



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.

ZfP-Sonderpreis der DGZfP beim Regionalwettbewerb Jugend forscht

MÜNCHEN



Luftgeschwindigkeitsmessung mit Ultraschall – Entwicklung eines low-cost Ultraschallane- mometers

Niels Junker

Schule:

Luftgeschwindigkeitsmessung mit Ultraschall

Entwicklung eines low-cost Ultraschallanemometers

von
Niels Junker

Inhaltsverzeichnis

0	Kurzfassung	1
1	Einleitung	2
1.1	Relevante Messprinzipien zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit	2
1.1.1	Flügelradanemometer	2
1.1.2	Staurohr (Pitotrohr)	3
1.2	Darstellung der Prinzipien, die basierend auf Ultraschall für Anemometer verwendet werden	3
1.2.1	Ultraschallanemometer basierend auf dem Dopplereffekt	3
1.2.2	Das Time-of-Flight Messprinzip	4
2	Entwicklung eines low-cost Ultraschallanemometers	4
2.1	Das Time-of-Flight Messprinzip	4
2.2	Transducer und Signalausbreitung	5
2.2.1	Ultraschallwandler (Ultraschalltransducer/Piezotransducer)	5
2.2.2	Ausbreitung von Ultraschallwellen	6
2.2.3	Abstand zwischen den Ultraschalltransducern	7
2.2.4	Aufbau	7
2.3	Diskreter Aufbau eines Ultraschallanemometers mit 40kHz Ultraschallwandler	9
2.3.1	Software	11
2.3.2	Tests	12
3	Diskussion	13
3.1	Mechanischer Aufbau	13
3.2	Applikationen des low-cost Ultraschallanemometers	15
4	Fazit	15

0 Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines Ultraschallanemometers basierend auf dem Time-of-Flight Messprinzip mit folgenden Zielen:

- eine komplexe Funktionalität in eine möglichst kompakte Form zu integrieren;
- die Kosten für die Herstellung möglichst gering zu halten, um den Sensor in Mass-Production herstellen zu können. Damit soll ein sehr breites Applikationsspektrum gedeckt werden;
- Erzielung einer positiven Umwelt-Bilanz.

Die Umsetzung des Time-of-Flight Prinzips erfolgt in der grundlegenden Form:

Zwei face-to-face, quasi parallel zur Strömung, positionierte Ultraschall-Wandler, ein Sender und ein Empfänger, bilden den akustischen Aufbau (Messstrecke).

Der Sender wandelt ein elektrisches Signal (Frequenz 40kHz) in ein Ultraschall Signal, das in Richtung des Empfängers ausgestrahlt wird. Das Signal propagiert sich mit Schallgeschwindigkeit, wird aber durch äußere Faktoren, wie zum Beispiel Medium-Bewegung (in diesem Fall Luft), beeinflusst. Dies bedeutet, dass wenn eine Strömung aus einer bestimmten Richtung vorhanden ist, das Signal entweder beschleunigt (wenn Vektor Schallwelle gleich gerichtet Vektor Strömung), oder verzögert wird (Vektor Schallwelle entgegen gerichtet Vektor Strömung).

Somit kann die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids, durch die Messung der Flugzeit (Time-of-Flight) des Ultraschall Signals, ermittelt werden. Die Flugzeit wird durch einen Chip, der speziell für Zeitmessapplikationen entwickelt wurde, gemessen.

Die Umsetzung erfolgt in folgenden Etappen :

- Studium des Prinzips (Thema der Arbeit)
- Machbarkeitsstudie (Thema der Arbeit)
- Realisierung einer diskreten Lösung (Thema der Arbeit)
- Realisierung einer integrierten Lösung (nächste Schritte)
- Marktanalyse (nächste Schritte)
- Produktions Implementierung (nächste Schritte)

1 Einleitung

In der heutigen Zeit wird die Effizienz moderner Systeme aufgrund nur begrenzter Ressourcen immer wichtiger. Deswegen ist die genaue Datensammlung mithilfe von Sensoren von größter Bedeutung, um diese Effizienz noch weiter zu erhöhen.

