

Kapitel 1

Einleitung

Bereits im Jahre 1513 beobachtete Leonardo da Vinci den Zusammenhang von Wasserstand, Durchfluss, Gefälle von Gewässern und deren Flussbettraugigkeit für die Wasserstraßen der Poebene. Die mathematischen Grundlagen hierzu erforschte Galileo Galilei im Jahre 1638 und anschließend Isaac Newton 1687 in seinem berühmten Werk der Bewegungsgesetze [New87] sowie 1684 in den Reibungsgesetzen von Flüssigkeiten. In den darauf folgenden Jahren wurden für den jeweiligen Einsatzzweck eine Vielzahl an mechanischen Prinzipien zur Durchflussmessung entwickelt, welche hinsichtlich Fluidart, -menge und Wirtschaftlichkeit eine Optimierung erfahren haben.

Etablierte Messprinzipien wie das Wirkdruckverfahren, der Kammer- bzw. Flügelbasierten Volumenzähler oder der Schwebekörper-Durchflussmesser sind, bedingt durch ihre Historie, auch heute noch weit verbreitet [Bon90, Fie92, OR71]. Aufgrund der mechanisch beweglichen Teile und/oder des zusätzlichen Druckabfalls werden die mechanischen Messprinzipien jedoch mehr und mehr vom Markt verdrängt. Vor allem die zunehmende Bedeutung von verschleißfreien Durchflussmessungen in der Energie-, Versorgungs- und Verfahrenstechnik setzt die Entwicklung neuer Verfahren voraus, welche hinsichtlich ihrer Messgenauigkeit und Wirtschaftlichkeit den klassischen Messmethoden überlegen sind.

Um die Forderungen der (industriellen) Betreiber von immer genaueren und zuverlässigeren Durchflussmesssystemen Sorge tragen zu können, fußen modernere Messkonzepte auf bewegungslosen Verfahren. Neben optischen und thermischen Messprinzipien, setzten sich hierbei im Wesentlichen induktive, oszillierende und akustische durch. Vor allem magnetisch-induktive Durchflusssensoren (MID) für meist vollgefüllte Rohrströmungen in überwiegend gedückerter Form sind stark verbreitet. Hohe Messgenauigkeiten unterliegen hierbei jedoch der Bedingung eines rotationssymmetrischen Strömungsprofils, welches nur bei entsprechenden Ein- und Auslaufstrecken (größer $10 \times$ Nennweite), sowie der Vermeidung von Luftbläschen im Fluid gegeben ist. Neben den hohen Baukosten (bei einer Dükerung) steigen zusätzlich auch die Kosten für dieses Messsystem überproportional mit zunehmenden Nennweiten. [Teu06b, Han03, MSW98]

Mit der Fertigung von definierten Rohrdurchmessern und zunehmender Erfahrung, erlangen Coriolis-Durchflussmesser in der standardisierten Verfahrenstechnik zunehmende Beliebtheit. Das Messverfahren findet ausschließlich bei vollgefüllten Rohrströmungen Anwendung und zeichnet sich durch hohe Messgenauigkeit aus. Von Nachteil sind jedoch die relativ hohen Beschaffungskosten und der begrenzte Einsatzbereich auf kleine Nennweiten ($DN=15-80\text{ mm}$) sowie einphasige Messmedien. [FG⁺10]

In jüngster Zeit erfahren allerdings Ultraschall-Durchflussmesser einen überdurchschnittlichen Zuwachs an Marktanteilen. Bedingt durch die vergleichsweise geringen Kosten, die weitgehende Wartungsfreiheit, die einfache Installation und das hohe Maß an Anwendungsflexibilität auch für größere Nennweiten, findet sich dieses akustische Messprinzip im Sortiment von allen großen Geräteherstellern [Bru08, Bet06]. Prinzipiell untergliedert sich das Messprinzip in das Laufzeitdifferenzverfahren, welches auf Mitführeffekte der Schallwellen in reinem Fluid basiert, und Doppler- bzw. Korrelationsverfahren, welche auf Echoauswertungen in Mehrphasenfluiden beruhen. Durch den Einsatz von immer leistungsfähigeren Signalprozessoren sowie der Anwendung von neuen Technologien, versprechen die Doppler- bzw. Korrelationsverfahren ein maßgebliches Verbesserungspotenzial. Die Identifizierung und Nutzung dieses Potenzials, in Form von neuen Signalverarbeitungsverfahren gepaart mit der Phased-Array-Technologie, ist Bestandteil dieser Arbeit.

1.1 Stand der Technik

Die Durchflussmessung in voll- und teilgefüllten Rohren mit hohen Volumenströmen erfolgt heutzutage vorwiegend mit berührungs- und bewegungslosen Messprinzipien. Das Bekannteste von ihnen ist das der elektrodynamischen Induktion, welches bereits Anfang des 19. Jahrhunderts durch elektrische Schaltungstechniken realisiert werden konnte [Wil30]. Wird ein starkes magnetisches Feld senkrecht zur Strömungsrichtung erzeugt, so entsteht beim Durchfließen des magnetischen Feldes -aufgrund der im Fluid mitgeführten Ladungsträger- eine elektrische Feldstärke senkrecht zum Magnetfeld und der Fließrichtung. Die durch die Feldänderung hervorgerufene Spannungsdifferenz an den Elektroden der Rohrrinnenwand verhält sich dabei proportional zur gemittelten Strömungsgeschwindigkeit des Fluids. Das Messprinzip lässt sich mithilfe einer Dükerung auch auf teilgefüllte Rohre anwenden.

Neben diesem induktiven sind auch akustische Messprinzipien -meist im Ultraschallbereich- in der Durchflussmessung weit verbreitet. Die zugrunde liegenden Effekte zur Strömungsmessung beruhen entweder auf dem Mitführen von Schallwellen im Fluid und der damit verbundenen Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit oder auf dem Dopplereffekt, hervorgerufen durch Schallreflektionen von vorbeifließenden Schwebstoffen im Fluid. Beim Mitführeffekt sind Sender und Empfänger getrennt voneinander angeordnet und über einen gemeinsamen Schalllaufpfad verbunden. Der Schalllaufpfad muss dabei quer zur Strömungsrichtung ausgerichtet sein, sodass die Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit durch die Strömung gegeben ist. Ausgewertet wird die von der Strömungsgeschwindigkeit hervorgerufene Laufzeit-, Phasen- oder Frequenzdifferenz zwi-

schen Sende und Empfangssignal [Fie92]. Die gewonnene Signaldifferenz entlang eines Schalllaufpfades ist zur Fließgeschwindigkeit proportional. Zur Steigerung der Geschwindigkeitsauflösung wird wechselseitig die Funktionalität von Sender und Empfänger umgekehrt oder die Schalllaufdistanz durch Reflexionen an der Rohrwand erhöht. Bei Messungen von Teilfüllungen muss die Anordnung von Sender und Empfänger so gestaltet werden, dass der Schalllaufpfad vollständig im Fluid liegt und der Füllstand bekannt ist [ISO05].

