

Fakultät für Physik und Astronomie

Ruprecht–Karls–Universität Heidelberg

Diplomarbeit
im Studiengang Physik

vorgelegt von
Christoph Maier
aus Hamburg

Dezember 1995

Aufbau einer aktiven Bildnachführung zur Visualisierung von Wasserströmungen mit Tracer teilchen

Die Diplomarbeit wurde ausgeführt am
Interdisziplinären Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen
und am
Institut für Umweltphysik
unter der Betreuung von
Herrn Prof. Dr. Bernd Jähne

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt einen Meßaufbau zur Untersuchung von Strömungen unterhalb der wellenbewegten Wasseroberfläche mit Bildnachführung. Dazu werden im Wasser suspen-dierte Polystyrolkugelchen in einem dünnen Lichtschnitt parallel zur Hauptströmungsrichtung sichtbar gemacht und von einer CCD-Kamera aus einer Richtung senkrecht zum Lichtschnitt aufgenommen. Mit einem von [Hering 1996] entwickelten Analyseverfahren werden die Trajek-torien der Tracerteilchen mittels digitaler Bildfolgenanalyse bestimmt.

Zur Erweiterung des effektiven Beobachtungsfeldes wird die Blickrichtung der Kamera über Galvanometerspiegel der Strömung zweidimensional nachgeführt.

Über ein Korrelationsverfahren wird dazu die mittlere Geschwindigkeit der Strömung im Blick-feld der Kamera in *Echtzeit* bestimmt und mit Hilfe eines linearen digitalen Reglers in ein Steuersignal für die Umlenkspiegel verarbeitet. Korrelationsverfahren und Regelung sind auf ei-nem handelsüblichen Pentium-PC implementiert. Durch die Zerlegung der Nachführung in zwei eindimensionale Regelkreise erfolgt die Berechnung der Spiegelposition aus der Bildinformation innerhalb einer Halbbildauastzeit der Kamera von 20 ms.

Für die Zurücktransformation der relativen Position der aufgenommenen Tracerteilchen im Ka-merabild in die Position in der Ebene des Lichtschnitts wird ein auf Strahlverfolgung basierender Algorithmus sowie ein darauf beruhendes Verfahren zur geometrischen Eichung angegeben.

Die Funktion der Nachführung wird an ersten Messungen verifiziert.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
1 Problemstellung	6
1.1 Die Luft–Wasser–Grenzschicht	6
1.2 Messungen an der Luft–Wasser–Grenzschicht mit Bildverarbeitungsmethoden	6
1.3 Bildnachführung	7
2 Zur Theorie von Reglern	8
2.1 Grundbegriffe	8
2.1.1 Signale	9
2.1.2 Filter	9
2.2 Lineare Systemtheorie	10
2.2.1 Linearität	10
2.2.2 Impulsantwort	10
2.2.3 Rückkopplung	10
2.2.4 Kausalität	12
2.2.5 Lineare Transformationen	12
2.2.6 Übertragungsfunktion	14
2.2.7 Stabilität	14
3 Aufbau	16
3.1 Wind–Wellen–Kanal	16
3.2 Bildaufnahmesystem	16
3.2.1 Beleuchtung	17
3.2.2 Kamera	18
3.2.3 Framegrabber	19
3.2.4 PC	20
3.2.5 Ausgabekarte	20
3.2.6 Umlenkspiegel	20
4 Das Nachführungsverfahren	22
4.1 Anforderungen an den Nachführungsalgorithmus	22
4.2 Das Verfahren zur Verschiebungsbestimmung	23
4.2.1 Bildaufnahme	23
4.2.2 Korrelation	25
4.2.3 Bestimmung des Korrelationsmaximums	28
4.3 Rekursives Filter	31
4.3.1 Systemmodell der Nachführungseinheit	31
4.3.2 Tatsächliche Geschwindigkeit	31
4.3.3 Positionsschätzer	32

INHALTSVERZEICHNIS	5
4.3.4 Geschwindigkeitsschätzer	33
4.3.5 Dynamisches Verhalten des Systems	36
4.4 Ansteuerung der Umlenkspiegel	40
4.5 Implementierung	41
4.5.1 Rechenzeit	41
5 Messungen	43
5.1 Messung der Pixelgröße	43
5.2 Messung der Winkelskalen	44
5.3 Skalenmessung mit der Kreuzkorrelation	46
5.4 Zeitverhalten	50
5.4.1 Verifikation des Frequenzgangs	50
5.5 Geometrische Eichung	51
5.5.1 Verfahren zur Entzerrung von Aufnahmen	51
5.5.2 Abbildungsgleichungen für die Strahlverfolgung	52
5.5.3 Strahlverfolgung durch die optischen Komponenten	53
5.5.4 Parameteranpassung und Eichung	57
5.6 Strömungsmessungen	62
6 Zusammenfassung und Ausblick	69
Literaturverzeichnis	71

Kapitel 1

Problemstellung

1.1 Die Luft–Wasser–Grenzschicht

Die Erdoberfläche ist zu mehr als 70% mit Ozeanen bedeckt. Über die Grenzschicht zwischen Luft und Wasser stehen die Ozeane mit der Atmosphäre in Wechselwirkung; Stoffe können von der Luft ins Wasser übertragen und umgekehrt. Ein Stoff, dessen Transport durch die Grenzschicht zwischen Luft und Wasser von besonderem Interesse ist, ist beispielsweise Kohlendioxid. Die Konzentration dieses Gases in der Atmosphäre hat starken Einfluß auf das Klima der Erde. Seit der industriellen Revolution nimmt der CO₂-Gehalt der Atmosphäre stetig zu und es kommt zu einer Erhöhung der Durchschnittstemperatur auf der Erde. Die Weltmeere sind eine mächtige Senke für Kohlendioxid. In ihnen ist schon etwa zehnmal so viel CO₂ gelöst wie in der Atmosphäre, und auch das zusätzliche durch den Menschen erzeugte Kohlendioxid kann großteils absorbiert werden. Der Übergang des Kohlendioxids aus der Luft ins Wasser spielt daher eine entscheidende Rolle für die weitere Entwicklung des Weltklimas.

Entscheidend für die Transportgeschwindigkeit von Stoffen aus der Luft ins Wasser sind die Transportvorgänge durch die Grenzschicht. Innerhalb des Luft- und Wasservolumens sorgen turbulente Vorgänge für einen sehr effektiven Stofftransport. In einer nur Bruchteile eines Millimeters dicken *viskosen Grenzschicht* unmittelbar unter der Wasseroberfläche kann der Stofftransport nur durch Diffusion stattfinden. Der Transport durch die viskose Grenzschicht hängt seinerseits stark von durch Wind erzeugten Wellen an der Wasseroberfläche und der durch sie erzeugten Wasserströmungen unterhalb der Oberfläche ab. Die genauen Zusammenhänge zwischen den Strömungsverhältnissen unter der Wasseroberfläche und dem Stofftransport durch die Grenzschicht sind noch nicht verstanden und sind Gegenstand aktueller Forschung.

1.2 Messungen an der Luft–Wasser–Grenzschicht mit Bildverarbeitungsmethoden

Die Arbeitsgruppe Gasaustausch/Bildverarbeitung an der Universität Heidelberg untersucht die Vorgänge in der Grenzschicht mit Hilfe *digitaler Bildverarbeitung*. Bildverarbeitungsverfahren haben den Vorteil, *berührungsreie* Messungen mit hoher Ortsauflösung zu ermöglichen. Durch die Verwendung digitaler Bildaufnahme und -verarbeitung läßt sich zudem auch eine hohe zeitliche Auflösung von 50 Hz bis zu einigen hundert Hz erzielen.

In der Arbeitsgruppe kommen verschiedene Meßverfahren zum Einsatz:

Mit Reflexions- und Refraktionsverfahren wird die *Neigung* der Wasseroberfläche bestimmt [Lauer 1994], [Menzel 1995], [Waas 1992], [Klinke 1995]. [Jähne 1980] fand, daß die Transferschwindigkeit von Stoffen durch die Grenzschicht linear mit der mittleren quadratischen Neigung der Wasseroberfläche wächst.

1.3. BILDNACHFÜHRUNG

7

Mit Tracern, z. B. Fluoreszenzfarbstoffen [Münsterer 1993] oder Wärme [Reinelt 1994], [Haußecker 1995] werden Transportvorgänge an der Grenzschicht direkt visualisiert.

Durch brechende Wellen ins Wasser eingebauchte Luftblasen werden untersucht von [Geißler 1993], [Balschbach 1994].

Störungen unterhalb der Wasseroberfläche werden mit verschiedenen Tracern, wie Wasserstoffbläschen [Dieter 1994], Farbstofftröpfchen [Fachat 1995] oder festen Kunststoffteilchen [Hering 1992], [Hering 1996] visualisiert. Für die Strömungsvisualisierung gibt es zwei Verfahren, Particle Image Velocimetry und Particle Tracking Velocimetry.

Bei der Particle *Imaging* Velocimetry (PIV) wird die Bewegung kleiner Regionen im Bild durch Kreuzkorrelation aufeinanderfolgender Bilder bestimmt. Man erhält so ein Vektorfeld der Strömung. Aus dieser *Eulerschen* Darstellung der Strömung lassen sich Feldgrößen wie die Energiedichte oder die Wirbeldichte berechnen.

Die Particle *Tracking* Velocimetry (PTV) verfolgt die Bahnen einzelner Teilchen. Man erhält so die Trajektorien einzelner Volumenelemente, die *Lagrange'sche* Darstellung der Strömung. Von [Hering et al. 1995] wurde ein Verfahren entwickelt, das mit Mitteln der digitalen Bildfolgenanalyse die Trajektorien mehrerer hundert Partikel gleichzeitig bestimmen kann.

Zur Bildaufnahme bei allen diesen Verfahren werden verschiedene Typen elektronischer Kameras und digitale Bildaufnahmegeräte auf Basis des PC verwendet. Die digitalisierten Bilder werden zunächst aufgenommen und abgespeichert. Zu einem späteren Zeitpunkt wird die Bildinformation mit Verfahren der *digitalen Bildverarbeitung* analysiert.

1.3 Bildnachführung

Ein immer wieder auftretendes Problem bei den Meßmethoden ist, daß interessierende *kleinskalige* Vorgänge von größeren Bewegungen überlagert werden. Durch entsprechende optische Meßaufbauten kann *entweder* ein großer Bildausschnitt *oder* eine hohe Ortsauflösung erreicht werden. Bei einer gegebenen Bildgröße ist die Ortsauflösung durch die Anzahl der Pixel der verwendeten digitalen Kameras (zwischen 256×256 und 1024×1024) beschränkt.

Die stürmische Entwicklung der Rechenleistung von PCs ist inzwischen so weit fortgeschritten, daß daran gedacht werden kann, die Verarbeitung der Bilder parallel zu deren Aufnahme in *Echtzeit* mit einem mit Framegrabber ausgestatteten PC zu realisieren.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, mit den am Institut vorhandenen Standardkomponenten eine Bildverarbeitung und Regelung in Echtzeit zu implementieren und für die aktive Bildnachführung zu nutzen. Konkret sollte bei einer Vorrichtung zur zweidimensionalen Strömungsvisualisierung mit PTV am Heidelberger Wind-Wellen-Kanal eine Nachführung der Blickrichtung der Kamera implementiert werden, um das effektive Beobachtungsfeld zu vergrößern und Driftbewegungen sowie Orbitalbewegungen größerskaliger Wellen zu kompensieren.

Kapitel 2

Zur Theorie von Reglern

Die in dieser Arbeit entwickelten Echtzeit-Bildnachführung stellt ein Regelungsproblem dar. Kann die Regelung durch *lineare* Filteroperationen realisiert werden, steht mit den Methoden der linearen Signaltheorie ein mächtiges Werkzeug zum Entwurf und zur Analyse von Regelungen zur Verfügung.

In diesem Kapitel werden nach der Einführung einiger Grundbegriffe Methoden zur Untersuchung linearer Systeme mit Hilfe linearer Transformationen vorgestellt.

2.1 Grundbegriffe

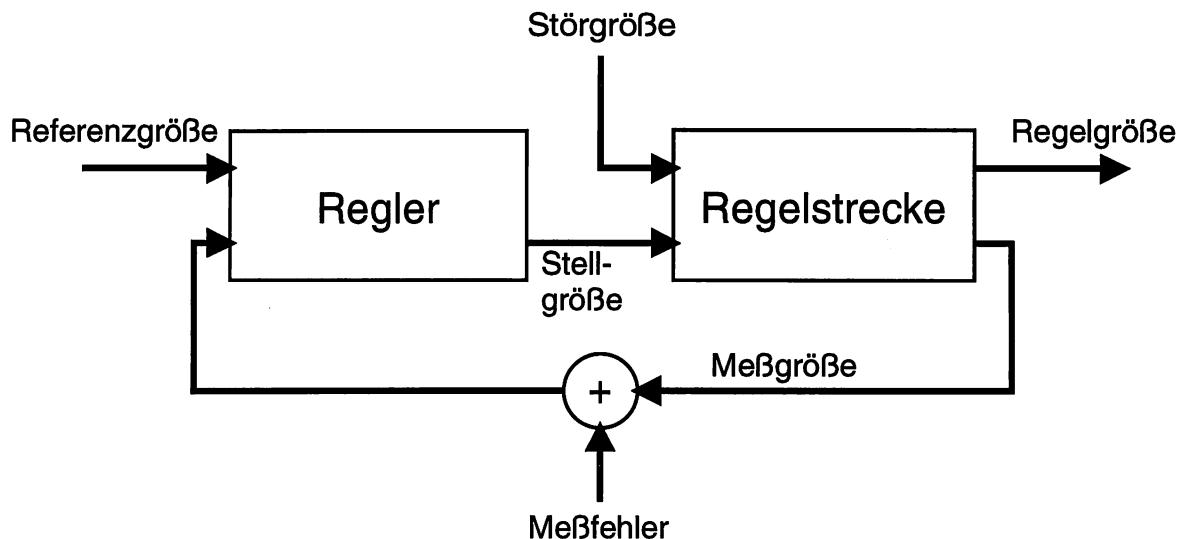


Abbildung 2.1: Blockdiagramm eines Reglers mit Rückkopplung

Bei dem in dieser Arbeit beschriebenen Aufbau handelt es sich um ein *Regelungsproblem*. Im allgemeinen sind Regelungen folgendermaßen aufgebaut:

Am Ausgang eines physikalischen Systems, der *Regelstrecke*, soll eine *Regelgröße* als Funktion einer *Referenzgröße* generiert werden. Der Einfluß von ebenfalls auf die Regelstrecke wirkenden *Störgrößen* soll unterdrückt werden.

Dazu erzeugt der *Regler* ein Eingangssignal für die Regelstrecke, die *Stellgröße*.

Bei einer Regelung mit *Rückkopplung* erhält der Regler als Eingangssignal zusätzlich zur Referenzgröße eine *Meßgröße*, die Information über den Zustand der Regelstrecke bereitstellt.

2.1. GRUNDBEGRIFFE

9

Ein typisches Beispiel für eine Regelung nach Abb. 2.1 ist die in Abschnitt 3.2.6 beschriebene *Servosteuerung für Galvanometerspiegel*:

Regelstrecke ist der Umlenkspiegel mit Galvanometer,

Regler ist die Steuereinheit.

Referenzgröße ist der gewünschte Stellwinkel des Spiegels,

Regelgröße dessen tatsächliche Winkelstellung.

Stellgröße ist der durch die Spule des Galvanometers fließende Strom.

Meßgröße ist die *Kapazität* eines präzisen Drehkondensators auf der Drehachse des Spiegels.

Störgrößen sind nicht vom Galvanometer erzeugte Drehmomente, die auf den Umlenkspiegel einwirken.

Die Zuordnung der Größen bei der im folgenden vorgestellten Bewegungsnachführung gestaltet sich etwas komplizierter, weil die eigentliche Referenzgröße, die tatsächliche Position der verfolgten Tracerteilchen, nicht direkt am Regler zur Verfügung steht.

Auf die Modellierung dieses Systems wird im Abschnitt 4.3.1 ausführlich eingegangen.

2.1.1 Signale

Als *Signale* bezeichnet man die Darstellung zeitlich veränderlicher Größen.

Man unterscheidet zwischen *zeitlich kontinuierlichen* und *zeitlich diskreten* Signalen.

Zeitlich kontinuierliche Signale sind für jeden Zeitpunkt definiert. Ein makroskopisches physikalisches System wird durch zeitlich kontinuierliche Signale wie beispielsweise Ort und Geschwindigkeit eines Körpers beschrieben.

Zeitlich diskrete Signale sind nur zu bestimmten Zeitpunkten definiert. Der Zeitraum zwischen zwei solchen Zeitpunkten heißt *Abtastintervall*, die entsprechende Frequenz *Abtastrate*. Sollen kontinuierliche Größen als zeitlich diskrete Signale dargestellt werden, müssen sie zuerst *abgetastet* werden. Umgekehrt muß man ein zeitlich kontinuierliches Signal aus diskreten Werten *rekonstruieren*. Das *Abtasttheorem* besagt, daß diese Umwandlungen ohne Informationsverlust durchgeführt werden können, wenn das kontinuierliche Signal *bandbegrenzt* ist und keine höheren Frequenzkomponenten als die halbe Abtastrate enthält [Bracewell 1965].

Entsprechend unterscheidet man auch zwischen Signalen mit diskretem und kontinuierlichem Wertebereich. Will man eine kontinuierliche physikalische Größe als diskretes Signal darstellen, muß man diese *digitalisieren*, d. h. auf eine endliche Menge möglicher Werte abbilden.

Ein Beispiel für ein zeitlich diskretes Signal mit kontinuierlichem Wertebereich ist die in einem Analogschieberegister (CCD) von Kameras gespeicherte Ladungsinformation.

2.1.2 Filter

Ein *Filter* ist ein System, das in Abhängigkeit von Eingangssignalen ein oder mehrere Ausgangssignale erzeugt. So ist beispielsweise die in Abb. 2.1 dargestellte Regelung ein Filter; Regelstrecke und Regler können aber auch jeweils getrennt als Filter betrachtet werden.

Je nach Realisierung unterscheidet man zwischen *analogen* und *digitalen* Filtern.

Analoge Filter verarbeiten kontinuierliche Signale. Analog Filter und Regelungen werden durch lineare Bauelemente wie zum Beispiel Operationsverstärker realisiert. Beispiele für analoge Regelungen, die als analoges Filter beschrieben werden können, sind *Servos* wie die in Abschnitt 3.2.6 erwähnte Steuerung für die Umlenkspiegel oder die in verschiedenen Meßgeräten der Arbeitsgruppe ([Haußecker 1996], [Dieter]) verwendeten Servomotoren für RC-Modelle.

Digitale Filter arbeiten mit diskretisierten Signalen. Der große Vorteil digitaler Filter ist, daß sie mit Digitalrechnern berechnet werden können. Dadurch lassen sich relativ unaufwendig auch sehr komplexe Filteroperationen realisieren.

Das Verhältnis von Ausgangs- zu Eingangssignal eines Filters wird als Übertragungsfunktion bezeichnet. Ein weiteres wichtiges Merkmal eines Filters ist das *Einschwingverhalten*, die zeitliche Entwicklung des Ausgangssignals ausgehend von einem im allgemeinen beliebigen Anfangszustand des Filters.

2.2 Lineare Systemtheorie

2.2.1 Linearität

Gilt für die Übertragungsfunktion T eines Filters das *Superpositionsprinzip*, d. h. für Eingangssignale $u(t)$ und $v(t)$ und die Konstanten a und b gilt

$$T[a u(t) + b v(t)] = a T[u(t)] + b T[v(t)] , \quad (2.1)$$

heißt das Filter *linear*.

Diese Bedingung wird beispielsweise von den linearen Operatoren der Differentiation und Integration erfüllt.

2.2.2 Impulsantwort

Ist für ein Filter die Linearitätsbedingung 2.1 erfüllt, kann man ein Eingangssignal $u(t)$ in eine Linearkombination von Einheitsimpulsen $\delta(t)$ zerlegen und das Ausgangssignal als Linearkombination aus den Übertragungsfunktionen von Einheitsimpulsen, der *Impulsantwort* $h(t)$ des Filters, gewinnen:

$$T[u(t)] = T \left[\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - \tau) u(\tau) d\tau \right] = \int_{-\infty}^{\infty} T_{\tau}[\delta(t - \tau)] u(\tau) d\tau =: \int_{-\infty}^{\infty} h_{\tau}(t - \tau) u(\tau) d\tau . \quad (2.2)$$

Das Ausgangssignal eines Filters ist also die *Faltung* des Eingangssignals mit der Impulsantwort des Filters. Der Index τ an der Übertragungsfunktion weist darauf hin, daß Übertragungsfunktion und Impulsantwort im allgemeinen zeitlich veränderlich sind. Ist die Impulsantwort $h(t)$ unabhängig vom Zeitpunkt des Eingangsimpulses, heißt das Filter *verschiebungsinvariant*.

Die Übertragungsfunktion eines Filters ist somit durch dessen Impulsantwort vollständig bestimmt.

2.2.3 Rückkopplung

Es gibt zwei Klassen linearer Filter: Filter ohne Rückkopplung und mit Rückkopplung.



Abbildung 2.2: Blockdiagramm eines Filters ohne Rückkopplung

Filter ohne Rückkopplung

Bei dieser Art linearer Filter wird nur das Eingangssignal $u(t)$ mit einer Sequenz $f(t)$ gefaltet (siehe Abb. 2.2); für das Ausgangssignal $x(t)$ gilt:

$$x(t) := T[u(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t - \tau) u(\tau) d\tau. \quad (2.3)$$

Ein Filter ohne Rückkopplung kann ohne ein anliegendes Eingangssignal kein Ausgangssignal erzeugen. Hat der Faltungskern $f(t)$ einen endlichen *Träger*, nimmt also nur in einem endlichen Intervall Werte ungleich 0 an, ist auch die Dauer der Impulsantwort des Filters endlich, weil die Impulsantwort mit dem Faltungskern identisch ist. Man bezeichnet diese Art von Filtern deshalb auch als *FIR-* (*finite impulse response*) Filter.

Filter mit Rückkopplung

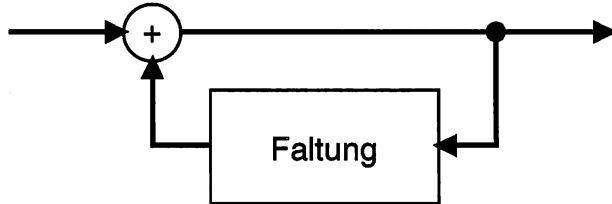


Abbildung 2.3: Blockdiagramm eines „all poles“ Filters mit Rückkopplung

Bei dieser Art von Filtern wird das *Ausgangssignal* $x(t)$ mit einer Sequenz $g(t)$ gefaltet und durch *Rückkopplung* zum Eingangssignal $u(t)$ hinzugeaddiert (siehe Abb. 2.3):

$$x(t) = u(t) + \int_{-\infty}^{\infty} g(t - \tau) x(\tau) d\tau. \quad (2.4)$$

Durch die Rückkopplung ist das Filter zu nicht verschwindenden Ausgangssignalen ohne anliegendes Eingangssignal, sogenannten *Eigenschwingungen*, in der Lage. Auch bei endlichem Träger des Faltungskerns $g(t)$ kann die Dauer der Impulsantwort des Filters unendlich lang sein.

Im allgemeinen kann dem rückgekoppelten Filter noch ein FIR-Filter vorgeschaltet sein (Abb. 2.4); für das Ausgangssignal gilt dann die Beziehung

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t - \theta) u(\theta) d\theta + \int_{-\infty}^{\infty} g(t - \tau) x(\tau) d\tau. \quad (2.5)$$

Diese Klasse linearer Filter wird als *autoregressive* oder *IIR-* (*infinite impulse response*) Filter bezeichnet.

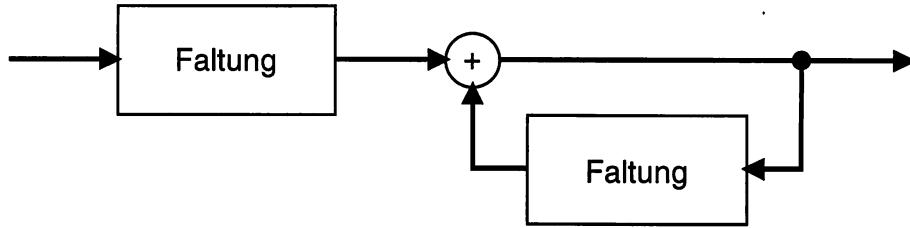


Abbildung 2.4: Blockdiagramm eines allgemeinen IIR–Filters mit Rückkopplung

2.2.4 Kausalität

Bei Regelungen ist es erforderlich, Signale in *Echtzeit* zu bearbeiten. Eine entscheidende Beschränkung bei der Realisierung von Filtern ist in diesem Fall die Bedingung der *Kausalität*: Die Werte, welche Signale in der Zukunft annehmen werden, sind nicht bekannt; für die Faltungskerne $f(t)$ und $g(t)$ des allgemeinen linearen Filters (2.5) gilt daher die Bedingung

$$f(t) = 0; g(t) = 0 \quad \text{für alle } t < 0. \quad (2.6)$$

2.2.5 Lineare Transformationen

Die Übertragungsfunktionen kontinuierlicher linearer Filter werden im allgemeinen durch Integrodifferentialgleichungen, die diskreter Filter durch Differenzengleichungen beschrieben.

Mit Hilfe *linearer Transformationen* können diese Gleichungen in algebraische Gleichungen umgewandelt werden.

Zum Einsatz kommen dabei die *Fouriertransformation* und deren Erweiterungen für den kontinuierlichen und den diskreten Fall, die *LaplaceTransformation* und die *z–Transformation*.

Fouriertransformation

Die Fouriertransformation entwickelt Signale nach der *Frequenz* ν :

$$\mathcal{F}[u](\nu) := \int_{-\infty}^{\infty} u(t) e^{-2\pi i \nu t} dt \quad (2.7)$$

Die Basisfunktionen $e^{-2\pi i \nu t}$ sind zueinander orthogonal; lineare Filter ändern also die Frequenz von Signalen nicht.

Für im Abtastintervall T definierte diskrete Signale lautet die *diskrete Fouriertransformation*

$$\mathcal{F}[u](\nu) := \sum_{n=-\infty}^{\infty} u_n \left(e^{2\pi i \nu T} \right)^{-n}. \quad (2.8)$$

Wegen der Beziehung $e^{2\pi i (\nu + \frac{1}{T}) T} = e^{2\pi i} e^{2\pi i \nu T}$ ist die diskrete Fouriertransformierte periodisch:

$$\mathcal{F}[u](\nu) = \mathcal{F}[u] \left(\nu \pm \frac{1}{T} \right). \quad (2.9)$$

Die Fouriertransformierte eignet sich vornehmlich zur Untersuchung des *Frequenzgangs*, d. h. des Amplitudenverhältnisses und der Phasenverschiebung als Funktion der Frequenz bei eingeschwungenen Systemen.

Laplacetransformation

Die *Laplacetransformation* ist die Erweiterung der Fouriertransformation zu *komplexen „Frequenzen“* s :

$$\mathcal{L}[u](s) := \int_{-\infty}^{\infty} u(t) e^{-st} dt . \quad (2.10)$$

Die Basisfunktionen kann man als *gedämpfte Schwingungen* $e^{-st} = e^{-\rho t} e^{-i\omega t}$ auffassen. Die Fouriertransformierte entspricht der Laplacetransformierten für rein komplexe $s = 2\pi i\nu$.

Für die Untersuchung von Einschwingvorgängen und kausalen Systemen gut geeignet ist die *halbseitige Laplacetransformation*

$$\mathcal{L}[u](s) := \int_0^{\infty} u(t) e^{-st} dt . \quad (2.11)$$

z -Transformation

Auf ähnliche Art und Weise verallgemeinert die *z -Transformation* die diskrete Fouriertransformation, indem $e^{2\pi i \nu T}$ in Gleichung 2.8 durch eine beliebige komplexe Zahl z ersetzt wird:

$$\mathcal{Z}[u](z) := \sum_{n=-\infty}^{\infty} u_n z^{-n} . \quad (2.12)$$

Die diskrete Fouriertransformierte entspricht der z -Transformation auf dem *Einheitskreis* $z = e^{-2\pi i \nu T}$.

Die Transformation der Übertragungsgleichungen linearer Filter in algebraische Gleichungen beruht auf zwei wichtigen Eigenschaften der oben angeführten Transformationen:

Verschiebungssatz

Der *Verschiebungssatz* besagt, daß die zeitliche Verschiebung eines Signals der Multiplikation der Transformierten mit einer Konstanten entspricht. Für die Fourier-, Laplace- und z -Transformation gelten:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}[u(t - t_0)](\nu) &= \int_{-\infty}^{\infty} u(t - t_0) e^{-2\pi i \nu t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau) e^{-2\pi i \nu \tau} e^{-2\pi i \nu t_0} d\tau = e^{-2\pi i \nu t_0} \mathcal{F}[u(t)](\nu) \\ \mathcal{L}[u(t - t_0)](s) &= \int_{-\infty}^{\infty} u(t - t_0) e^{-st} dt = \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau) e^{-s\tau} e^{-s t_0} d\tau = e^{-s t_0} \mathcal{L}[u(t)](s) \\ \mathcal{Z}[u_{n-m}](z) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} u_{n-m} z^{-n} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_k z^{-k} z^{-m} = z^{-m} \mathcal{Z}[u_n](z) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Bei kontinuierlichen Filtern führt auch die Transformation der Ableitung nach der Zeit

$$\mathcal{F}\left[\frac{du}{dt}\right](\nu) = 2\pi i \nu \mathcal{F}[u](\nu) ; \quad \mathcal{L}\left[\frac{du}{dt}\right](s) = s \mathcal{L}[u](s) \quad (2.14)$$

sowie der zeitlichen Integration

$$\mathcal{F}\left[\int_{-\infty}^t u(\tau) d\tau\right] = \frac{1}{2\pi i \nu} \mathcal{F}[u](\nu) ; \quad \mathcal{L}\left[\int_{-\infty}^t u(\tau) d\tau\right] = \frac{1}{s} \mathcal{L}[u](s) \quad (2.15)$$

auf eine Multiplikation.

Faltungssatz

Aus dem Verschiebungssatz folgt der *Faltungssatz*, demzufolge das Faltungsprodukt zweier Sequenzen $u \star v$ in das Produkt der Transformierten übergeht:

$$\begin{aligned}\mathcal{F}[u \star v](\nu) &= \int_{-\infty}^{\infty} dt e^{-2\pi i \nu t} \int_{-\infty}^{\infty} d\tau u(t - \tau) v(\tau) \stackrel{(2.13)}{=} \int_{-\infty}^{\infty} d\tau e^{-2\pi i \nu \tau} \mathcal{F}[v](\nu) = \mathcal{F}[v](\nu) \mathcal{F}[u](\nu) \\ \mathcal{L}[u \star v](s) &= \int_{-\infty}^{\infty} dt e^{-st} \int_{-\infty}^{\infty} d\tau u(t - \tau) v(\tau) \stackrel{(2.13)}{=} \int_{-\infty}^{\infty} d\tau e^{-s\tau} \mathcal{L}[v](s) = \mathcal{L}[v](s) \mathcal{L}[u](s) \quad (2.16) \\ \mathcal{Z}[u \star v](z) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} z^{-n} \sum_{m=-\infty}^{\infty} u_{n-m} v_m \stackrel{(2.13)}{=} \sum_{m=-\infty}^{\infty} v_m z^{-m} \mathcal{Z}[u](z) = \mathcal{Z}[v](z) \mathcal{Z}[u](z)\end{aligned}$$

2.2.6 Übertragungsfunktion

Die Beziehung zwischen Ausgangssignal $x(t)$ und Eingangssignal $u(t)$ lässt sich für ein lineares Filter allgemein durch Gleichung (2.5) ausdrücken.