Ein wichtiger Faktor, der den Traum des doch unmöglichen Perpetuum Mobile zerstört, ist die Luftreibung. Alles sich Bewegende hat damit zu kämpfen, von Booten, Fahrrädern, Fahrzeugen bis hin zu Flugzeugen. Die Problemstellung soll deutlich machen, wie wichtig die genaue Datenaufzeichnung der Strömungsgeschwindigkeit dieser Fahrzeuge ist, um dadurch eine Effizienzsteigerung zu ermöglichen.

Meine Motivation, einen möglichst kleinen, umweltneutralen und low-cost Sensor zu entwickeln entstand in Verbindung mit der möglichst optimierten Schonung der Ressourcen aber auch in Verbindung mit der Realisierung einer Alternative für das bis jetzt eingesetzte Staurohr in der Luftfahrt. Scheinbar sind diese Staurohre sehr empfindlich gegenüber Verstopfungen. Der Absturz der Airbus Maschine der Air France, Flug AF447, scheint in Verbindung mit dem Ausfall der Staurohre zu stehen.

Diese Arbeit befasst sich mit der Messung von Luftbewegungen basierend auf dem Time-of-Flight-Ultraschall Messprinzip.

Die Ergebnisse, die ich erzielt habe bilden eine sehr gute Basis für die Weiterführung dieser Entwicklung. Ich habe mir daher eine weitere Entwicklung, bis hin zur Serienreife, zum Ziel gesetzt.

1.1 Relevante Messprinzipien zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit

Die Aktuelle Arbeit befasst sich nicht mit dem Vergleich der Messprinzipien für Strömungsgeschwindigkeit im Allgemeinen. Es werden nur relevante Messprinzipien in Kurzform erwähnt, die in dem ähnlichen Applikationsfeld mit dem Ziel meiner Entwicklung zu finden sind.

1.1.1 Flügelradanemometer

Das bekannteste und meist genutzte Mittel zur Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeiten der Luft ist das Flügelradanemometer. Es ist ein Windrad, welches die Windgeschwindigkeit durch seine Drehzahl ermitteln kann. Nachteil eines solchen Anemometers ist die Trägheit des Rads, was dazu führt, dass kleine Geschwindigkeiten nicht erfassbar sind. Ein weiterer Nachteil ist die geringe Dynamik und der Verschleiß, da es sich beim Rad um ein mechanisch bewegtes Teil handelt.

1.1.2 Staurohr (Pitotrohr)

Das Staurohr, auch Pitotrohr genannt, wird v.a. in der Luftfahrt bei Flugzeugen genutzt, um die reelle Fluggeschwindigkeit zu ermitteln. Das Pitotrohr errechnet diese durch die Differenz aus dem Umgebungsdruck und dem durch die anströmende Luft verursachten Staudruck.

Ein Nachteil des Staurohrs ist die Anfälligkeit für Verstopfung und Vereisung. Jüngstes Beispiel sind die Messfehler der Staurohre durch Vereisung beim Flug der Air France AF447 im Jahre 2009. Die Absturzursache des Flugzeugs war die fehlerhafte Geschwindigkeitsanzeige. Das Verstopfen des Rohrs mit Eiskristallen führt dazu, dass ein geringerer Staudruck gemessen wird und das Staurohr damit eine zu kleine Geschwindigkeit angibt. Es folgt eine nicht erforderliche Erhöhung des Schubes des Flugzeugs durch den Autopiloten. Die Folge davon ist eine zu hohe Geschwindigkeit, was zu unkontrollierbaren Luftwirbeln an den Tragflächen führen kann und schließlich das Flugzeug dadurch zum Absturz bringt. (Metz, 2011)

1.2 Darstellung der Prinzipien, die basierend auf Ultraschall für Anemometer verwendet werden

Es sollte eine klare Unterscheidung, zwischen den Ultraschallanemometer basierend auf dem Dopplereffekt und den Ultraschallanemometer basierend auf dem Time-of-Flight Prinzip gemacht werden.

1.2.1 Ultraschallanemometer basierend auf dem Dopplereffekt

Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit mittels Ultraschall wurde erst in den 1940er Jahren als Möglichkeit erwähnt. Ab 1990 wurde dieses Messprinzip in verschiedenen Formen umgesetzt.

