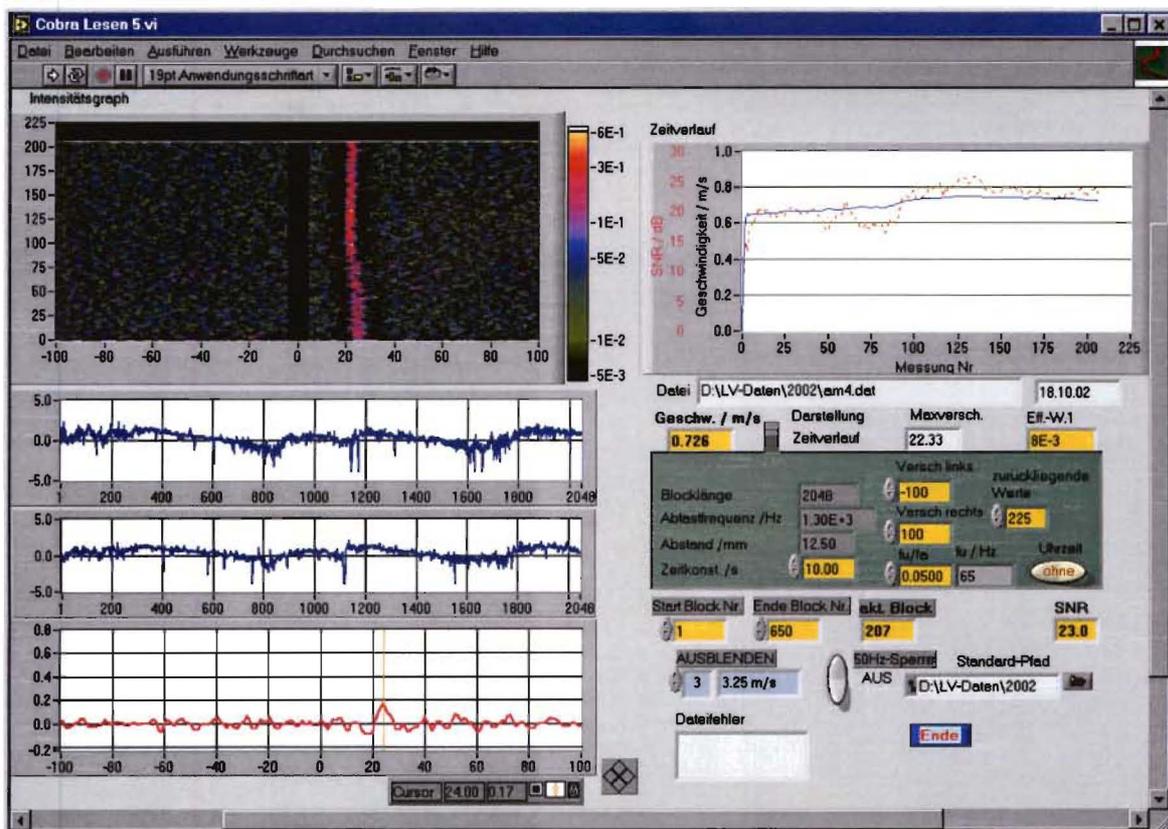


Abb. 28: Messung KA Loddenbach 4

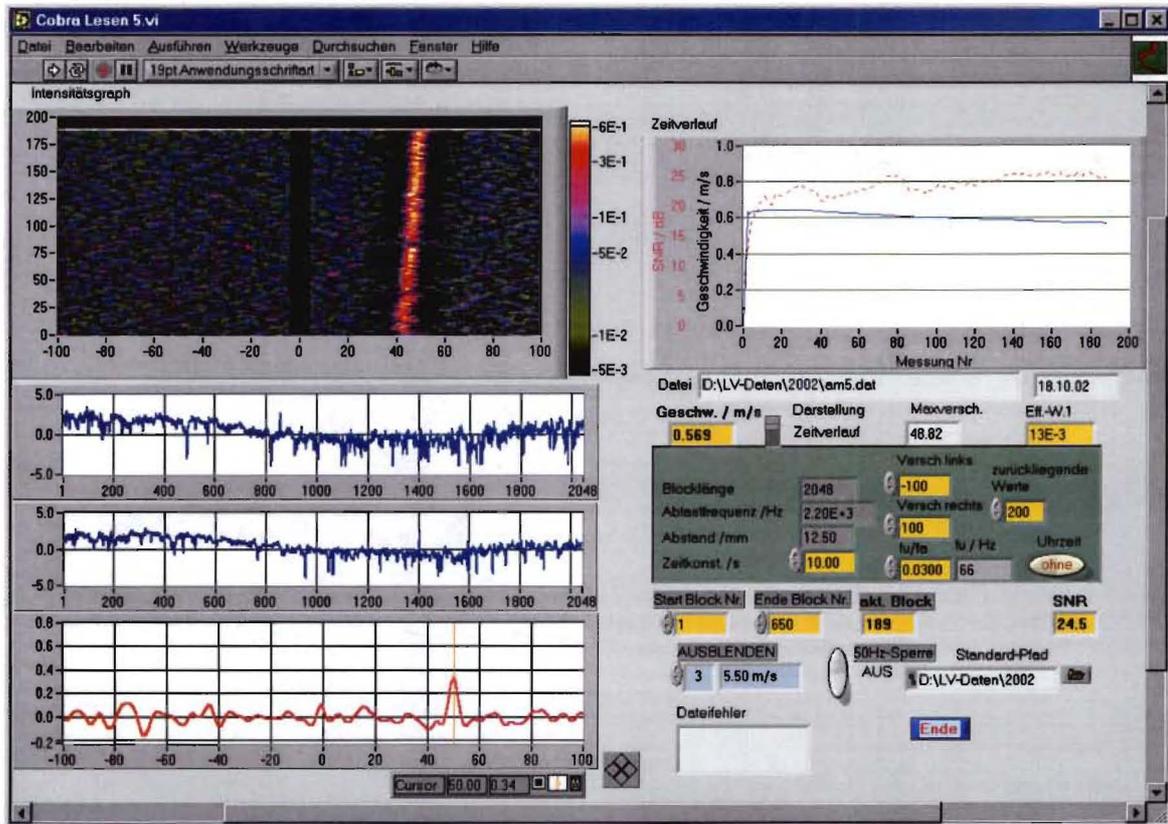


Abb. 29: Messung KA Loddenbach 5

Bei der Messung Abb. 29 wurde probeweise die Abtastfrequenz von bisher 1300 Hz auf einen Wert von 2200 Hz angehoben. Dadurch verringert sich die Integrationszeit für die Bildung einer einzelnen KKF im Verhältnis der Abtastfrequenzen. Außerdem ist die räumliche Auflösung entsprechend größer. Alle anderen Parameter blieben unverändert. Man erkennt keinen signifikanten Unterschied zu den vorherigen Messungen.

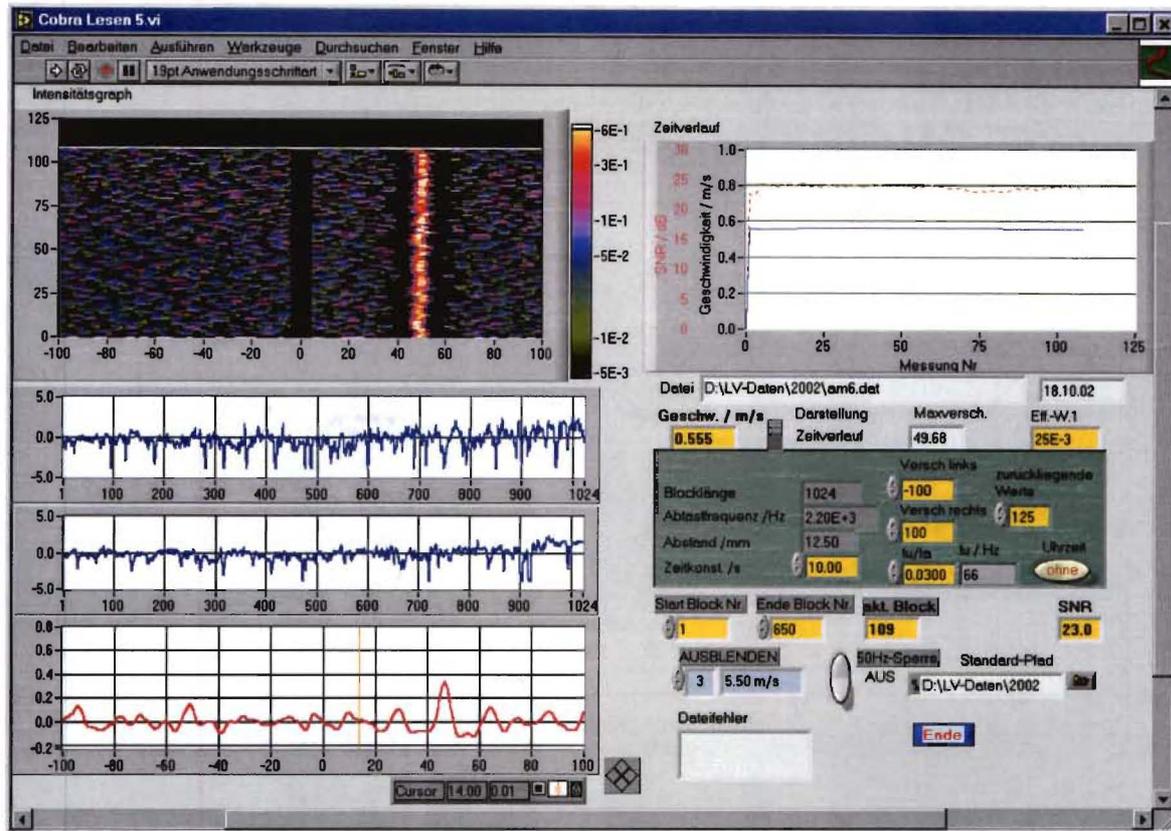


Abb. 30: Messung KA Loddenbach 6

Bei der Messung Abb. 30 wurde mit einer Blocklänge von 1024 statt wie bisher 2048 gearbeitet. Dadurch verringert sich die Integrationszeit um die Hälfte. Das Ergebnis unterscheidet sich kaum von den vorherigen. Der Korrelationsgrad liegt jedoch mit etwa 0,45 im Mittel etwas höher als bei den Messungen mit längerer Integrationszeit. Die nachfolgenden Messungen (Abb. 31 bis Abb. 33) zeigen weitere Ergebnisse mit den ursprünglich verwendeten Parametern. Auch hier zeigt sich ein recht hoher Korrelationsgrad von etwa 0,3 bis 0,6.