Transformiert man die Signale und Faltungskerne, so lässt sich direkt das Verhältnis von Ausgangssignal zu Eingangssignal, die sogenannte *Übertragungsfunktion* T , angeben. Bei Anwendung der Laplacetransformation gilt beispielsweise:

$$\mathcal{L}[x](s) = \mathcal{L} \left[\int_{-\infty}^{\infty} f(t - \theta) u(\theta) d\theta + \int_{-\infty}^{\infty} g(t - \tau) x(\tau) d\tau \right] (s) \stackrel{(2.16)}{=} \mathcal{L}[f](s) \mathcal{L}[u](s) + \mathcal{L}[g](s) \mathcal{L}[x](s) \quad (2.17)$$

und folglich

$$T(s) := \frac{\mathcal{L}[x](s)}{\mathcal{L}[u](s)} = \frac{\mathcal{L}[f](s)}{1 - \mathcal{L}[g](s)} . \quad (2.18)$$

Die Faltungskerne digitaler Filter werden zu Polynomen transformiert; eine Sequenz $(f_m, f_{m+1}, \dots, f_n)$ wird zum Polynom $\sum_{k=m}^n f_k z^{-k}$. Die Übertragungsfunktion wird somit zur *rationalen* Funktion der komplexen Variablen z :

$$T(z) = \frac{\sum_{k=m}^n f_k z^{-k}}{1 - \sum_{l=p}^q g_l z^{-l}} . \quad (2.19)$$

Für einen aus *Differenzier-* und *Integriergliedern* aufgebauten analogen Regler erhält man wegen der Transformationsregeln (2.14) und (2.15) ebenfalls eine rationale Funktion der komplexen Variablen s .

Das Verhalten des Filters kann somit mit den Werkzeugen der komplexen Analysis [Fischer, Lieb 1992] untersucht werden.

2.2.7 Stabilität

Eine wichtige Bedingung an eine Regelung ist *Stabilität*:

die Regelung darf keine ungedämpften oder sogar anwachsenden *Eigenschwingungen* zeigen. Eigenschwingungen sind Ausgangssignale, die ohne anliegendes Eingangssignal erzeugt werden. Betrachtet man die transformierte Übertragungsfunktion, ist das Auftreten einer Eigenschwingung nur für Werte möglich, bei welchen die Übertragungsfunktion einen *Pol*, also eine Nullstelle im Nenner, aufweist.

Bei FIR-Filtern (siehe Abb. 2.2) hat die Übertragungsfunktion (2.19) den Nenner 1 und somit keine Pole. Systeme ohne Rückkopplung sind also auf jeden Fall stabil.

Die Übertragungsfunktion rückgekoppelter Systeme enthält Polstellen.

Für Stabilitätsbetrachtungen ist es zweckmäßig, die komplexen Ausdrücke z^n und e^{st} in Analogie zu $e^{2\pi i \nu t}$ als gedämpfte Schwingungen zu interpretieren:

$$z^n =: |z|^n e^{in \arg z} \quad \text{und} \quad e^{st} =: e^{\operatorname{Re}(s)t} e^{i\operatorname{Im}(s)t}. \quad (2.20)$$

Voraussetzung für die Stabilität des Systems ist, daß die Eigenschwingungen mit der Zeit abklingen. Daraus ergeben sich für die Lage der Pole stabiler Systeme folgende Bedingungen:

$$|z| < 1 \quad \text{im diskreten} \quad \text{und} \quad \operatorname{Re}(s) < 0 \quad \text{im kontinuierlichen Fall.} \quad (2.21)$$

Die Pole der z -transformierten Übertragungsfunktion diskreter Systeme müssen also *innerhalb des Einheitskreises*, diejenigen der Laplace-transformierten Übertragungsfunktion kontinuierlicher Systeme *in der linken Halbebene* der komplexen Zahlenebene liegen.

Der *Frequenzgang* des Filters, die Übertragungsfunktion in Fourierdarstellung, läßt sich aus der z -Transformierten durch Einsetzen von $z = e^{2\pi i \nu}$, aus der Laplacetransformierten durch Setzen von $s = 2\pi i \nu$ gewinnen.

Aus der Lage der Pole und Nullstellen der Übertragungsfunktion lassen sich direkt qualitative Aussagen über den Frequenzgang des Filters ableiten: ein Pol in der Nähe des Einheitskreises bzw. der imaginären Achse bewirkt die Anhebung der Amplitude bei der entsprechenden Frequenz, eine Nullstelle die Abschwächung des Ausgangssignals.

Kapitel 3

Aufbau

In diesem Kapitel werden die einzelnen Bestandteile der Apparatur zur Strömungsmessung beschrieben, für welche die Nachführung in Echtzeit implementiert wurde.

3.1 Wind–Wellen–Kanal

Die Messungen wurden am ringförmigen Wind–Wellen–Kanal des Instituts für Umweltphysik in Heidelberg (Abb. 3.1) durchgeführt.

Im Gegensatz zu linearen Windkanälen, bei denen die Länge der vom Wind überstrichenen Wasseroberfläche begrenzt ist, kann bei dem ringförmigen Kanal die effektive Strecke, über die der Wind auf die Oberfläche einwirkt (*fetch*), praktisch unendlich lang werden.

Der Kanal hat einen Umfang von 4 m, eine Breite von 30 cm und eine Höhe von 70 cm. Für Messungen wird bis zu einer Höhe von etwa 30 cm mit Wasser aufgefüllt. Die Seitenwände des Kanals bestehen aus Plexiglas; zur Beobachtung sind außerdem mehrere ebene Glasfenster in Boden, Deckel und Seitenwände eingebaut.

Der Wind wird mit einem *Paddelring*, einer Art horizontal liegendem Windrad, erzeugt. Um die Drift der Wasserfüllung in Windrichtung zu kompensieren, die sich durch den vom Wind herrührenden Impulseintrag einstellt, ist ein durchsichtiger, *beweglicher Boden* eingebaut.

Darüberhinaus verfügt der Kanal über eine Reihe von weiteren Vorrichtungen, welche Messungen an der Grenzschicht zwischen Luft und Wasser nach verschiedenen Verfahren ermöglichen. Eine Aufstellung der Möglichkeiten zur Messung mit dem Heidelberger Windkanal findet sich in [Schmundt 1995].

3.2 Bildaufnahmesystem

Die Vorrichtung für die Visualisierung der Strömung mit Tracerteilchen ist am größten Beobachtungsfenster des Kanals (60x40 cm) installiert. Sie ist in Abb. 3.2 dargestellt.

Zur Visualisierung eines zweidimensionalen Ausschnittes der Strömung wird eine dünne (5...10 mm) Ebene parallel zum Beobachtungsfenster ausgeleuchtet. Dieser sogenannte *Lichtschnitt* tritt durch ein Fenster im Boden in den Kanal ein. Die aus den *Umlenkspiegeln* und einer *CCD-Kamera* bestehende Aufnahmeeinheit betrachtet die Tracerteilchen aus einer Richtung senkrecht zum Lichtschnitt.

Bewegungen der Tracerteilchen, die größer als der Bildausschnitt der Kamera sind, können mit den Umlenkspiegeln zweidimensional nachgeführt werden. Die Größe der von der Kamera erfaßten Fläche in der Ebene des Lichtschnitts ist vom Beobachtungsabstand abhängig; für einen typischen Abstand der Aufnahmeeinheit von 30 cm vom Beobachtungsfenster ist die abgebildete

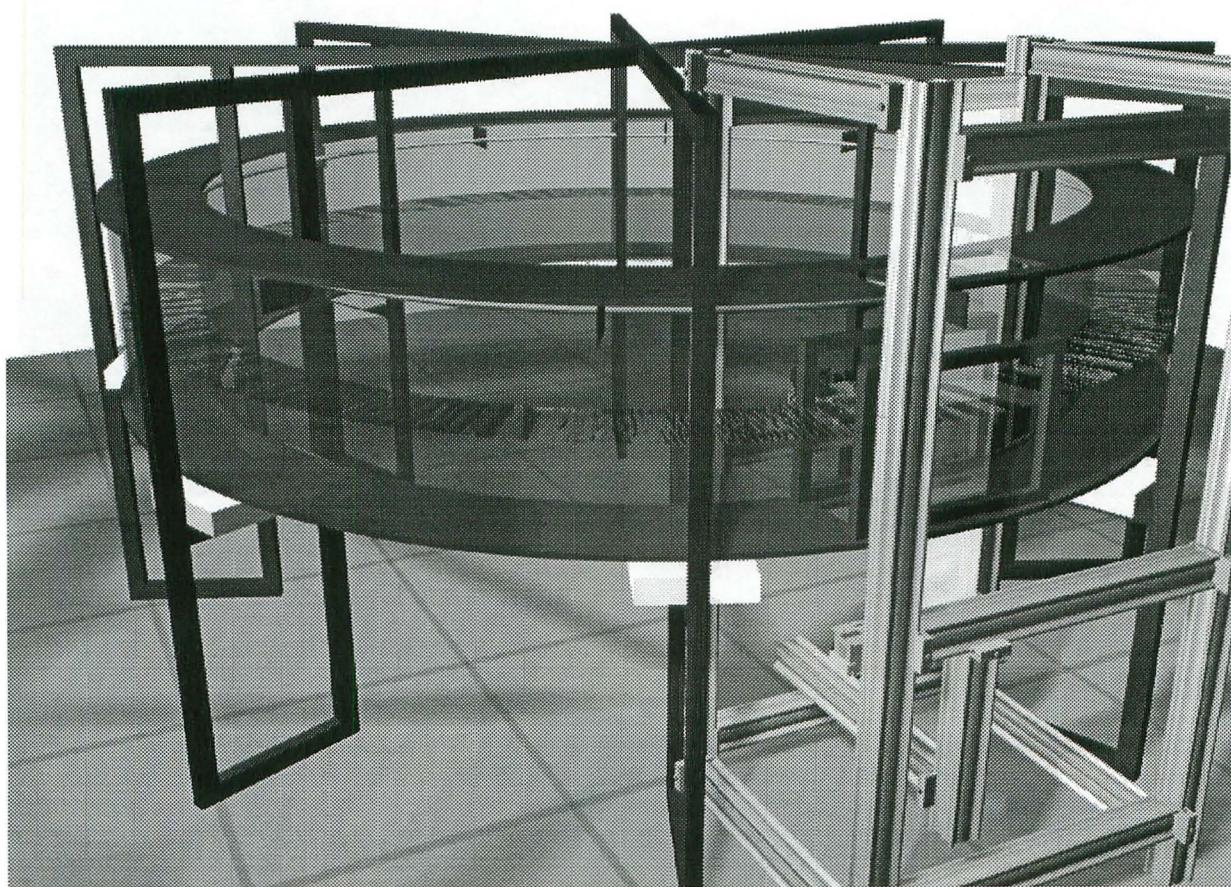


Abbildung 3.1: Der Wind–Wellen–Kanal am Institut für Umweltphysik Heidelberg — Der Übersichtlichkeit halber ist nur der Aufbau für die in der Arbeit beschriebene Strömungsvisualisierung (im Bild rechts) dargestellt. Erkennbar sind die Beobachtungsfenster in Boden, Deckel und Seitenwand des Kanals und der Lichtschnitt zur Ausleuchtung einer Ebene innerhalb des Kanals. Die Bildaufnahmeeinheit (siehe Abb. 3.2) befindet sich auf der Innenseite des Kanals. — Mit dem unterhalb des Deckels montierten *Paddelring* wird Wind erzeugt.

Fläche etwa 10 cm breit und 13 cm hoch. Mit der Nachführung kann im gleichen Abstand ein Bereich von 49×53 cm überstrichen werden.

Auf die Komponenten der Apparatur zur Bildaufnahme und -nachführung soll nun im einzelnen eingegangen werden.

3.2.1 Beleuchtung

Der Lichtschnitt durch eine 40 cm lange Halogen-Stablampe mit einer Leistungsaufnahme von 2 kW erzeugt, die unterhalb eines Fensters im Boden des Kanals montiert ist. Um den zur Beleuchtung eines zweidimensionalen Schnittes der Strömung erforderlichen dünnen Lichtschnitt zu erzeugen, sind über der Lampe ein in seiner Breite verstellbarer Spalt und eine Zylinderlinse angebracht. Die Lampe befindet sich in der Brennlinie¹ der Zylinderlinse (siehe Abb. 3.3). Zur

¹Eine zylindrische Linse bricht das Licht nur in der Ebene parallel zur Deckfläche des Zylinders. Deshalb ist der Brennpunkt zu einer Linie senkrecht zu dieser Ebene ausgedehnt.

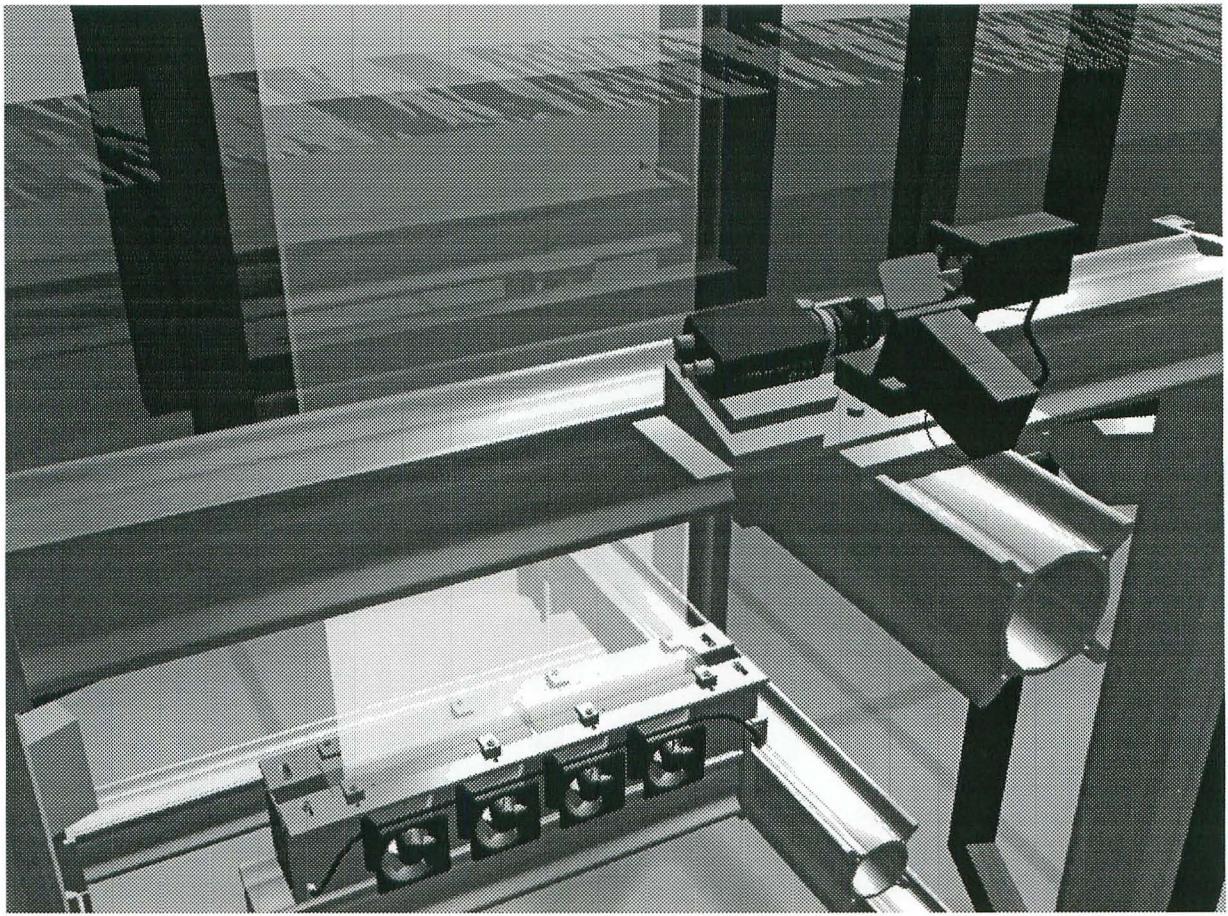


Abbildung 3.2: Ansicht des Bildaufnahmesystems — Mit einer Halogen-Stablampe und einer Zylinderlinse (im Bild unten, mit 4 Ventilatoren zur Kühlung) wird ein *Lichtschnitt* erzeugt. Die beleuchteten Tracerteilchen werden von der Aufnahmeeinheit aus Kamera und X-Y-Umlenkspiegeln durch das Fenster auf der Innenseite des Windkanals verfolgt und aufgenommen.

Ableitung der entstehenden Verlustwärme sind 4 Lüfter erforderlich. Diese sind in Abb. 3.2 unten gut erkennbar.

3.2.2 Kamera

Für die Messungen kommt eine SONY XC-75CE CCD-Kamera [SONY] mit einem 25 mm-Objektiv zum Einsatz.

Das CCD hat 795×596 Sensorelemente der Größe $8.6 \mu\text{m} \times 8.3 \mu\text{m}$, von denen 752×582 Elemente genutzt werden. Insgesamt ist die optisch aktive Fläche $7.95 \text{ mm} \times 6.45 \text{ mm}$ groß.

Die Kamera gibt ein Videosignal nach CCIR-Norm, also halbbildweise mit einer Horizontalfrequenz von 15625 Hz und einer Vertikalfrequenz von 50 Hz aus. Die einzelnen horizontalen Pixel werden mit einer Frequenz von 14.1875 MHz ausgegeben.

Pro Halbbild werden abwechselnd nur die ungeraden und die geraden 286 der insgesamt 572 genutzten Bildzeilen ausgegeben.

Die Belichtungsdauer pro übertragenem Bild ist an der Kamera einstellbar, d. h. der Aufnahmezeitraum kann auf weniger als eine ganze (Halb-)Bildaustastzeit von 20 ms eingestellt werden. Das ist wichtig, um Doppelbelichtungseffekte beim Nachstellen der Umlenkspiegel zu vermeiden

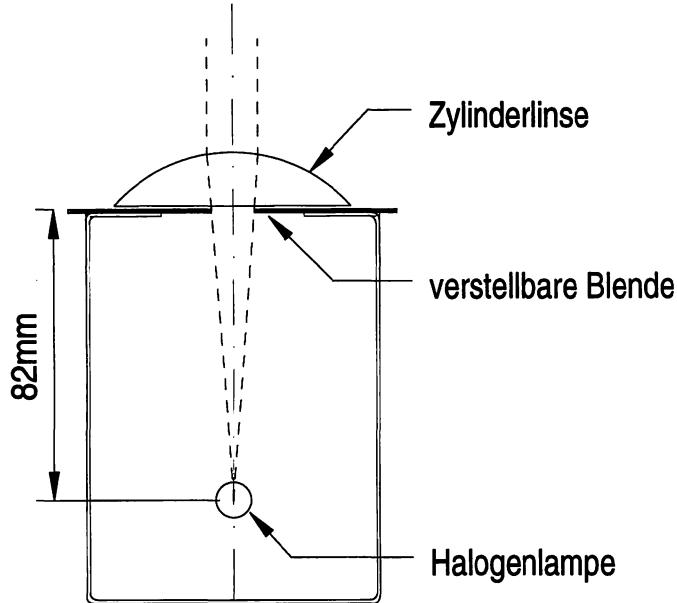


Abbildung 3.3: Schematischer Querschnitt durch die Lampe zur Ausleuchtung einer lotrechten Ebene — Das von einer stabförmigen Halogenlampe erzeugte Licht fällt durch eine verstellbare Blende nach oben. Mit einer Zylinderlinse werden die Lichtstrahlen parallel fokussiert.

(siehe Abb. 4.11).

Technisch ist die einstellbare Belichtungszeit folgendermaßen realisiert:

Zunächst werden die lichtempfindlichen Fotodioden des CCD entladen.

Über eine einstellbare Zeitdauer (maximal 40 ms) wird die Ladung in den Fotodioden auf integriert — unbeschaltete oder in Sperrrichtung betriebene Halbleiterdiode wirken als Kondensatoren.

Zu einem Zeitpunkt, der ungefähr mit dem Vertikalsynchronisationsimpuls zusammenfällt, wird die akkumulierte Ladung aller Fotodioden eines Halbbildes in nicht lichtempfindliche Spalten-CCDs geschrieben. Von dort wird die Ladung zeilenweise über ein Zeilen-CCD an den Videoausgangsverstärker ausgegeben.

Trotz der seriellen Ausgabe der Bildinformation werden sämtliche Pixel eines Halbbildes also gleichzeitig aufgenommen. Das resultierende Timing ist in Abb. 4.6 dargestellt. Detailliertere Angaben zum Aufbau einer CCD-Kamera findet man beispielsweise in [Hinsch 1990].

3.2.3 Framegrabber

Das Videosignal der Kamera wird von einem ITEX-PCI-Bus-Framegrabber [ITI 1995] der Firma Imaging Technologies aufgenommen. Eine Besonderheit dieses Framegrabbers ist, daß eingangsseitig zwischen verschiedenen *Akquisitionsmodulen* gewählt werden kann, die auf die PCI-Bus-Karte aufgesteckt werden. Beim hier vorgestellten Aufbau findet ein sog. *variable scan*-Modul Verwendung, mit dem das Timing (in Grenzen) an die Kamera angepaßt werden kann.

Das Akquisitionsmodul übernimmt die Pegelanpassung, Antialiasingfilterung und Digitalisierung in Byte-Daten mit einer Taktrate von 14.18 MHz. Das entspricht der Frequenz, mit welcher der Inhalt der einzelnen Sensorelemente einer Zeile ausgegeben wird. Die eingelesenen Halbbilder haben ein Format von 736×286 Pixeln.

Über einen internen 32-bit-Datenbus werden die digitalisierten Werte in ein dual ported RAM geschrieben. Von dort werden die Daten über eine DMA-fähige PCI-Bus-Schnittstelle ausge-

geben.

Wegen des hohen Datendurchsatzes des PCI-Bus (bei der vorliegenden Anwendung wurden 42 MByte pro Sekunde gemessen) kann die Videokarte des PC die Ausgabe der Bilder übernehmen, so daß ein eigener Videoausgang entfallen kann.

3.2.4 PC

Zum Einsatz kam ein mit 64 MByte ausgestatteter PC mit 90 MHz Pentium-Prozessor und PCI-Bus

3.2.5 Ausgabekarte

Eine intelligente I/O-Karte vom Typ ML2 der Firma SORCUS [ML2 1995] erzeugt die analogen Ansteuersignale für die Umlenkspiegelsteuerung.

Diese Einsteckkarte für den PC hat 16 digitale Eingänge, 8 digitale Ausgänge, 16 analoge Eingänge, 2 analoge Ausgänge sowie eine serielle Schnittstelle.

Auf der Karte befindet sich ein PC-kompatibler 8-bit-Prozessor² mit 512 kByte eigenem Speicher und einem Echtzeitbetriebssystem, mit dem Programme *unabhängig* vom Prozessor des PC ausgeführt werden können. 2 Timer können für Zeitmessungen und zur Erzeugung von Interrupts verwendet werden.

Die Steuersignale für die Umlenkspiegel werden über 12 Bit genaue Digital-Analog-Wandler ausgegeben.

Die analogen Rückmeldesignale für die Position der Spiegel können über 12 Bit-Analog-Digital-Wandler mit einer Genauigkeit von ± 1 LSB zurückgelesen werden.

3.2.6 Umlenkspiegel

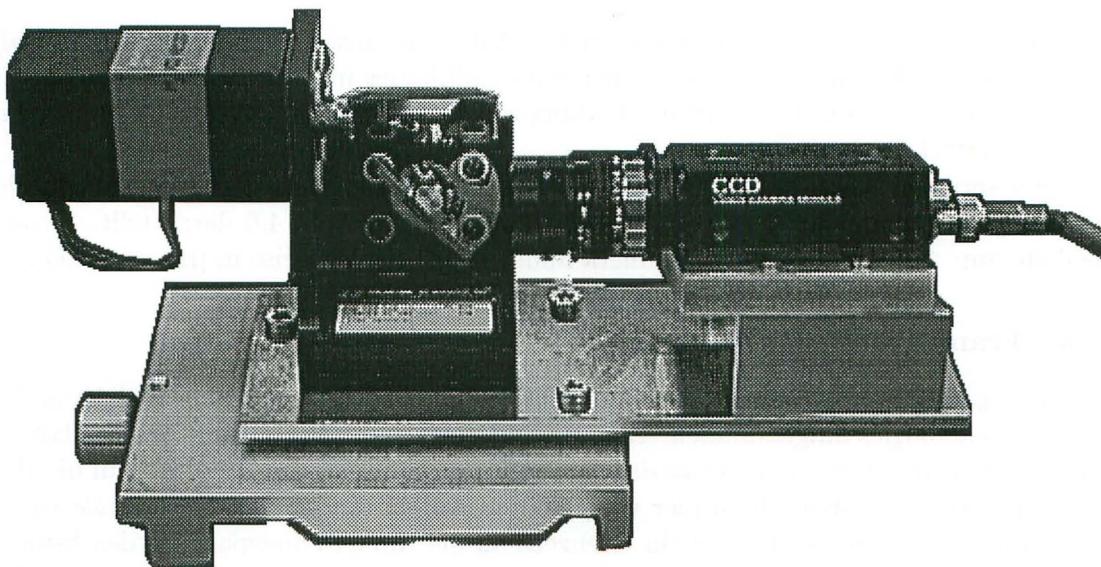


Abbildung 3.4: Die X-Y-Ablenkeinheit mit der CCD-Kamera

²Der NEC V20-Prozessor ist aufwärtskompatibel zum 8-bit-Prozessor 8088. Die Kompatibilität zu diesem 8-bit-Prozessor ist das herausragende Merkmal handelsüblicher PCs.

3.2. BILDAUFAHMESYSTEM

21

Die Blickrichtung der Kamera wird durch eine X–Y–Ablenkeinheit XY2026 der Firma General Scanning gesteuert [GSI 1991].

Die Ablenkeinheit besteht aus 2 Umlenkspiegeln für die Vertikale (Y–Achse) und die Horizontale (X–Achse), die von *Galvanometern* um jeweils $\pm 10^\circ$ gedreht werden können. Das Funktionsprinzip der Galvanometer entspricht einem sehr linearen Dreheisenamperemeter. Zur Rückkopplung ist ein hochpräziser kapazitiver Positionssensor an die Drehachse gekoppelt, dessen Funktion auf der Verstimmung eines Schwingkreises mit einem Drehkondensator beruht.

Je eine Steuerung vom Typ CX–660, vom Aufbau her ein konventioneller PID–Regler [Hinsch 1990], regelt anhand dieser Rückkopplung den Steuerstrom der Spiegel (vgl. Abschnitt 2.1).

Als Eingang benötigt der Regler eine analoge Spannung im Bereich von ± 10 V. Empfindlichkeit und Nullstellung der Spiegel können von Hand mit Potentiometern eingestellt werden. Um für die Eichung der Skalen (siehe Abschnitt 5.2) reproduzierbare Verhältnisse zu bekommen, wurde die Eingangsempfindlichkeit grundsätzlich auf ihren Maximalwert eingestellt.

Die Regler stellen die Position und die Geschwindigkeit der Spiegel als analoge Signale im Bereich von ± 5 V im Rahmen der bei der Messung auftretenden Zeitskalen praktisch verzögerungsfrei (innerhalb einiger Mikrosekunden) zur Verfügung.

Für die Protokollierung der Spiegelposition kann dieses analoge Rückmeladesignal mit Hilfe der im vorigen Abschnitt beschriebenen intelligenten Schnittstellenkarte eingelesen und digitalisiert werden. Die Genauigkeit der Positionsrückmeldung wird durch die Analog–Digital–Wandler der ML2–Karte bestimmt.

Im Schrittbetrieb haben die Spiegel eine typische Einstellzeit von 5 ms.

Die effektive *Apertur* der Spiegel, d. h. der Durchmesser des bei beliebiger Spiegelstellung durch die Spiegel umgelenkten Lichtkegels, beträgt 20 mm.

Die Apertur der Spiegel wird umso kleiner, je flacher die optische Achse auf den Spiegel auftrifft. Aus diesem Grund ist die Drehachse des X–Umlenkspiegels um 18° aus der Horizontalen verkippt.

Insgesamt bewirken die beiden Spiegel ein Verdrehen des Bildes um 72° im Gegenuhrzeigersinn.

Die Kamera ist um 18° gekippt montiert, so daß die Kamerazeilen parallel zur Drehachse des X–Umlenkspiegels liegen (siehe Abb. 3.2; für die genaue Geometrie der Aufnahmeeinheit siehe Abb. 5.2 und 5.3).

Somit entspricht die Zeilenrichtung des Kamerabildes im Gegensatz zur Konvention bei Fernsehbildern der *Vertikalen* in der Ebene des Lichtschnitts. Ein Verstellen der horizontalen Blickrichtung durch Drehen des X–Umlenkspiegels bewirkt eine Verschiebung des Kamerabildes in Spaltenrichtung; eine Drehung des Y–Spiegels ändert die vertikale Blickrichtung und erzeugt eine Verschiebung des Bildes in Zeilenrichtung.

Kapitel 4

Das Nachführungsverfahren

Zur Realisierung der Nachführung mit der im vorigen Kapitel beschriebenen Meßapparatur ist ein schneller Algorithmus erforderlich, der mit möglichst geringer Verzögerung aus den aufgenommenen Bildern eine Verschiebungsinformation extrahiert und die Umlenkspiegel so nachstellt, daß die beobachteten Teilchen im Blickfeld der Kamera bleiben.

Die Verschiebungsextraktion erfolgt durch das Bestimmen des Maximums der eindimensionalen *Kreuzkorrelation* von Ausschnitten aufeinanderfolgender Halbbilder in zwei zueinander senkrechten Richtungen.

Die so gewonnene Verschiebung wird durch ein *lineares, rückgekoppeltes digitales Filter* zu einer Positionsinformation für die Umlenkspiegel verarbeitet.

Auf die Berechnungsschritte soll nun im einzelnen eingegangen werden.

4.1 Anforderungen an den Nachführungsalgorithmus

Ziel des Algorithmus ist, aus dem aufgenommenen Bild die *globale* Verschiebung der betrachteten Teilchen in der Strömung zu messen und in ein Steuersignal für die Scannerspiegel umzusetzen. Dazu sind folgende Schritte in *Echtzeit* erforderlich:

Aufnahme des Bildes mit der Kamera,

Einlesen des Bildes über den Framegrabber und Sichern der gesamten Bildinformation,

Bestimmung der Verschiebung zwischen aufeinanderfolgenden Bildern,

Filtern der Verschiebungsinformation in ein geeignetes Signal zur

Ansteuerung der Scannerspiegel.

Das wichtigste Kriterium für die Auswahl der Methoden ist eine möglichst kurze Verzögerungszeit zwischen der Aufnahme der Bildinformation und dem Ansteuern der Umlenkspiegel mit einem *daraus resultierenden* Signal. Mit dem vorgestellten Algorithmus wird die *kürzestmögliche* mit den verwendeten Geräten realisierbare Verzögerungszeit von 2 Halbbildaustastzeiten (40 ms) zwischen Aufnahme der Bildinformation und Umsetzen in ein Steuersignal erzielt.

Des weiteren muß sichergestellt werden, daß die *gesamte* Bildinformation während der Nachführung zur späteren *offline*-Analyse [Hering 1996] gespeichert wird. Weil die Bilddaten nicht schnell genug auf Festplatte gespeichert werden können, ist die Aufnahmezeit beim gegenwärtigen Speicherausbau des verwendeten Rechners auf etwa 250 Halbbilder (5 Sekunden) beschränkt.

4.2 Das Verfahren zur Verschiebungsbestimmung

Zur Bestimmung der Verschiebung aus den aufgenommenen Bildern wurde ein *Korrelationsverfahren* implementiert.