Die auf dem Dopplereffekt aufbauende Strömungsmessung beruht auf der Schallrückstreuung von vorbeifließenden Schwebstoffen oder ungelösten Luftbläschen im Fluid und wird daher auch oft als reflexionsbasiertes Messverfahren bezeichnet. Sind diese Verunreinigungen in ausreichender Menge im Fluid vorhanden und bewegen sich diese schlupffrei mit der Strömung -was in guter Näherung zutrifft-, dann lässt sich von der Geschwindigkeitsbestimmung dieser Verunreinigungen auf die Fließgeschwindigkeit zurückschließen [Mor10, Teu06a, ST10]. Die Verunreinigungen und somit Repräsentanten der Fließgeschwindigkeit reflektieren dabei die vom Sensor ausgestrahlten Schallwellen und streuen diese zurück. Die dadurch hervorgerufene Stauchung bzw. Dehnung der Schallwellen sind ein Maß für die Reflektorgeschwindigkeit und lassen sich durch die Auswertung der Dopplerverschiebung bestimmen. Bei gepulstem Senden wird die Änderung der Echolaufzeit zur Erfassung der Reflektorgeschwindigkeit verwendet. Ist die Füllstandshöhe bekannt, lassen sich mit diesem Verfahren auch teilgefüllte Rohrströmungen messen.

Reflexionsbasierte Ultraschallmessgeräte existieren sowohl in bistatischer, als auch monostatischer Ausführung. Da bei bistatischen Messgeräten Sender und Empfänger örtlich voneinander getrennt angeordnet sind, lassen sich neben gepulsten Signalen auch continuous wave (CW) Signale verwenden. Während sich Sensoren mit CW-Signalen in voll und teilgefüllten Rohren höherer Nennweite aufgrund ihrer ortsunabhängigen Geschwindigkeitsmessung nicht etablieren konnten, sind Sensoren mit gepulsten Sendesignale unter der Bezeichnung ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) weit verbreitet [LCK94, VT98]. ADV-Sensoren bestehen aus drei Empfängern, welche im Winkel von 120° ringförmig um den Sender angeordnet sind. Die Abstrahlung der Sendepulse erfolgt senkrecht zur Fließrichtung und der Empfang der Echos unter einem Einstrahlwinkel von 60° zum Sendepfad. Unter Kenntnis der Echolaufzeit ist eine punktuelle Messung aller drei Geschwindigkeitskomponenten möglich. Die Echoauswertung erfolgt durch das Puls-zu-Puls Verfahren [MR72, KP89]. Zur Bestimmung des Geschwindigkeitsprofils und damit der mittleren Fließgeschwindigkeit müssen mehrere Messungen über den Querschnitt verteilt durchgeführt werden.

Im Gegensatz zur bistatischen Sensorkonzeption haben sich in der Praxis monostatische Ultraschall-Durchflusssensoren aufgrund ihrer Kosteneffizienz durchgesetzt. Hierbei finden Senden und Empfangen intermittierend mit demselben Strahler statt, sodass gepulste Sendesignale notwendig sind. Die Einstrahlrichtung eines räumlich festen Messpfades erfolgt radial zur Fließrichtung, um die Laufzeitänderung der Reflektoren oder die Dopplerverschiebung erfassen zu können. Abgestrahlt wird entweder in Richtung Sohle oder

Oberfläche [Teu06a, ISO07], sodass neben einem Sensor zur Geschwindigkeitsmessung oft noch zusätzlich ein Füllstandssensor im Messgerät integriert ist. Zur Bestimmung der Dopplerfrequenz bzw. Phasendifferenz der Echos müssen die Pulse in kohärenter Signalform gesendet werden. Bei Kanal- oder Rohrmessungen mit einem Füllstand bzw. einer Nennweite unter 5 m findet dieses Auswerteverfahren beispielsweise bei V-ADCP (Vertical -Acoustic Doppler Current Profiler) Sensoren Anwendung [HWX09]. Im Gegensatz hierzu wird die Detektion der Laufzeitänderung von Reflektoren durch korrelative Auswerteverfahren gelöst, sodass hier auch das inkohärente Senden von Pulsen möglich ist. Bekannte Durchflusssensoren in diesem Anwendungsbereich sind beispielsweise die der Firma NIVUS [Sol13]. Um die Messgenauigkeit der Durchflusssensoren bei gestörten Strömungen und komplexen Gerinnkonturen weiter zu steigern, ist die Messpfadanzahl im Strömungsquerschnitt zu erhöhen [Mor10, Sol13].

1.2 Problemstellung und Ziele der Arbeit

Damit der Durchfluss an einer Messstelle bestimmt werden kann, muss die durchströmende Querschnittsfläche mit der mittleren Fließgeschwindigkeit in diesem Querschnitt multipliziert werden. Während diese Durchflussberechnung bei vollgefüllten und symmetrischen Rohrströmungen mit hoher Präzision realisierbar ist, lässt sich eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit bei offenen Gerinnen oder stark gestörten bzw. asymmetrischen Strömungsprofilen mit einer punktuellen Messung auf einem Messstrahl nicht bestimmen.

Besonders schwierig sind dabei Messstellen, bei welchen das Strömungsverhalten durch gestörte Ein- und Auslaufbedingungen beeinflusst wird oder der Querschnitt z.B. durch Sedimentationen variiert. Ausgehend von diesen praxisnahen Bedingungen sind Messgenauigkeiten von unter $\pm 2\%$ zum tatsächlichen Durchfluss kaum möglich, sofern keine kontinuierliche Vermessung des gesamten Geschwindigkeitsprofils und des Querschnitts stattfindet. [Mor10, Teu06b]

Um diese Problematik lösen zu können, müssen zur Rekonstruktion des Geschwindigkeitsprofils möglichst viele Messpunkte, verteilt über den Querschnitt, vorliegen und die Querschnittsfläche und Füllstandshöhe bekannt sein. Die Erfüllung dieser Prämissen werden inzwischen überwiegend mit mehreren Ultraschall-Durchflussmesser entlang des Querschnittes realisiert [Mor10]. Mit zunehmender Anzahl an Messgeräten steigen jedoch die Kosten aber auch Komplexität zur Sensorsynchronisierung, Installation und Datenfusion.