Fazit: Alle im Zulauf der Kläranlage durchgeführten Messungen haben ausgezeichnete Ergebnisse geliefert.

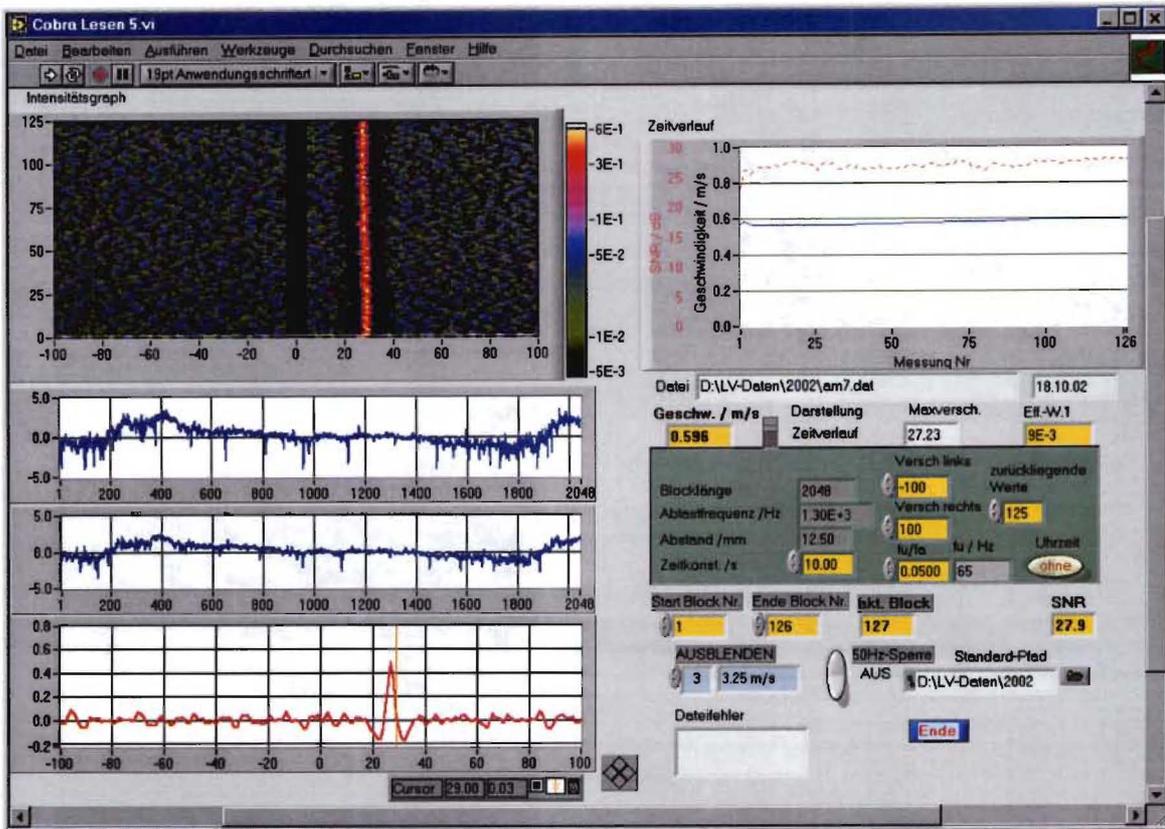


Abb. 31: Messung KA Loddenbach 7

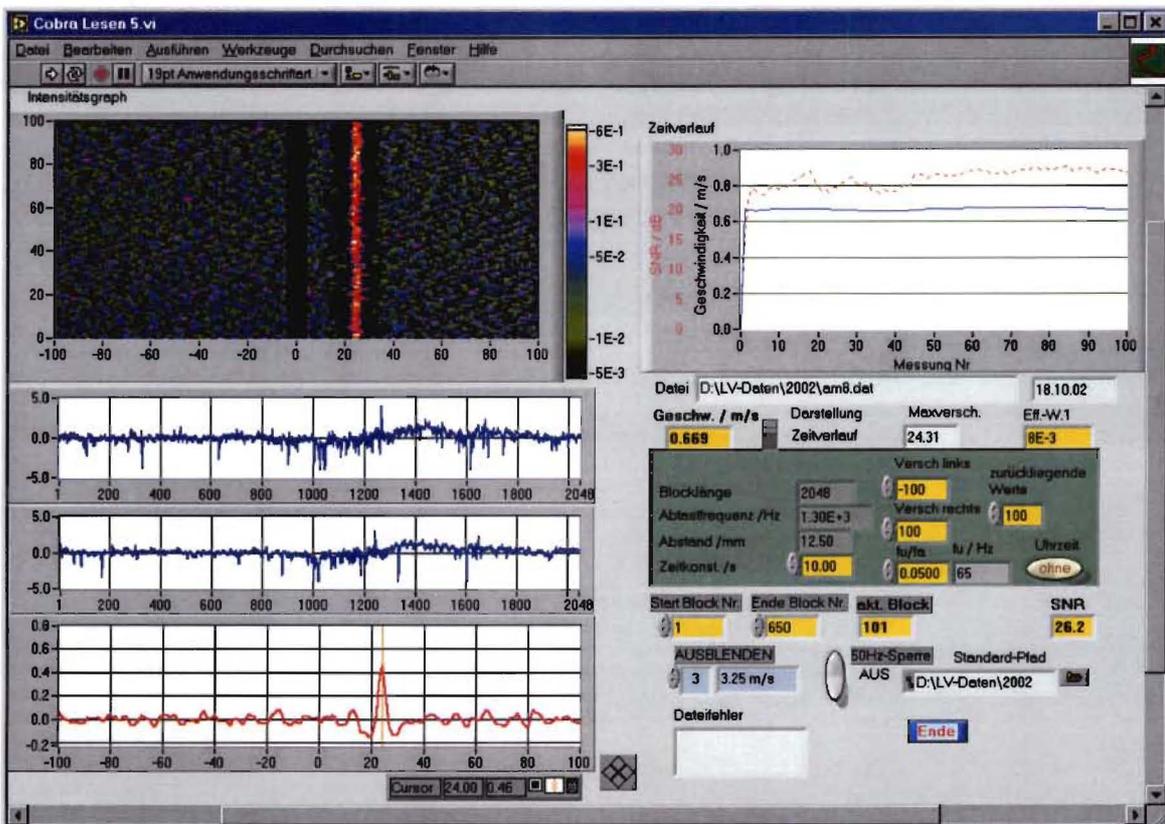


Abb. 32: Messung KA Loddenbach 8

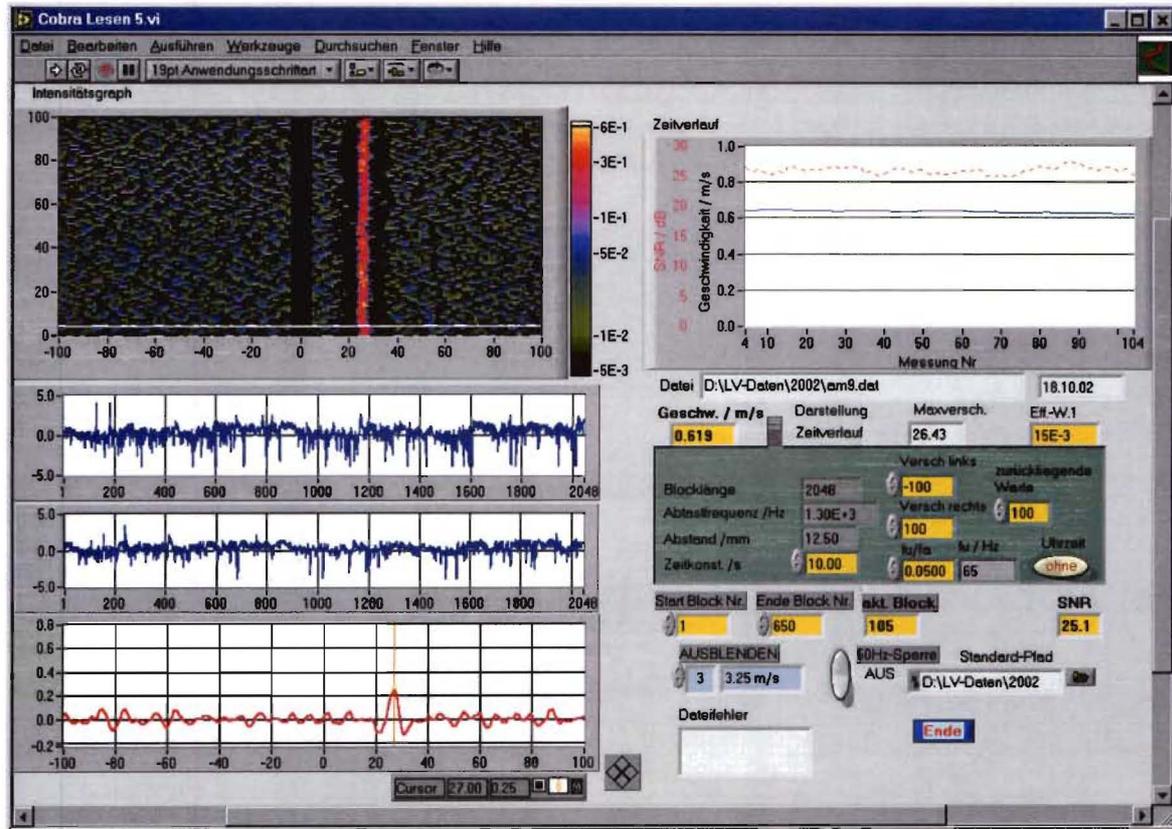


Abb. 33: Messung KA Loddnbach 9



6.4. Messungen im Auslauf der Kläranlage Warendorf

Um zu testen, ob das Verfahren auch bei relativ klarem Wasser Ergebnisse liefert, wurde eine Kläranlage mit frei



Abb. 34: Auslauf der Kläranlage Warendorf

zugänglichem Auslauf und geeigneten Strömungsverhältnissen gesucht.