Im Gegensatz zu anderen Verfahren (Eine Zusammenfassung verschiedener Methoden zur Bewegungsanalyse in Bildfolgen findet man in [Jähne 1993]), welche Bewegung an einzelnen Bildpunkten oder zumindest in kleinen Bildregionen bestimmen, liefert die Korrelation direkt die *mittlere* Verschiebung zwischen zwei betrachteten Bildausschnitten. Bei der hier vorgestellten Anwendung soll zunächst die mittlere Bewegung der Strömung kompensiert werden; die genauere Bestimmung der Teilchengeschwindigkeiten erfolgt offline mit den in [Hering 1996] beschriebenen Verfahren.

Es werden nicht die gesamten Halbbilder, sondern nur bestimmte Bildausschnitte korreliert. Zum einen verringert sich damit der erforderliche Rechenaufwand auf ein mit den vorliegenden Geräten handhabbares Maß; zum anderen können die Ausschnitte so gewählt werden, daß störende Bildteile (wie die Wasseroberfläche) für die Bestimmung der Verschiebung ignoriert werden.

Im Fourieraum wird die Korrelation auf eine Multiplikation reduziert, und mit der Fast Fourier Transformation steht ein sehr effizienter ($\mathcal{O}[n \log_2 n]$) Transformationsalgorithmus zur Verfügung [NumRec 1988].

Auf einem handelsüblichen schnellen PC kann die zweidimensionale Korrelation trotzdem nicht schnell genug bestimmt werden, weil die Anzahl der Stützstellen der Transformation n in diesem Fall der *Gesamtanzahl* $h \cdot v$ der Pixel eines betrachteten Bildausschnittes der Größe $h \times v$ Pixel entspricht.

Deshalb wird die *eindimensionale* Korrelation von Bildausschnitten bestimmt, die senkrecht zur Korrelationsrichtung aufsummiert sind. Der Rechenaufwand für die beiden eindimensionalen Korrelationen in zueinander senkrecht stehenden Richtungen reduziert sich so auf $\mathcal{O}[h \log_2 h + v \log_2 v]$.

Mit diesem Verfahren kann die Verschiebung zwischen aufeinanderfolgenden Bildern in einigen Millisekunden und somit deutlich weniger als einer Halbbildauastastzeit bestimmt werden (siehe Abschnitt 4.5.1).

Auf die Bestandteile des Bildnachführungsalgorithmus soll nun im einzelnen eingegangen werden.

4.2.1 Bildaufnahme

In der Kamera wird das einfallende Licht über einen einstellbaren Zeitraum bis zum VSYNC-Signal in den Fotosensoren aufintegriert. Etwa zum Zeitpunkt der Ausgabe des Vertikalsynchronisationssignals wird der Inhalt eines Halbbildes in einen Ausgabepuffer kopiert und von dort seriell im CCIR-Format an den Framegrabber übertragen [SONY].

Aus historischen Gründen¹ wird das aufgenommene Bild im *Zeilensprungverfahren* halbbildweise, d. h. abwechselnd entweder nur die geraden oder ungeraden Bildzeilen übertragen. Im Vergleich zur tatsächlichen Aufnahmefeldbreite des CCD halbiert sich dabei *entweder* die vertikale *oder* die zeitliche Auflösung. Wie in Abschnitt 4.3.5 gezeigt werden wird, stellt die Bildaufnahmefrequenz der Kamera die wesentlichste Beschränkung des Folgevermögens der Nachführung dar. Die Halbbilder werden deshalb jeweils als getrennte Bilder behandelt; die vorhandene Möglichkeit, die Bilder schon im Framegrabber zusammenzusetzen [ITI 1995], wird nicht genutzt.

¹Die CCIR-Norm zur Übertragung von Fernsehbildern ist ein Kompromiß bei vorgegebener Bildgeometrie (Höhe:Breite = 4:3) zwischen nicht zu hoher Horizontalfrequenz (15625 Hz) und damit Bandbreite des zu übertragenden Videosignals und einer Vertikalfrequenz (50 Hz), bei der sich das Flimmern des Bildes noch in Grenzen hält.

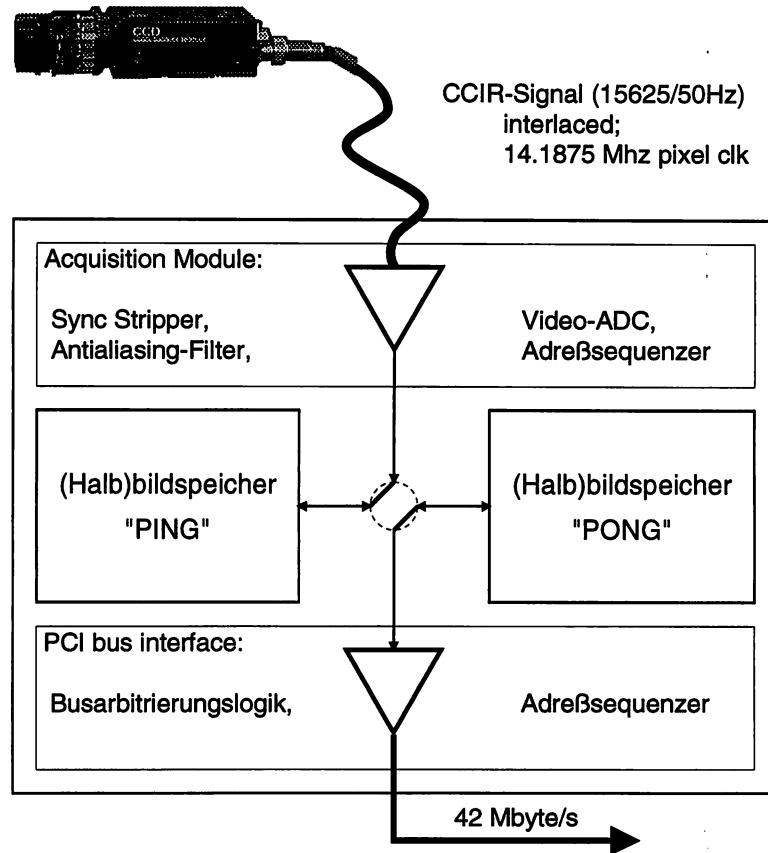


Abbildung 4.1: Blockdiagramm der Bildaufnahme in den PC mit der ITEX-Framegrabberkarte — Die Bilddaten von der Kamera werden im Akquisitionsmodul digitalisiert. Um zuverlässig Datenverluste zu vermeiden, sind zwei Halbbildspeicher eingerichtet, von denen jeweils der eine mit Daten beschrieben wird und der andere über eine PCI-Bus-Schnittstelle in den Hauptspeicher des PC übertragen wird.

Die Konfiguration des Framegrabbers für das Nachführungsverfahren ist schematisch in Abb. 4.1 dargestellt.

Im *Akquisitionsmodul* werden die Bilddaten digitalisiert und in das RAM des Framegrabbers geschrieben.

Gleichzeitig werden die digitalisierten Daten des vorhergehenden Halbbildes über den PCI-Bus aus dem RAM des Framegrabbers in den Hauptspeicher des PC kopiert. Der Framegrabber übernimmt dabei die Kontrolle über den PCI-Bus, so daß die CPU des Hostrechners parallel dazu weiterarbeiten kann, so lange sie nicht auf den PCI-Bus oder den Zielbereich des Datentransfers zugreift. Bei der erreichten Transferrate von über 42 MByte/s ist ein Halbbild in 5 ms kopiert. Auf die genaue zeitliche Abfolge bei der Bildaufnahme und den nachfolgenden Verarbeitungsschritten wird in einem späteren Abschnitt (4.3.4) nochmals ausführlicher eingegangen. Ist nur ein Bildspeicher angelegt, können in einem ungünstigen Fall Bilddaten überschrieben werden, bevor sie in den Hauptspeicher des Rechners kopiert werden. Ein Bild im Hauptspeicher könnte dann Daten von zwei *verschiedenen* Zeitpunkten enthalten².

²Dieser Fall tritt auf, falls bei der Arbitrierung des PCI-Bus Verzögerungen auftreten, so daß die PCI-Bus-Schnittstelle des Framegrabbers erst Bus Master wird und den Datentransfer beginnt, nachdem das Akquisitions-

Durch ein sog. „ping-pong scheme“ wird ein solches Überschreiben der Daten verhindert: es werden *zwei* Bildspeicher angelegt, die abwechselnd beschrieben und gelesen werden.

Im Speicher des PC werden die Daten halbbildweise hintereinander abgelegt. Der maximal verfügbare Speicher begrenzt die Länge der eingelesenen Sequenz und damit auch die Dauer der Nachführung.

4.2.2 Korrelation

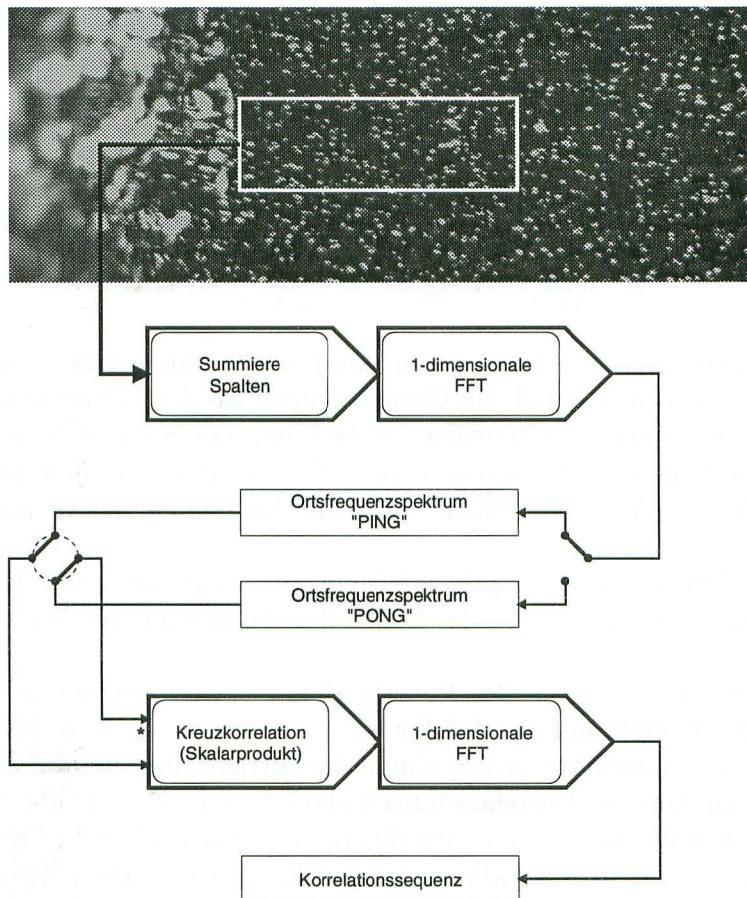


Abbildung 4.2: Datenfluß beim Korrelationsalgorithmus (für Verschiebung in *Zeilenrichtung*)

Nach dem Laden in den Hauptspeicher des PC werden aus den aufgenommenen Bildern Ausschnitte in eine Richtung aufsummiert. Die so gewonnenen eindimensionalen Sequenzen, deren Länge bei dem verwendeten Algorithmus eine Zweierpotenz sein muß, werden im Fourierraum kreuzkorreliert.

Dazu wird die Sequenz zunächst mit einer Fast Fourier Transformation in den Frequenzraum transformiert³. Weil jeweils zwei aufeinanderfolgende Sequenzen korreliert werden, wird die transformierte Sequenz in einen von zwei Speichern geschrieben.

Die Korrelation wird ausgeführt durch die Bildung des komplexen Skalarprodukts der Fouriertransformierten der aktuellen Sequenz (s_m) mit derjenigen der vorherigen Sequenz (p_n) und

modul bereits die ersten Daten des neuen Halbbildes eingelesen hat.

³Eine sehr übersichtliche Darstellung der Fourier-Transformationsmethoden findet man beispielsweise in [NumRec 1988]

anschließender Rück-FFT in den Ortsraum (siehe Abb. 4.2):

$$\begin{aligned}
 K_{sp}(d) &:= \sum_{f=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} \langle P_f | S_f \rangle e^{2\pi i f d} \\
 &:= \sum_{f=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} \left(\sum_{n=0}^{N-1} p_n e^{-2\pi i n f} \right)^* \left(\sum_{m=0}^{N-1} s_m e^{-2\pi i m f} \right) e^{2\pi i f d} \\
 &= \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} p_n^* s_m \sum_{f=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} e^{2\pi i f(d-m+n)} \\
 &= \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} p_n^* s_m N \delta_{(d-m+n) \bmod N} \\
 &= N \sum_{m=0}^{N-1-d} p_{m+d}^* s_m + N \sum_{m=N-d}^{N-1} p_{m+d-N}^* s_m
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Durch die Transformation in den Fourieraum werden die Bildausschnitte als *periodische* Sequenzen interpretiert, und man erhält im Grunde genommen die Summe von 2 teilweisen Korrelationen, deren Verschiebungen sich genau um die Länge der Sequenz N unterscheiden.

Durch die Periodizität macht sich auch das *Abtasttheorem* insofern bemerkbar, daß eine Verschiebung von Δ , $\Delta \in \{0, N\}$ an derselben Stelle ein Maximum erzeugt wie eine Verschiebung von $\Delta - N$.

Das Korrelationsverfahren kann also *prinzipiell* eine Verschiebung von 2 Bildern in Korrelationsrichtung von mehr als der Hälfte der Länge des Ausschnittsfensters nicht mehr korrekt detektieren.

Setzt man für die Sequenz (s_m) weißes Rauschen⁴ mit einer mittleren Leistungsdichte $\rho := \langle s_m^* s_m \rangle$ an und nimmt weiterhin an, daß für alle n $p_n = s_{n-\Delta}$, d. h. bis auf Verschiebung unveränderte Sequenzen korreliert werden, nimmt die mittlere Höhe des auf die oben angegeben Art bestimmten Maximums der Korrelation nach $\max(\Delta) = \rho(N - \Delta)$ ab. Aus diesem Grund ist der Bereich, in dem die Korrelation zuverlässige Information liefert, kleiner als das Intervall $[-\frac{N}{2}, \frac{N}{2}]$. Für den Fall der zweidimensionalen Korrelation geben [Keane&Adrian 1990], [Keane&Adrian 1991] einen nutzbaren Bereich von $[-\frac{N}{3}, \frac{N}{3}]$ an.

Auch wenn diese Abschwächung des Korrelationsmaximums nach größeren Verschiebungen hin für eine Sequenz aus einzelnen Punkten nicht so ausgeprägt ist, muß davon ausgegangen werden, daß bei einer Überlagerung von Sequenzen mit verschiedenen Verschiebungen, wie das bei einem Geschwindigkeitsgradienten der Strömung senkrecht zur Korrelationsrichtung der Fall sein wird, die mittlere Verschiebung systematisch *unterschätzt* wird. Für die Bildnachführung ist diese systematische Unterschätzung des *Geschwindigkeitsfehlers* der Nachführung aber unkritisch.

Wesentlich kritischer wirkt sich das *Blendenproblem* auf die Verschiebungsmessung aus. Das Blendenproblem entsteht dadurch, daß Bewegung im Bild grundsätzlich nur in Richtung von Helligkeitsänderungen im Bild bestimmt werden kann. An Ecken in Bildern und an punktförmigen Strukturen kann die Bewegung exakt bestimmt werden.

Das hier beschriebene Korrelationsverfahren setzt voraus, daß

- die beobachteten Strukturen *klein* im Verhältnis zur Größe der Bildausschnitte sind und
- die Strukturen keine über einen gesamten Bildausschnitt ausgeprägte *Orientierung* aufweisen.

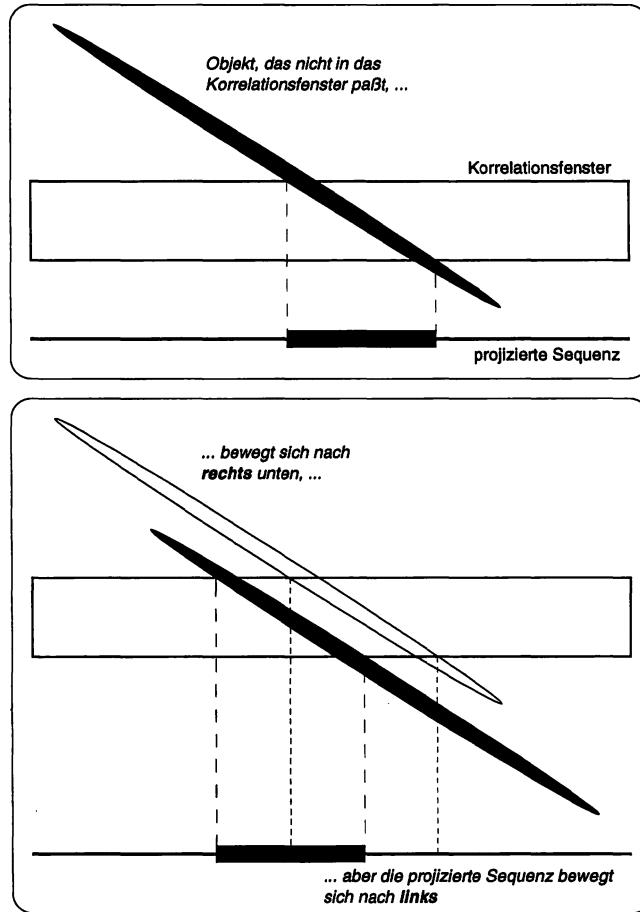


Abbildung 4.3: Veranschaulichung des *Blendproblems* bei Strukturen, die größer sind als die zur Korrelation verwendeten Bildausschnitte. Obwohl sich die Struktur nach rechts unten bewegt, entsteht durch die Projektion auf die Horizontale eine scheinbare Bewegung nach links.

Für die punktförmigen Tracerteilchen sind diese Bedingungen sehr gut erfüllt. Zur Verfolgung ausgedehnter, linienförmiger Strukturen ist das beschriebene Verfahren aber völlig ungeeignet. In solchen Fällen treten systematische Fehler bei der Geschwindigkeitsmessung und starkes Übersprechen zwischen den zueinander senkrecht stehenden Meßrichtungen auf, das im schlimmsten Fall die Charakteristik des Reglers zu positiver Rückkopplung verändern und damit ein „Davonlaufen“ der Spiegelposition bewirken kann. Ein solcher Fall ist in Abb. 4.3 dargestellt.

Den Wertebereich der erhaltenen Korrelationssequenz kann man auf das Intervall $[-1, 1]$ einschränken, die Kreuzkorrelation (4.1) durch die Wurzel aus dem Produkt der mittleren quadratischen Amplituden der Sequenzen teilt [Bracewell 1965], [Jain 1989]:

$$\sigma_{sp}(d) := \frac{\sum_{m=0}^{N-1} (p_{m+d} - \langle p \rangle)^* (s_m - \langle s \rangle)}{\sqrt{\langle p - \langle p \rangle | p - \langle p \rangle \rangle \langle s - \langle s \rangle | s - \langle s \rangle \rangle}} \quad (4.2)$$

Nach dem *Parsevalschen Theorem* kann die Normierung auch im Fourieraum durchgeführt werden. Der zusätzliche Rechenaufwand für diese Normierung beschränkt sich damit auf ein Skal-

⁴Weißes Rauschen hat *per definitionem* für jede Verschiebung $\neq 0$ eine Autokorrelation von 0.

larprodukt, eine Wurzel und eine Division für jede Sequenz:

$$\sigma_{sp}(d) = \frac{\sum_{\substack{f=-\frac{N}{2} \\ f \neq 0}}^{\frac{N}{2}} \langle P_f | S_f \rangle e^{2\pi i f d}}{\sqrt{\left(\sum_{\substack{f=-\frac{N}{2} \\ f \neq 0}}^{\frac{N}{2}} \langle P_f | P_f \rangle \right) \left(\sum_{\substack{f=-\frac{N}{2} \\ f \neq 0}}^{\frac{N}{2}} \langle S_f | S_f \rangle \right)}} \quad (4.3)$$

Die *Höhe* des Kovarianzmaximums gibt einen Hinweis darauf, wie eindeutig die gefundene Verschiebung ist; ein Geschwindigkeitsgradient in Korrelationsrichtung im betrachteten Bildausschnitt führt zu einer Verbreiterung und Absenkung des Maximums. Die Höhe des Maximums gibt allerdings keinen Anhaltspunkt, ob die beobachtete Struktur periodisch ist und somit mehrere, fast gleich hohe Maxima existieren oder ob das Maximum eindeutig, aber falsch ist (siehe Abb. 4.4).

4.2.3 Bestimmung des Korrelationsmaximums

Die Position der *Maxima* der im vorigen Programmteil gewonnenen eindimensionalen Korrelationssequenzen geben die mittlere Verschiebung der (Halb-)Bilder gegeneinander an.

Zunächst wird in jeder Sequenz *innerhalb eines einstellbaren Bereiches* der maximale Wert m gesucht.

Es ist sinnvoll, nicht die gesamte Länge der Sequenz nach Maxima abzusuchen, da „Ausreißer“ vorkommen, bei denen der Korrelation ein falsches Ergebnis überlagert ist oder das der tatsächlichen Verschiebung entsprechende Maximum ganz im Untergrund verschwindet (siehe dazu Abb. 4.4). Andererseits hat sich in Versuchen gezeigt, daß die Nachführung so gut funktioniert, daß die auftretenden Verschiebungen in der Nähe des Nullpunkts liegen.

Mit der Einschränkung des Suchbereichs lassen sich „Ausreißer“ unterdrücken, ohne daß das Zeitverhalten für Signale kleiner Amplitude verschlechtert wird, wie das bei einer nächtlichen Glättung durch ein Tiefpaßfilter der Fall wäre.

Die Bestimmung der Verschiebung von Bild zu Bild mit einer Genauigkeit von 1 Pixel hat sich für die Nachführung als zu grob erwiesen. Insbesondere bei guter Nachführung der Strömung sind die auftretenden Geschwindigkeitsdifferenzen, die mit der Korrelation gemessen werden, sehr klein.

Die Position des Maximums der Kreuzkorrelation muß daher *subpixelgenau* bestimmt werden. Dazu wird in einem Intervall um den Maximalwert m mit der Breite $2h + 1$ die Korrelationssequenz K_x durch eine Parabel 2. Ordnung angenähert:

$$F_{c,\hat{x},\hat{K}}(x) := c(\hat{x} - x)^2 + \hat{K}. \quad (4.4)$$

Die besten Parameter c , \hat{x} und \hat{K} im Sinne des kleinsten quadratischen Fehlers

$$\min_{c,\hat{x},\hat{K}} \chi^2 := \min_{c,\hat{x},\hat{K}} \sum_{x=m-h}^{m+h} (c(\hat{x} - x)^2 + \hat{K} - K_x)^2 \quad (4.5)$$

findet man durch Nullsetzen der partiellen Ableitungen

$$0 = \frac{\partial}{\partial \hat{K}} \chi^2 = \frac{1}{2h+1} \sum_{x=m-h}^{m+h} [2N] (c(\hat{x} - x)^2 + \hat{K} - K_x) \quad (4.6)$$

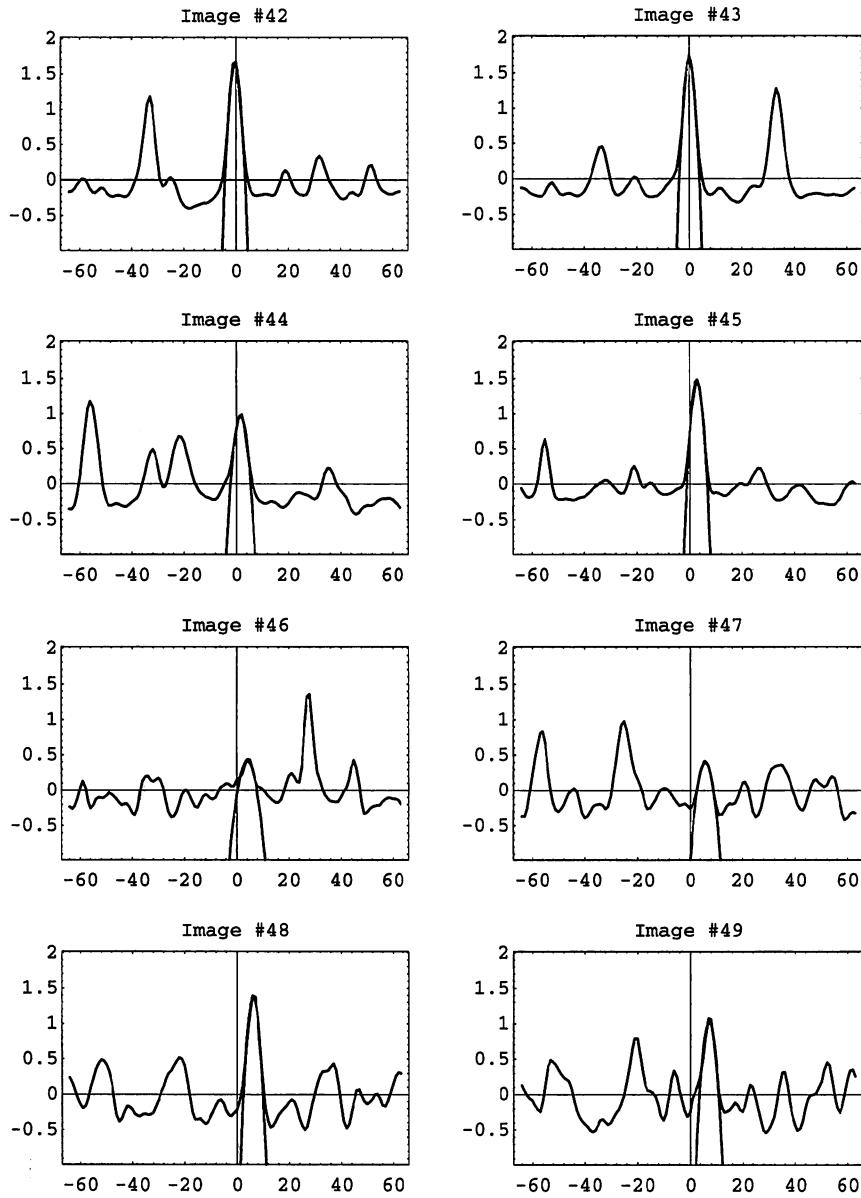


Abbildung 4.4: Eine typische Folge von Kreuzkorrelationssequenzen bei geringer Teilchendichte. Die Größe des betrachteten Bildausschnittes ist 128×20 Pixel; es wird eine Parabel an eine 7 Stützstellen lange Teilsequenz um das Maximum im Intervall $[-20, +20]$ angepaßt. Außerhalb dieses Bereiches auftretende Maxima werden ignoriert. Die maximal mögliche Amplitude der Korrelation ist auf ± 2 normiert.

$$0 = \frac{\partial}{\partial \hat{x}} \chi^2 = \frac{1}{2h+1} \sum_{x=m-h}^{m+h} [4Nc] (\hat{x} - x) (c(\hat{x} - x)^2 + \hat{K} - K_x) \quad (4.7)$$

$$0 = \frac{\partial}{\partial c} \chi^2 = \frac{1}{2h+1} \sum_{x=m-h}^{m+h} [2N] (\hat{x} - x)^2 (c(\hat{x} - x)^2 + \hat{K} - K_x). \quad (4.8)$$

Für $c \neq 0$ sind diese Bedingungen gleichbedeutend mit den Gleichungen ($\langle x \rangle = m$)

$$0 = c \langle (\hat{x} - x)^2 \rangle - \langle K \rangle + \hat{K} \quad (4.9)$$

$$0 = c \langle x(\hat{x} - x)^2 \rangle - \langle xK \rangle + \hat{K} \langle x \rangle \quad (4.10)$$

$$0 = c \langle x^2(\hat{x} - x)^2 \rangle - \langle x^2K \rangle + \hat{K} \langle x^2 \rangle. \quad (4.11)$$

Eliminiert man \hat{K} durch Einsetzen von (4.9) in (4.10) und (4.11), findet man

$$0 = c \left(\hat{x}^2 \langle x \rangle - 2\hat{x} \langle x \rangle^2 + \langle x \rangle \langle x^2 \rangle - \hat{x}^2 \langle x \rangle + 2\hat{x} \langle x^2 \rangle - \langle x^3 \rangle \right) - \langle x \rangle \langle K \rangle + \langle xK \rangle \quad (4.12)$$

$$0 = c \left(\hat{x}^2 \langle x^2 \rangle - 2\hat{x} \langle x \rangle \langle x^2 \rangle + \langle x^2 \rangle^2 - \hat{x}^2 \langle x^2 \rangle + 2\hat{x} \langle x^3 \rangle - \langle x^4 \rangle \right) - \langle x^2 \rangle \langle K \rangle + \langle x^2K \rangle. \quad (4.13)$$

Da die quadratischen Terme in \hat{x} herausfallen, ergibt sich für \hat{x} die *lineare* Beziehung

$$\hat{x} = \frac{1}{2} \frac{(\langle x^3 \rangle - \langle x \rangle \langle x^2 \rangle)(\langle x^2K \rangle - \langle x^2 \rangle \langle K \rangle) - (\langle x^4 \rangle - \langle x^2 \rangle^2)(\langle xK \rangle - \langle x \rangle \langle K \rangle)}{(\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2)(\langle x^2K \rangle - \langle x^2 \rangle \langle K \rangle) - (\langle x^3 \rangle - \langle x \rangle \langle x^2 \rangle)(\langle xK \rangle - \langle x \rangle \langle K \rangle)}. \quad (4.14)$$

Numerisch etwas günstiger ist ($\Delta x := x - \langle x \rangle$, $\Delta K := K - \langle K \rangle$)

$$\hat{x} = \frac{1}{2} \frac{\langle x^2 \Delta x \rangle \langle x^2 \Delta K \rangle - \langle x^2(x^2 - \langle x^2 \rangle) \rangle \langle \Delta x \Delta K \rangle}{\langle (\Delta x)^2 \rangle \langle x^2 \Delta K \rangle - \langle x^2 \Delta x \rangle \langle \Delta x \Delta K \rangle}. \quad (4.15)$$

Für c erhält man damit

$$\begin{aligned} c &= \frac{\langle \Delta x \Delta K \rangle}{\langle x^2 \Delta x \rangle - 2\hat{x} \langle (\Delta x)^2 \rangle} \\ &= \frac{\langle (\Delta x)^2 \rangle \langle x^2 \Delta K \rangle - \langle \Delta x \Delta K \rangle \langle x^2 \Delta x \rangle}{\langle (\Delta x)^2 \rangle \langle x^2(x^2 - \langle x^2 \rangle) \rangle - \langle x^2 \Delta x \rangle^2}; \end{aligned} \quad (4.16)$$

für \hat{K} schließlich

$$\hat{K} = \langle K \rangle - c \langle (\hat{x} - x)^2 \rangle = \langle K \rangle - c \left(\hat{x}^2 - 2\hat{x} \langle x \rangle + \langle x^2 \rangle \right). \quad (4.17)$$

\hat{x} ist die gesuchte Verschiebung in Korrelationsrichtung. Messungen an Testbildern (siehe Abschnitt 5.3) ergaben für ein an 7 Stützstellen angepaßtes Korrelationsmaximum eine Genauigkeit in der Größenordnung von 0.1 Pixel.

Die Werte der anderen beiden Fitparameter haben keine naheliegende Bedeutung, wenn man die Korrelation wie in (4.1) angegeben durchführt.

Normiert man aber die Kreuzkorrelation nach (4.5), ist \hat{K} ein Maß dafür, wie eindeutig (bis auf Periodizitäten) die gefundene Verschiebung ist. Trotzdem kann aus der Höhe des Maximums nicht direkt auf die Signifikanz der Messung geschlossen werden, weil in ungünstigen Fällen auch eindeutig *falsche* Verschiebungen gefunden werden können (siehe Abb. 4.4).

Um solche Fehlmessungen abzufangen, wird aus jeweils *zwei* Bildausschnitten pro Richtung die Verschiebung bestimmt.