Der Dopplereffekt basiert auf der Verschiebung der Frequenz eines Signals, in Verbindung mit der Geschwindigkeit des Signalgenerators. Z.B. wenn der Signalgenerator sich in Richtung des Empfängers bewegt, wird die beim Empfänger gemessene Frequenz höher als die generierte Frequenz. Umgekehrt, wenn der Signalgenerator sich vom Empfänger wegbewegt, wird die beim Empfänger gemessene Frequenz niedriger als die vom Sender generierte Frequenz.

Für die Luftgeschwindigkeitsmessung wird die Doppler-Frequenzverschiebung durch die Bewegung des Mediums (Luft) hervorgerufen und nicht durch die Bewegung des Signalgenerators (Die Signalgeneratoren und Empfänger sind fest zueinander, das Medium fungiert als sekundäre Generatorquelle).

Diese Messmethode ist sehr genau, jedoch bedarf es durch die extrem genau benötigte Frequenzmessung eines aufwendigen mathematischen Apparates (Korrelationsprodukte usw.), somit kommen hier nur Digital-Signal-Verarbeitungsprozessoren in Frage (DSP).

Daher erreichten die bisherigen darauf basierenden Produkte keine entscheidende Marktrelevanz.

1.2.2 Das Time-of-Flight Messprinzip

Das Time-of-Flight Messprinzip wird bei Punkt 2 dieser Arbeit ausführlich beschrieben. Hier werden nur die Unterschiede zu dem Dopplerprinzip erwähnt.

Die Time-of-Flight Messung basiert auf der Messung der Flugzeit des Ultraschallsignales und beachtet nicht die Frequenzverschiebung. Daher kann es als reine „Digitalmessung“ realisiert werden. Dies impliziert relevante messtechnische Vorteile.

Dieses Messprinzip wird seit längerem für die Messung von Luftströmungen verwendet. Es gehört also zum aktuellen Stand der Technik (Patente und Gebrauchsmuster für dieses Prinzip sind vorhanden). Es gibt jedoch keine low-cost Anemometer basierend auf diesem Prinzip, die für eine Massenfertigung geeignet sind.

2 Entwicklung eines low-cost Ultraschallanemometers

2.1 Das Time-of-Flight Messprinzip

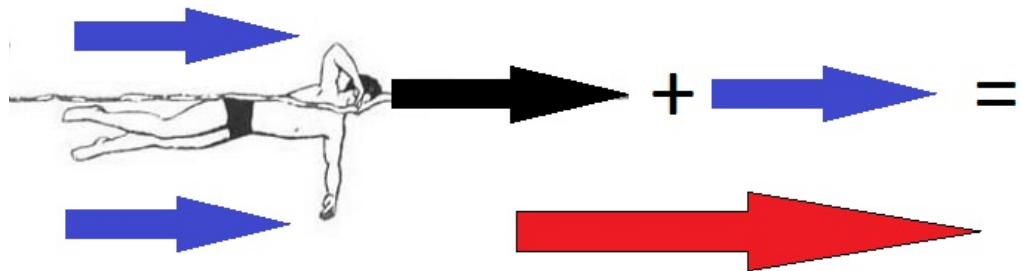
Der Grundaufbau besteht aus zwei face-to-face stehende Ultraschall Transducer, die alternierend als Sender und Empfänger fungieren.

Der Sender sendet ein Ultraschall-Signal, also eine Schallwelle/Schwingung in Richtung des Empfängers. Das Signal bewegt sich mit Ultraschallgeschwindigkeit, kann aber durch äußere Faktoren, grundsätzlich Luftbewegungen, beeinflusst werden. Druck, Temperatur, Feuchte sind auch Einflussfaktoren; auf deren Einfluss wird hier nicht eingegangen, weil die Kompensation dieser Faktoren erzielt wird.

Dies bedeutet, dass eine Strömung aus einer bestimmten Richtung das Signal entweder beschleunigt (wenn Vektor Schallwelle gerichtet gleich Vektor Strömung), oder verzögert (Vektor Schallwelle gerichtet entgegen Vektor Strömung).