Bei der Kläranlage Warendorf wird das geklärte Abwasser über ein Wasserrad der Ems zugeführt. Der Zulaufkanal des Wasserrads ist halbwegs zugänglich. Der Gerinnequerschnitt ist rechteckförmig. Das geklärte Abwasser strömt von unten ein, so dass bei stärkerem Durchfluss Wirbel entstehen. Abb. 34 zeigt den Messort bei

abgeschaltetem Auslauf, in Abb. 35 ist das Gerinne bei starkem Durchfluss zu sehen.



Abb. 35: Auslauf bei hohem Durchfluss



Abb. 36: Messung am Auslauf der KA Warendorf

Abb. 36 zeigt den in das Gerinne eingebrachten Schwimmer bei den Messungen. Man erkennt bei genauem Hinsehen, dass am Bug des Schwimmers starke Wirbel auftreten. Bedingt durch die nicht optimierte Formgebung wurde der vordere Teil des Schwimmers teilweise unter Wasser gedrückt. Während der eigentlichen Messung wurde versucht, dieses Verhalten durch Anpassung des Anstellwinkels des Halteseils auszugleichen. Außerdem konnte beobachtet werden, dass die Strömungsrichtung am Messort

Schwankungen aufwies, die durch das von unten erfolgende Einströmen des Wassers in das Gerinne verursacht wurden. Die Messergebnisse (Abb. 37) zeigen ein weniger ausgeprägtes Maximum der Korrelationsfunktion, sie sind in ihrer Qualität schlechter als die Ergebnisse der Messungen im Zulauf der KA Loddenbach. Das Signal-Stör-Verhältnis des dynamischen Histogramms liegt zwischen 5 dB und 10 dB. Dies ist nicht auf die geringe Menge von Streupartikeln im geklärten Abwasser zurückzuführen, wie man aus den in Abb. 37 gezeigten Zeitverläufen der beiden Messsignale gut erkennen kann. Ursache ist die erheblich stärkere Wirbelbildung. Es stellt sich die Frage, warum bei den Messungen in der Kläranlage Loddenbach solche Wirbel nicht aufgetreten sind, obwohl die Strömungsgeschwindigkeit in beiden Fällen bei ca. 0,5 bis 0,8 m/s lag. Ein Grund hierfür ist darin zu sehen, dass das Gerinne der Kläranlage Loddenbach kaum breiter als der Schwimmer ist und außerdem raue Betonwände aufweist. Dadurch ergab sich bei den Messungen eine wesentlich niedrigere Strömungsgeschwindigkeit an den beiden Schwimmkörpern. Das Gerinne der Kläranlage Warendorf ist jedoch breiter und besitzt glatte Wände, daher wirkte eine höhere Strömungsgeschwindigkeit auf die beiden Schwimmkörper ein.