Unterscheiden sich die beiden Verschiebungen in eine Richtung um weniger als eine vorgegebene Schwelle, wird der Mittelwert der Messungen weitergegeben. Bei Überschreiten der Schwelle wird derjenige Wert verworfen, der vom *vorigen* Wert der Verschiebung weiter entfernt liegt.

4.3 Rekursives Filter

Die von groben Störungen befreiten Verschiebungsinformationen, wie sie das im vorigen Abschnitt beschriebene Korrelationsverfahren liefert, sind als direktes Steuersignal für die Position der Umlenkspiegel nicht geeignet — die Korrelation liefert einen *Geschwindigkeitsfehler*, aus dem ein *Positionssignal* erzeugt werden muß.

Ein anhand eines *Systemmodells* für die Nachführungseinheit entworfenes digitales Filter wandelt die Verschiebung zweier aufeinanderfolgender Halbbilder in das Positionssignal für die Spiegel um.

4.3.1 Systemmodell der Nachführungseinheit

Das Nachführungssystem wird als *state variable*-Modell beschrieben, bei dem der Zustand des Systems zu einem Zeitpunkt durch einen Satz von *Zustandsvariablen*⁵ charakterisiert wird. Eine Funktion der Zustandsvariablen und der Eingangsgrößen — in diesem Fall der Verschiebungsinformation — bestimmt den Zustand im folgenden Zeitschritt.

Als natürlicher Wert für die Größe der Zeitschritte, das *Abtastintervall*, bietet sich die Austastzeit für ein Halbbild (20 ms) an.

Man betrachtet nun die Apparatur als *lineares* System, das aus folgenden Subsystemen besteht:

- einer Vorschrift zur Gewinnung der diskretisierten tatsächlichen Geschwindigkeit v aus den Positionsmessungen w
- einem Schätzer für die Geschwindigkeit \hat{v}
- einem Schätzer für die Position \hat{w}

4.3.2 Tatsächliche Geschwindigkeit

Mit diesem Subsystem wird die tatsächliche mittlere Bewegung der beobachteten Teilchen in der Wasserströmung modelliert:

$$w_{n+1} = w_n + v_n \quad (4.18)$$

Die Einheit der Geschwindigkeit ist dabei so gewählt, daß $[w] = [v] T$, wobei T das Abtastintervall, in diesem Fall 20 ms, ist.

Es legt fest, daß mit der *tatsächlichen Geschwindigkeit* v_n zum Zeitpunkt n die *Vorwärtsdifferenz* der tatsächlichen Positionen gemeint ist:

$$v_n = w_{n+1} - w_n . \quad (4.19)$$

Dieses Modell für die Geschwindigkeit ist *akausal*, d. h. der Wert der Ausgangsgröße hängt von Zuständen *in der Zukunft* ab. Ein Filter nach dieser Vorschrift könnte nicht realisiert werden, ohne zusätzliche Verzögerungen einzuführen.

Die zugrundeliegende Beschreibung des physikalischen Vorgangs (4.18) ist kausal.

⁵engl. *state variables*

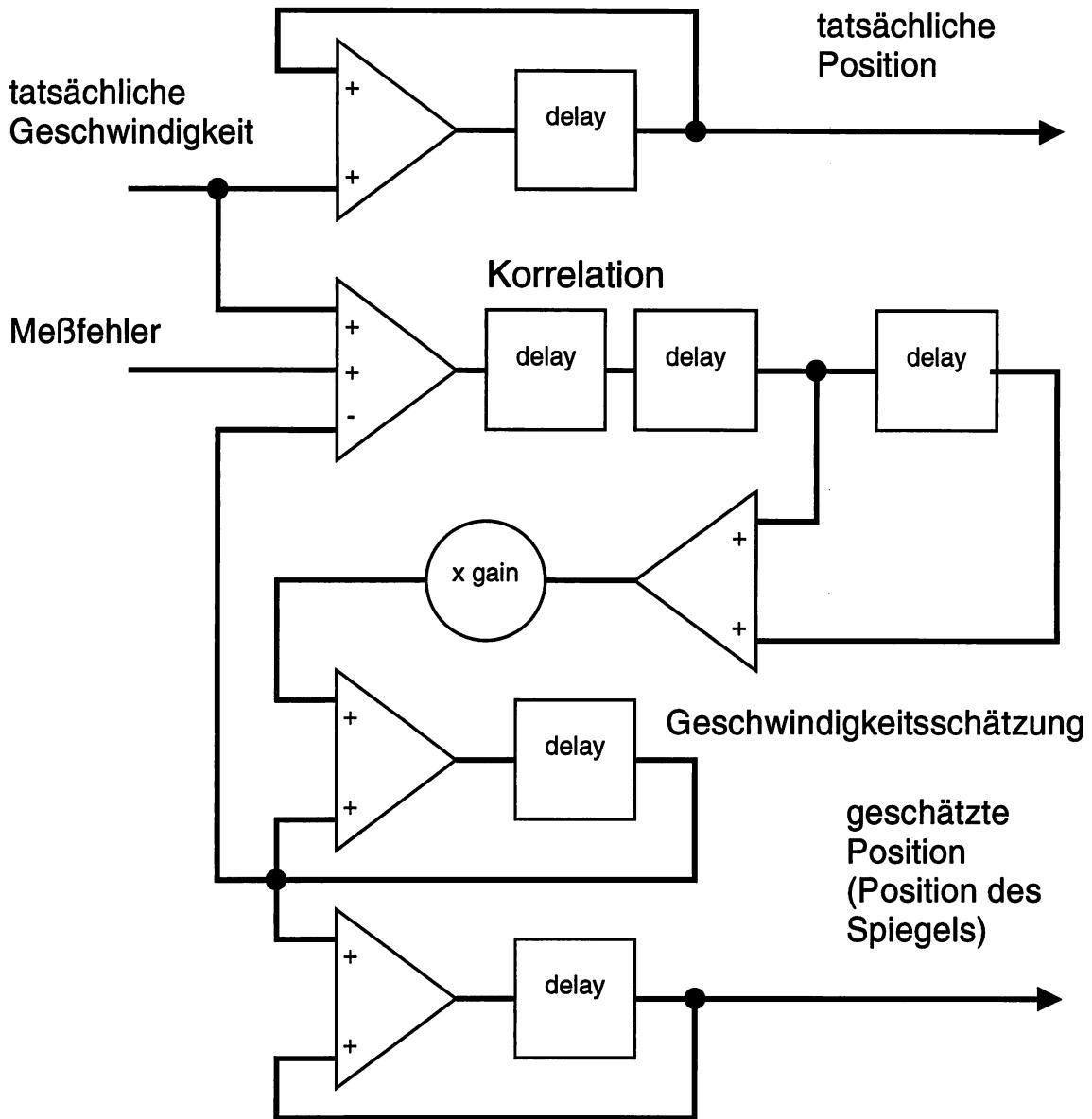


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung des Systemmodells für eine Achse, bestehend aus Addierern (Dreiecksymbole), Verzögerungsstufen (Rechtecke) und der Multiplikation mit einer Konstanten (Kreis). Aus dem Diagramm kann die Übertragungsfunktion mit dem Formalismus der z -Transformation direkt abgelesen werden.

4.3.3 Positionsschätzer

Der Positionsschätzer entspricht genau dem Modell für die tatsächliche Position (4.18). Allerdings steht nur eine *geschätzte* Geschwindigkeit \hat{v} zur Verfügung:

$$\hat{w}_{n+1} = \hat{w}_n + \hat{v}_n \quad (4.20)$$

Als Filter betrachtet ist der Positionsschätzer das *inverse Filter* zum Modell für die Geschwindigkeit (4.19). Durch die Definition von v_n als Vorwärtsdifferenz ist dieses Subsystem kausal und somit als verzögerungsfreies Filter realisierbar.

4.3. REKURSIVES FILTER

33

Anschaulich macht der Positionsschätzer die Differentiation der Ortsinformation zur Geschwindigkeit wieder rückgängig, indem er das Eingangssignal aufintegriert.

Als Integrator ist der Positionsschätzer extrem empfindlich gegen konstante, additive Fehler der geschätzten Geschwindigkeit, weil diese ein Wegdriften des Spiegels bewirken. An dieser Stelle kann man die endliche Genauigkeit der Zahlendarstellung in Computern gezielt dazu benutzen, kleine *offsets* der geschätzten Geschwindigkeit auf Null zu runden. Geringe Differenzen zwischen tatsächlicher Geschwindigkeit der Bildstrukturen und der Geschwindigkeit der Spiegel gehen durch begrenzte Genauigkeit des Positionsschätzers zwar ebenfalls verloren; es kann so aber sichergestellt werden, daß zumindest bei ruhenden Objekten keine Änderung der Spiegelstellungen erfolgt.

4.3.4 Geschwindigkeitsschätzer

Dieser Teil des Systems ist entscheidend für das Systemverhalten. Die wesentliche Beschränkung des Systems besteht darin, daß *prinzipiell* die Korrektur auf die geschätzte Geschwindigkeit erst mit drei Schritten Verzögerung zur Verfügung steht. Das liegt an der oben beschriebenen

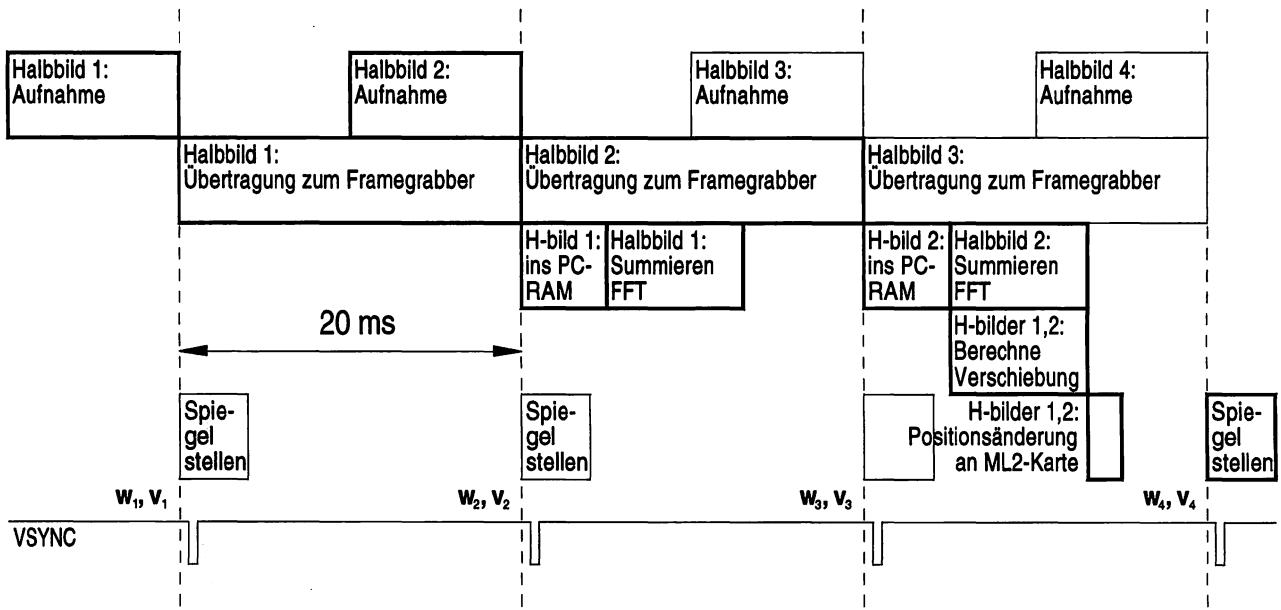


Abbildung 4.6: Zeitliche Abfolge der Operationen von der Aufnahme eines Bildes bis zum *davon abhängigen* Stellen der Umlenkspiegel

Messung der Geschwindigkeitskorrektur. Nach dem Verstellen der Spiegel wird das Bild von der Kamera aufgenommen. Zum Anfang des nächsten Halbbildes wird das Bild in den Ausgabepuffer der Kamera kopiert und während des nächsten Halbbildaustastzeitraums in den PC eingelesen. Unmittelbar danach (d. h. innerhalb eines Abtastzeitraums) werden die horizontalen und vertikalen Positionen „gemessen“, d. h. es werden eindimensionale Ortsfrequenzspektren berechnet. Erst wenn auch das darauffolgende Bild eingelesen ist, kann die Geschwindigkeitskorrektur durch Kreuzkorrelation bestimmt werden. Da die Positionsmessung des 2. Bildes, die Kreuzkorrelation, die Extraktion des Maximums und die Berechnung der Geschwindigkeitsschätzung im Zeitraum zwischen dem Einlesen des 2. Bildes und dem darauffolgenden Neustellen der Spiegel erfolgt, stehen zur Berechnung von \hat{v}_n (und damit \hat{w}_{n+1}) Korrekturwerte vom Zeitpunkt $n - 2$ und früher zur Verfügung.

Die Kreuzkorrelation liefert Werte der Form

$$u_n = \eta ((w_{n-1} - \hat{w}_{n-1}) - (w_{n-2} - \hat{w}_{n-2})) + \epsilon_{n-2} = \eta (v_{n-2} - \hat{v}_{n-2}) + \epsilon_{n-2}. \quad (4.21)$$

ϵ ist der Meßfehler.

η bezeichnet den Skalenfaktor zwischen der Ortsauflösung der Kamerakoordinate und der Ortsauflösung der Scannersteuerung. Wegen der geometrischen Verzerrung des Kamerabildes durch die Spiegel sind die (i. allg. unterschiedlichen) η der Bildachsen positionsabhängig.

Systemmodell des Geschwindigkeitsschätzers

Da die Messung der tatsächlichen Geschwindigkeit erst mit zwei Schritten Verzögerung zur Verfügung steht, ist es nötig, die Geschwindigkeit im voraus zu schätzen.

Ein guter Schätzer zeichnet sich dadurch aus, daß er aus dem gegenwärtigen und bereits vergangenen Zuständen möglichst genau den nächsten Zustand vorhersagt. Das gelingt umso besser, je genauer das verwendete Systemmodell der tatsächlichen Dynamik des Systems entspricht.

Sind die dynamische Gleichung und die statistischen Parameter der Meßwerte hinreichend genau bekannt, kann die „Güte“ eines Schätzers quantitativ angegeben werden und ein optimaler Schätzer entworfen werden [SSH 1994], [Ackermann 1985], [Bremer 1988].

Bei der vorliegenden Anwendung ist das nicht der Fall. Die genaue Dynamik des Systems ist im voraus nicht bekannt. Trotzdem kann man ausgehend von grundlegenden physikalischen Zusammenhängen ein Modell erstellen. Eine einfache physikalische Annahme ist, daß die Geschwindigkeit bis auf eine kleine Korrektur, die man aus der Messung des Geschwindigkeitsfehlers erhält, gleich bleibt. Dieses Annahme stimmt gut mit der Realität überein, so lange die auf die beobachteten Objekte einwirkenden Kräfte hinreichend klein sind. Ein darauf beruhender linearer Schätzer für die Geschwindigkeit hat die Form

$$\hat{v}_{n+1} = \hat{v}_n + \sum_{k=0}^{p-1} f_k u_{n-k} = \hat{v}_n - \sum_{k=0}^{p-1} f_k \eta \hat{v}_{n-k-2} + \sum_{l=0}^{p-1} f_l (\eta v_{n-l-2} + \epsilon_{n-l-2}). \quad (4.22)$$

Ein Schätzer in dieser Form ist besonders einfach zu implementieren, weil nur die aktuelle Geschwindigkeit v_n zwischengespeichert werden muß, wie aus der ersten Formulierung des Schätzers als Funktion der Korrelationsmessung (u) ersichtlich ist. Die zweite Formulierung drückt die Systemgleichung des Schätzers in den Modellvariablen (\hat{v}) und (v) aus.

Bei dem Geschwindigkeitsschätzer muß ein Kompromiß gesucht werden zwischen

- schneller Reaktion auf Eingangssignale,
- gutem Einschwingverhalten und
- guter Unterdrückung von Störsignalen.

Wie aus dem nächsten Abschnitt ersichtlich werden wird, hat der Regler insgesamt eine ausgeprägte *Tiefpaßcharakteristik* — das Eingangssignal wird zweimal integriert. Filterung mit einem Tiefpaß entspricht einer Glättung des Signals, deshalb werden *hochfrequente*⁶ Komponenten der Meßfehler (ϵ) auch bei nur einer Rückkopplung ($p = 1$) schon sehr gut unterdrückt.

Andererseits bewirkt die Integration, daß die Nachführung *prinzipiell* sehr empfindlich gegen Störungen mit konstantem Anteil reagiert. Ein konstanter, additiver Fehler (*offset*) bei der Korrelation bewirkt ein Wegdriften der Bildposition; „Ausreißer“ bei der Messung in eine Richtung verursachen einen Sprung in der Bildposition. Durch nachträgliches Zurückrechnen von Kamera in Weltkoordinaten können solche Sprünge bis zu einer gewissen Größe bei der offline-Analyse wieder ausgeglichen werden; trotzdem werden bei der Bestimmung des Korrelationsmaximums einige Maßnahmen vorgenommen, um spezifisch Störpulse mit großer Amplitude auszufiltern (vgl. Abschnitt 4.2.3).

⁶In diesem Zusammenhang sind schon Frequenzen von 10 Hz und mehr als „hoch“ anzusehen, siehe Abb. 4.10.

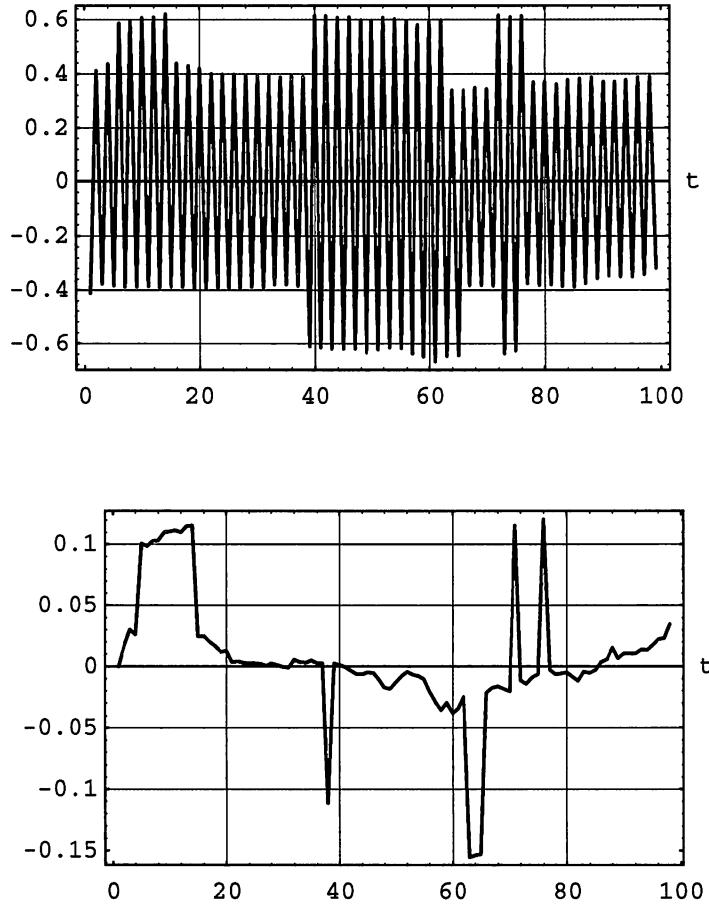


Abbildung 4.7: Auswirkung des Zeilensprungverfahrens bei der Bildaufnahme auf die Verschiebung senkrecht zu den Kamerazeilen: Die subpixelgenau ermittelte Verschiebung oszilliert um den tatsächlichen Wert. Die Amplitude der Oszillation von etwa $\pm \frac{1}{2}$ Pixel schwankt abhängig vom Bildinhalt der Korrelationsfenster. — Die Verschiebungssequenz wurde erzeugt durch Verstellen des Spiegels in Zeilenrichtung bei der Aufnahme eines ruhenden Testbildes mit einem zufälligen Punkt muster; die tatsächliche Verschiebung ist daher genau 0. — Das untere Diagramm zeigt den Wert der Verschiebung in Spaltenrichtung nach gleitender Mittelung über je zwei aufeinanderfolgende Werte.

Durch das halbbildweise Einlesen der Bildinformation im Zeilensprungverfahren ist dem Verschiebungssignal in horizontaler (Kamera *spalten*-) Richtung eine Oszillation mit der halben Ab tastfrequenz und einer Amplitude von ungefähr $\pm \frac{1}{2}$ überlagert. Diese Oszillation tritt bei den Messungen in Abschnitt 5.3 als Standardabweichung von etwas weniger als $\frac{1}{2}$ bei nicht über 2 Halbbildern gemittelten Verschiebungsmessungen auf (siehe Tabellen 5.1, 5.2 und 5.3).

Da sich bei der Größe der beobachteten Teilchen von wenigen Pixeln Quantisierungseffekte bei der Aufnahme bemerkbar machen, schwankt die Amplitude der Oszillation zu stark, um sie zuverlässig ins Modell einzubauen und vom Verschiebungssignal (u) subtrahieren zu können (siehe Abb. 4.7).

Aus diesem Grund wird zur Geschwindigkeitsschätzung die Verschiebungsinformation zweier aufeinanderfolgender Korrelationen mit gleichem Gewicht verwendet:

$$\hat{v}_{n+1} = \hat{v}_n + f(u_n + u_{n-1}) = \hat{v}_n - f\eta(\hat{v}_{n-2} - \hat{v}_{n-3}) + f\eta(v_{n-2} + v_{n-3}) + f(\epsilon_{n-2} + \epsilon_{n-3}) \quad (4.23)$$

Damit wird die durch das Halbbildverfahren verursachte Störung vollständig eliminiert; allerdings verschlechtert sich das Reaktionsvermögen des Systems auf schnelle Geschwindigkeitsänderungen.

Das Systemmodell für eine Achse wird in Abbildung 4.5 schematisch dargestellt.

4.3.5 Dynamisches Verhalten des Systems

Das dynamische Verhalten des Systems lässt sich mit Methoden der z -Transformation bestimmen [SSH 1994], [Ackermann 1985], [Jain 1989](?).

Die z -Transformation ist ein Verfahren, mit dem das dynamische Verhalten *diskreter* Systeme in Form algebraischer Gleichungen dargestellt werden kann. Sie entspricht somit der Laplace-Transformation für kontinuierliche Signale.

Die Systemkomponenten haben folgende z -Transformierte:

Systemkomponente	Zustandsgleichung	z -Transformierte
Geschwindigkeit	$v_n = w_{n+1} - w_n$	$\frac{z-1}{z^4 - z^3 + f\eta(z+1)}$
Geschwindigkeitsschätzer	$\hat{v}_{n+1} = \hat{v}_n - f(u_n + u_{n-1})$	$\frac{f\eta(z+1)}{z^4 - z^3 + f\eta(z+1)}$
Positionsschätzer	$\hat{w}_{n+1} = \hat{w}_n + \hat{v}_n$	$\frac{1}{z-1}$

Wie im kontinuierlichen Fall gilt der *Faltungssatz*, demzufolge die Transformierte der Übertragungsfunktion für die Hintereinanderausführung linearer Filteroperationen dem Produkt der Transformierten der einzelnen Funktionen entspricht.

Den Frequenzgang des Systems erhält man durch Einsetzen von $z = e^{\frac{2\pi i\nu}{\nu_S}}$ in die Übertragungsfunktion des Systems:

$$\mathcal{Z}\left[\frac{\hat{w}}{w}\right]\left(z = e^{\frac{2\pi i\nu}{\nu_S}}\right) = \frac{1}{1 + i\frac{e^{\frac{6\pi i\nu}{\nu_S}}}{f\eta} \tan\left(\frac{\pi\nu}{\nu_S}\right)} \frac{e^{\frac{2\pi i\nu}{\nu_S}} - 1}{e^{\frac{2\pi i\nu}{\nu_S}} - 1} \quad (4.24)$$

für die Übertragungsfunktion der Position; die Übertragungsfunktion für die Geschwindigkeiten ist

$$\mathcal{Z}\left[\frac{\hat{v}}{v}\right]\left(e^{\frac{2\pi i\nu}{\nu_S}}\right) = \frac{1}{1 + i\frac{e^{\frac{6\pi i\nu}{\nu_S}}}{f\eta} \tan\left(\frac{\pi\nu}{\nu_S}\right)}. \quad (4.25)$$

Die Übertragungsfunktionen für die geschätzte Position aus der tatsächlichen Bildposition und für die geschätzte Geschwindigkeit aus der tatsächlichen Geschwindigkeit unterscheiden sich nur um die hebbare Singularität bei $1 = z = e^0$. Das kommt dadurch zustande, daß sich die Beiträge der Übertragungsfunktionen des Geschwindigkeitsmodells (4.19) und des Positionsschätzers (4.20) bis auf die Singularität, die wiedergibt, daß nach einer Differentiation mit anschließender Integration die Information über die absolute Position verlorengeht, aufheben. Das Frequenzverhalten wird also ausschließlich durch den Geschwindigkeitsschätzer bestimmt. Für verschiedene Rückkopplungen ist dessen Amplituden- und Phasenverhältnis in Abb. 4.8 dargestellt.

Entscheidend für die Güte der Nachführung ist die Abweichung der geschätzten Position von der tatsächlichen Position $w - \hat{w}$. Diese Differenz bleibt trotz Nachführung auch dann im Bild sichtbar, wenn innerhalb des aufgenommenen Bildes keine relativen Bewegungen stattfinden.

Für den relativen Fehler bei der Nachführung ist die Übertragungsfunktion⁷

$$\mathcal{Z}\left[\frac{v - \hat{v}}{v}\right]\left(e^{\frac{2\pi i\nu}{\nu_S}}\right) = \frac{1}{1 - i f\eta e^{\frac{-6\pi i\nu}{\nu_S}} \cot\left(\frac{\pi\nu}{\nu_S}\right)}. \quad (4.26)$$

⁷Die Übertragungsfunktionen für den relativen Geschwindigkeitsfehler und den relativen Positionsfehler unterscheiden sich nur bei $\nu = 0$. Der konstante Anteil des Positionsfehlers ist beliebig, da die Korrelation keine absolute Position bestimmen kann.

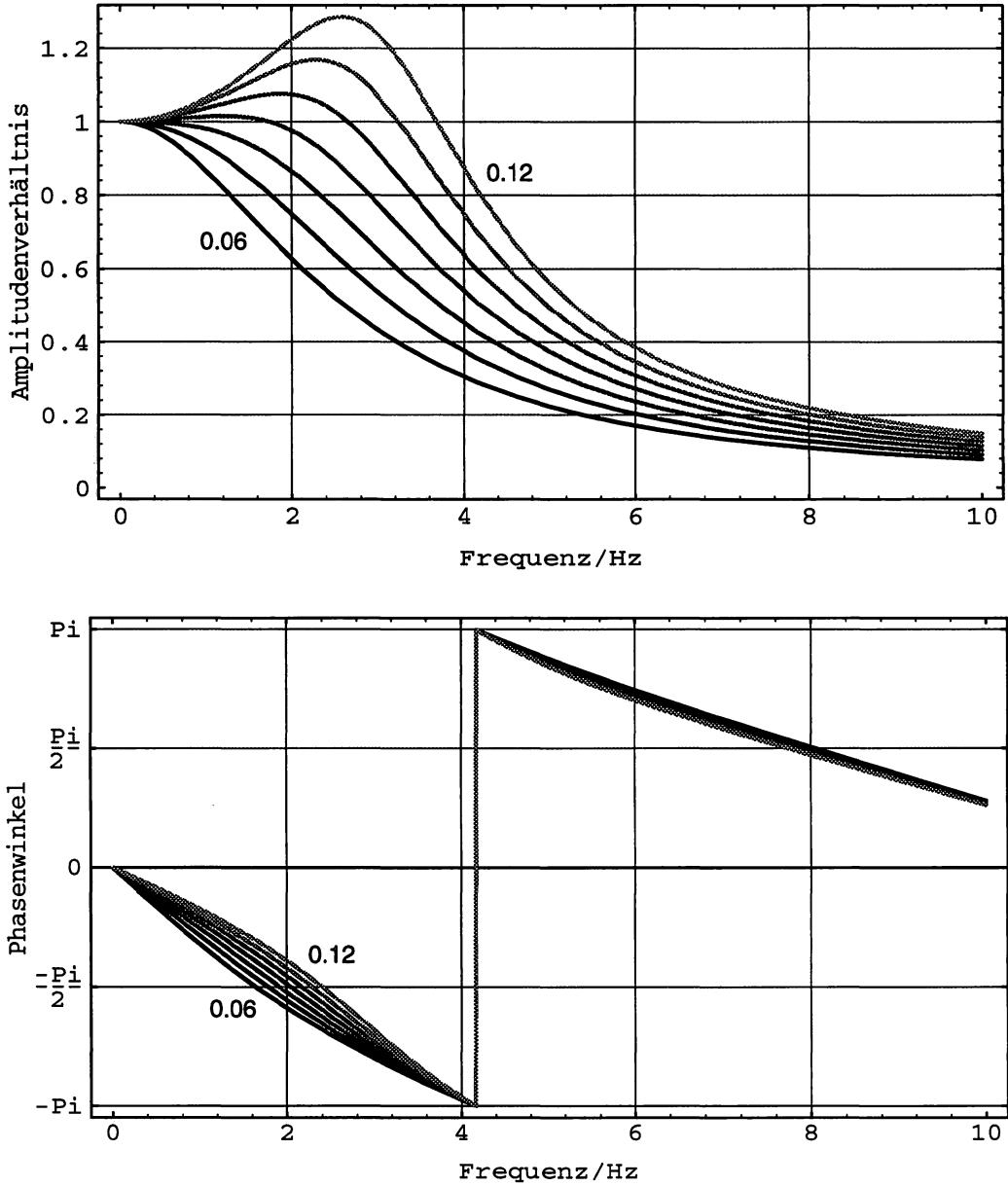


Abbildung 4.8: Frequenz- und Phasengang der Übertragungsfunktion von tatsächlicher zu geschätzter Position sowie tatsächlicher zu geschätzter Geschwindigkeit für verschiedene Rückkopplungsverstärkungen $f\eta = 0.06, 0.07, \dots, 0.12$. Mit zunehmender Rückkopplungsverstärkung verstärkt sich das Überschwingen, während sich die Phasenverschiebung für kleine Frequenzen verringert.

Dem Frequenzgang des relativen Fehlers der Nachführung (Abb. 4.9) entnimmt man, daß eine Verfolgung von Bewegungen nur bis zu einer Frequenz von etwa 1 Hz möglich ist. Auf Geschwindigkeitsänderungen höherer Frequenz kann sich das System wegen der Verzögerung von der Bildaufnahme bis zum Einlesen der Daten in den PC nicht schnell genug einstellen. Für Frequenzen über 1 Hz ist das Verhalten des Systems mit Nachführung sogar *schlechter* als ohne Nachstellen der Spiegel: steigt die Phasenverschiebung zwischen tatsächlichem und nachgeführtem Signal über 60° , ist sogar bei einem Amplitudenverhältnis dieser Signale von genau 1 die Amplitude des Fehlersignals größer als die des ursprünglichen Signals⁸.