Um eine hohe Messpunktabdeckung über den kompletten Querschnitt, bei gleichzeitiger Reduktion der Messgeräte zu erreichen, wird in dieser Arbeit die Phased-Array-Technologie angewendet. Dadurch lässt sich die Schallabstrahlung des Sensorsystems elektrisch durch phasenselektives Ansteuern in jede gewünschte Richtung auslenken. Die gerichtete Schallabstrahlung erfolgt bewegungslos und ohne mechanischen Verschleiß des Sensorsystems. Mit diesem Sensorkonzept lassen sich, selbst unter starker Störung der Strömung, die Fließgeschwindigkeiten hinreichend gut erfassen.

Mit der Phased-Array-Technologie zur Steigerung der Messpunktabdeckung, setzt sich diese Arbeit zum Ziel, geeignete Auswerteverfahren zu entwickeln. Durch den Einsatz leistungsfähiger Prozessoren lassen sich auch komplexere Algorithmen in den Sensorsystemen realisieren. Hierzu werden auf Grundlage der Sensorwerte Geschwindigkeitsprofile quer über den kompletten Kanal- bzw. Rohrquerschnitt generiert, sodass asymmetrische Strömungsverläufe erfasst werden können. Zusätzlich zu dieser technologischen Verbesserung sollen in dieser Arbeit neue Auswerteverfahren zur Geschwindigkeitsmessung von Reflektoren untersucht werden. Dabei sollen Mehrdeutigkeiten von Echos durch eine spezielle Sendesignalcodierung unterbunden und ein detailliertes Verfolgen der Reflektoren erzielt werden. Darauf aufbauend wird aus den Laufzeitänderungen einer Reflektorspur die Geschwindigkeit bestimmt, wozu es innovativer Filtermethoden bedarf. Neben dieser Spurverfolgung von Reflektoren werden auch Signalformen und Auswerteverfahren zur Bestimmung der Dopplerfrequenz analysiert. Für die Kombination der beiden Verfahren, besteht das Ziel ein Signalmuster und die dazugehörige Auswertemethodik zu entwickeln, welche sowohl die Laufzeitänderung und Position der Reflektoren als auch deren Dopplerfrequenz im Echo erfassen.

1.3 Gliederung der Arbeit

In **Kapitel 2** wird das Messprinzip der Durchflussmessung durch einen Phased-Array-Sensor für offene Kanäle und vollgefüllte Rohre vorgestellt. Zudem werden die Randbedingungen des Sensorsystems analysiert und der daraus resultierende Parameterbereich näher spezifiziert. Im Weiteren findet die Modellierung des Systems statt, mit dem Ziel einer möglichst realitätsnahen Nachbildung der Messumgebung. Neben dem Strömungsverlauf von Schallreflektoren werden auch Modellansätze zum elektromechanischen Verhalten eines Piezokristalls, deren Zusammenspiel in der Gruppe und Charakteristiken der Ultraschallausbreitung in Fluiden erläutert. Durch die Nachbildung des Sensorsystems in Form einer Signalkette und unter Kenntnis der Eingangssignale und Variation der Modellparameter, lassen sich Empfangssignale simulativ generieren und zur Verifikation der Auswerteverfahren nutzen. Darüber hinaus wird eine sensor- und strömungsbedingte Fehleranalyse des Systems durchgeführt.

Basierend auf den simulativ und messtechnisch ermittelten Empfangssignalen, werden in den nachfolgenden Kapiteln Auswerteverfahren zur Bestimmung von Fließgeschwindigkeiten durch die Phased-Array-Technologie erläutert. Hierbei wird in **Kapitel 3** ein laufzeitbasiertes Korrelationsverfahren beschrieben, welches gepaart mit einer speziellen Sendesignalform, die zeitliche Verfolgung von Reflektorspuren ermöglicht. Die Verfolgung von Reflektoren erfolgt auf Grundlage der Objektverfolgungstheorie und damit auf Verfahren der Zustandsschätzung mit Datenassoziation. Sind die Reflektorgeschwindigkeiten im Sichtbereich des Phased-Array-Sensor bekannt, werden räumliche Geschwindigkeitsprofile von vollgefüllten Rohrleitungen und teilgefüllten Rechteckkanälen zur Extrapolation nicht

messbarer Zonen vorgestellt und bewertet. Abschließend finden zahlreiche Analysen zur Durchflussmessung mittels Phased-Array-Sensor und dem laufzeitbasierten Auswerteverfahren statt.

In **Kapitel 4** werden dopplerbasierte Auswerteverfahren zur Bestimmung der Reflektorgeschwindigkeiten untersucht. Hierzu werden etablierte und moderne Verfahren zur Identifizierung der Dopplerfrequenz vorgestellt und auf die vorliegende Aufgabenstellung erweitert. Hauptaugenmerk liegt auf der Theorie der eigenwertbasierten Spektralanalyse. Nach einer simulativen Gegenüberstellung der Verfahren sowie einer Bewertung hinsichtlich Störfestigkeit, variierender Reflektoranzahl und Strömungseinflüssen, werden Messergebnisse des Phased-Array-Sensors bei vollgefüllter Rohrströmung präsentiert.

Zur Verbesserung der Geschwindigkeitsmessung werden -aufbauend auf den zuvor beschriebenen laufzeit- und dopplerbasierten Auswerteverfahren- in **Kapitel 5** zwei Optionen zur Verfahrensfusion erläutert. Dabei wird ein Sendesignal bestehend aus kohärentem und codiertem Pulsmuster und dessen Signalaufbereitung vorgestellt und näher untersucht. Die daraus gewonnenen Geschwindigkeits- und Positionsinformationen dienen einerseits zur Reduktion von Messunsicherheiten bei der laufzeitbasierten Objektverfolgung und andererseits zur Steigerung der Messentfernung beim dopplerbasierten Auswerteverfahren. Zum Ende des Kapitels erfolgt die simulative Untersuchung beider fusionierter Auswerteverfahren und der Vergleich mit den Ergebnissen aus den vorhergehenden Kapiteln. Zusätzlich werden die Verfahren experimentell an Strömungskanälen untersucht.

Das Hardwarekonzept des Sensorsystems, bestehend aus einem Phased-Array-Strahler zur elektromechanischen Wandlung, einem digitalen Signalprozessor zur Signalaufbereitung und einem Mikrocontroller zur Umsetzung der Auswertverfahren, wird in **Kapitel 6** aufgezeigt. Um die Machbarkeit der diskutierten Verfahren zu stützen, wird zusätzlich ein rechenintensives Auswerteverfahren hinsichtlich Rechenlaufzeit und Speicherressourcen auf dem Mikrocontroller untersucht. Zudem wird geprüft, ob eine Sichtbereichserweiterung des Phased-Array-Sensors zu einer Fehlerminimierung der Durchflussmessung führt. **Kapitel 7** vervollständigt die Arbeit mit einer abschließenden Bewertung der vorgestellten Auswerteverfahren und einer Zusammenfassung.