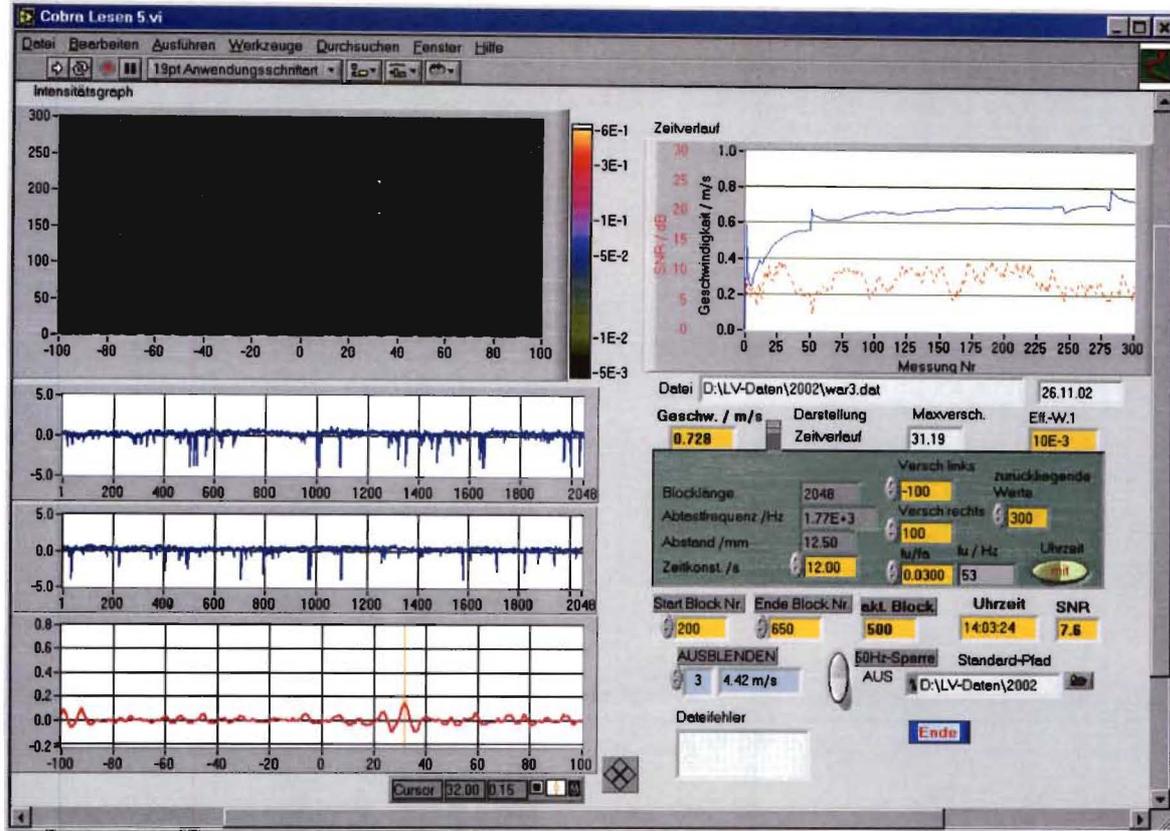


Abb. 37: Messung KA Warendorf (Auslauf) 1

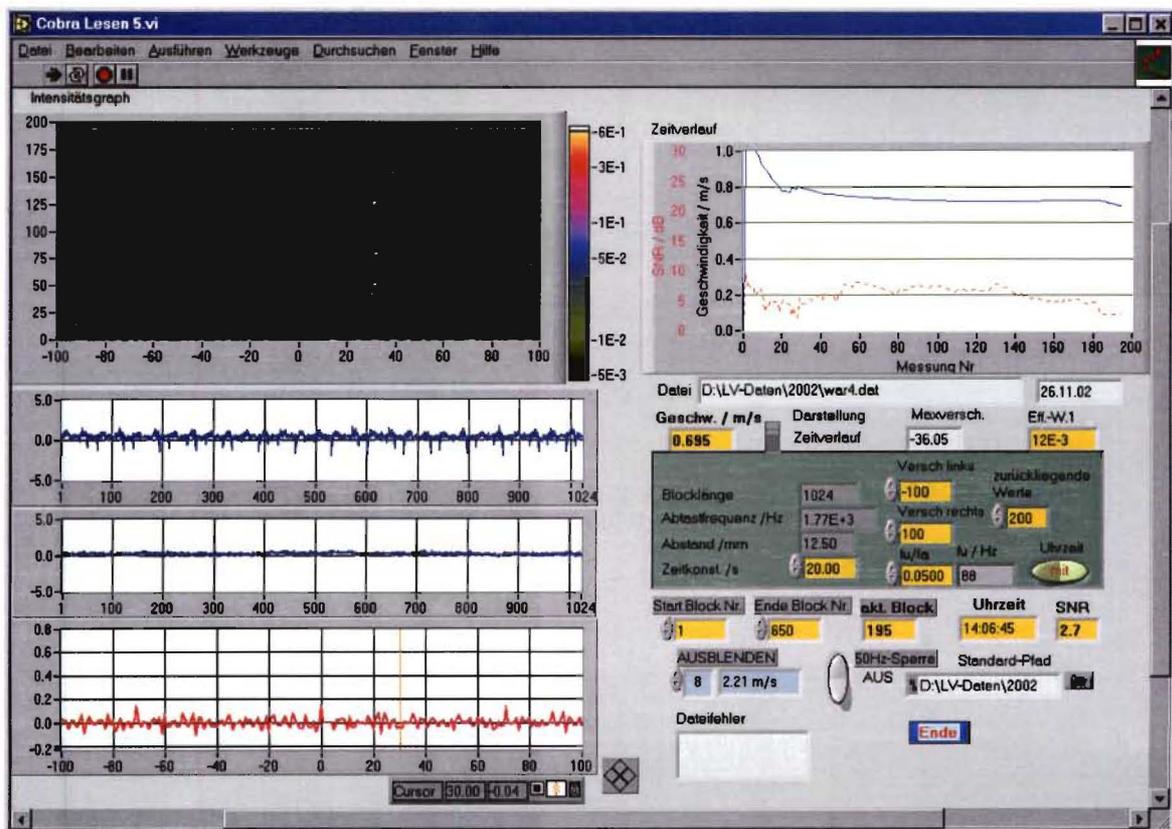


Abb. 38: Messung KA Warendorf (Auslauf) 2



Fazit: Die etwas schlechteren Ergebnisse bei den Messungen im Auslauf sind nicht auf das hier untersuchte Messverfahren sondern auf die nicht optimierten Schwimmer in Verbindung mit den etwas schwierigen Strömungsverhältnissen am Messort zurückzuführen.



7. Fazit und Ausblick

7.1. Zusammenfassung des Ergebnisses und mögliche Verbesserungen

Es konnte gezeigt werden, dass das Korrelationsverfahren zur Messung der Abwassermenge grundsätzlich geeignet ist. Dies gilt sowohl für die Messung im Zulauf als auch im Auslauf. Dabei sind folgende positiven Eigenschaften hervorzuheben:

- Berührungslose Messung
- Großer Dynamikbereich
- Hohe Genauigkeit der Messung der Strömungsgeschwindigkeit und des Durchflusses
- Variabler Messquerschnitt