Dies wird in Abbildung 4 anhand des Beispiels eines Schwimmers dargestellt, der mit und gegen die Strömung schwimmt. Die daraus entstehende zusammengesetzte Geschwindigkeit (roter Pfeil) führt dazu, dass der Schwimmer (wie die Ultraschallwelle bei dem Time-of-Flight Prinzip) eine längere Zeit, bzw. eine kürzere Zeit für dieselbe Entfernung benötigt.

Schwimmer mit dem Strom



Schwimmer gegen den Strom

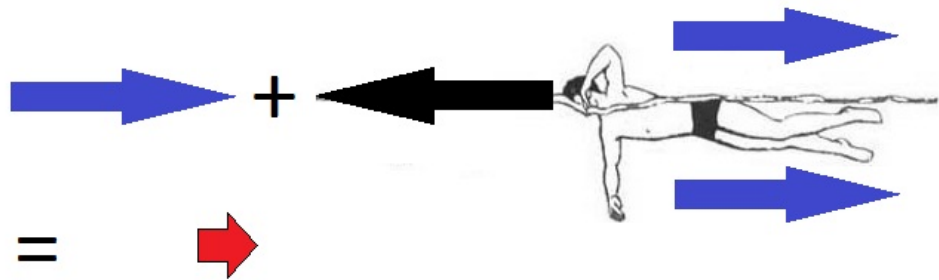


Abbildung 1: Time-of-Flight Prinzip veranschaulicht anhand eines Schwimmers

Basierend auf dieser Beeinflussung und auf einer hochpräzisen Zeitmessung ist es möglich, Folgerungen auf die Strömungsgeschwindigkeit des Mediums zu ziehen.

Details in Verbindung mit dieser Messung werden in den nächsten Kapiteln referenziert.

2.2 Transducer und Signalausbreitung

2.2.1 Ultraschallwandler (Ultraschalltransducer/Piezotransducer)

Die Ultraschalltransducer sind Grundelemente für die Generierung und den Empfang von Schallwellen.

Die Funktionsweise eines Ultraschallwandlers beruht auf dem piezoelektrischen Effekt. Dieser, kurz auch Piezo-Effekt genannt, ist die Eigenschaft von Kristallen mit einer polaren Achse, durch mechanischen Druck zwischen vorderem und hinterem Ende dieser Achse, eine elektrische Spannung erzeugen zu können.

Bei den Ultraschallwandlern handelt es sich um den reziproken piezoelektrischen Effekt. In diesem Fall wird das Piezokristall durch die zugeführte Spannung verformt. Durch eine Wechselfspannung gibt es einen Wechsel zwischen Normalzustand und verformten Zustand. Das führt dazu, dass die Piezokeramiken wellenförmiges Schallsignal aussenden.

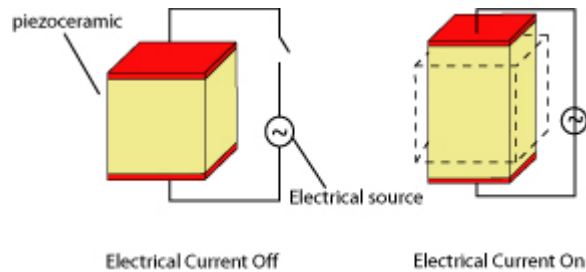


Abbildung 2: Darstellung des Piezo-Effekts. Veranschaulichung der Verformung der Piezokeramik durch die Spannung (NDT Resource Center)

Das Frequenzspektrum, das durch Ultraschalltransducer generiert werden kann, ist durch die geometrischen Dimensionen bestimmt. Je nach Piezo-Komposition kann die Schallgeschwindigkeit im Kristall variieren. Zum Beispiel eine Piezo-Scheibe der Firma a PIC, Material: PIC255, bei einer Stärke von 2mm erzeugt eine Frequenz von 1MHz. Die Stärke des Materials bildet die Wellenlänge/2 und dies ist für die Frequenz bestimmend.

Dies bedeutet, dass höhere Frequenzen mit dünneren Piezo-Scheiben generiert werden und andererseits niedrigere Frequenzen mit dickeren Piezo-Scheiben.