Kapitel 2

Modellierung des Sensorsystems

Das in dieser Arbeit vorgestellte Sensorsystem kombiniert das intermittierende Strahlerverhalten mit der Phased-Array-Technologie und ist damit in der Lage bestehende Messsysteme zu verbessern. Diese Erweiterung geht mit einer Komplexitätssteigerung des Sensorsystems einher, sodass eine ausführliche Modellierung und Analyse des Systems unumgänglich erscheint. Im Nachfolgenden wird daher zunächst die Funktionsweise des Sensorsystems vorgestellt und dessen Randbedingungen im Bezug auf existierende Auswerteverfahren untersucht. Zudem wird das Sensorsystem messtechnisch erfasst und in ein mathematisches Modell zur Empfangssignalgenerierung überführt. Abschließend erfolgt ein Überblick über das Sensordesign und eine ausführliche Fehleranalyse des Systems.

2.1 Grundlagen und Funktionsweise des Sensorsystems

Der Schallfrequenzbereich zwischen Hörschall und Hyperschall wird als Ultraschall bezeichnet und beansprucht das Frequenzband von oberhalb 20 kHz. Dabei breitet sich der Schall in Flüssigkeiten als Longitudinalwelle aus. Die Erzeugung der Ultraschallwellen kann mit piezoelektrischen Materialien erfolgen, mithilfe welcher die reversible Transformation von mechanischer in elektrische Energie möglich ist. Wird folglich ein elektrisches Feld an das piezoelektrische Material angelegt, verformt sich dieses Material und eine Schallwelle entsteht. Wird hingegen umgekehrt Druck auf das Material ausgeübt, führt dies zu einer elektrischen Ladung des Materials. Der Werkstoff empfängt Schallwellen und stellt diese in Form elektrischer Feldänderungen dar. Dieses Phänomen wird auch als „Piezoeffekt“ bezeichnet. Da mit dem piezoelektrischen Material sowohl gesendet, als auch empfangen werden kann, setzte sich umgangssprachlich der Begriff des aktiven Sensors durch [Kut88, LMM09].

In dieser Arbeit wird zur Durchflussmessung ein eindimensionaler Phased-Array-Sensor mit ebener Strahlsschwenkung aus der Medizintechnik verwendet. Der Sensor besteht dabei aus einem 1-3 Kompositmaterial, bestehend aus Polymer und einer piezoelektrischen Blei

(Pb) Zirkonat Titanat (PZT) Keramik [SA91, WH09]. Die Resonanzfrequenz und damit auch die Sendefrequenz der Sensorik liegt bei 1 MHz.

Um den Funktionsnachweis der Auswerteverfahren und der Phased-Array-Technologie für ein möglichst breites Anwendungsspektrum erbringen zu können, werden im Nachfolgenden zwei Positionierungsformen des Sensors betrachtet (siehe Abb. 2.1). Dabei wird bei offenen Gerinnen oder teilgefüllten Rohrleitungen der Durchflussmesser an einem Schwimmer auf der Wasseroberfläche gefesselt, sodass dieser frei von Ablagerungen den kompletten Querschnitt sukzessiv ausleuchten kann. Für vollgefüllte Rohrleitungen ist der Sensor an der Rohrwand fixiert (vgl. Abb. 2.1 rechts) und bei Teilfüllungen an der Sohle.

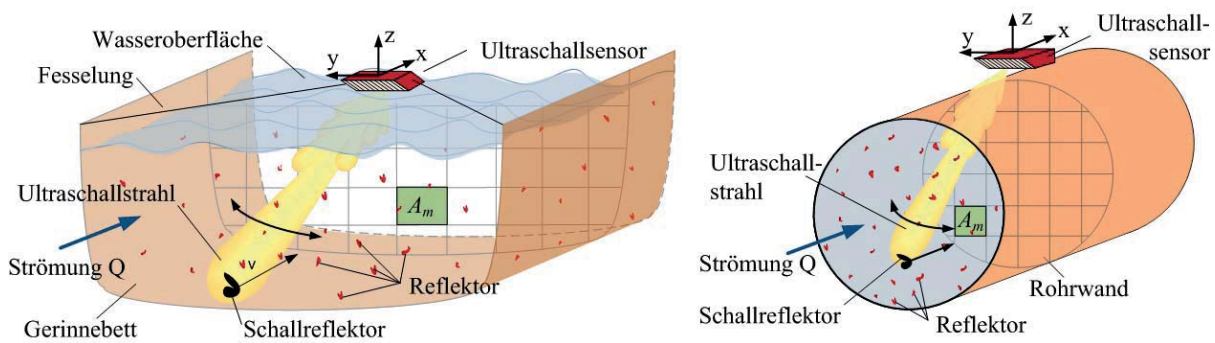


Abb. 2.1: Grundprinzip des Ultraschallmesssystems für freie Gerinne (links) und vollgefüllte Rohre (rechts). Von Bedeutung sind die Ausrichtung des Koordinatensystems und die Querschnittsdiskretisierung zur Durchflussberechnung.

Der Sensor misst entgegen der Strömungsrichtung. Die Richtcharakteristik des Sensors in Azimuthebene wird mit θ_{az} und in Elevationsebene mit θ_{el} beschrieben. α und β sind die Hauptstrahlrichtungen des Sensors. Der horizontale Einstrahlwinkel α befindet sich auf der x-y Ebene und der vertikale Winkel β auf der x-z Ebene (siehe Abb. 2.2).

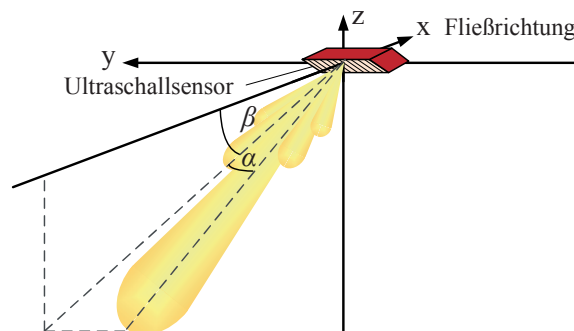


Abb. 2.2: Koordinatensystem zur Sensorpositionierung und -einstrahlung.