Die zu Beginn des Projektes genannte Zielvorstellung „... ohne größere bauliche Eingriffe“ messen zu können, muss allerdings relativiert werden. Zur Messung ist auch beim Korrelationsverfahren eine halbwegs gleichgerichtete, zur Messanordnung parallele Strömung, frei von großvolumigen Wirbeln, erforderlich. Um dies zu erreichen, sollte das Gerinne über eine Strecke von etwa fünf- bis zehnfacher Gerinnebreite gerade und ohne Querschnittsveränderung ausgeführt sein. In einer für den Dauerbetrieb geeigneten Ausführung sollte anstelle des Schwimmers eine automatische Höhennachführung verwendet werden (Abb. 39). Das vollständige Gerät wird dabei mit Hilfe einer Traverse am oberen Rand des Gerinnes befestigt. Eine Parallelführung ermöglicht die Höhenverstellung in einem weiten Bereich. Mit einem Abstandssensor (z. B. Ultraschall) wird eine eventuelle Abweichung vom Sollwert dem Antrieb der Höhenverstellung als Regelgröße zugeführt. Die aktuelle Füllhöhe wird mit Hilfe eines Winkelcodierers gemessen. Die Messfehler der Abstandsmessung sind sehr gering, da auf einen konstanten Abstand Sensorgehäuse – Oberfläche des Wassers geregelt wird. Winkelcodierer weisen eine hohe Messgenauigkeit auf, so dass auch die jeweils aktuelle Strömungsquerschnittsfläche recht genau bestimmt werden kann. Das tatsächliche Strömungsprofil über den Querschnitt wird mit Hilfe eines Modells, in das die Gerinneabmessungen und die Beschaffenheit der Begrenzungsflächen eingeht, berechnet.

Neben dem Antrieb für die Höhenverstellung und den Vorverstärkern ist dann auch die weitere Analog-Signalverarbeitung und die Regelelektronik im Sensorgehäuse unterzubringen.

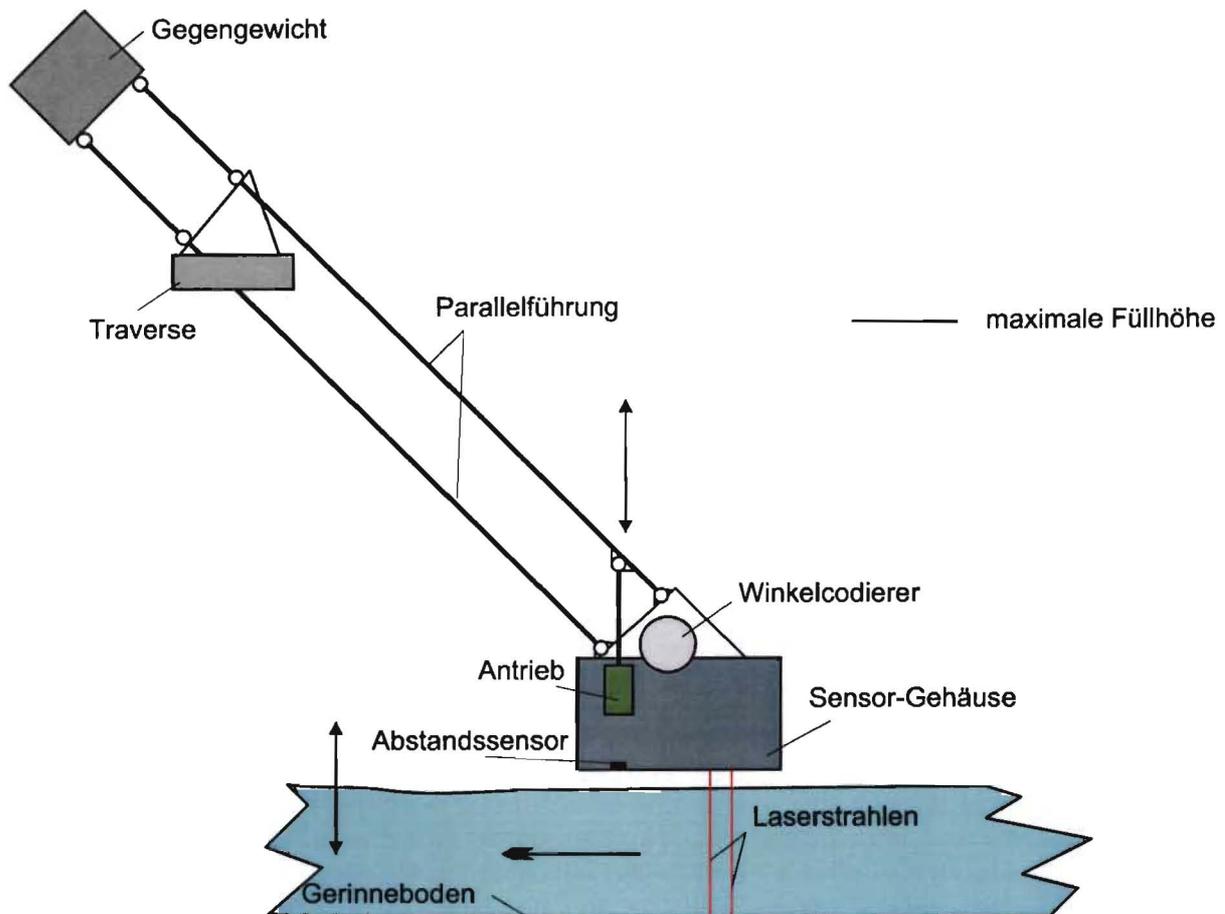


Abb. 39: Vorschlag für automatische Höhennachführung

Als abschließender Arbeitspunkt des vorliegenden Projektes war ein Expertengespräch vorgesehen. Dieses Expertengespräch hat aus terminlichen Gründen leider noch nicht stattgefunden, so dass die sicherlich sehr informativen Ergebnisse dieses Gesprächs nicht in diesen Abschlussbericht eingearbeitet werden konnten.