Typisch für Ultraschallmessungen für Gase sind Frequenzen zwischen 40kHz und 300kHz. Es handelt sich trotzdem um Ultraschall, da der Hörbereich beim Menschen (20Hz bis 20kHz) tiefer liegt.

2.2.2 Ausbreitung von Ultraschallwellen

Die Ultraschallwellen verbreiten sich, je nach Medium, longitudinal oder transversal.

Die Intensität der Ultraschallwellen hängt von der Kopplung der Transducer mit dem Medium (akustische Impedanz), von den Eigenschaften des Mediums und vom Abstand zum Generator ab.

Das folgende Bild zeigt die prinzipielle Ausbreitung des Ultraschalls.

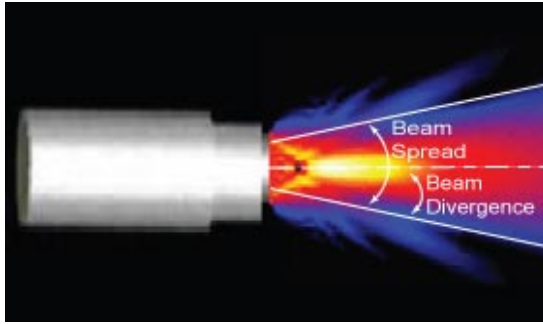


Abbildung 3: Ausbreitung des Ultraschallsignals (NDT Resource Center)

2.2.3 Abstand zwischen den Ultraschalltransducern

Es wurde anfangs ein Abstand von 35m m zwischen den Ultraschallwandlern gewählt. Für den Abstand zwischen den Ultraschalltransducern musste man einen Kompromiss finden. Problem bei einem zu geringen Abstand ist, dass die an den Ultraschallwandlern vorbeiströmende Luft die Messstrecke zu wenig beeinflusst. Es ist vorteilhafter einen möglichst großen Abstand zu haben. Je größer der Abstand wird, desto schwächer wird, aufgrund der Dämpfung kombiniert mit der Streuung der Feldintensität, das Ultraschallsignal.

2.2.4 Aufbau



Abbildung 4: Umsetzung des Sensorholders (maschinelle Bearbeitung)

Die Schwingfrequenz der gewählten Ultraschallwandler beträgt 40kHz.

Nach ersten Tests stand fest, dass die 40 kHz Ultraschall-Wandler eine Burst-Spannung von +/- 5 Volt benötigen, um ein ausreichendes Ausgangssignal mit der Amplitude 800mV zu erzeugen.

Das Ultraschallsignal wird nicht nur aus einem Punkt aus dem Ultraschallwandler, sondern aus mehreren Punkten ausgesendet. Bei dem getesteten 40kHz Ultraschallwandler befindet sich am Ausgang ein Konus, der die Signale der verschiedenen Austrittspunkte bündelt und damit verstärkt.

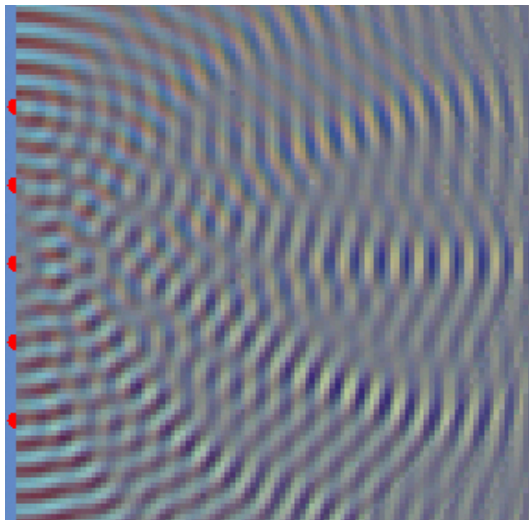


Abbildung 5: Animation der Interferenz des Ultraschallsignals bei einem flachen Ausgang (NDT Resource Center)