Zusammenfassen lässt sich die Funktionalität des Sensorsystems wie folgt: Zur Berechnung des Durchflusses muss zunächst die Kontur des Gerinnequerschnitts bekannt sein. Sofern die Ultraschallwellen an der Sohle beispielsweise durch Kies zurückgestreut werden

und nicht absorbiert oder einer Totalreflexion unterliegen, ist eine Vermessung der Kontur durchaus mit dem Phased-Array-Sensor möglich. Sind die Kanalabmaße -wie in dieser Arbeit- bekannt, genügt für Teilfüllungen eine lotrechte Füllstandsmessung im Fluid, um unter Berücksichtigung der Sedimentationen Rückschlüsse auf die Kontur schließen zu können. Die Geschwindigkeitskomponenten, der mit der Strömung schlupffrei mitfließenden Reflektoren, lassen sich aus dem Empfangssignal auf Grundlage einer Laufzeitänderung (im Zeitbereich) oder der Dopplerbestimmung (im Frequenzbereich) extrahieren. Mithilfe dieser Komponente v_{mess} und den bekannten Einstrahlwinkeln α und β erschließt sich der Geschwindigkeitsvektor $\mathbf{v}(x_m, y_m, z_m)$ eines jeden Flächenelements m durch die Projektion:

$$\mathbf{v}(x_m, y_m, z_m) = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}_m = \begin{bmatrix} (\cos(\alpha) \cos(\beta))^{-1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_{mess,m}. \quad (2.1)$$

Liegen der Querschnitt und die Geschwindigkeitsvektoren $\mathbf{v}(x_m, y_m, z_m)$ der Reflektoren vor, lässt sich der Durchfluss des Fluids über die Querschnittsfläche A wie folgt berechnen:

$$\text{Durchfluss } Q \text{ über } A = \iint_A \mathbf{v} \, d\mathbf{A} \approx \sum_{m=1}^M \mathbf{v}(x_m, y_m, z_m) \Delta \mathbf{A}_m. \quad (2.2)$$

In der Realität wird dieses Oberflächenintegral durch eine diskrete Methode [DR84] berechnet, wie Abb. 2.1 verdeutlicht.

2.2 Messeinschränkungen von Auswerteverfahren

Laufzeitmessverfahren unterliegen der Beschränkung, dass die Messentfernung durch das Pulswiederholintervall t_{PRI} begrenzt wird. Dopplerverfahren benötigen ein geringes Pulswiederholintervall, um eine eindeutige Bestimmung der Dopplerverschiebung zu ermöglichen. Laufzeitmessungen werden mit gepulsten Signalen durchgeführt, die nicht notwendigerweise kohärent¹ sein müssen. Zur Dopplerbestimmung muss die Pulsfolge kohärent sein. Soll mit dem kohärenten Pulssignal zusätzlich die Reflektorentfernung bestimmt werden, um die gemessenen Signale einem Ort zuzuordnen, müssen beide Bedingungen (Entfernungs- und Frequenzeindeutigkeit) eingehalten werden (siehe Abb. 2.3). In Bezug auf diese beiden Sendesignalformen sollen im weiteren Verlauf unter Einfluss von Parametern wie Halbwertsbreite des Strahlers in Elevationsrichtung ($\theta_{el,3dB}$), Azimuthrichtung ($\theta_{az,3dB}$), Einstrahlwinkel (β), Pulswiederholintervall (t_{PRI}), Pulsbreite (t_{PW}), Pulsanzahl (N), Sendefrequenz (f_0) und Maximalgeschwindigkeit des Reflektors ($v_{x,max}$), die Größe und Form des Messbereichs bestimmt werden.

¹Kohärent: Die Signalform der Pulse zueinander weist ein kontinuierliches und durchgehendes Signalmuster auf.

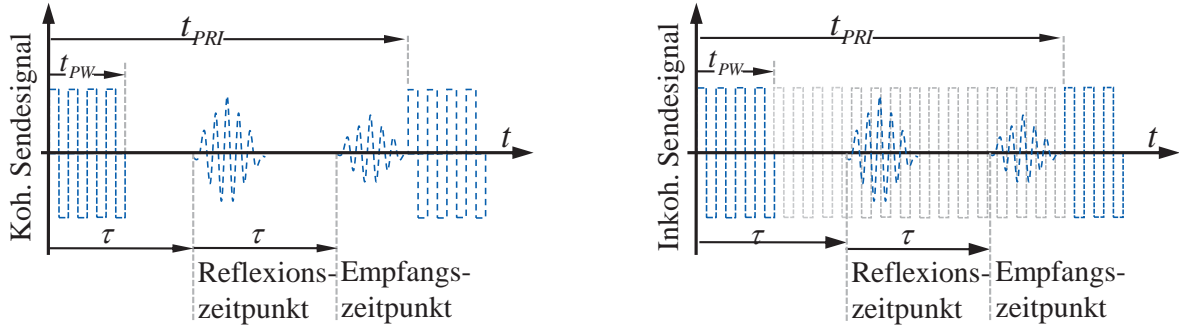


Abb. 2.3: Inkohärente (links) und kohärente (rechts) Signalformen mit zusätzlicher Dopplermessung.

Damit eine eindeutige Messung bei inkohärenten Signalformen stattfinden kann, müssen die Echo-Signale des ersten Sendepulses stets vor dem Absenden des zweiten Pulses empfangen werden. Nur unter Einhaltung dieser Bedingung lassen sich die Echos auch eindeutig einer Entfernung und damit einem Sendepuls zuordnen. Um diese Entfernungseindeutigkeit gewährleisten zu können, muss demnach das Pulswiederholintervall t_{PRI} stets größer sein als die doppelte Schalllaufzeit τ zwischen Sensor und Reflektor, $t_{PRI} \geq 2\tau$ (siehe Abb. 2.3 links). Abzüglich der Pulsdauer t_{PW} erschließt sich die Maximalentfernung aus

$$r \leq r_{max} = \frac{(t_{PRI} - t_{PW})c_w}{2}, \quad (2.3)$$

wobei mit c_w die Schallgeschwindigkeit im Wasser mit 1480 m/s definiert ist. Zusätzlich zu dieser Bedingung ist festzuhalten, dass während des Sendevorgangs kein Empfang möglich ist, sodass eine Minimalentfernung von

$$r \geq r_{min,1} = \frac{t_{PW}c_w}{2}, \quad (2.4)$$

vorliegt.

Diese zwei Restriktionen zeigen bereits die Messbereichseinschränkung für das älteste und zugleich bekannteste „single-pulse“-Verfahren [LS04, Lhe73, Pin79]. Hierbei wird ein zusammenhängendes Signal über eine besonders lange Pulsdauer gesendet, um mit einer anschließenden diskreten Fourier-Transformation (DFT) eine möglichst gute Frequenzauflösung zu erhalten. Erst nachdem das komplette Signal empfangen wurde, wird wieder gesendet. In Abb. 2.4 links wird nun unter Verwendung der oberen Gleichungen deutlich, dass bereits bei einer Pulsdauer von 0,5 ms die Entfernung unterhalb 37 cm nicht messbar ist. Ein weiterer Nachteil bei diesen langen Sendesignalen liegt in der schlechten Raumaufklärung von $\Delta r = c_w t_{PW}$, weswegen dieses Verfahren in seichten Gewässern (Füllstände < 5 m) kaum anzutreffen ist.