⁸Diesen Sachverhalt kann man sich mit der Rechnung $\sin(\omega t) - \sin(\omega t - \phi) = 2 \sin(\frac{\phi}{2}) \cos(\omega t - \frac{\phi}{2})$ herleiten:

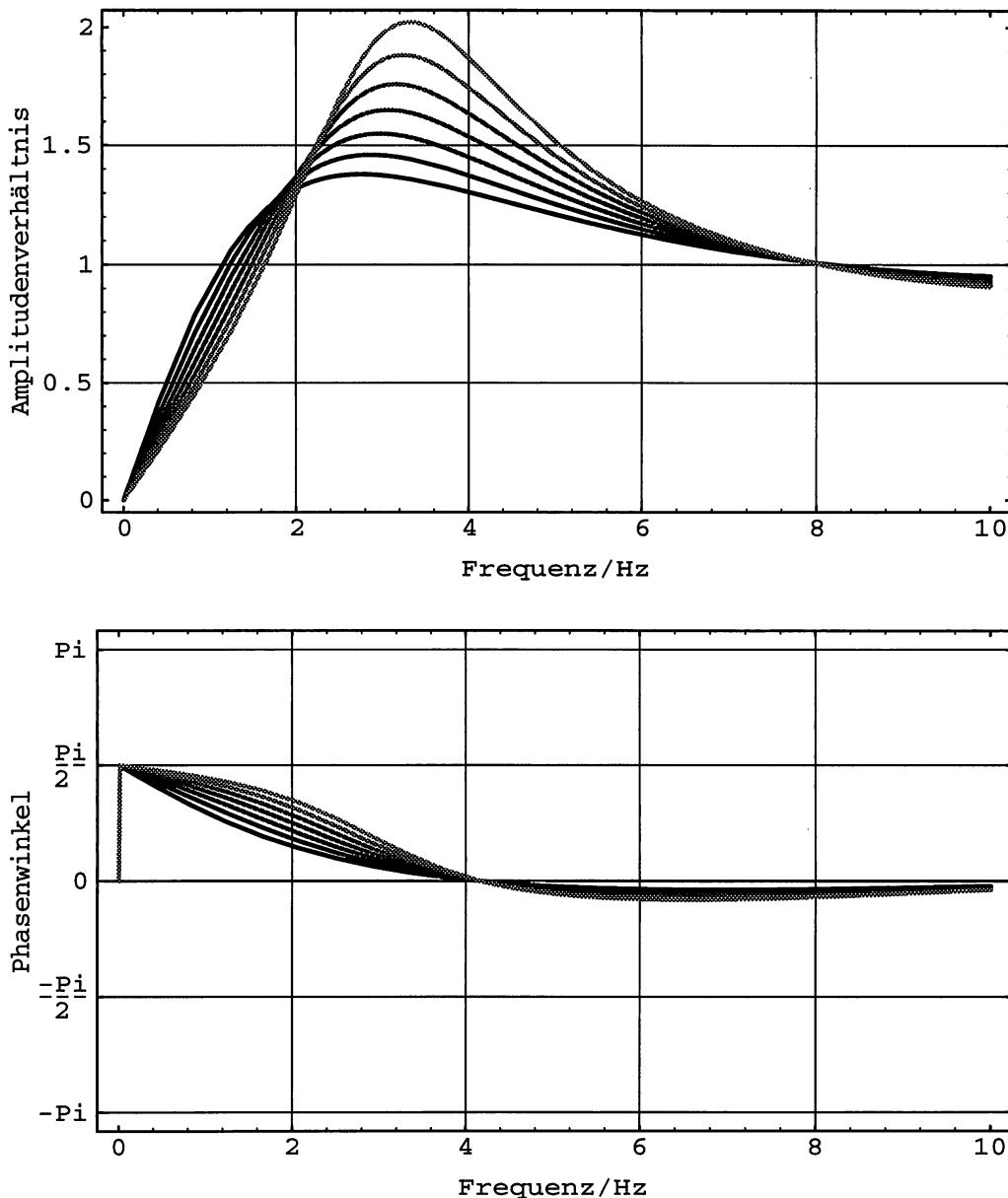


Abbildung 4.9: Frequenz- und Phasengang der Übertragungsfunktion der Differenz zwischen tatsächlicher und geschätzter Position bzw. Geschwindigkeit für verschiedene Rückkopplungsverstärkungen $f\eta = 0.06, 0.07, \dots, 0.12$. Mit zunehmender Rückkopplungsverstärkung verringert sich der Fehler im Bereich bis 2 Hz; bei höheren Frequenzen vergrößert sich der Fehler stark.

Die Korrelationsmessung ist mit Meßfehlern behaftet.

Durch zufällige Korrelation neu in die Bildausschnitte kommender Bildstrukturen mit dem vorigen Bildausschnitt entstehen additive Fehler (ϵ) bei der Messung der Verschiebung.

Die Übertragungsfunktion dieses Meßfehlers (ϵ) auf die *Geschwindigkeit* der Umlenkspiegel (\hat{v}) entspricht genau der Übertragungsfunktion für die tatsächliche Geschwindigkeit (v).

Die Amplitude des Differenzsignals ist $2 \sin(\frac{\phi}{2})$.

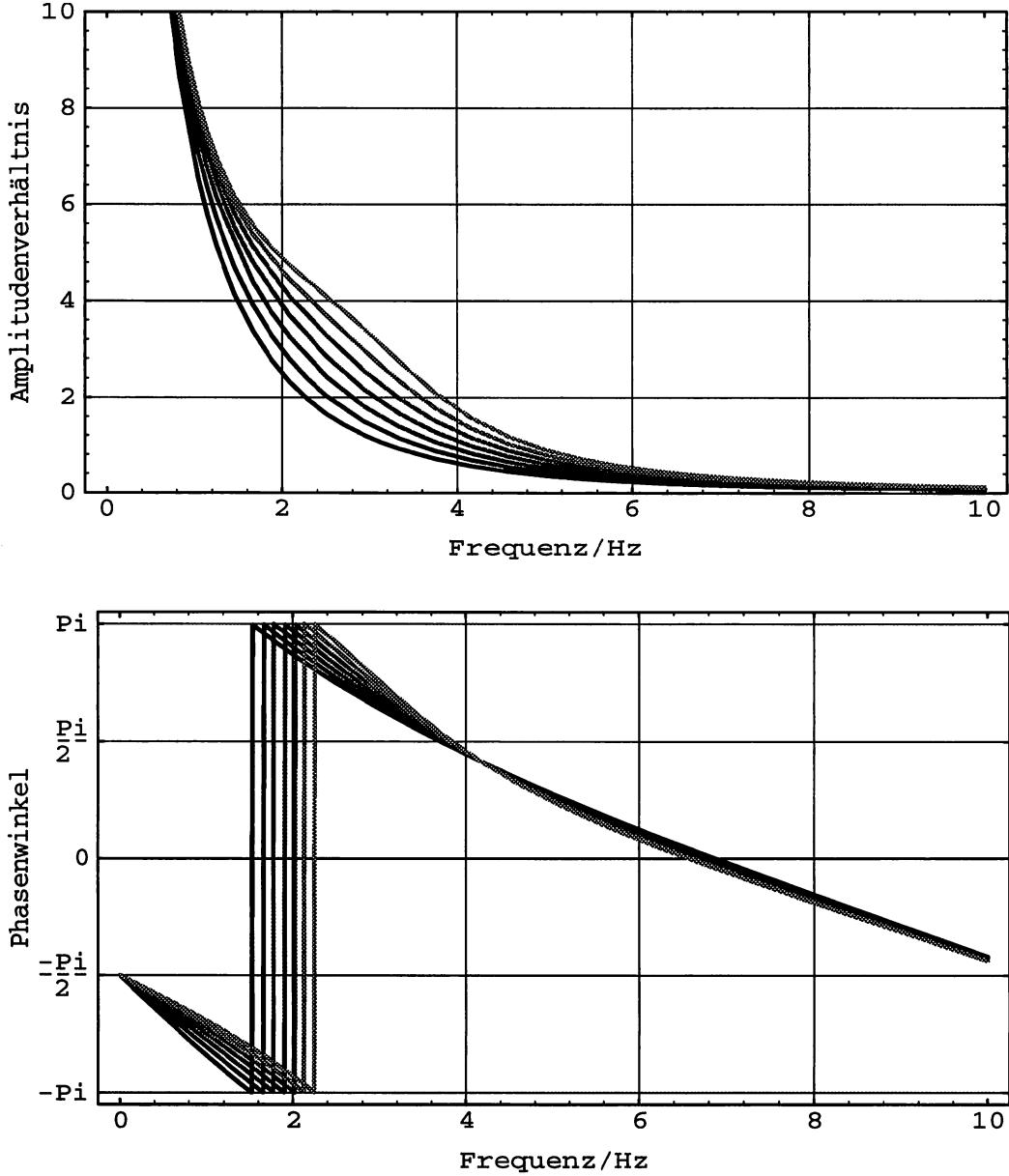


Abbildung 4.10: Frequenz- und Phasengang der Übertragungsfunktion von Meßfehlern der Korrelation zur geschätzten Position für verschiedene Rückkopplungsverstärkungen $f\eta = 0.06, 0.07, \dots, 0.12$. Durch die Integratorstufe hat die Übertragungsfunktion einen Pol für einen konstanten Offset.

Bei der Übertragung auf die Position \hat{w} der Spiegel wird der Fehler noch zusätzlich aufintegriert:

$$\mathcal{Z} \left[\frac{\hat{w}}{\epsilon} \right] \left(e^{\frac{2\pi i \nu}{\nu_S}} \right) = \frac{1}{\left(e^{\frac{2\pi i \nu}{\nu_S}} - 1 \right) \left(1 + i \frac{e^{\frac{6\pi i \nu}{\nu_S}}}{f\eta} \tan \left(\frac{\pi \nu}{\nu_S} \right) \right)} \quad (4.27)$$

Die durch einen konstanten additiven Meßfehler verursachte Ortsabweichung wächst somit über alle Grenzen; die Übertragungsfunktion hat bei $\nu = 0$ Hz einen Pol (siehe Abb. 4.10). Ein offset bei der Verschiebungsmessung würde sich also als Wegdriften der Bildposition schon bei völlig unbewegten Objekten bemerkbar machen.

Bei der gewählten Quantisierung der geschätzten Geschwindigkeit \hat{v} (1/256 DAC-Schritt) tritt

bei stehenden Bildern keine Drift auf.

Mit wachsender Differenz zwischen Objekt- und Spiegelgeschwindigkeit, auch senkrecht zur Stellrichtung des jeweiligen Reglers, nimmt der Anteil der in den Korrelationsfenstern aufeinanderfolgender Halbbilder enthaltenen Objektstrukturen an der gesamten in den Korrelationsfenstern enthaltenen Bildinformation ab und additive Fehler (ϵ) somit zu.

Diese Fehler können sich als kleine Sprünge der Spiegelpositionen und einer der nachgeföhrten Bewegung überlagerte Drift bemerkbar machen. Die Verfahren zur offline-Analyse der aufgenommenen Bilddaten müssen gegen solche, bei einer Ortsnachführung anhand von Geschwindigkeitmessungen prinzipiell nicht völlig vermeidbare Nachführungsfehler robust sein.

Wenig problematisch wirkt sich die durch die geometrische Verzerrung des aufgenommenen Bildes verursachte Änderung des Verhältnisses η zwischen der Verschiebung des Bildes in der Kameraebene und der dazu erforderlichen Winkeländerung der Umlenkspiegel aus. Effektiv wird dadurch nur die Verstärkung des Geschwindigkeitsfehlers und somit das Zeitverhalten leicht verändert.

4.4 Ansteuerung der Umlenkspiegel

Die durch das lineare Filter erzeugten geschätzten Positionen können jetzt zur Ansteuerung der Spiegel verwendet werden. Die Umlenkspiegel reagieren mit etwa 1 ms Verzögerung auf eine Änderung des Positioniereingangs. Der größte Teil des Verstellweges wird in etwa 3 ms durchlaufen; nach einer weiteren Millisekunde ist die Endposition erreicht.

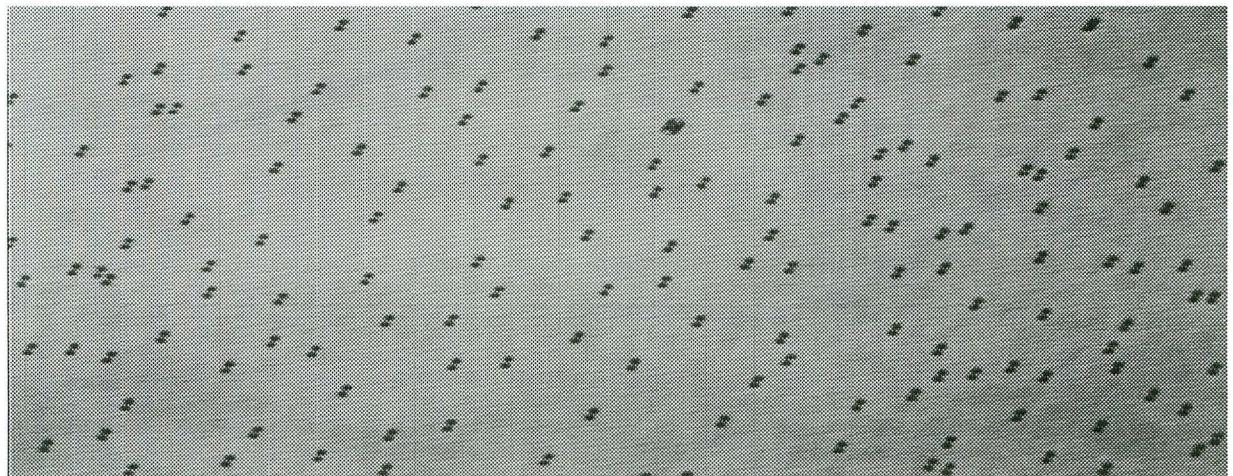


Abbildung 4.11: Aufnahme eines Testbildes zufällig verteilter Punkte mit einer Integrationszeit von 40 ms und Verstellen der Spiegel nach Abb. 4.6 — Durch das Springen der Spiegel in der Mitte des Aufnahmezeitraums erscheinen die Punkte an zwei, um den Verstellweg der Spiegel verschobenen Bildpositionen.

Es muß sichergestellt werden, daß die Kamera während des Verstellens der Spiegel keine Bildinformation aufnimmt. Ist die Belichtungsdauer für ein (Halb-)bild groß gegen die Verstelldauer der Spiegel, erscheinen die aufgenommenen Objekte an *zwei*, um den Verstellweg der Spiegel auseinanderliegenden Positionen (siehe Abb. 4.11). Dadurch entstehen bei der Verschiebungsauswertung falsche Korrelationsmaxima, und die Position des aufgenommenen Bildes in der Objektebene, die für die weitere Analyse der Bilder nötig ist, kann nicht mehr eindeutig angegeben werden.

Diese Verfälschung der Bewegungsinformation wird vermieden, indem die Kamera so eingestellt

wird, daß sie nur in der ersten Hälfte eines Halbbildaustastintervalls lichtunempfindlich ist und das Positionssignal für die Spiegel unmittelbar nach dem VSYNC-Signal geändert wird (siehe Abb. 4.6).

Durch die Bewegung der aufgenommenen Objekte *innerhalb* eines Belichtungszeitraumes erscheinen diese trotz Nachführung verschmiert; es entstehen sogenannte *streaks*. Für die weitere Auswertung der Bilder (siehe [Hering 1996]) ist das sogar von Vorteil.

Beim gegenwärtigen (Dezember 1995) Stand der *offline*-Analyse ist ein Überlappen der Teilchenspuren für die Zuordnung der Tracerteilchen von einem Halbbild zum nächsten sehr vorteilhaft.

Der in Abb. 4.11 gezeigte Doppelbelichtungseffekt kann vermieden werden, wenn die Schätzung der Position aus der geschätzten Geschwindigkeit auf der in Abschnitt 3.2.5 beschriebenen intelligenten Schnittstellenkarte implementiert und die Position mit einer höheren Abtastrate als der Rate der Neuberechnung der geschätzten Geschwindigkeit an die Steuereinheit der Spiegel ausgegeben wird.

Erste Versuche mit linear interpolierten Positionssignalen, die mit 5-fach höherer Abtastrate als der Halbbildaustastfrequenz an die Ansteuerungseinheit der Spiegel ausgegeben wurden, führten zu einer deutlichen Verbesserung des Ergebnisses der *offline*-Analyse.

4.5 Implementierung

Die Bildeinleseroutinen für den Framegrabber, die Verschiebungsbestimmung durch Kreuzkorrelation und der Geschwindigkeitsschätzer wurden auf dem PC unter dem 32-bit DOS C++ Compiler von WATCOM, Version 10.0, implementiert. Der Positionsschätzer wurde als Task des Echtzeitbetriebssystems auf der ML2-Karte implementiert und mit dem Borland C++ Compiler, Version 3.1 programmiert.

Die Programmierung unter dem „Betriebssystem“ MS-DOS wurde gewählt, weil dessen relativ einfache Struktur eine vergleichsweise gute und reproduzierbare Betriebssicherheit selbstentwickelter Programme zuläßt. Durch die 32-bit-Erweiterungen entfällt der Hauptnachteil von DOS, die von 8-bit-Prozessoren übernommene Einschränkung des zusammenhängenden Adressraums auf 64 KByte.

Die gewählte Programmiersprache C++ ermöglicht die Verwendung *objektorientierter* Programmieransätze, der Zusammenfassung von Daten und der sie manipulierenden *Methoden* zu *Objekten* und der *Vererbung* von Daten und Methoden der Eigenschaften von Datentypen an *abgeleitete* Objekte [Stroustrup 1991].

Für die Rechengeschwindigkeit äußerst wichtig ist die *inline* Deklaration vieler elementarer Funktionen. Dieses Sprachkonstrukt von C++ erlaubt die sehr effiziente Implementierung von Unterprogrammen ohne zusätzlichen Rechenaufwand für Funktionsaufrufe im kompilierten Programm.

4.5.1 Rechenzeit

Die Rechenzeit für die einzelnen Routinen wurde gemessen, indem nach der Ausführung der einzelnen oben beschriebenen Bearbeitungsschritte jeweils eine 4-stellige Binärzahl über den Paralellport des Rechners ausgegeben wurde. Über einen 4-bit-Digital-Analog-Wandler und ein Oszilloskop (siehe Abb. 4.12) kann so das Timing unmittelbar abgelesen werden.

Für die Rechenzeit der einzelnen Bearbeitungsschritte erhält man folgende Werte:

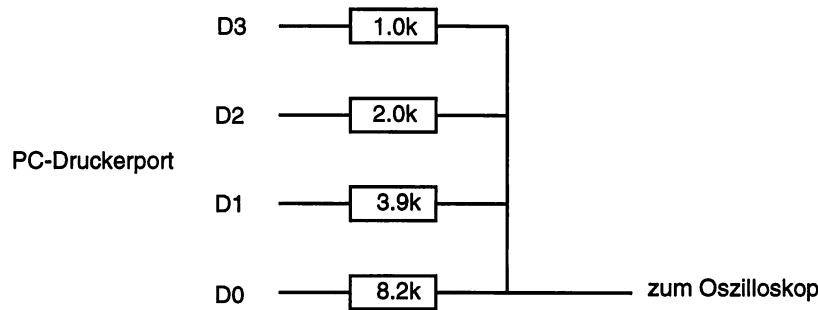


Abbildung 4.12: 4-bit Analog–Digital–Wandler zur Messung der Rechenzeit einzelner Routinen mit einem Oszilloskop durch Ausgabe von Zahlen auf den Druckerport des PC

Halbbildtransfer vom Framegrabber zum PC	4.8 ms
Aufsummieren eines 128×40 Pixel großen Bildausschnitts	1.4 ms
Aufsummieren eines 64×40 Pixel großen Bildausschnitts	0.8 ms
Eindimensionale FFT mit 128 Stützpunkten	0.8 ms
Eindimensionale FFT mit 64 Stützpunkten	0.3 ms
Komplexes Skalarprodukt, 64 Werte	< 0.2 ms
Maximumfit, 7 Stützstellen	< 0.2 ms
Kommunikation mit der ML2-Karte	0.6 ms

Die Genauigkeit der Rechenzeiten ist jeweils ± 0.1 ms.

Bei der Entwicklung des Korrelationsverfahrens haben sich je zwei 128×40 Pixel große Bildausschnitte für die Verschiebung in Zeilenrichtung und zwei 40×64 Pixel große Ausschnitte für die Verschiebungsbestimmung in Spaltenrichtung bewährt. Mit diesen Werten liegt die gesamte Rechenzeit vom Einlesen eines Halbbildes bis zum Erstellen einer zweidimensionalen Geschwindigkeitsschätzung bei etwa 16 ms und ist somit zuverlässig geringer als die Halbbildaustastzeit von 20 ms.

Durch die Auslagerung des Positionsschätzers auf die ML2-Karte ist es möglich, diesen mit einer vom PC unabhängigen, interruptgesteuerten Routine zu realisieren und für eine quasikontinuierliche Verstellung der Spiegel die Ausgaberate des Positionssignals höher als die Halbbildaustastzeit von 20 ms zu wählen.

Kapitel 5

Messungen

In diesem Kapitel sind die Messungen aufgeführt, mit denen die Eigenschaften der Nachführung untersucht wurden. Durch Vermessung eines Testbildes bekannter Größe wird die Größe der Kamerapixel bestimmt. Die Winkelauflösung der Digital-Analog-Wandler wird sowohl in Winkelheiten als auch in der entsprechenden Anzahl von Pixeln gemessen. Das Verhältnis von DAC-Schritten zu Pixeln geht in die Rückkopplung der Regelung ein und kann deshalb mit Hilfe der Verschiebungsbestimmung nachgemessen werden. Die Übereinstimmung des Zeitverhaltens der Nachführung mit dem theoretisch berechneten Modell wird mit der Aufnahme der sinusförmigen Bewegung eines auf ein Pendel montiertes Testbild verifiziert. Für die Korrektur der durch die Umlenkspiegel verursachten geometrischen Verzerrung wird ein Algorithmus zur Rücktransformation von Bildkoordinaten in Objektkoordinaten angegeben und anhand einer Eichung verifiziert. Schließlich werden Strömungsbilder aufgenommen und Spuren einzelner Teilchen mit dem PTV-Algorithmus nach [Hering 1996] ausgewertet.

Aus zwei Gründen sind bei dem hier beschriebenen Meßaufbau Eichungen der Bildgeometrie erforderlich:

- Beim Entwurf des Reglers gehen die Skalenfaktoren η in die Systemgleichung mit ein (siehe Abschnitt 4.3.4). Auch wenn die Regelung gegen leichte Variationen der Skalen robust ist, muß doch das Verhältnis zwischen der Änderung des Wertes zur Steuerung der Spiegelpositionen und der entsprechenden Verschiebung des Bildes in Pixeln grob bekannt sein.
- Für die *offline*-Auswertung der Bilddaten muß die Position der beobachteten Tracerteilchen in der Objektebene möglichst genau bekannt sein. Die einem Fotoelement auf dem CCD entsprechende Position in der Objektebene ist von der Einstellung der Umlenkspiegel abhängig. Außerdem verursachen die Umlenkspiegel eine deutliche geometrische Verzerrung des aufgenommenen Bildes, die möglichst genau korrigiert werden muß.

5.1 Messung der Pixelgröße

Sowohl für die Festlegung der Verstärkungsfaktoren des Korrelationssignals in der Regelung als auch bei der Übertragung der Pixelkoordinaten in eine Position in der Objektebene ist die Größe eines einzelnen Pixels λ entscheidend.

Betrachtet man ein Objekt der Länge L im Abstand g durch ein Objektiv der Brennweite f und mißt die Länge p des Bildes in Pixeln, läßt sich unter Verwendung der Abbildungsgleichung für ideale Linsen [Hecht 1989]

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g} \quad (5.1)$$

und dem Strahlensatz

$$\frac{\lambda p}{L} = \frac{b}{g} = \frac{f}{g-f} \quad (5.2)$$

die Größe eines Pixels sofort angeben.

Bei dem verwendeten Meßaufbau setzt sich der Objektabstand g aus 3 Komponenten zusammen: dem Abstand D vom Objekt zum Y-Spiegel, dem Abstand der Spiegelmittelpunkte E und dem Abstand des X-Spiegels von der objektseitigen Hauptebene des Objektivs S .

Weil die Lage der objektseitigen Hauptebene im Objektiv S nicht exakt bekannt ist, kann S nicht genau gemessen werden. Bei 30 mm Länge des Objektivs und einem typischen Abstand der X-Y-Ablenkeinheit zum Objekt von 60 cm entspricht das einer Unsicherheit der Pixelgröße von 5%.

Um diese Unsicherheit zu verringern, wird in der Nullstellung der Umlenkspiegel die Größe der Abbildung des Objekts in Pixeln p bei verschiedenen Abständen D zur Scannereinheit gemessen und ein *least squares fit* an die quadratische Differenz zwischen gemessenen und berechneten Bildgrößen

$$\chi^2(\lambda, S) := \sum_n \left(\frac{f L}{\lambda(S + E + D_n - f)} - p_n \right)^2$$

mit dem Levenberg–Marquardt–Algorithmus [NumRec 1988] vorgenommen.

Somit können die Pixelgrößen der Kamera in Zeilenrichtung λ_Z und in Spaltenrichtung λ_S sowie der unbekannte Abstand S gleichzeitig bestimmt werden.

Das Ergebnis der Messung nach dieser Methode bei 5 verschiedenen Abständen ist

$$\lambda_Z = 8.73 \mu\text{m} \pm 0.06 \mu\text{m} \quad \text{und} \quad \lambda_S = 17.1 \mu\text{m} \pm 0.2 \mu\text{m} \quad (= 2 \cdot 8.6 \mu\text{m})$$

für die Pixelgrößen; für den Abstand von der objektseitigen Hauptebene des Objektivs zur Mitte des X-Spiegels findet man

$$S = 40 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm} \quad \text{bzw.} \quad S = 32 \text{ mm} \pm 6 \text{ mm}, \quad \text{gemittelt} \quad S = 37 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$$

Der mit dieser Methode gefundene Wert für die horizontalen und vertikalen Pixelgrößen¹ befindet sich in guter Übereinstimmung mit der im Datenblatt [SONY] angegebenen Pixelgröße von $8.6 \mu\text{m} \times 8.3 \mu\text{m}$.

Der Öffnungswinkel des Bildausschnitts ist für hinreichend großen Objektabstand nahezu konstant

$$\phi = 2 \arctan \left(\frac{n_{\text{Pixel}} \lambda}{2f} \right).$$

Für die Aufnahmeeinheit sind die Öffnungswinkel

$$\phi_Z = 2 \arctan \left(\frac{736 \cdot 8.73 \mu\text{m}}{50 \text{ mm}} \right) = 14.6^\circ \quad \text{und} \quad \phi_S = 2 \arctan \left(\frac{286 \cdot 17.1 \mu\text{m}}{50 \text{ mm}} \right) = 11.2^\circ$$

5.2 Messung der Winkelskalen

Für die Regelung und Koordinatenbewegung genauso wichtig sind die Winkel, um welche die Umlenkspiegel sich pro Spannungsschritt bewegen.

An den Digital–Analog–Wandlern für die Ansteuerung der Spiegel vom Rechner und den Analog–Digital–Wandlern zur Positionsrückmeldung sind die Winkelstellungen als vorzeichenbehaftete 12 bit–Binärzahlen codiert.

¹Die horizontale Breite eines Kamerapixels stimmt wegen der an den Pixeltakt der Kamera angepaßten Einlesefrequenz überein; da beim implementierten Aufnahmeverfahren Halbbilder getrennt behandelt werden, wird der doppelte Abstand zwischen 2 Pixeln gemessen.

5.2. MESSUNG DER WINKELSKALEN

45

Läßt man zunächst die geometrische Verzerrung innerhalb des Bildes außer acht, findet man die Beziehung zwischen den Stellwinkeln ξ und v und der dadurch verursachten Verschiebung im Bild L aus einfachen trigonometrischen Überlegungen [GSI 1991]:

$$\tan(2v) = \frac{L_Z}{D} \quad (5.3)$$

$$\tan(2\xi) = \frac{L_S}{\frac{D}{\cos(2v)} + E} \quad (5.4)$$

Mit Gleichung (5.2) kann man L durch die in Pixeln gemessene Verschiebung p ausdrücken. Für hinreichend kleine Winkel ist außerdem $\tan \varphi \approx \varphi$ und $\cos \varphi \approx 1$.

Damit findet man zwischen den Positionswerten für die Spiegel w_X und w_Y und den dadurch verursachten Verschiebungen im Bild p_Z und p_S die Beziehung

$$2 \Upsilon w_Y = \frac{S + E + D - f}{Df} \lambda_Z p_Z \quad (5.5)$$

$$2 \Xi w_X = \frac{S + E + D - f}{(D + E)f} \lambda_S p_S \quad (5.6)$$

Die für das Systemmodell relevanten Skalenfaktoren η_X und η_Y ergeben sich direkt als Quotienten

$$\eta_Y = \frac{p_Z}{w_Y} \quad \text{und} \quad \eta_X = \frac{p_S}{w_X}. \quad (5.7)$$

Eine Messung über jeweils 10 Winkelstellungen bei einem Abstand von $D = 600$ mm ergibt Faktoren von

$$\eta_Y = 0.520 \pm 0.001 \frac{\text{Pixel}}{\text{DAC-Einheit}} \quad \text{und} \quad \eta_X = -0.289 \pm 0.001 \frac{\text{Pixel}}{\text{DAC-Einheit}} \quad (5.8)$$

Für die Winkel pro DAC-Einheit findet man damit

$$\Upsilon = \frac{(9.66 \pm 0.07) \cdot 10^{-5}}{\text{DAC-Einheit}} = \frac{1^\circ}{181 \pm 1 \text{ DAC-Einheiten}} \quad (5.9)$$

und

$$\Xi = \frac{-(1.01 \pm 0.01) \cdot 10^{-4}}{\text{DAC-Einheit}} = \frac{-1^\circ}{173 \pm 2 \text{ DAC-Einheiten}} \quad (5.10)$$

Im Vergleich mit dem spezifizierten Mindestaussteuerbereich der Umlenkspiegel von $\pm 10^\circ$ bei ± 2048 DAC-Einheiten [GSI 1991] erscheinen diese Werte plausibel.

Im Rahmen dieser Messung kann auch das *Übersprechen* der Stellrichtungen gemessen werden, d. h. wie stark sich die Winkeländerung eines Umlenkspiegels auf die dazu *senkrechte* Bildkoordinate auswirkt.

Im Rahmen der Meßgenauigkeit findet man

$$p_Z = 0.003 \frac{\text{Pixel}}{\text{DAC-Einheit}} w_X \quad \text{und} \quad p_S = 0.0 \frac{\text{Pixel}}{\text{DAC-Einheit}} w_Y. \quad (5.11)$$

Das Übersprechen der Richtungen ist also vernachlässigbar, so lange keine Kopplung durch ungünstige Bildstrukturen verursacht wird. Abbildung 4.3 zeigt, wie ein Übersprechen der Verschiebung in eine Stellrichtung auf die Messung in der dazu senkrechten Richtung durch ungünstig orientierte Bildstrukturen zustande kommt.

Bei den bisher beschriebenen Eichmessungen wurde von der Verschiebungsbestimmung durch die Kreuzkorrelation kein Gebrauch gemacht, sondern die Koordinaten von Objekten in Testbildern wurden von Hand mit Hilfe eines Programmes ermittelt, das die Anzeige von Bildsequenzen ermöglicht [Heurisko 6.6.1995].

Sinnvoll ist daher eine zusätzliche

5.3 Skalenmessung mit der Kreuzkorrelation

Wie man der Gleichung (4.21) entnehmen kann, treten die Skalenfaktoren η bei der Messung des Geschwindigkeitsfehlers auf.

Man kann nun eine Bewegung im Bild erzeugen, indem man die Kamera auf ein fest montiertes Testbild richtet und die Umlenkspiegel mit einem vorgegebenen Bewegungsmuster verstellt. Damit kann das Verhältnis der Verschiebung in Pixeln zu derjenigen in DAC-Einheiten und damit die Genauigkeit des Korrelationsverfahrens nachgemessen werden.

Auf die Scannerspiegel wird eine Rampe (konstante Geschwindigkeit) auf die Scannerachsen gegeben und die resultierenden Korrelationsmaxima gemessen. Neben den Skalenfaktoren können so auch das Übersprechen einer Achse auf die andere und systematische Meßfehler bestimmt werden.