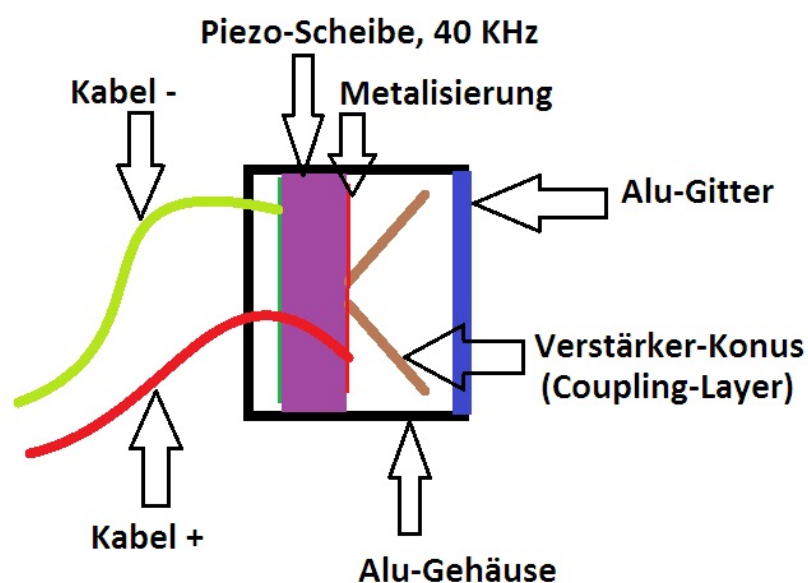


Abbildung 6: Schematische Abbildung des 40kHz Ultraschallwandlers

Als nächster Schritt sollte die Um setzung dieser Ergebnisse in ein kom pakteres Modul mit hochgenauer Zeitmessung erfolgen.

2.3 Diskreter Aufbau eines Ultraschallanemometers mit 40kHz Ultraschallwandler

Die Erkenntnisse vorheriger Schritte werden mit der Verwendung von 40kHz Ultraschallwandlern, in Kombination mit einer Zeitmessung basierend auf dem AsiC (Application specified integrated Circuit), der Fa. Acam , GP2 umgesetzt. Die Steuerung der Messung wird mit dem Kontroller MSP430-F417 von Texas Instruments realisiert.

Weil der GP2 AsiC nicht die benötigte 40kHz Burstfrequenz generieren kann (sondern nur höhere Frequenzen) ist die Entscheidung getroffen worden, diese 40kHz Frequenz mit einem Baustein der Firma Cypress (PsoC CY8C29466) zu generieren.