Neben dieser Minimalentfernung von Gl. 2.4 wird bei kurzer Pulsdauer die Entfernung im Wesentlichen durch den Öffnungswinkel und den Einstrahlwinkeln β sowie α

eingeschränkt. Demnach muss sich ein Reflektor für einen längeren Zeitraum innerhalb des Strahlersichtbereichs aufhalten, um genügend Pulse zu reflektieren. Die notwendige Anzahl an Pulsreflexionen N resultiert aus der Art des Auswerteverfahrens. Für eine Hauptstrahlrichtung $\alpha = 0$ gilt die Gleichung zur Bestimmung der Minimalentfernung

$$r \geq r_{min,2} = \frac{Nv_{x,max}t_{PRI} + t_{PW}}{\sin(\beta)} \left(\tan\left(\beta - \frac{\theta_{el,3dB}}{2}\right) - \tan\left(\beta - \frac{\theta_{el,3dB}}{2}\right) \right), \quad (2.5)$$

wobei die Variable $v_{x,max}$ die maximal anzunehmende Reflektorgeschwindigkeit im Fluid definiert.

Das weit verbreitete Kreuzkorrelationsverfahren¹ nutzt kurze Pulse und unterliegt damit dieser Restriktion. Um die Fließgeschwindigkeit einer Wolke aus Reflektoren zu bestimmen, genügen bereits zwei Sendepulse bzw. Pulsreflexionen. Abb. 2.4 links zeigt die Abhängigkeit des Messbereichs von der Pulsbreite und dem Pulswiederholintervall. Jedoch wird in [KTSH10, ST10] darauf hingewiesen, dass in der Realität der Erhöhung der Messentfernung, bedingt durch das Pulswiederholintervall, Grenzen gesetzt sind. Die Annahme beruht auf der Tatsache der Schallabsorption. Darüber hinaus konnte ein Zuwachs der Messfehler durch die strukturelle Änderung der Reflektorwolke über die Zeit nachgewiesen werden. In vielen Fällen, insbesondere in Kläranlagen, handelt es sich nicht um einzelne Reflektoren, sondern um Reflektorwolken, deren Struktur sich stetig ändert. Die Dekorrelation der Echos zweier aufeinanderfolgender Empfangssignale nimmt demnach mit steigendem Pulswiederholintervall (t_{PRI}) zu. Bei einem Simulationsszenario mit einer Fließgeschwindigkeit von 3 m/s und einer Strahlerkeulenbreite von $\frac{\theta_{el,3dB}}{2} = 3^\circ$, sowie einem Einstrahlwinkel $\beta = 45^\circ$ erfolgt der Fehlerzuwachs ab einer t_{PRI} von etwa 2 ms (vgl. Anhang A.1). Zusammenfassend zeigt sich, dass damit das Kreuzkorrelationsverfahren einer Einschränkung der Messentfernung auf wenige Meter unterliegt.

Soll aus den Echos einer kohärenten Pulsfolge die Dopplerfrequenz bestimmt werden, so muss die Abtastfrequenz und damit das Pulsintervall dem Nyquist-Kriterium genügen. Bei einer Sendefrequenz f_0 gilt:

$$f_{D,max} = \frac{2f_0v_{x,max}}{c_w} = \frac{1}{2t_{PRI}}. \quad (2.6)$$

Soll also gleichzeitig aus der kohärenten Echofolge die Entfernung bestimmt werden, so erhält man mit Gl. 2.3 -unter Vernachlässigung der Pulsbreite- die Einschränkung [DZS79, BCDT91, LS84]:

$$r \leq r_{max} = \frac{c_w^2}{8f_0v_{x,max}}. \quad (2.7)$$

In Abb. 2.4 rechts ist der Messbereich für eine simulative Doppler- und Entfernungsmessung dargestellt. Hier wird deutlich, dass selbst bei einer niedrigen Sendefrequenz

¹Bei der Kreuzkorrelation werden zwei Empfangssignale miteinander korreliert, um die Radialgeschwindigkeit zu bestimmen [KTSH08].

f_0 und einem zur Fließgeschwindigkeit passenden Pulswiederholintervall, eine eindeutige Messung nur bis zu einer geringen Messentfernung möglich ist. Auswerteverfahren wie die Kovarianzmethode nach [MR72] oder die darauf zurückzuführende „Puls-Paar“-Methode unterliegen diesen Einschränkungen. Kohärente Messverfahren sind somit auf unter 1–2 m limitiert [Lhe83], vgl. Parameter in [ZHCL96].

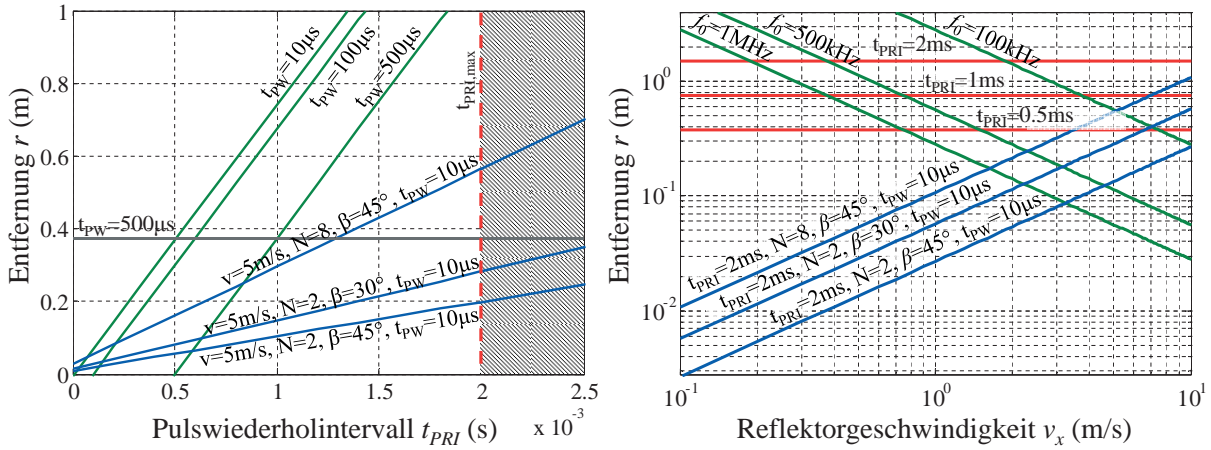


Abb. 2.4: Messrestriktionen von inkohärenten (links) und kohärenten (rechts) Signalformen. Links: Gl. 2.3 in grün, Gl. 2.4 in grau, Gl. 2.5 in blau und Dekorrelationssimulation in rot; Rechts: Gl. 2.3 in rot, Gl. 2.5 in blau und Gl. 2.6 in grün.