In Abhängigkeit der konstanten Eingangssteigungen m_{in} in horizontaler und vertikaler Richtung werden gemessen:

- die mittlere gemessene Verschiebung \bar{m}_{out}
- die Varianz der gemessenen Verschiebung $\sigma_{m_{\text{out}}}$
- die maximale Abweichung der gemessenen Verschiebung $\Delta m_{\text{out}} := \max |m_{\text{out}} - \bar{m}_{\text{out}}|$

Bildausschnitte

Nr.	Korrelationsachse	vertikal	horizontal	Fitbreite	zuläss. Bereich
0	vertikal	[304:128]	[123:20]	3	± 42
1	vertikal	[304:128]	[143:20]	3	± 42
2	horizontal	[328:40]	[111:64]	3	± 26
3	horizontal	[368:40]	[111:64]	3	± 26

Die *Fitbreite* gibt die Anzahl von Punkten links und rechts vom Maximalwert der Korrelation an, die für den Maximumsfit verwendet werden. Bei einer Fitbreite von h wird also über $2h + 1$ Punkte gefittet.

Der *zulässige Bereich* ist der Bereich, innerhalb dessen das Maximum der Korrelationssequenz gesucht wird. „Ausreißer“ außerhalb dieses Bereichs werden ignoriert.

Die *vertikale* Richtung stimmt mit der *Zeilenrichtung* der Kamera überein; im Vergleich zur gängigen Fernsehnorm (horizontale Zeilen) erscheint das Bild also um 90° gedreht. Die Bildausschnitte liegen symmetrisch in der Mitte der 736×286 Pixel großen (Halb-)Bilder.

Die Bildausschnitte 4...7 entsprechen den Ausschnitten 0...3. Es wird jedoch der Mittelwert von jeweils 2 aufeinanderfolgenden Messungen verwendet, um das Zittern um 1 Pixel, das durch das Halbbildverfahren entsteht, zu unterdrücken.

Die Ergebnisse der Messungen bei verschiedenen Winkelgeschwindigkeiten der Spiegel sind in den Tabellen 5.1, 5.2 und 5.3 angegeben.

Die Skalenfaktoren sind gegeben durch das *negative* Verhältnis zwischen m_{in} und m_{out} — Verstellen der Spiegel bewirkt eine Verschiebung des Bildes in *Gegenrichtung*.

Lineare Regression über die gemessenen Werte ergibt

$$\eta_Y = - \left(\frac{m_{\text{out}}}{m_{\text{in}}} \right)_Y = 0.504 \pm 0.008 \frac{\text{Pixel}}{\text{DAC-Einheit}} \quad \eta_X = - \left(\frac{m_{\text{in}}}{m_{\text{out}}} \right)_X = -0.291 \pm 0.004 \frac{\text{Pixel}}{\text{DAC-Einheit}}$$

in ausgezeichneter Übereinstimmung mit den in Abschnitt 5.2 gefundenen Werten.

Aus der gemessenen Verschiebung entlang der Richtung senkrecht zu dem Umlenkspiegel, der ausgelenkt wird, lässt sich die gegenseitige Beeinflussung der Stellrichtungen bestimmen.

Bildausschnitte	Y-Achse (<i>vertikal</i>)				X-Achse (<i>horizontal</i>)			
	m_{in}	\bar{m}_{out}	$\sigma_{m_{out}}$	Δm_{out}	m_{in}	\bar{m}_{out}	$\sigma_{m_{out}}$	Δm_{out}
0, 2	0	-0.07	0.24	0.87	-10	-2.83	0.52	0.94
1, 3	0	-0.07	0.26	1.14	-10	-2.62	1.57	14.44
4, 6	0	-0.07	0.21	0.79	-10	-2.83	0.09	0.24
5, 7	0	-0.07	0.22	0.75	-10	-2.61	1.10	7.43
0, 2	0	-0.06	0.14	0.68	-5	-1.45	0.49	0.63
1, 3	0	-0.07	0.13	0.72	-5	-1.43	0.49	0.68
4, 6	0	-0.06	0.12	0.47	-5	-1.450	0.042	0.195
5, 7	0	-0.07	0.12	0.44	-5	-1.429	0.061	0.231
0, 2	0	-0.017	0.070	0.222	-1	-0.32	0.49	0.60
1, 3	0	-0.026	0.086	0.292	-1	-0.33	0.50	0.58
4, 6	0	-0.017	0.034	0.086	-1	-0.323	0.017	0.066
5, 7	0	-0.026	0.038	0.104	-1	-0.338	0.014	0.078
0, 2	0	0.017	0.070	0.193	1	0.33	0.49	0.55
1, 3	0	0.027	0.083	0.226	1	0.34	0.50	0.54
4, 6	0	0.016	0.035	0.083	1	0.324	0.016	0.058
5, 7	0	0.027	0.038	0.095	1	0.338	0.011	0.047
0, 2	0	0.06	0.14	0.62	5	1.45	0.50	0.55
1, 3	0	0.07	0.13	0.43	5	1.27	1.57	14.50
4, 6	0	0.06	0.12	0.45	5	1.449	0.037	0.058
5, 7	0	0.07	0.11	0.32	5	1.27	1.10	7.43
0, 2	0	0.06	0.23	0.86	10	2.82	0.51	0.96
1, 3	0	0.08	0.26	1.18	10	2.61	1.57	14.42
4, 6	0	0.06	0.20	0.69	10	2.83	0.08	0.30
5, 7	0	0.08	0.22	0.79	10	2.61	1.09	7.42

Tabelle 5.1: Mit dem Korrelationsverfahren detektierte Geschwindigkeiten bei vorgegebener Winkelgeschwindigkeit des X-Spiegels

Bildausschnitte	Y-Achse (<i>vertikal</i>)				X-Achse (<i>horizontal</i>)			
	m_{in}	\bar{m}_{out}	$\sigma_{m_{out}}$	Δm_{out}	m_{in}	\bar{m}_{out}	$\sigma_{m_{out}}$	Δm_{out}
0, 2	-10	5.09	0.30	1.65	0	-0.11	0.51	1.10
1, 3	-10	5.09	0.19	0.59	0	-0.12	0.53	1.11
4, 6	-10	5.09	0.25	1.31	0	-0.10	0.18	0.53
5, 7	-10	5.09	0.15	0.48	0	-0.11	0.18	0.52
0, 2	-5	2.51	0.24	1.06	0	-0.07	0.45	0.76
1, 3	-5	2.51	0.16	0.49	0	-0.04	0.44	0.79
4, 6	-5	2.51	0.22	0.91	0	-0.062	0.096	0.24
5, 7	-5	2.51	0.13	0.49	0	-0.037	0.114	0.29
0, 2	-1	0.459	0.098	0.236	0	-0.01	0.41	0.59
1, 3	-1	0.464	0.071	0.157	0	-0.02	0.37	0.47
4, 6	-1	0.459	0.082	0.218	0	-0.006	0.022	0.10
5, 7	-1	0.465	0.051	0.135	0	-0.015	0.011	0.03
0, 2	1	-0.457	0.097	0.257	0	0.01	0.42	0.62
1, 3	1	-0.462	0.090	0.340	0	0.02	0.37	0.46
4, 6	1	-0.459	0.081	0.207	0	0.009	0.039	0.11
5, 7	1	-0.464	0.051	0.110	0	0.015	0.011	0.03
0, 2	5	-2.51	0.24	1.03	0	0.07	0.46	0.73
1, 3	5	-2.51	0.17	0.53	0	0.05	0.43	0.77
4, 6	5	-2.51	0.22	0.91	0	0.065	0.100	0.24
5, 7	5	-2.51	0.14	0.46	0	0.042	0.109	0.30
0, 2	10	-5.08	0.32	1.53	0	0.10	0.52	1.08
1, 3	10	-5.08	0.21	0.77	0	0.11	0.53	1.19
4, 6	10	-5.09	0.27	1.38	0	0.11	0.18	0.53
5, 7	10	-5.09	0.17	0.75	0	0.11	0.18	0.51

Tabelle 5.2: Mit dem Korrelationsverfahren detektierte Geschwindigkeiten bei vorgegebener Winkelgeschwindigkeit des Y-Spiegels

Bildausschnitte	Y-Achse (vertikal)				X-Achse (horizontal)			
	m_{in}	\bar{m}_{out}	$\sigma_{m_{out}}$	Δm_{out}	m_{in}	\bar{m}_{out}	$\sigma_{m_{out}}$	Δm_{out}
0, 2	-1	0.477	0.087	0.220	1	0.32	0.50	0.55
1, 3	-1	0.516	0.144	0.440	1	0.31	0.49	0.60
4, 6	-1	0.477	0.056	0.168	1	0.314	0.019	0.057
5, 7	-1	0.517	0.081	0.189	1	0.309	0.048	0.182
0, 2	1	-0.435	0.102	0.287	1	0.33	0.50	0.57
1, 3	1	-0.447	0.094	0.235	1	0.35	0.50	0.56
4, 6	1	-0.437	0.057	0.167	1	0.326	0.018	0.043
5, 7	1	-0.447	0.053	0.143	1	0.347	0.022	0.069
0, 2	1	-0.479	0.099	0.273	-1	-0.32	0.49	0.56
1, 3	1	-0.518	0.151	0.489	-1	-0.31	0.48	0.61
4, 6	1	-0.480	0.057	0.147	-1	-0.314	0.018	0.084
5, 7	1	-0.518	0.079	0.185	-1	-0.311	0.040	0.158
0, 2	-10	5.11	0.48	1.54	10	2.80	0.54	1.03
1, 3	-10	5.20	0.44	1.57	10	2.81	0.54	1.28
4, 6	-10	5.11	0.40	1.37	10	2.80	0.19	0.53
5, 7	-10	5.20	0.35	1.04	10	2.80	0.22	0.69
0, 2	10	-4.97	0.38	1.27	10	2.81	0.59	1.80
1, 3	10	-4.98	0.36	1.04	10	2.85	0.56	1.07
4, 6	10	-4.98	0.33	1.20	10	2.82	0.26	1.30
5, 7	10	-4.98	0.31	0.72	10	2.85	0.19	0.52
0, 2	10	-5.08	0.51	1.77	-10	-2.80	0.54	1.02
1, 3	10	-5.19	0.47	1.48	-10	-2.80	0.41	1.24
4, 6	10	-5.10	0.41	1.31	-10	-2.81	0.20	0.54
5, 7	10	-5.20	0.38	1.05	-10	-2.80	0.22	0.68

Tabelle 5.3: Mit dem Korrelationsverfahren detektierte Geschwindigkeiten bei vorgegebener Winkelgeschwindigkeit beider Spiegel

Das Übersprechen des Y-Spiegels auf die horizontale Richtung ist $-0.0122 \pm 0.005 \frac{\text{Pixel}}{\text{DAC-Einheit}}$; der X-Spiegel bewirkt eine gemessene Verschiebung von $-0.0115 \pm 0.007 \frac{\text{Pixel}}{\text{DAC-Einheit}}$.

Aus den Meßergebnissen kann auch der Einfluß der Fehlerquellen bei der Geschwindigkeitsmessung abgelesen werden:

Im Normalfall tritt ein Meßfehler von deutlich unter 1 Pixel auf. Mit zunehmender Geschwindigkeit verringert sich der Anteil der Bildinformation in den zur Korrelation verwendeten Ausschnitten, der in aufeinanderfolgenden Halbbildern enthalten ist; der Fehler nimmt zu.

Bei den Meßergebnissen in Tabelle 5.1 für den Bildausschnitt Nr. 3 treten einzelne Fehlkorrelationen auf, die den mittleren Meßfehler deutlich erhöhen. Fehler dieser Art werden durch den in Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Vergleich von jeweils *zwei* gemessenen Verschiebungen für jede Stellrichtung aus verschiedenen Bildausschnitten weitgehend eliminiert.

5.4 Zeitverhalten

Das Zeitverhalten der Regelung wurde mit einem vor die Aufnahmeeinheit montierten Pendel überprüft, auf das ein Testbild mit einem zufälligen Punktmuster geklebt war.

Es wurden verschiedene Rückkopplungen f eingestellt und die Bewegung des Pendels nachgeführt.

Mit dem *offline*-Teilchenverfolgungsverfahren wurden in der so aufgenommenen Bildsequenz die Positionen einzelner Punkte ausgewertet.

Die so erhaltenen Trajektorien entsprechen der Differenz zwischen tatsächlicher und geschätzter Position im Systemmodell (siehe Abschnitt 4.3).

5.4.1 Verifikation des Frequenzgangs

Frequenz	Rückkopplung		Trajektorie vs. Pendel		Systemmodell	
Hz	f	ηf	$\frac{x_{\text{trj}}^{pk}}{x_{\text{drv}}^{pk}}$	$\Delta\phi$	$\frac{x_{\text{trj}}^{pk}}{x_{\text{drv}}^{pk}}$	$\Delta\phi$
0.6	-0.18	0.052	0.60	63°	0.66	62.8°
0.6	-0.24	0.070	0.53	68°	0.53	71.8°
0.6	-0.30	0.087	0.41	70°	0.44	77.8°

Tabelle 5.4: Messung des dynamischen Verhaltens der Ablenkeinheit mit einem Pendel — aufgeführt sind Amplituden- und Phasenverhältnis der trotz Nachführung verbleibenden Bewegung und der tatsächlichen Bewegung des Pendels. Die letzte Spalte enthält die Vorhersage des Systemmodells (4.26)

Anhand der so gewonnenen Daten kann überprüft werden, wie gut das in Abschnitt 4.3.1 entwickelte Systemmodell das Zeitverhalten der Nachführungseinheit beschreibt.

Die Bewegung des Pendels lässt sich in guter Näherung durch eine rein horizontale, sinusförmige Bewegung der Form

$$x_{\text{drv}}(t) = x_{\text{drv}}^{pk} \cos \left(\sqrt{\frac{g}{l}} t - \phi_{\text{drv}} \right)$$

mit der Fadenlänge l und der Erdbeschleunigung g beschreiben.

An die horizontale Komponente der Trajektorien der Testpunkte wird nun die Funktion

$$x_{\text{traj}} \left[\nu, x_{\text{traj}}^{pk}, \phi_{\text{traj}}, m_{\text{traj}}, x_{\text{traj}}^0 \right] (t) = x_{\text{traj}}^{pk} \cos (2\pi \nu t - \phi_{\text{traj}}) + m_{\text{traj}} t + x_{\text{traj}}^0 , \quad (5.12)$$

an die Position des Umlenkspiegels die Funktion

$$x_{\text{uml}} \left[\nu, x_{\text{uml}}^{pk}, \phi_{\text{uml}}, m_{\text{uml}}, x_{\text{uml}}^0 \right] (t) = x_{\text{uml}}^{pk} \cos(2\pi\nu t - \phi_{\text{uml}}) + m_{\text{uml}} t + x_{\text{uml}}^0 \quad (5.13)$$

angepaßt². Der Term $m t + x^0$ gibt den Nullpunkt der Oszillation an, der wegen des integrierenden Verhaltens des Reglers (siehe Abschnitt 4.3.5) beim Auftreten von Meßfehlern bei der Verschiebungsbestimmung langsam wegdriften kann.

Durch Addition von $x_{\text{traj}}(t)$ und $x_{\text{uml}}(t)$ kann man die Bewegung des Pendels x_{drv} rekonstruieren. Der Quotient der komplexen, d. h. mit Phaseninformation behafteten Amplituden der Bewegung des Spiegels und des Pendels sollte mit der Übertragungsfunktion (4.24) übereinstimmen. Das Ergebnis der Messung ist in Tabelle 5.4 festgehalten.

5.5 Geometrische Eichung

Mit dem Meßaufbau wird eine durch den Lichtschnitt erzeugte *Objektebene* auf die *Bildecke*, die lichtempfindliche Schicht des CCD der Kamera, abgebildet.

Zur Auswertung der Strömungsbilder ist es erforderlich, die genaue Position der aufgenommenen Tracerteilchen in der Ebene des Lichtschnitts aus den Koordinaten dessen Bildes zu bestimmen. Bei einer idealen, *affinen*³ Abbildung wären zur Übertragung der Kamerakoordinaten in die Position, an der sich das auf diese Position abgebildete Objekt tatsächlich befindet, nur eine Skalierung der aufeinander senkrecht stehenden Koordinatenachsen von Kamera- zu Objektkoordinaten wie in Abschnitt 5.1 erforderlich.

Die Bildaufnahme durch die aus Kamera, Objektiv und Umlenkspiegeln bestehende Aufnahmeeinheit verursacht zusätzlich geometrische Verzerrungen, die von der Position des Bildes in der Kameraebene und der Stellung der Spiegel abhängig sind. Diese Verzerrungen werden zum einen durch Abbildungsfehler des Objektivs verursacht, zum anderen und hauptsächlichen Teil sind sie darauf zurückzuführen, daß durch die Spiegel der Strahlengang so abgelenkt wird, daß die optische Achse die Objektebene nicht mehr senkrecht schneidet und somit der Objektabstand innerhalb des aufgenommenen Bildes nicht mehr konstant ist.

5.5.1 Verfahren zur Entzerrung von Aufnahmen

Ein gängiges Verfahren zur Kompensation geometrischer Verzerrungen ist die Korrektur der Kamerakoordinaten mit einem Potenzreihenansatz [Russ 1995]. Anhand eines Eichbildes mit bekannten Objektkoordinaten können dann durch Lösen einer linearen Gleichung die Koeffizienten der Korrekturfunktion bestimmt werden.

Für radialsymmetrische Verzerrungen gibt [Lenz 1987] eine von einem Parameter κ abhängige Korrektur an: $\vec{x} = \frac{\vec{x}_v}{1+\kappa r^2}$. Dabei ist r der Abstand des Bildes auf dem Kamera-CCD vom *Hauptpunkt*, dem Schnittpunkt mit der optischen Achse, in den *verzerrten* Koordinaten \vec{x}_v ; \vec{x} sind die korrigierten Koordinaten.

Eine Eichung nach diesem Verfahren wurde für die in der Aufnahmeeinheit verwendete Kamera und das Objektiv von [Schmundt 1994] vorgenommen. Für den radialen Verzerrungsparameter wird $|\kappa| < 8.2 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^{-2}$ angegeben. Im Vergleich zu den durch die Spiegel verursachten Verzerrungen, auf die im folgenden eingegangen wird, ist der durch das Objektiv hervorgerufene Abbildungsfehler somit vernachlässigbar.

Bei der Korrektur der durch die Umlenkspiegel verursachten Verzerrung tritt das zusätzliche Problem auf, daß *für jede mögliche Stellung der Spiegel* eine Entzerrungsfunktion angegeben

²Für den tatsächlichen Fit wird $x^{pk} \cos(\omega t - \phi) = a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t)$ gesetzt. a und b können aus einem linearen Fit bestimmt werden.

³winkel- und geradentreuen

werden muß. Wollte man die Korrekturfunktion als Potenzreihe formulieren und die Koeffizienten anhand von Eichbildern bestimmen, müßte man eine ganze Serie von unter verschiedenen Stellwinkeln der Umlenkspiegel aufgenommenen Bildern auswerten. Da der gesamte erreichbare Blickwinkel des Bildaufnahmesystems sehr groß ist, ist das Erstellen einer geeigneten Serie von Eichaufnahmen aufwendig, weil die relative Position der zur Eichung verwendeten Objekte über mehrere Aufnahmen hinweg sehr präzise bekannt sein muß. Es würde also entweder ein Eichobjekt benötigt, das den gesamten Blickwinkel des Aufnahmesystems abdeckt oder ein kleineres Eichobjekt müßte zwischen den Aufnahmen sehr präzise verschoben werden.

Eine andere Möglichkeit zur Entzerrung des Bildes besteht darin, die Abbildungsgleichung aus dem Bildaufbau so weit wie möglich zu *berechnen* und nur Korrekturparameter, die beispielsweise Toleranzen in der Ausrichtung der einzelnen optischen Komponenten berücksichtigen, anhand von Eichobjekten an gemessene Daten anzupassen.

Dieses Verfahren hat den Vorteil, daß nur wenige, dem Problem angepaßte Parameter aus der Messung bestimmt werden müssen. Dadurch kommt man mit wenigen Eichaufnahmen aus, da die Abhängigkeit der Verzerrung von der Stellung der Umlenkspiegel bekannt ist. Nachteil gegenüber dem Polynomansatz ist die im allgemeinen nichtlineare Abhängigkeit der Entzerrungsfunktion von deren Koeffizienten, wodurch das Verfahren zur Anpassung der Parameter aufwändiger wird. Da diese Parameteranpassung aber nur einmal pro Meßreihe durchgeführt werden muß und die Abbildungsfunktion relativ einfach aus elementarer Geometrie hergeleitet werden kann, wurde eine auf der direkten Berechnung der Abbildungsgleichung beruhende geometrische Entzerrung implementiert.

Die Abbildungsgleichung der Bildaufnahmeeinheit wird durch *ray tracing*, also dem Rückverfolgen einzelner Lichtstrahlen durch die optisch aktiven Komponenten von der Bildebene bis zur Objektebene, bestimmt [Lindley 1992].

Im einzelnen sind die aktiven optischen Komponenten vom CCD zum Lichtschnitt:

Das Objektiv der Kamera Da die durch das Objektiv verursachte Aberration vergleichsweise gering ist [Schmundt 1994], wird das Objektiv durch eine ideale Linse angenähert. Für die Abbildungseigenschaften wird also Gleichung 5.1 angesetzt.

Der X-Umlenkspiegel Dieser Spiegel ist um 18° aus der Horizontalen gekippt⁴. Die Kamera ist so montiert, daß die durch diesen Spiegel verursachte Verschiebung mit der *Vertikalrichtung* des aufgenommenen Bildes zusammenfällt. Die Nullstellung des Spiegels liegt bei 45° , bewirkt also eine Ablenkung von 90° .

Der Y-Umlenkspiegel Die Nullstellung dieses Spiegels liegt bei 36° Neigung aus der Vertikalen. In dieser Stellung fällt die optische Achse genau horizontal in das Aufnahmesystem.

Der Luft–Wasser–Übergang am Kanalfenster bewirkt eine Brechung der Lichtstrahlen zur optischen Achse hin⁵.

Der Aufbau ist schematisch in Abb. 5.1 dargestellt.

5.5.2 Abbildungsgleichungen für die Strahlverfolgung

Im folgenden wird ein auf elementarer euklidischer Geometrie beruhender Formalismus beschrieben, mit dem die Abbildungseigenschaften der einzelnen optischen Komponenten berechnet werden können.

⁴Durch das Verkippen des X-Spiegels wird die Apertur des Y-Umlenkspiegels erhöht.

⁵Genau genommen durchläuft ein Lichtstrahl *zwei* Grenzschichten zwischen Luft und Glas und zwischen Glas und Wasser. Das Glas bewirkt jedoch nur eine geringe Parallelverschiebung des Strahls und wird daher vernachlässigt.

Lichtstrahl

Ein Lichtstrahl wird als *Gerade* mit Aufpunkt \vec{X} und Richtung \vec{m} bestimmt:

$$\vec{G}_{\vec{X}, \vec{m}}(\lambda) := \vec{X} + \lambda \vec{m} \quad (5.14)$$

Die optisch aktiven Elemente lassen sich jeweils durch eine durch einen Ortsvektor \vec{P} und einen Richtungs(normalen)vektor \vec{n} festgelegte optische *Ebene* charakterisieren.

Schnittebene

Ein Lichtstrahl ändert seine Richtung am Schnittpunkt \vec{X}_\cap mit dieser Ebene

$$\vec{X}_\cap = \vec{X} + \frac{\vec{m} (\vec{n} \cdot (\vec{P} - \vec{X}))}{\vec{n} \cdot \vec{m}} \quad . \quad (5.15)$$

Spiegel

Ein *Spiegel* bewirkt eine Umkehrung der Komponenten der Richtung des Lichtstrahls parallel zum Normalenvektor

$$\vec{m}' = \vec{m} - \frac{2\vec{n}(\vec{n} \cdot \vec{m})}{\vec{n} \cdot \vec{n}} \quad .$$

Ideale Linse

Eine ideale dünne Linse wird durch ihre Hauptebene charakterisiert. Die Länge des Normalenvektors entspricht dabei der Brennweite. Eine *Konvexlinse* verursacht die Richtungsänderung

$$\vec{m}' = \vec{m} \frac{\vec{f} \cdot (\vec{X} - \vec{P})}{\vec{f} \cdot \vec{n}} + (\vec{X} - \vec{P}) \frac{|\vec{f} \cdot (\vec{X} - \vec{P})|}{\vec{f} \cdot \vec{f} - |\vec{f} \cdot (\vec{X} - \vec{P})|} \quad ,$$

bei einer *Konkavlinse* ist die Richtung des gebrochenen Strahls

$$\vec{m}' = \vec{m} \frac{\vec{f} \cdot (\vec{X} - \vec{P})}{\vec{f} \cdot \vec{m}} - (\vec{X} - \vec{P}) \frac{|\vec{f} \cdot (\vec{X} - \vec{P})|}{\vec{f} \cdot \vec{f} + |\vec{f} \cdot (\vec{X} - \vec{P})|} \quad .$$

Brechende Grenzschicht

Für die Brechung an einer Grenzschicht zwischen Brechungsindex ν und ν' gilt

$$\vec{m}' = \left[\frac{\nu}{\nu' \vec{n}^2} \right] \left(\vec{n} \times (\vec{m} \times \vec{n}) + \frac{\vec{n} \cdot \vec{m}}{|\vec{n} \cdot \vec{m}|} \vec{n} \sqrt{\left(\frac{\nu'}{\nu} \right)^2 \vec{m}^2 \vec{n}^2 - (\vec{m} \times \vec{n})^2} \right) \quad .$$

5.5.3 Strahlverfolgung durch die optischen Komponenten

Für die Strahlverfolgung muß nun der Strahlengang vom CCD der Kamera zurück zur Objektivebene durch die oben angegebenen Formeln ausgedrückt werden. Die Anordnung der optischen Elemente ist in den Abbildungen 5.2 und 5.3 skizziert.

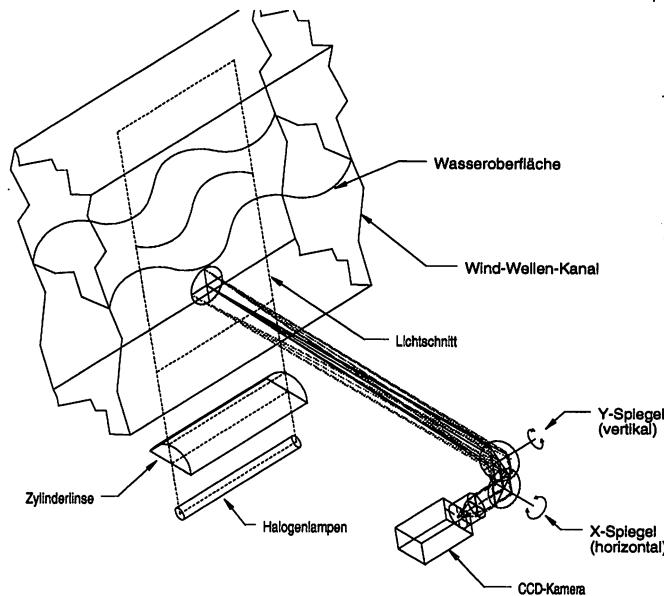


Abbildung 5.1: Schematische Übersicht des Bildaufnahmesystems

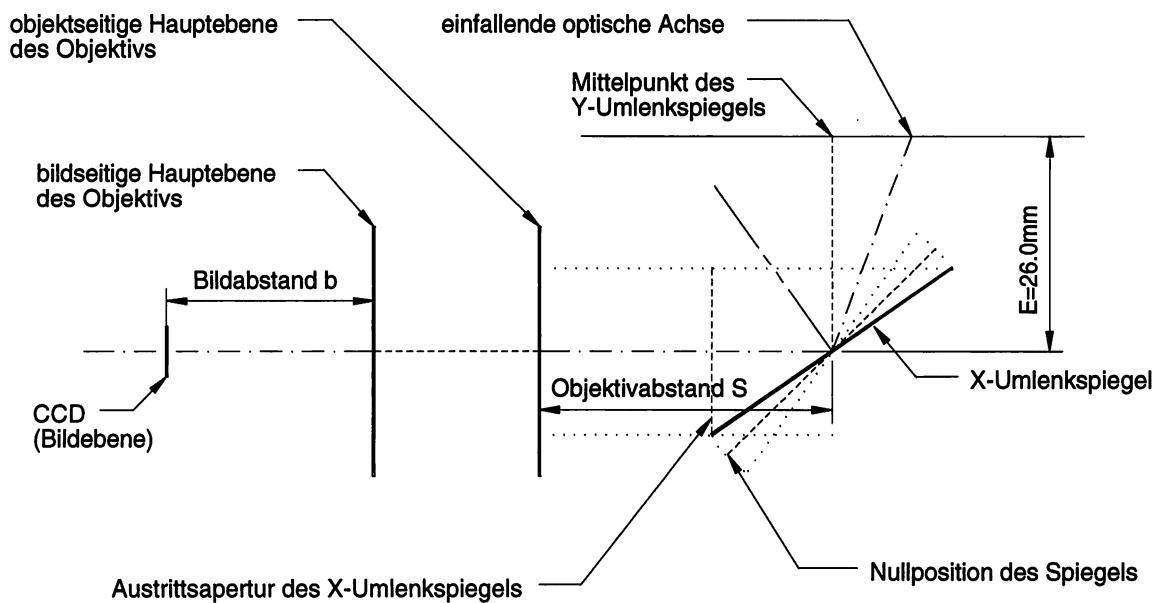


Abbildung 5.2: Skizze zur Geometrie der Aufnahmeeinheit, Ansicht der Geometrie in Blickrichtung auf das Kanalfenster (Teil 1). — Ein vom CCD zurückverfolgter Lichtstrahl durchläuft zunächst das als ideale dicke Linse angenommene Objektiv und wird dann in vom X-Umlenkspiegel nach oben zum Y-Spiegel hin abgelenkt.

Auf das CCD einfallender Strahl

Ein auf das CCD einfallender Strahl sei charakterisiert durch seine Koordinaten in der Bildebene (x_{CCD}, y_{CCD}) und in der Hauptebene der Linse (x_L, y_L). Ursprung dieser Koordinaten sei jeweils der Durchstoßpunkt der optischen Achse.

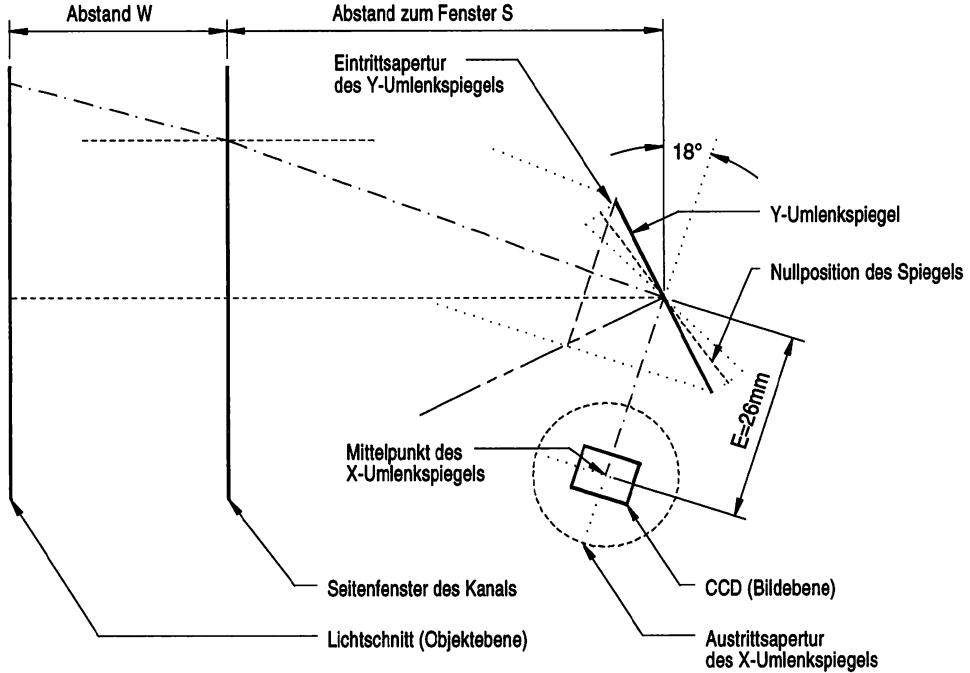


Abbildung 5.3: Skizze zur Geometrie der Aufnahmeeinheit, Ansicht der Geometrie in Blickrichtung der Kamera (Teil 2). — Ein vom CCD zurückverfolgter Lichtstrahl zeigt in die Papierebene und wird vom X-Umlenkspiegel nach oben abgelenkt. Der Y-Umlenkspiegel reflektiert den Lichtstrahl in Richtung des Kanalfensters, an dem der Strahl in das Wasser gebrochen wird, bevor er auf die Objektebene trifft. — Um bei gleicher Größe des Y-Spiegels die Apertur zu erhöhen, sind X-Spiegel und Kamera um 18° aus der Horizontalen verdreht.