7.2. Ökologische und ökonomische Bilanzierung

Um eine ökologisch wirksame Abwasserwirtschaft zu ermöglichen, muss unter anderem möglichst genau bekannt sein wie groß das jeweilige Abwasseraufkommen ist (Lit 8). Hierbei sind besonders die räumliche Verteilung (möglichst viele Messstellen) und der genaue zeitliche Verlauf des Durchflusses von Interesse. Bisher wird in den meisten Klärwerken lediglich das geklärte Abwasser mengenmäßig bestimmt. Diese Messung besitzt jedoch den Nachteil, dass der zeitliche Verlauf des Durchflusses durch den Klärwerksprozess gepuffert ist. Belastungsspitzen werden auf diese Weise geglättet. Um eine bessere Ausnutzung der Klärwerkskapazität und Leitungssysteme sicherzustellen, ist auch eine Messung am Zulauf wünschenswert. Das gleiche gilt für Direkteinleiter. Wegen des an dieser Stelle sehr stark schwankenden Aufkommens muss das eingesetzte Messgerät eine sehr hohe Dynamik besitzen und sollte unabhängig von der Beschaffenheit des Abwassers sein. Das vorgestellte Verfahren weist diese Eigenschaften auf. Es ist daher möglich, durch Einsatz des untersuchten Verfahrens folgende ökologischen und ökonomischen Vorteile zu erzielen:

- Verbesserte Kontrolle und Optimierung des Klärwerksprozesses
- Vertiefte Kenntnis des zeitlichen Verlaufs des Abwasseraufkommens
- Messung des Durchflusses bei Direkteinleitern mit stark schwankendem Aufkommen
- Messung des Durchflusses an geeigneten Stellen im Kanalsystem und dadurch ermöglichte Optimierung von Baumaßnahmen
- Messung des Durchflusses bei unterschiedlichen Abflussarten (Nachtabfluss, Trockenwetterabfluss, etc.)
- Wirtschaftlichere Dimensionierung von Abwasseranlagen (Investitionskosten, Betriebskosten)



Da bei dem Korrelationsverfahren keine exotische Technik zur Anwendung kommt, dürfte der Herstellungspreis eines Gerätes nach dem vorgeschlagenen Verfahren vergleichbar zu den bekannten Messgeräten sein. Der Aufwand für verbesserte Messmöglichkeiten lohnt sich unbedingt, da hierdurch genauere, objektive Grundlagen für eine wirtschaftliche und ökonomische Planung geschaffen werden.

7.3. Maßnahmen zur Verbreitung des Vorhabensergebnisses

Die Ergebnisse wurden gezielt vorgestellt

- Einigen Anwendern (Klärwerke)
- Fertigungs- und Vertriebsfirmen (Jüke Systemtechnik Altenberge, Axel Zangenberg Messsysteme)

Veröffentlichungen:

- Veröffentlichung im Internet über Homepage FH Münster
- Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift (voraussichtlich in „tm Technisches Messen“)
- Daneben ist die Vorstellung des Verfahrens auf einer Messe / Fachausstellung geplant.

Danksagung

Die Phase 4 des vorliegenden Projektes musste mit einem recht kleinen Budget auskommen. Die erzielten Ergebnisse wären ohne den engagierten und teilweise nicht finanziell abgoltene Einsatz vieler Beteiligter nicht zustande gekommen. Besonders zu erwähnen ist die Anregung zum Projekt und die Unterstützung bei der Durchführung durch Herrn Dr. H.-J. Siebeneck, der Einsatz des Diplomanden Dipl.-Ing. G. Wagner und der am Projekt beteiligten Mitarbeiter der Firma Jüke Systemtechnik und der Fachhochschule Münster. Allen Beteiligten und natürlich nicht zuletzt auch der Deutschen Bundesstiftung Umwelt sei hier besonderer Dank ausgesprochen.



8. Literaturhinweise

Lit 1: Abschlussberichte Phase 1-3 des Projektes Entwicklung eines Verfahrens zur Messung der Abwassermenge in teilgefüllten Gerinnen und Freispiegelleitungen

Lit 2: M. S. Beck, Correlation in instruments: crosscorrelation flowmeters, J.Phys. E: Sci. Instrum., Vol 14, 1981

Lit 3: F. Mesch, Geschwindigkeits- und Durchflussmessung mit Korrelationsverfahren, Regelungstechnische Praxis 24, Jahrg. 1982, H. 3

Lit 4: J. Hoffmann, Taschenbuch der Messtechnik, Carl Hanser Verlag, 1998, pp.179-180

Lit 5: Patentschrift DE 198 20 8490C 2

Lit 6: G. Wagner, Entwicklung einer Anlage zur berührungslosen Messung der Durchflussmenge in offenen Gerinnen, Diplomarbeit an der Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, 2002

Lit 7: R. Jamal, P. Krauss, LabView das Grunlagenbuch, Prentice Hall, 1998

Lit 8: J. Strauch, Durchflussmessung in Kanalisationsbauwerken, IKT-eNewsletters, August 2002