Um diese gravierenden Nachteile der Messbereichsrestriktion zu umgehen, wird vorgeschlagen, die Sendesignale zu codieren. Dadurch erweitert sich der Entfernungsbereich und die für die Geschwindigkeitsbestimmung erforderliche hohe Pulsfrequenz kann trotzdem eingehalten werden. In Kap. 3.2 wird ein Codiervorgang auf der Basis des Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) vorgestellt. Weitere Codier-Möglichkeiten sind die Phasen-Codierung [DZ93, SO93], sowie das aus der Radartechnik bekannte staggered pulse train-Verfahren nach [Zrn77, SZ00, SZ02] oder [ZM85, DZS79], welche jedoch in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt werden.

2.3 Modellierung des Sensorsystems

In diesem Kapitel wird ein mathematisches Modell des Sensorsystems und der Messumgebung erstellt. Basierend auf diesem Modellansatz findet neben der Identifizierung von Systemeigenschaften auch die Generierung von Empfangssignalen statt, um Auswerteverfahren zu entwickeln und zu bewerten. Das System ist in folgende Einzelmodelle aufgeteilt:

- Strömungsmodell,
- Elektromechanische Übertragungsfunktion,

- Schallausbreitungsmodell,
- Schallabsorptionsmodell und
- Schallreflexionsmodell.

In Abb. 2.5 ist der Signalflussverlauf dargestellt. Im Strömungsmodell wird die Geometrie und das Rechengitter des zu simulierenden Kanals abgebildet. Für eine gegebene Einlaufgeschwindigkeit \bar{v}_{in} werden die resultierenden Strömungslinien¹ ($f(x, y, z, k)$) und damit Repräsentanten einer Reflektorspur zur Reflexionspunktbestimmung berechnet. Sind Informationen über Distanz (r_{ref}) und Winkel (α_s, β_s) zwischen Sensor und Reflektor zum Zeitpunkt der Schallreflexion (k) bekannt, lässt sich das Sendesignal $s_0(k)$ über die elektromechanische Wandlung des Piezos in Schalldruck überführen und über die entsprechenden Schallausbreitungsmodelle bis hin zur Reflexion berechnen. Zur Generierung der Echosi-

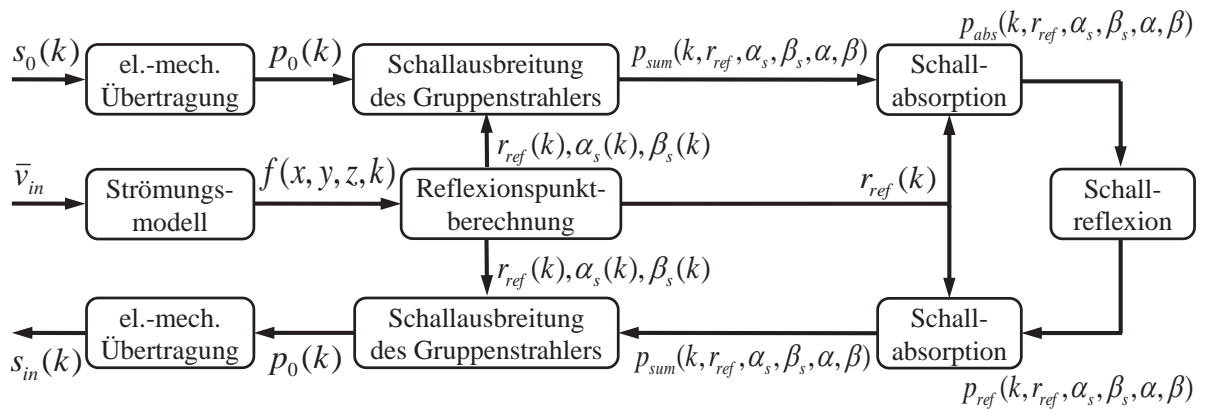


Abb. 2.5: Modellstruktur.

gnale am Sensor müssen die Einzelmodelle von Schallabsorption, Schallausbreitung und elektromechanischer Wandlung ein weiteres Mal in umgekehrter Reihenfolge durchlaufen werden, um das Echosignal $s_{in}(k)$ zu erhalten.

2.3.1 Strömungsmodell

Die Notwendigkeit vollständiger Informationen über die Strömung ist bei der Durchflussmessung mit einer Geschwindigkeitsprojektion unabdingbar. Mit zunehmenden Turbulenzen steigen die Messfehler, sodass zur Kompensation mehr und mehr Sekundärinformationen über die Strömungseigenschaften erforderlich werden. Neben dem Einwirken auf Störgrößen, benötigt die Messung zur Lösung von Gl. 2.2 ein mathematisches Strömungsprofil über den kompletten Kanalquerschnitt. Um an diese Strömungsinformationen zu gelangen, werden CFD (Computational Fluid Dynamics) Simulationen mit der Software FLUENT[®] durchgeführt. Das dabei aufgestellte Modell dient letztlich auch zur Generierung von Strömungslinien, welche zur Empfangssignalgenerierung notwendig sind.

¹Der Verlauf der Strömungslinien erfolgt dabei tangential zu den Geschwindigkeitsvektoren.

Das instationäre Strömungsmodell für inkompressible Flüssigkeiten wird vollständig über die Kontinuitäts- und Navier-Stokes-Gleichung beschrieben [Lj11]. Die Kontinuitätsgleichung stellt dabei die Erhaltung der Massen dar und ist durch

$$\nabla \mathbf{v}_{ist} = \frac{\partial v_{ist,x}}{\partial x} + \frac{\partial v_{ist,y}}{\partial y} + \frac{\partial v_{ist,z}}{\partial z} = 0 \quad (2.8)$$

definiert [Sie00]. D.h. die Flüssigkeit, welche in ein Volumenelement hineinfließt muss auch wieder herausfließen, sodass die Kontinuität der gesamten Masse erhalten bleibt¹. Ausgangspunkt der inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichung bildet der Impulserhaltungssatz und somit die Tatsache, dass die Summe aller Impulse eines abgeschlossenen Systems gleich Null ist. Zusammen mit der Newtonschen Bewegungsgleichung für ein Massenelement ($dm = \varrho_0 dV$) gilt:

$$dF = dF_R + dF_p + dF_g = dm \frac{d\mathbf{v}_{ist}}{dt} = \varrho_0 dV \frac{d\mathbf{v}_{ist}}{dt}. \quad (2.9)$$