In das Objektiv einfallender Strahl

Der Abstand zwischen CCD und (bildseitiger)⁶ Hauptebene des Objektivs sei b .

Der zugehörige in die Linse einfallende Strahl ist dann bestimmt durch den Punkt in der (objektseitigen) Hauptebene (x_L, y_L) und die Richtung (die 3. Komponente sei parallel zur optischen Achse)

$$\vec{m}_1 = \left(\frac{x_L - x_{\text{CCD}}}{b} - \frac{x_L}{f}, \frac{y_L - y_{\text{CCD}}}{b} - \frac{y_L}{f}, 1 \right).$$

Auf den X-Umlenkspiegel einfallender Strahl

Der Mittelpunkt des X-Umlenkspiegels sei $(0, 0, 0)$, der Winkel zur ausfallenden optischen (z)-Achse $\xi + 45^\circ$; die objektseitige Hauptebene des Objektivs liege senkrecht zur z -Achse bei $z = -S$.

In diesem Koordinatensystem ist der in den X-Umlenkspiegel einfallende Strahl beschrieben durch den Auftreffpunkt auf den Spiegel

$$\vec{X}_2 = \left(x_L + \frac{m_{1x} (y_L (1 - \tan(\xi)) - S (1 + \tan(\xi)))}{m_{1y} (\tan(\xi) - 1) - (1 + \tan(\xi))}, \frac{(y_L + S m_{1y}) (1 + \tan(\xi))}{m_{1y} (1 - \tan(\xi)) + (1 + \tan(\xi))}, \right)$$

⁶Die Näherung des Objektivs durch eine optisch aktive Ebene wird verbessert, wenn man eine bildseitige und eine objektseitige Hauptebene annimmt, zwischen denen die Lichtstrahlen parallel zur optischen Achse verschoben werden. Die Abstände im Innern der Kamera sind einer direkten Messung ohnehin nicht zugänglich, und der Bildabstand ist nur zur korrekten Fokussierung im Modell nötig.

$$\frac{(y_L + S m_{1y}) (1 - \tan(\xi))}{m_{1y} (\tan(\xi) - 1) - (1 + \tan(\xi))}$$

und die Richtung

$$\vec{m}_2 = \left(\frac{m_{1x}}{\cos(2\xi) (1 + m_{1y} \tan(2\xi))}, 1, \frac{m_{1y} - \tan(2\xi)}{1 + m_{1y} \tan(2\xi)} \right).$$

In die Ablenkeinheit einfallender Strahl

Bei der verwendete Scannereinheit XY2026 ist der Abstand zwischen den Umlenkspeichern $E = 26.0\text{ mm}$ [GSI 1991]. Die Scannereinheit ist um den Winkel $\omega = 18^\circ$ um die Drehachse des Y-Spiegels gedreht. Dadurch verringert sich der Winkel der reflektierten Lichtstrahlen zum Lot auf den Y-Spiegel, womit bei gegebener Größe des Spiegels die nutzbare Apertur vergrößert wird.

Im Koordinatensystem, das im vorigen Abschnitt eingeführt wurde, liege der Mittelpunkt des Y-Umlenkspeichers dann bei $(0, E, 0)$; der Winkel zur ausfallenden optischen (y)-Achse ist $v + 45^\circ + \omega/2$.

Der in die Scannereinheit einfallende Strahl ist bestimmt durch

$$\begin{aligned} \vec{X}_3 &= \left(\frac{(m_{2y} X_{2x} + m_{2x} (E - X_{2y})) (1 + \tan(v + \frac{\omega}{2}))}{m_{2x} (\tan(v + \frac{\omega}{2}) - 1) + m_{2y} (1 + \tan(v + \frac{\omega}{2}))}, \right. \\ &\quad X_{2y} + \frac{m_{2y} (X_{2x} (1 - \tan(v + \frac{\omega}{2})) + (E - X_{2y}) (1 + \tan(v + \frac{\omega}{2})))}{m_{2x} (\tan(v + \frac{\omega}{2}) - 1) + m_{2y} (1 + \tan(v + \frac{\omega}{2}))}, \\ &\quad \left. X_{2z} + \frac{m_{2z} (X_{2x} (1 - \tan(v + \frac{\omega}{2})) + (E - X_{2y}) (1 + \tan(v + \frac{\omega}{2})))}{m_{2x} (\tan(v + \frac{\omega}{2}) - 1) + m_{2y} (1 + \tan(v + \frac{\omega}{2}))} \right) \end{aligned}$$

und

$$\vec{m}_3 = (m_{2y} \cos(2v + \omega) + m_{2x} \sin(2v + \omega), m_{2x} \cos(2v + \omega) - m_{2y} \sin(2v + \omega), m_{2z})$$

Für die weitere Rechnung muß das Koordinatensystem um ω gedreht werden. Man findet

$$\vec{X}_3^{rot} = (X_{3x} \cos(\omega) - X_{3y} \sin(\omega), X_{3x} \sin \omega + X_{3y} \cos \omega, X_{3z})$$

und (mit $m_{2y} = 1$)

$$\vec{m}_3^{rot} = \left(1, \frac{m_{2x} - \tan(2v)}{1 + m_{2x} \tan(2v)}, \frac{m_{2z}}{\cos(2v) (1 + m_{2x} \tan(2v))} \right)$$

Lichtstrahl innerhalb des Kanals

Das seitliche Beobachtungsfenster des Windkanals befindet sich in einer Ebene senkrecht zur X-Achse im Abstand D vom Mittelpunkt des X-Umlenkspeichers; als Aufpunkt kann im gedrehten Koordinatensystem folglich $(D, 0, 0)$ gewählt werden. Unter Vernachlässigung des Glasfensters wird ein Übergang Luft/Wasser angenommen.

Der Lichtstrahl trifft im Punkt

$$\vec{X}_4 = \left(D, X_{3y}^{rot} + m_{3y}^{rot} (D - X_{3x}^{rot}), X_{3z}^{rot} + m_{3z}^{rot} (D - X_{3x}^{rot}) \right)$$

auf die Grenzschicht; die Richtung des gebrochenen Strahls ist

$$\vec{m}_4 = \left(1, \frac{m_{3y}^{rot}}{n_{H_2O} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{1}{n_{H_2O}^2} \right) (m_{3y}^{rot 2} + m_{3z}^{rot 2})}}, \frac{m_{3z}^{rot}}{n_{H_2O} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{1}{n_{H_2O}^2} \right) (m_{3y}^{rot 2} + m_{3z}^{rot 2})}} \right)$$

mit dem Brechungsindex von Wasser $n_{H_2O} = \frac{4}{3}$.

Schnittpunkt des Strahls mit der Ebene des Lichtschnitts

Der Abstand des Lichtschnitts vom seitlichen Fenster des Kanals sei W .

Der Schnittpunkt des Lichtstrahls mit der Ebene des Lichtschnitts hat schließlich die Koordinaten

$$X_{\text{Partikel}} = (D + W, X_{4y} + m_{4y} W, X_{4z} + m_{4z} W).$$

5.5.4 Parameteranpassung und Eichung

Mit der im vorigen Abschnitt angegebenen Strahlverfolgung ist es möglich, einem durch seine physikalischen Koordinaten auf dem CCD gegebenen Bildpunkt die Koordinaten des zugehörigen Objekts zuzuordnen.

Prinzipiell ist es sogar möglich, mit der Strahlverfolgung die Unschärfe der Abbildung zu bestimmen. Da der Abstand von der Ebene des Lichtschnitts zum Objektiv mit den Stellwinkeln der Spiegel und der Position im Bild variiert, werden zwangsläufig Objekte in Teilen des Bildes unscharf abgebildet; der Ort X_{Partikel} in der Objektebene ist also auch vom Schnittpunkt des Lichtstrahls mit der Hauptebene des Objektivs abhängig. Bei der weiteren Auswertung der Strömungsbilder wird die Unschärfe durch Bestimmung des *Grauwertschwerpunktes* der abgebildeten Tracerteilchen kompensiert⁷.

Die Simulation des Strahlengangs mit einem Optik–Entwicklungs paket [ZEMAX 1995] ergab, daß die Abweichung der Position des *Zentralstrahls* durch den Mittelpunkt des Objektivs in der Objektebene vom Mittelwert aller innerhalb der Apertur liegender, von der Bildposition ausgehender Strahlen im Rahmen der Meßgenauigkeit von $\mathcal{O}(1 \text{ Pixel})$ gering genug ist, daß zur Bestimmung der Objektkoordinaten eines Bildpunktes trotzdem die im vorigen Abschnitt beschriebene Rechnung nur für den Zentralstrahl vorgenommen werden muß.

Das im vorigen Abschnitt beschriebene Verfahren zur Bestimmung der Objektkoordinaten ist noch nicht ohne weiteres für die genaue Entzerrung der aufgenommenen Bilder brauchbar: Zum einen sind nicht alle Parameter direkter Messung zugänglich; zum anderen müssen auch noch eventuelle Fehler bei der Ausrichtung der optischen Komponenten und die *genauen* Werte der Umrechnungsskalen, beispielsweise für die Stellwinkel ξ und v , bestimmt werden.

Die Anpassung der Funktionsparameter erfolgt durch die Aufnahme eines Eichbildes, zum Beispiel eines quadratischen Punktmusters. Man erhält so ein verzerrtes Bild des Eichmusters (siehe Abb. 5.4). Mit Hilfe des im Programm zur *offline*–Analyse [Hering 1996] enthaltenen Segmentierungsverfahrens werden die Schwerpunkte der aufgenommenen Punkte in Bildkoordinaten bestimmt.

Die Parameter werden nun so optimiert, daß der Abstand der durch Rückverfolgung der Zentralstrahlen aus dem aufgenommenen Bild berechneten Koordinaten der Eichpunkte von deren tatsächlichen Positionen minimal wird.

Schon bei der Bestimmung der Pixelgröße in Abschnitt 5.1 traten bei einer Anpassung nach dem Marquardt–Levenberg–Algorithmus [NumRec 1988] Stabilitätsprobleme auf, weil die Zielfunktion bezüglich mancher Parameter schlecht konditioniert ist. Deshalb wurde auf das vom Verfasser schon in einer früheren Arbeit [Dueck 1991] eingesetzte *Record-to-Record Travel*–Verfahren [Dueck 1989], einer Abwandlung des *simulated annealing*–Algorithmus [NumRec 1988], verwendet, um die Parameter anzupassen. Diese Klasse von Optimierungsalgorithmen ist sehr robust gegen schlecht konditionierte Probleme und Zielfunktionen mit vielen „falschen“ lokalen Extrema. Außerdem wird der Gradient der Zielfunktion nicht benötigt.

⁷Eine gewisse Unschärfe bei der Abbildung ist sogar von Vorteil, weil sich dadurch der Einfluß von Diskretisierungsfehlern bei der Zerlegung des Bildes in einzelne Pixel bei der Aufnahme verringert.

Da das Anpassen der Parameter nur einmal pro Meßreihe vorgenommen werden muß, bereitet der Nachteil dieses Verfahrens, die hohe ($\mathcal{O}(10^4)$) Anzahl der benötigten Iterationen, keine größeren Probleme.

Prinzipiell ist es mit diesem Verfahren sogar möglich, die geometrische Anordnung der optischen Komponenten nur aus der Verzerrung des bekannten Eichbildes zu ermitteln. Die so erhaltenen Werte sind allerdings nicht sehr genau, weil das Optimierungsproblem schlecht konditioniert ist⁸.

Die Entzerrung eines Punktrasters nach dem beschriebenen Verfahren ist in Abb. 5.4 dargestellt.

Anzupassende Parameter

Im einzelnen müssen folgende Parameter durch Eichung ermittelt werden:

Ξ, Υ — die *genauen* Umrechnungsfaktoren zwischen DAC-Wert und Winkel der Umlenkspiegel⁹;

$\Delta\xi, \Delta\nu$ — additive Abweichungen (*offsets*) von der Nullstellung der Umlenkspiegel;

b — der Bildabstand bestimmt die Vergrößerung des Bildes nach Gleichung (5.1);

Φ — ein Winkel, der eine mögliche Verdrehung der Kamera um die optische Achse beschreibt.

Die Abstände der optischen Komponenten zueinander, D und W , können ausgemessen oder angepaßt werden. Mit letzterer Methode erhält man sehr ungenaue Werte; die durch diese Ungenauigkeiten verursachten Verzerrungen im Bild sind aber *entsprechend* klein.

Versuchsweise wurde eine Eichung mit einem Punktgitter mit 10 mm Punktabstand im Abstand von $D = 600$ mm vom Mittelpunkt des Y-Umlenkspiegels außerhalb des Kanals vorgenommen. Bei einer Spiegelstellung von -1025 DAC-Schritten am X-Spiegel und -1217 Schritten am Y-Spiegel wurde von 221 Punkten des Gitters der Mittelpunkt bestimmt und die Parameter einschließlich der Längen D und S angepaßt.

Die *absolute* Position des Eichgitters wurde nicht ausgemessen, sondern als anzupassender Parameter \vec{V} (Ursprung des Eichgitters) in die Optimierung integriert.

2 Optimierungsdurchläufe ergaben:

b / mm	S / mm	D / mm	$\Delta\xi$	$\Delta\nu$	Φ	\vec{V} / mm	χ^2 / mm ²
25.74	35.60	597	-0.021°	0.153°	0.47°	(-134.6, 173.0)	26.99
25.48	34.98	589	0.042°	0.019°	0.53°	(-135.9, 173.5)	23.59

Die Winkel $\xi = 6.00^\circ$ und $\nu = -6.74^\circ$ wurden mit den in Abschnitt 5.2 ermittelten Skalenfaktoren aus dem Positionsrückmeldeignal der Spiegel berechnet. Der Wert der Zielfunktion χ^2 ist die Summe der Abstandsquadrate der berechneten Objektkoordinaten von der Position des zugehörigen Gitterpunktes. Die maximale Abweichung der zurückgerechneten Position eines Gitterpunktes von dessen tatsächlichen Koordinaten ist kleiner als 1 mm.

Das verzerrte Bild in der Kameraebene sowie das mit den Parametern der 2. Optimierung in die Objektebene zurückgerechnete Bild sind in Abb. 5.4 dargestellt.

⁸Daß die Anpassung aller geometrischen Parameter schlecht konditioniert ist, kann man in Abb. 5.3 ganz anschaulich an einem Beispiel sehen: Da sich die Richtung des Strahls vom Y-Umlenkspiegel zur Objektebene an der Grenzschicht nur unwesentlich ändert, spielt es für die Verzerrung kaum eine Rolle, wie sich der Abstand zur Objektebene $D + W$ auf die einzelnen Summanden verteilt.

⁹Die Empfindlichkeit und Nullposition der Spiegelansteuerung kann mit Drehpotentiometern an der Steuerung eingestellt werden [GSI 1991]; deshalb müssen diese Werte für jede Meßreihe nachgemessen werden.

Um die Übertragbarkeit der Eichung auf andere Winkelstellungen nachzuweisen, wurde bei einer anderen Winkelstellung von $\xi = 8.56^\circ$ und $v = -8.74^\circ$ nur die absolute Position des Eichgitters neu angepaßt¹⁰ und die übrigen Parameter beibehalten. Abb. 5.5 zeigt das Ergebnis dieser Entzerrung; die Summe der quadratischen Fehler von 195 Punkten ist $\chi^2 = 59.22 \text{ mm}^2$; die Maximalabweichung von der tatsächlichen Position in der Größenordnung von 1 mm.

Das hier beschriebene Verfahren ermöglicht also die Rückrechnung der verzerrten Aufnahmen in die Originalkoordinaten; bei einer für die Strömungsverfolgung akzeptablen Genauigkeit sogar *ohne Ausmessen des Aufbaus* nur aus der Aufnahme eines Eichobjekts.

¹⁰Die Neuanpassung des Ursprungs des Eichgitters ist nötig, weil andere Punkte im Blickfeld der Kamera liegen und deshalb ein anderer Teil des Eichgitters als Referenzbild verwendet werden muß.

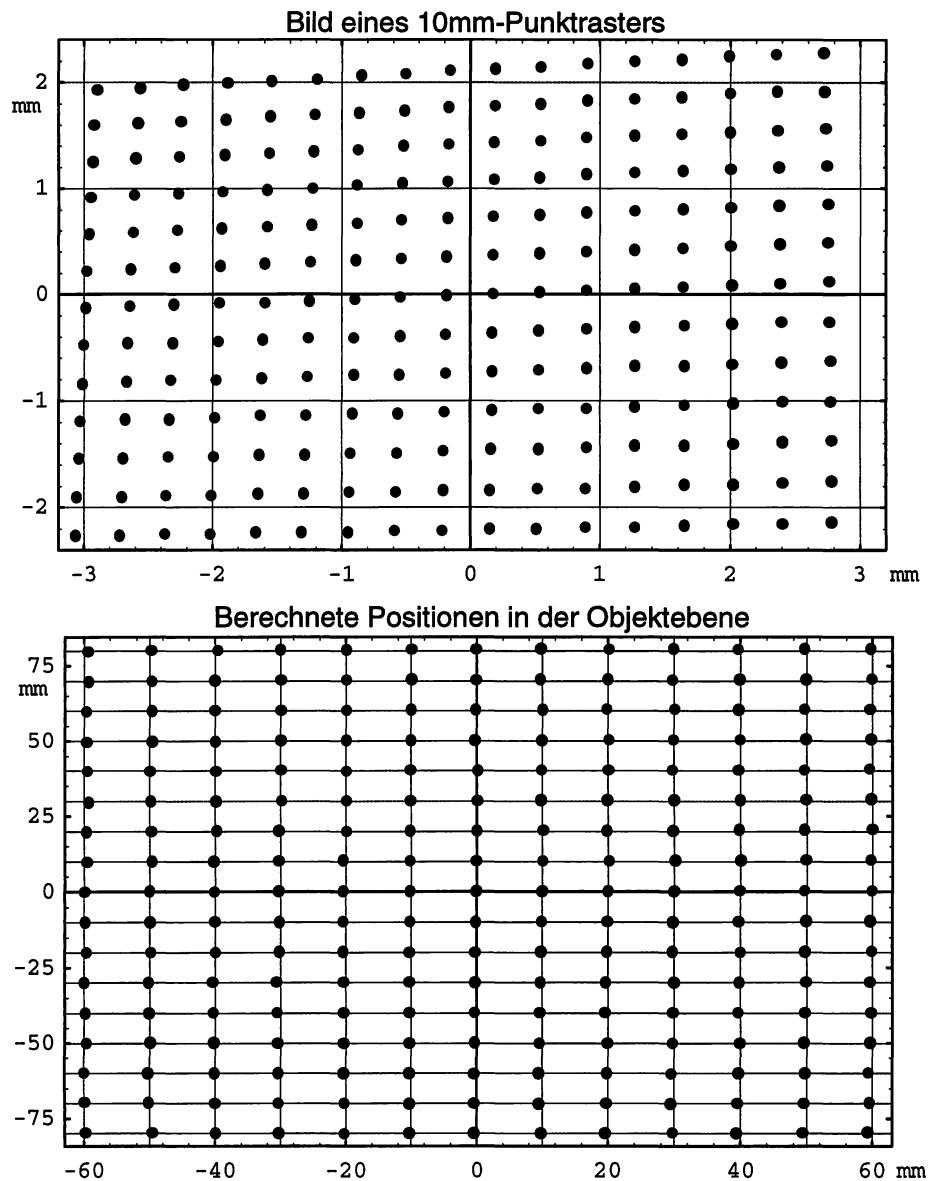


Abbildung 5.4: Korrektur der geometrischen Verzerrung im Bild bei Ablenkwinkeln von $\xi = 6.00^\circ, v = -6.74^\circ$ — Das obere Diagramm zeigt die Schwerpunkte der Bilder eines quadratischen 10 mm–Punktrasters in der CCD-Ebene. Das untere Diagramm zeigt die daraus mittels Strahlverfolgung berechneten Positionen der Schwerpunkte in der Objektebene. — Alle Einheiten in Millimeter.

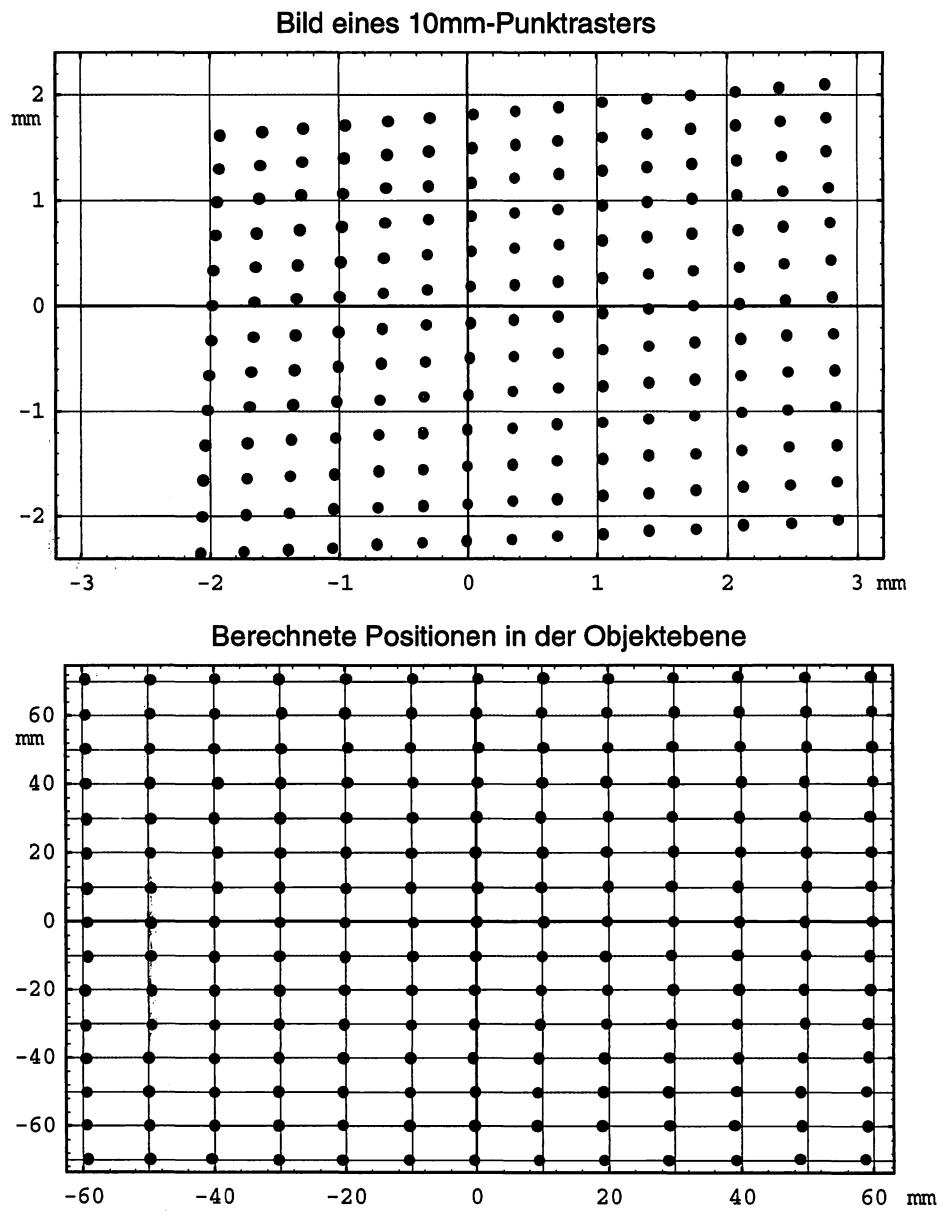


Abbildung 5.5: Korrektur der geometrischen Verzerrung im Bild bei Ablenkwinkeln von $\xi = 8.56^\circ$, $v = -8.74^\circ$ unter Verwendung der an Abb. 5.4 angepaßten Entzerrungsformel. Das zurückgerechnete Bild erscheint zentriert, weil die absolute Position des Eichgitters unbekannt und daher ein frei anzupassender Parameter ist. — Alle Einheiten in Millimeter.

5.6 Strömungsmessungen

Mit der in dieser Arbeit beschriebenen Nachführung ist es prinzipiell möglich, Teilchen über längere Strecken und somit auch längere Zeit zu verfolgen als mit einem feststehenden Bildausschnitt.

Zum Zeitpunkt der Herausgabe dieser Arbeit müssen an der *offline*-Auswertung noch einige Anpassungen vorgenommen werden, um die Nachführung effektiv zu nutzen. Trotzdem konnten einige Messungen unter realistischen Bedingungen durchgeführt werden, um das Funktionieren der Nachführung zu bestätigen.

Bei einer Windgeschwindigkeit von $4.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ in 17 cm Höhe über der Wasseroberfläche¹¹ wurden Serien von je 200 Bildern aufgenommen und einzelne Tracerteilchen verfolgt.

Zur Auswertung der Partikelspuren stand ein noch nicht angepaßtes Programm zur Verfügung, bei dem die geometrische Entzerrung noch nicht implementiert war, so daß nur wenige und vergleichsweise kurze Spuren verfolgt werden konnten.

Die aufgenommenen Spuren wurden mit den in Abschnitt 5.2 berechneten Skalenfaktoren η in Einheiten der die Spiegel ansteuernden Digital-Analog-Wandler umgerechnet. Die tatsächliche Position der Teilchen wurde näherungsweise durch Addition der Spiegelpositionen bestimmt.

Die so erhaltenen Trajektorien sind in Abb. 5.6 bis 5.11 abgebildet.

¹¹Die Füllhöhe des Wassers im Kanal war 30 cm.

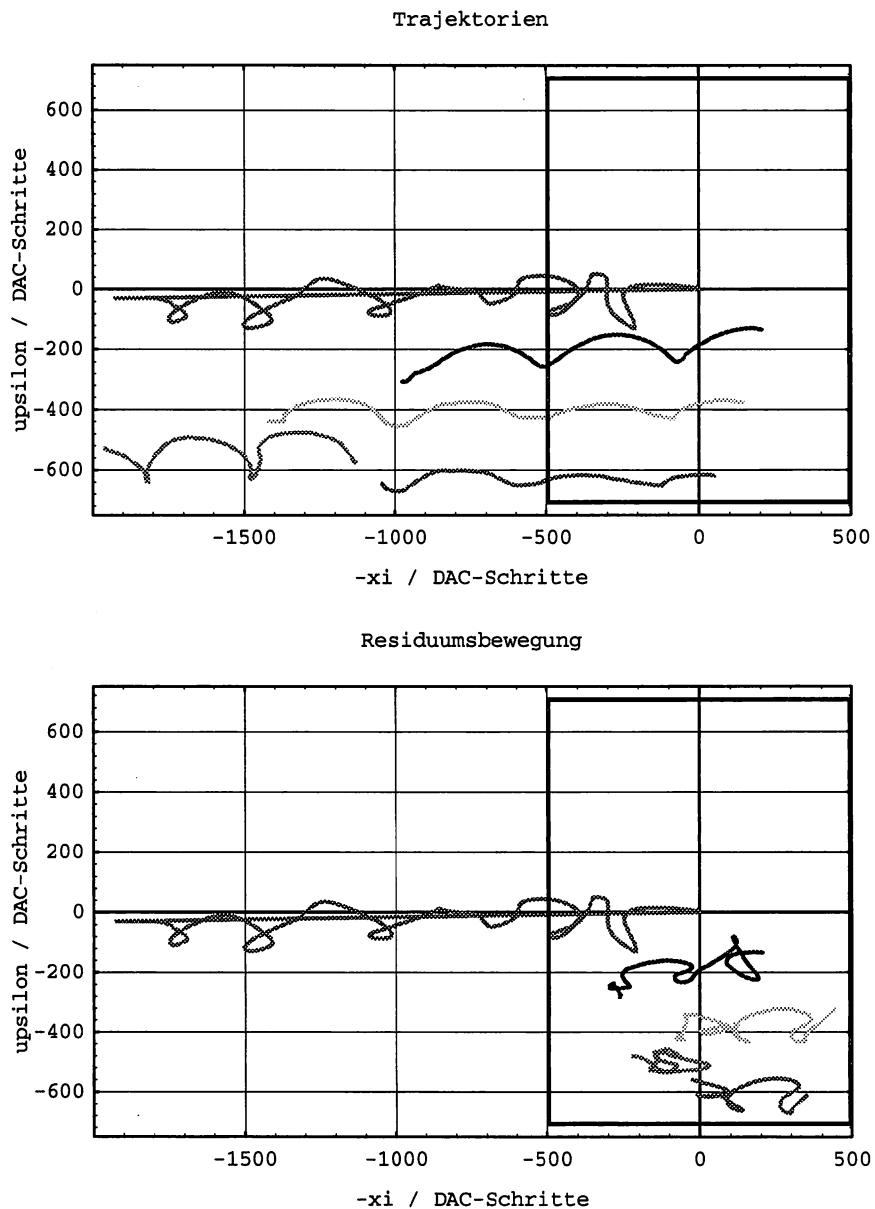


Abbildung 5.6: Trajektorien und Residuumsbewegung einer Strömungsaufnahme mit Nachführung bei $4.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ Windgeschwindigkeit und einem Rückkopplungsfaktor $f\eta = 0.1$ — Das untere Bild zeigt die Spuren der detektierten Teilchen im Kamerabild; im oberen Bild sind die daraus durch Addition der Spiegelstellung rekonstruierten tatsächlichen Trajektorien abgebildet. Der Bildausschnitt der Kamera ist als schwarzes Rechteck dargestellt; die Bahn des Bildmittelpunktes ist als graue Kurve eingezeichnet. — Gut zu erkennen ist die Verfolgung des blauen Teilchens im oberen Bild links.