Wird die Gleichung durch die Kräfte eines viskosen Fluids für ein Volumenelement dV ersetzt sowie dessen substantielle Beschleunigung, resultiert die inkompressible Navier-Stokes-Gleichung

$$\underbrace{\varrho_0 dV \left(\frac{\partial \mathbf{v}_{ist}}{\partial t} + (\mathbf{v}_{ist} \cdot \nabla) \mathbf{v}_{ist} \right)}_{\text{subs. Beschleunigung } \frac{d\mathbf{v}_{ist}}{dt}} = \underbrace{\eta \Delta \mathbf{v}_{ist} dV}_{\text{Reibungskraft } dF_R} - \underbrace{\mathbf{grad} p dV}_{\text{Druckkraft } dF_p} + \underbrace{\varrho_0 \mathbf{g} dV}_{\text{Schwerkraft } dF_g} \quad (2.10)$$

$$\varrho_0 \left(\frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{v}_{ist} \cdot \nabla) \right) \mathbf{v}_{ist} = -\mathbf{grad} p + \varrho_0 \mathbf{g} + \eta \Delta \mathbf{v}_{ist}, \quad (2.11)$$

wobei η die dynamische Viskosität des Fluids beschreibt. Für $\eta = 0$ und folglich eine ideale Flüssigkeit, reduziert sich die Gleichung um den Reibungsterm zur Euler-Gleichung und somit zu einer vereinfacht lösbaren Differentialgleichung 1.Ordnung. Der Vektor \mathbf{g} erschließt sich aus dem Gefällewinkel des Gerinnes ξ und der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$:

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} g \sin(\xi) \\ 0 \\ -g \cos(\xi) \end{bmatrix}.$$

Die substantielle Beschleunigung setzt sich aus einer zeitlichen Änderung $\frac{\partial \mathbf{v}_{ist}}{\partial t}$ der Geschwindigkeit am selben Ort und der Konvektionsbeschleunigung $(\mathbf{v}_{ist} \cdot \nabla) \mathbf{v}_{ist}$ -also der räumlichen Änderung der Geschwindigkeit- zusammen [SS07]. Die ausführliche Schreibweise der inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichung ist im Anhang unter Kap. A.2 dargestellt. Mit Gl. 2.8 und 2.11 sind insgesamt vier Differentialgleichungen für vier unbekannte Variablen

¹Dichte $\varrho_0 = \text{const}$, folglich ist $dm \propto dV$ vgl. Gl. 2.9.

-die Geschwindigkeitskomponenten ($v_{ist,x}, v_{ist,y}, v_{ist,z}$) und den Druck (p)- beschrieben, die ein geschlossenes System bilden.

Die Generierung des Strömungskanals, dessen Rechengitter und das numerische Lösen des Strömungsmodells erfolgen mithilfe der Software FLUENT[®]. Es werden ein vollgefülltes Rohr mit einem Durchmesser von 100 mm und ein rechteckiger, offener Kanal mit den Abmaßen 350×455 mm (b×h) simuliert. Diese Kanalformen werden zur Verifizierung der Strömungsprüfstände nachgebildet. Basierend auf den resultierenden Geschwindigkeitsvektorfeldern lassen sich nun die ortsabhängigen Strömungsprofile für unterschiedliche Einlaufgeschwindigkeiten bestimmen. In Abb. 2.6 links ist exemplarisch das simulierte Geschwindigkeitsprofil einer Rohrströmung in Fließrichtung für die Einlaufgeschwindigkeit von 1 m/s dargestellt und rechts die einer Kanalströmung mit der Einlaufgeschwindigkeit von 0,3 m/s.

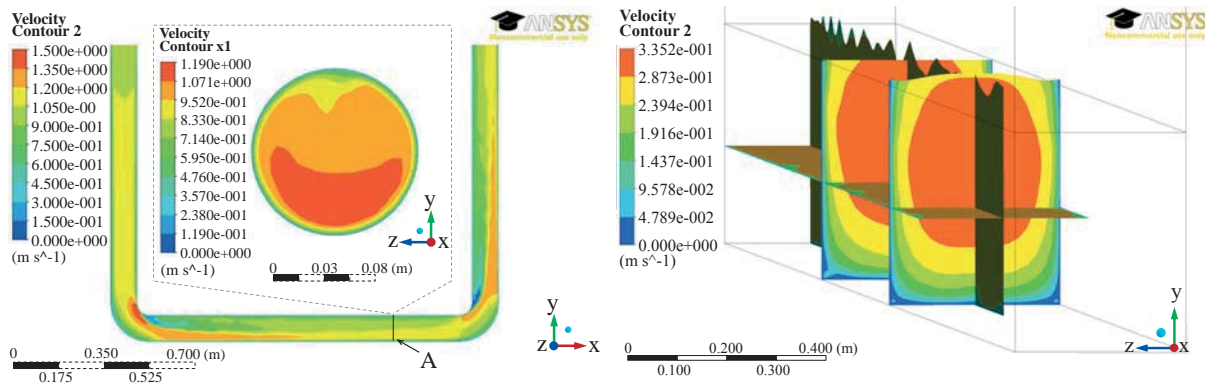


Abb. 2.6: Links: Vollgefülltes Rohr und dessen Geschwindigkeitsverteilung bei A mit $\bar{v}_{in} = 1$ m/s; Rechts: Offener Kanal und dessen Geschwindigkeitsverteilung bei 17 m und 21 m nach dem Einlauf mit $\bar{v}_{in} = 0,3$ m/s.

Zusätzlich zu diesen Profilen ist auf Grundlage des Geschwindigkeitsfeldes die Generierung von Strömungslinien $f(x, y, z, k)$ möglich. Für die nachfolgende Signalmodellierung werden diese zeitlich äquidistant abgetasteten Strömungslinien als Stromlinien von Reflektoren interpretiert. In Abb. 2.7 sind die Strömungslinien für einen Kanalabschnitt beider Formen dargestellt.

2.3.2 Reflexionspunktberechnung

Um die Stromlinien der Reflektoren aus der CFD-Simulation in die Signalflusskette einzubinden, wird in diesem Kapitel ein Verfahren zur Synchronisierung der Daten vorgestellt. Während aus dem Strömungsmodell die Positionen einer Stromlinie für ein kontinuierliches Zeitintervall k gegeben sind, müssen die Positionen bei der Berechnung der Schallausbreitung bzw. Schallabsorption zum Reflexionszeitpunkt bekannt sein. Bewegen sich die Reflektoren entlang einer Strömungslinie in Sensorrichtung, nimmt auch die Distanz zwischen Reflektor und Sensor schrittweise ab. Äquivalent zur Distanzabnahme reduziert