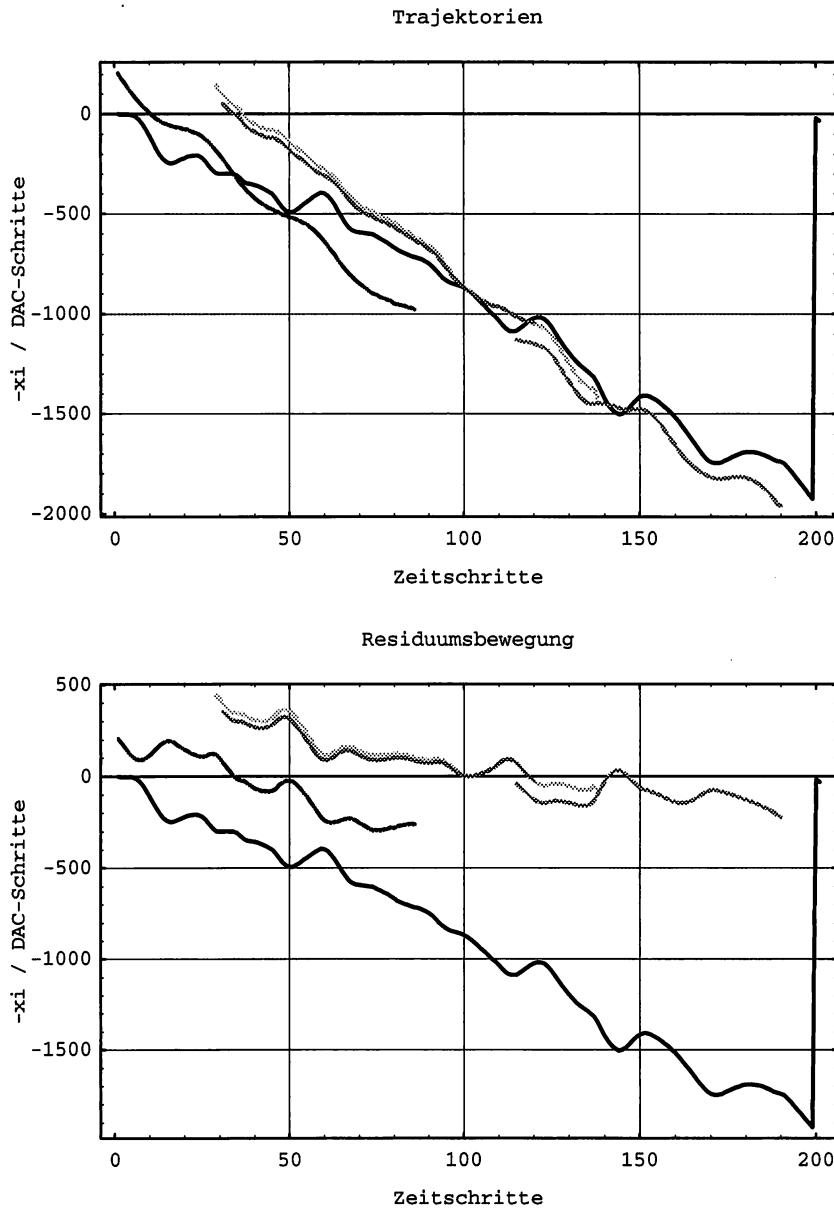


Abbildung 5.7: Horizontale Komponente der Trajektorien und der Residuumsbewegung einer Strömungsaufnahme mit Nachführung bei $4.2 \frac{m}{s}$ Windgeschwindigkeit und einem Rückkopplungsfaktor $f\eta = 0.1$ — Die Position des X-Umlenkspiegels ist als schwarze Linie eingezeichnet; die farbigen Linien sind die Positionen der verfolgten Teilchen. — Nach Erreichen des maximalen Stellwinkels wird der Spiegel auf die Nullposition zurückgesetzt.

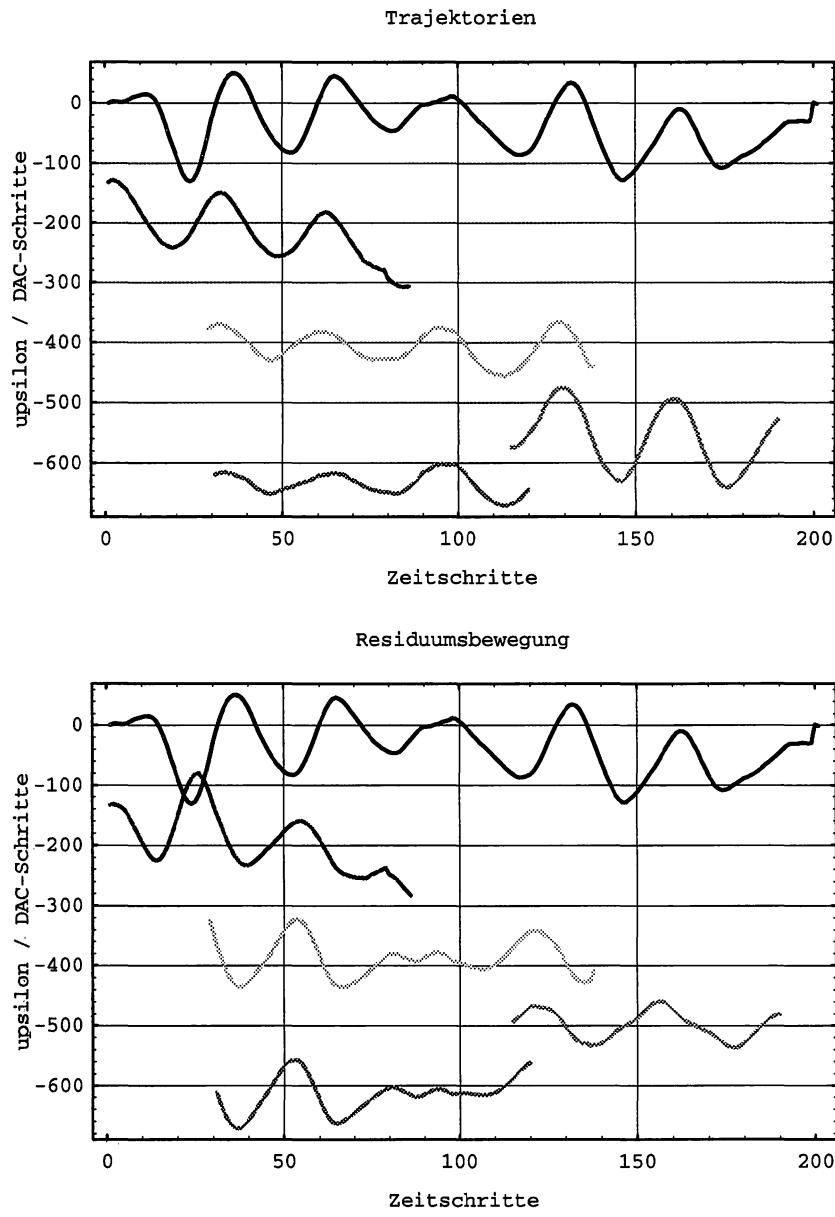


Abbildung 5.8: Vertikale Komponente der Trajektorien und der Residuumsbewegung einer Strömungsaufnahme mit Nachführung bei $4.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ Windgeschwindigkeit und einem Rückkopplungsfaktor $f\eta = 0.1$ — Die Position des Y-Umlenkspiegels ist als schwarze Linie eingezeichnet; die farbigen Linien sind die Positionen der verfolgten Teilchen. — Gut zu erkennen sind das Vorausseilen der Residuumsbewegung relativ zur Position des Umlenkspiegels im unteren Bild und das Überschwingen der nachgeführten Bewegung im Vergleich zur tatsächlichen Bewegung im oberen Bild bei Frequenzen um 2 Hz (vgl. Abb. 4.8 und 4.9)

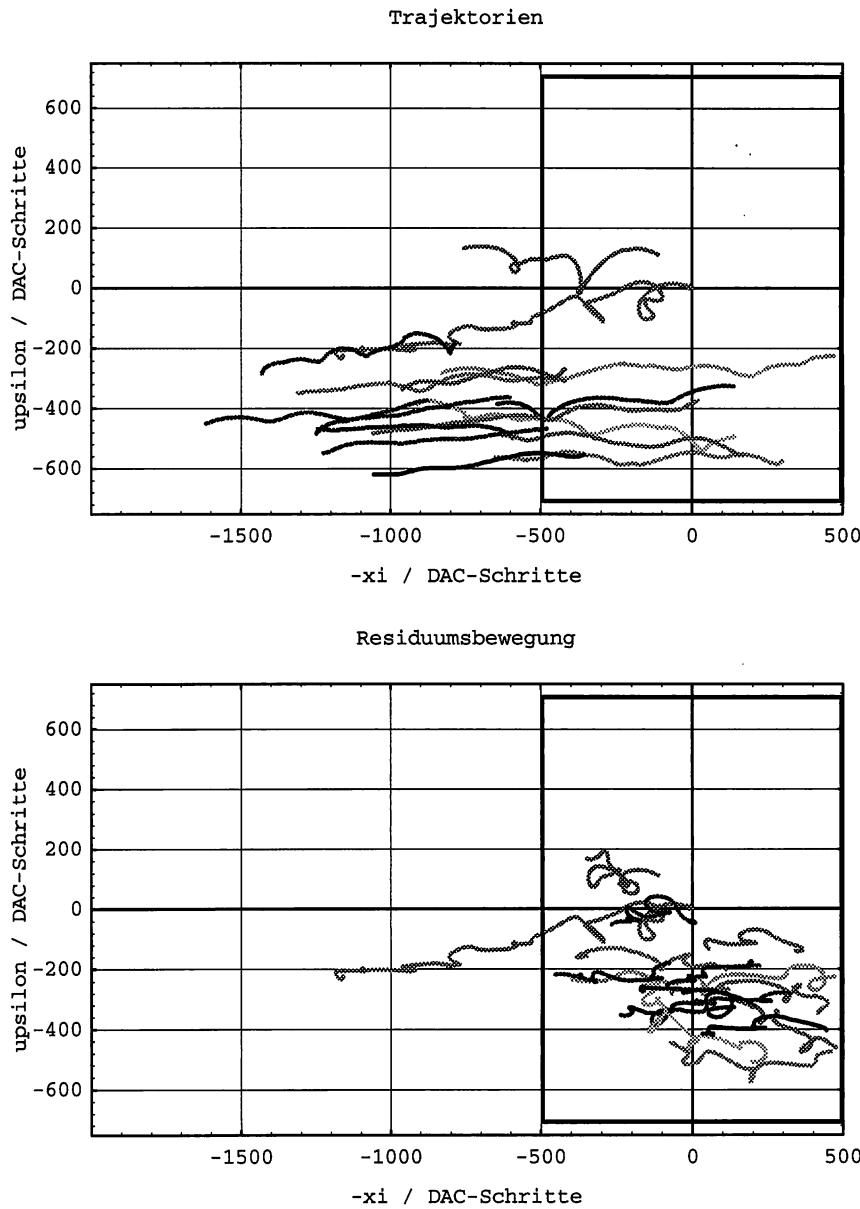


Abbildung 5.9: Trajektorien und Residuumsbewegung einer Strömungsaufnahme mit Nachführung bei $4.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ Windgeschwindigkeit und einem Rückkopplungsfaktor $f\eta = 0.08$ — Das untere Bild zeigt die Spuren der detektierten Teilchen im Kamerabild; im oberen Bild sind die daraus durch Addition der Spiegelstellung rekonstruierten tatsächlichen Trajektorien abgebildet. Der Bildausschnitt der Kamera ist als schwarzes Rechteck dargestellt; die Bahn des Bildmittelpunktes ist als graue Kurve eingezeichnet. — Einzelne Teilchen werden über eine Strecke verfolgt, die länger ist als die Breite des Kamerabildes.

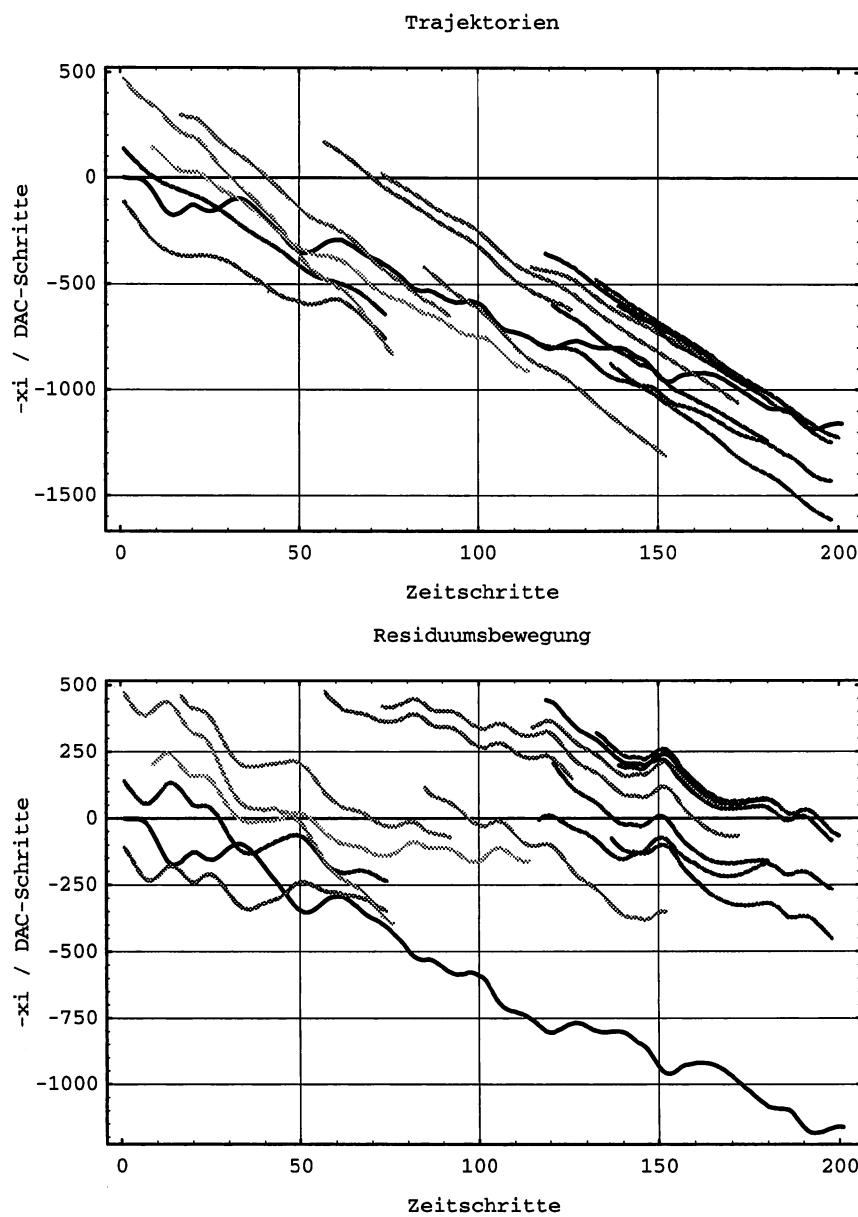


Abbildung 5.10: Horizontale Komponente der Trajektorien und der Residuumsbewegung einer Strömungsaufnahme mit Nachführung bei $4.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ Windgeschwindigkeit und einem Rückkopplungsfaktor $f\eta = 0.08$ — Die Position des X-Umlenkspiegels ist als schwarze Linie eingezeichnet; die farbigen Linien sind die Positionen der verfolgten Teilchen. —

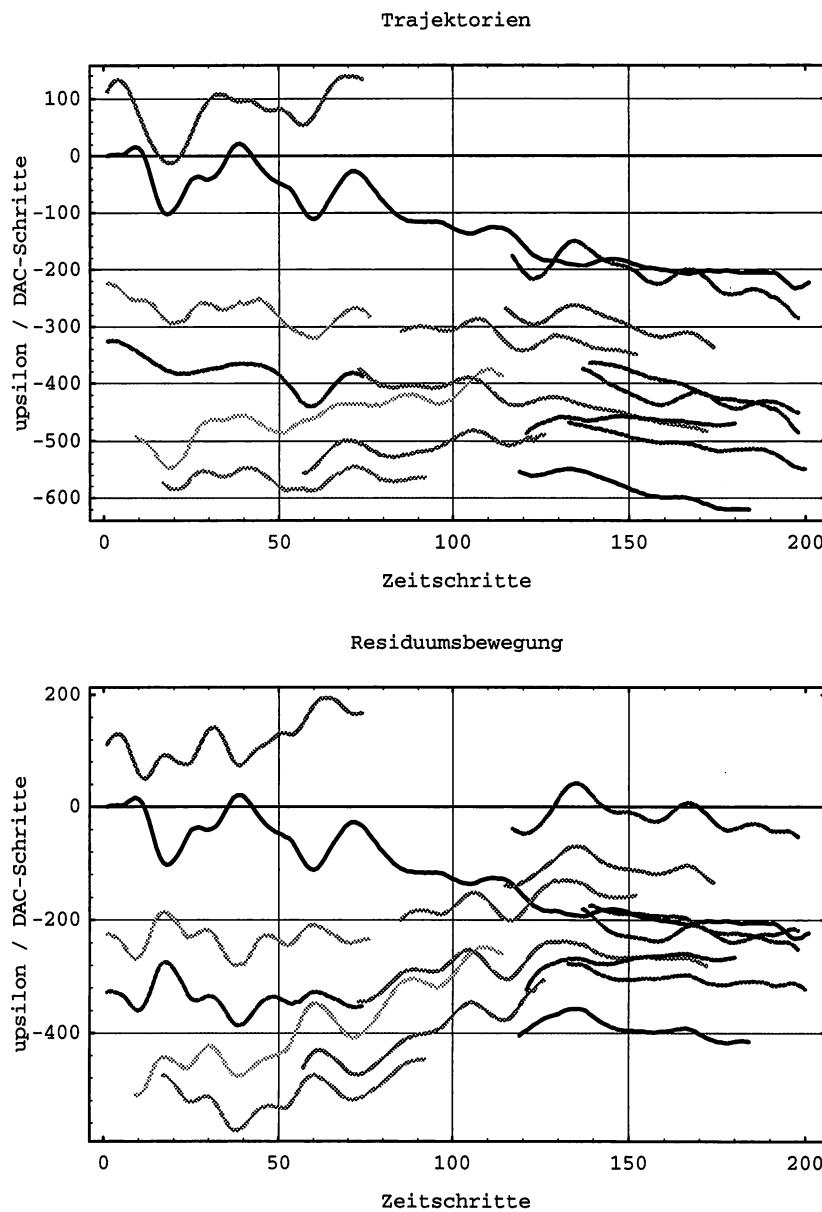


Abbildung 5.11: Vertikale Komponente der Trajektorien und der Residuumsbewegung einer Strömungsaufnahme mit Nachführung bei $4.2 \frac{m}{s}$ Windgeschwindigkeit und einem Rückkopplungsfaktor $f\eta = 0.08$ — Die Position des Y-Umlenkspiegels ist als schwarze Linie eingezeichnet; die farbigen Linien sind die Positionen der verfolgten Teilchen.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit konnte ohne spezielle Hardware zur Bewegungsdetektion eine Bildnachführung auf einem PC implementiert werden, die ihre Stellgröße in Echtzeit aus der im Kamerabild enthaltenen Information bezieht.

Zur Bestimmung der Bewegungsinformation werden rechteckige Bildausschnitte des von der Kamera aufgenommenen Bildes in eine Richtung zu eindimensionalen Sequenzen aufsummiert; die Geschwindigkeitskomponente in der dazu senkrechten Richtung wird durch Kreuzkorrelation im Fourierraum bestimmt. Ein linearer Regler setzt die Komponenten der so gewonnenen Geschwindigkeitsdifferenz zwischen tatsächlicher und nachgeführter Bewegung der betrachteten Objekte in ein Steuersignal für Galvanometerspiegel um, mit denen die Blickrichtung der aufnehmenden Kamera abgelenkt wird.

Das Einlesen der Bildinformation, die Geschwindigkeitsbestimmung und die Berechnung des Ansteuersignals für die Spiegel kann für ein Bild jeweils innerhalb einer Halbbildaustastzeit der Kamera (20 ms) erfolgen. Somit ist eine Nachführung synchron zur Bildaufnahme möglich.

Die Nachführung wurde auf die Messung der Stömung unterhalb der Wasseroberfläche mit Hilfe fester Tracerteilchen angewendet; es konnte gezeigt werden, daß mit der Nachführung einzelne Teilchen über wesentlich größere Entfernung verfolgt werden können als mit fester Blickrichtung der Kamera.

Problematisch ist die niedrige Bildaufnahmerate der Standard-Kamera und die lange Verzögerungszeit von 40 ms zwischen Bildaufnahme und Einlesen der Bildinformation in den Hauptspeicher des PC. Bewegungen mit einer Frequenz von mehr als 1 Hz können deshalb nicht verfolgt werden. Eine höhere Bildaufnahmerate der Kamera würde zu einer deutlichen Verbesserung des Folgeverhaltens führen.

Das Verfahren zur Auswertung der Strömungsbilder mittels Particle Tracking Velocimetry kann noch für die Anwendung mit der Nachführung optimiert werden. Dazu wird eine Koordinatentransformation von Kamerakoordinaten in Objektkoordinaten angegeben, die in den Analysealgorithmus integriert werden kann.

Die Nachführung des Bildausschnitts lässt sich darüberhinaus bei einer Vielzahl der in der Gruppe Gasaustausch/Bildverarbeitung benutzten Meßverfahren einsetzen. So hat [Münsterer 1993] bereits eine Verfolgung der Wasseroberfläche mittels einer eindimensionalen analogen Regelung bei der Messung von Konzentrationsprofilen eingesetzt.

Eine Schwierigkeit bei der direkten Übertragung des in dieser Arbeit vorgestellten Verfahrens zur Verschiebungsbestimmung auf die Verfolgung anderer Strukturen als punktförmigen Objekten ist dessen hohe Empfindlichkeit gegen ausgedehnte, orientierte Strukturen. Mit dem in der Zukunft zu erwartenden weiteren Anstieg der Rechenleistung von Personal Computern werden sich sicherlich auch robustere Verfahren in Echtzeit ausführen lassen.

Die Methoden zum Entwurf und zur Analyse linearer Systeme, auf deren Grundlagen in der

Arbeit ausführlich eingegangen wird, lassen sich sehr vielseitig für Regelungen, aber auch für die Bildverarbeitung mit linearen Filtern einsetzen.

Literaturverzeichnis

- [Ackermann 1985] J. Ackermann,
Sampled-Data Control Systems,
Springer 1985, ISBN 0-387-15610-0
- [Adrian 1991] R. J. Adrian,
Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics,
Annual Review of Fluid Mechanics **23**(1991) 261–304
- [Balschbach 1994] G. Balschbach,
Verschiedene Verfahren zur Visualisierung und Größenbestimmung von Gasblasen in Wasser, Diplomarbeit, Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg 1994
- [Bremer 1988] H. Bremer,
Dynamik und Regelung mechanischer Systeme,
Teubner 1988, ISBN 3-519-02369-5
- [Bremeyer 1995] R. Bremeyer,
Lokale Orientierung von Streak-Bildern,
Diplomarbeit, Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg 1995
- [Bracewell 1965] R. Bracewell,
The Fourier Transform and Its Applications,
McGraw Hill 1965
- [Dieter 1994] J. Dieter,
Messung von Strömungen in der viskosen Grenzschicht an der Wasseroberfläche,
Diplomarbeit, Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg 1994
- [Dieter] J. Dieter,
Dissertation, Universität Heidelberg, in Vorbereitung
- [Dueck 1988] G. Dueck, T. Scheuer,
Threshold Accepting—A General Purpose Optimization Algorithm Appearing Superior to Simulated Annealing,
Technical Report TR 88.10.011, IBM Deutschland, Wissenschaftliches Zentrum Heidelberg 1988
- [Dueck 1989] G. Dueck,
New Optimization Heuristics—The Great Deluge Algorithm and the Record-to-Record Travel
Technical Report TR 89.06.011, IBM Deutschland, Wissenschaftliches Zentrum Heidelberg 1989

[Dueck 1991]

G. Dueck, H. M. Wallmeier, C. Maier,
Search for Nash-Equilibria by Optimization Heuristics,
 Technical Report TR 75.91.11, IBM Deutschland, Wissenschaftliches
 Zentrum Heidelberg 1991

[Evans 1994]

B. L. Evans et al.,
*User's Guide to the Signal Processing Packages and Notebooks for
 Implementing Linear System Theory in Mathematica 1.2 and 2.0*,
 Georgia Institute of Technology, Atlanta 1994, im WWW auf dem
 Server von Wolfram Research zu beziehen:
<http://www.wri.com/> [...]
MathSource/Applications/Engineering/Electrical/Signals/0202-240/

[Fachat 1995]

A. Fachat,
*Untersuchung eines 3-D Aufnahmeverfahrens für Strömungsvorgänge
 an der Wasseroberfläche*,
 Diplomarbeit, Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg 1995

[Fischer, Lieb 1992]

W. Fischer, I. Lieb,
Funktionentheorie, 6. Auflage
 Vieweg 1992, ISBN 3-528-57247-7

[Geißler 1993]

P. Geißler,
Depth-from-Focus Bildanalyseverfahren zur Messung der Konzentration und Größe von Blasen und Mikroorganismen,
 Diplomarbeit, Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg 1993

[GSI 1991]

CX660 Scanner Control Amplifier User Manual Rev. C,
XY Scan Head Series User Manual Rev. B,
 General Scanning Inc., Watertown, Mass. 1991

[Haußecker 1995]

H. Haußecker, B. Jähne,
*Heat as a proxy tracer for gas exchange measurements in the field:
 principles and technical realization*,
 Air-Water Gas Transfer — Selected Papers from the 3rd International Symposium of Air-Water Gas Transfer, Heidelberg, Hrsg.: B. Jähne, E. Monahan, AEON Verlag & Studio, Hanau 1995, ISBN 3-9804429-0-X

[Haußecker 1996]

H. Haußecker,
 Dissertation, Universität Heidelberg, in Vorbereitung

[Hecht 1989]

Optik,
 Addison-Wesley 1989

[Hennessy 1990]

Computer Architecture: A quantitative Approach,
 Morgan Kaufmann 1990, ISBN 1-55860-069-8

[Hering 1992]

F. Hering,
*Messungen von Transportgeschwindigkeiten in winderzeugten Was-
 serwellen mittels Digitaler Bildfolgenanalyse*,
 Diplomarbeit, Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg 1992

- [Hering et al. 1995] F. Hering, D. Wierzimok, B. Jähne,
Particle Tracking and its Application in the Investigation of Turbulence beneath Water Waves,
zur Veröffentlichung angenommen in Experiments in Fluids,
Springer 1995
- [Hering 1996] F. Hering,
Lagrangian Untersuchungen des Strömungsfeldes unterhalb der wellenbewegten Wasseroberfläche mittels Bildfolgenanalyse,
Dissertation, Universität Heidelberg, in Vorbereitung
- [Heurisko 6.6.1995] B. Jaehne et al.,
Heurisko Digital Image Processing,
AEON Verlag & Studio, Hanau 06. 06. 1995
- [Hinsch 1990] H. Hinsch,
Elektronik,
Skript zur Vorlesung, Universität Heidelberg 1990
- [ITI 1995] (Itex framegrabber manuals) Imaging Technology, Inc.
- [Jähne 1980] *Zur Parametrisierung des Gasaustausches mit Hilfe von Laborexperimenten*,
Dissertation, Universität Heidelberg 1980
- [Jähne 1985] B. Jähne,
Transfer processes across the free water surface,
Habilitationsschrift, Universität Heidelberg 1985
- [Jähne, 1991] B. Jähne, *Digitale Bildverarbeitung*, Springer Verlag, Berlin, ., 2. Auflage 1991
- [Jähne 1993] B. Jähne,
Spatio-Temporal Image Processing,
Springer 1993, ISBN 0-387-57418-2; ISBN 3-540-57418-2
- [Jähne, 1995] B. Jähne, *Digital Image Processing*, Springer Verlag, Berlin, ., 3. Auflage 1995
- [Jain 1989] A. Jain,
Fundamentals of Digital Image Processing,
Prentice Hall 1989, ISBN 0-13-336165-9
- [Keane&Adrian 1990] R. D. Keane, R. J. Adrian,
Optimization of Particle Image Velocimeters, Part i: Double pulsed systems,
Measurement Science and Technology 1(1990) 1202–1215
- [Keane&Adrian 1991] R. D. Keane, R. J. Adrian,
Optimization of Particle Image Velocimeters, Part ii: Multiple pulsed systems,
Measurement Science and Technology 2(1991) 963–974
- [Kinsman 1965] B. Kinsman, *Wind Waves*,
Prentice-Hall 1965

- [Klinke 1995] J. Klinke, B. Jähne,
Measurements of Short Ocean Waves during the MBLARI West Coast Experiment,
 Air-Water Gas Transfer — Selected Papers from the 3rd International Symposium of Air-Water Gas Transfer, Heidelberg, Hrsg.: B. Jähne, E. Monahan, AEON Verlag & Studio, Hanau 1995, ISBN 3-9804429-0-X
- [Lauer 1994] H. Lauer,
Messung der Neigungsverteilung von Wasseroberflächenwellen mittels digitaler Bildverarbeitung,
 Diplomarbeit, Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg 1994
- [Lenz 1987] R. Lenz,
Linsenfehlerkorrigierte Eichung von Halbleiterkameras mit Standard-objektiven für hochgenaue 3D-Messungen in Echtzeit,
 Proc. 9. DAGM-Symposium S. 212–216, Springer 1987
- [Lindley 1992] C. A. Lindley,
Practical Ray Tracing in C,
 Wiley 1992, ISBN 0-471-57301-9
- [Mathematica 1991] S. Wolfram,
Mathematica—A System for Doing Mathematics by Computer,
 Wolfram Research, Inc., 2nd ed. 1991, ISBN 0-201-51507-5
- [Menzel 1995] M. Menzel,
 Entwicklung eines zweidimensionalen Gradienten-Detektors zur Messung kleinskaliger winderzeugter Wasseroberflächenwellen mittels Farbbildverarbeitung,
 Diplomarbeit, Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg 1995
- [ML2 1995] *Multi-LAB/2 Handbuch*, 3. Auflage v. 31. Januar 1995,
 SORCUS Computer GmbH, Heidelberg
- [Münsterer 1993] T. Münsterer,
Messungen von Konzentrationsprofilen gelöster Gase in der Wasser-seitigen Grenzschicht,
 Diplomarbeit, Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg 1993
- [NumRec 1988] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery,
Numerical Recipes in C,
 Cambridge University Press 1988, 2. Auflage 1992
- [Oertel 1989] H. Oertel, H. Oertel, *Optische Strömungsmeßtechnik*,
 G. Braun, Karlsruhe 1989
- [Pulnix] *TM-640 operations & maintenance manual*,
 PULNIX Europe Ltd.
- [Reinelt 1994] S. Reinelt,
 Bestimmung der Transfersgeschwindigkeit mittels CFT mit Wärme als Tracer,
 Diplomarbeit, Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg 1994

- [Russ 1995] J. C. Russ,
The Image Processing Handbook, 2nd ed.,
IEEE Press 1995, ISBN 0-8493-2516-1
- [SSH 1994] M. S. Santina, A. R. Stubberud, G. H. Hostetter,
Digital Control System Design, 2nd ed.,
Saunders College Publishing 1994, ISBN 0-03-076012-7
- [Schmitt, Ruck] F. Schmitt, B. Ruck,
Laserlichtschnittverfahren zur qualitativen Strömungsanalyse,
Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe
- [Schmundt 1994] D. Schmundt,
*Voruntersuchung der Einsatzmöglichkeiten digitaler Bildverarbeitung
zur Analyse von Transportvorgängen und Wachstumsprozessen in
Pflanzen*,
Diplomarbeit, Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg 1994
- [Schmundt 1995] D. Schmundt et al.,
The circular wind/wave facility at the University of Heidelberg,
Air-Water Gas Transfer—Selected Papers from the Third International Symposium of Air-Water Gas Transfer, Heidelberg, B. Jähne und E. Monahan (Hrsg.), Aeon Verlag Hanau 1995, ISBN 3-9804429-0-X
- [SONY] XC-75/75CE CCD Monochrome Video Camera Module, Bedienungsanleitung;
XC-73/73CE, XC-75/75CE Service Manual,
SONY Inc.
- [Stroustrup 1991] Bjarne Stroustrup,
The C++ Programming Language, 2nd ed.,
Addison Wesley 1991, ISBN 0-201-53864-4
- [Waas 1992] Stefan Waas,
Entwicklung eines feldgängigen optischen Meßsystems zur stereoskopischen Messung von Wasseroberflächenwellen,
- [Willert&Gharib 1991] C. E. Willert, M. Gharib,
Digital Particle Image Velocimetry,
Experiments in Fluids 10(1991) 181–193
- [ZEMAX 1995] ZEMAX Optical Design Program, Version 4.0,
FOCUS Software Inc., Tucson (AZ) 1995

Erklärung:

Ich versichere, da ich diese Arbeit selbständig verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Heidelberg, den 13. Dezember 1995