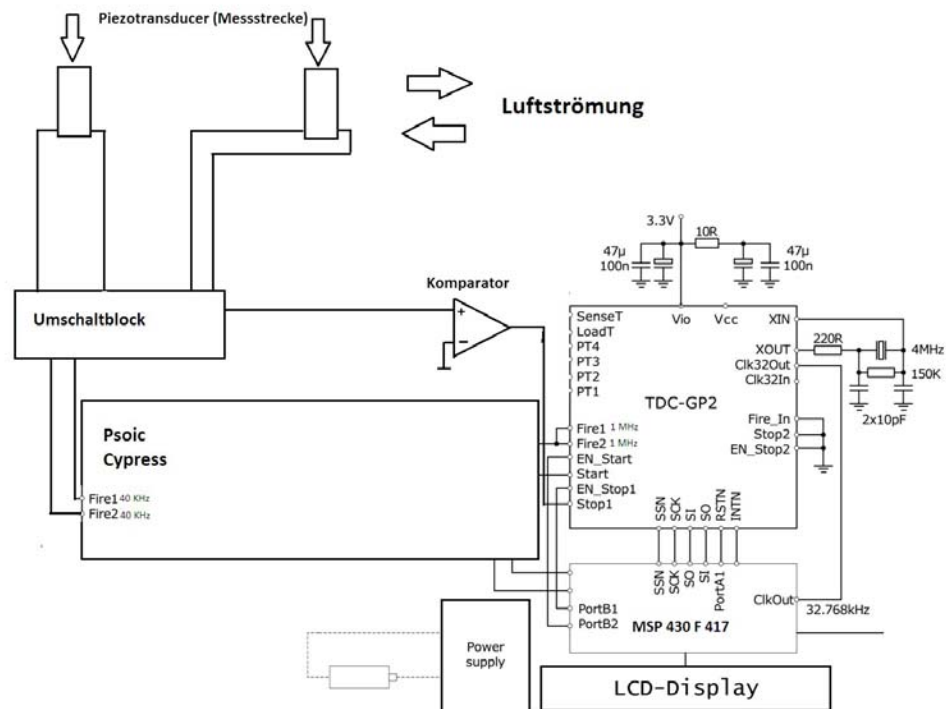


Abbildung 7: Blockschemata des Aufbaus mit 40kHz Ultraschallwandlern

Beschreibung der Mess- und Steuerplatine

Als Messplatine ist ein Board, worauf schon die GP2 Zeitmessung für eine Wasserdurchflussmessung implementiert war, verwendet worden.

Um die Messergebnisse anzuzeigen wurde auf der Messplatine auch ein 7 Segment LCD Display integriert. Die Ansteuerung des Displays erfolgt basierend auf dem Displaydriver des Mikrokontrollers MSP430-F417.

Dieser Mikrokontroller übernimmt auch die Kontrolle der Zeitmessungen, indem er die Kommunikation mit dem GP2 kontrolliert (Steuerung und Ablesung der Messwerte) und die Steuerung des analogen Umschalters synchronisiert.

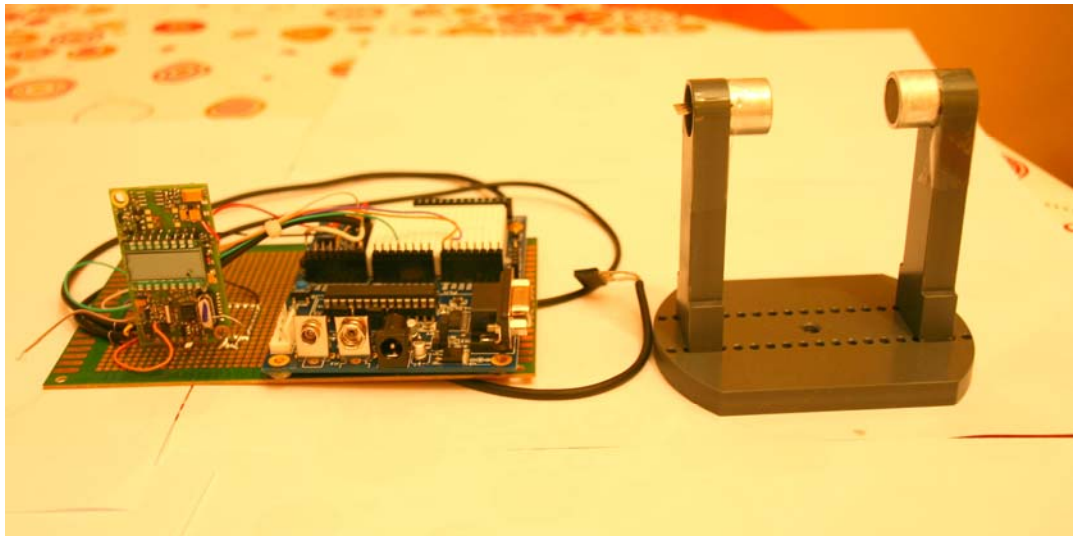


Abbildung 8: Seitenansicht des Ultraschallanemometers mit Display

Beschreibung des GP2 AsiCs von Acam

Das GP2 ist ein speziell entwickelter Chip für Zeitmessapplikationen. In diesem Chip sind schon Peripheriebausteine integriert, die eine Zeitmessapplikation relativ komfortabel gestalten lassen.

Alle diese Bausteine lassen sich via SPI vom Mikrokontroller steuern, somit kann durch die Software die ganze Kontrolle des Messprozesses implementiert werden.

Beschreibung des PsoCs CY8C29466 von Cypress

Wie erwähnt kann der Acam Chip keine 40kHz Frequenz erzeugen, somit war es notwendig einen Chip zu verwenden, der diese Frequenz synchron mit dem Burstsignal des Acam Chips generieren kann. Zusätzlich sollte dieser Chip:

- eine 5Volt Spannung erzeugen können (damit das Burstsignal eine hohe Amplitude hat)
- die Zeitverzögerungen zwischen den einzelnen Blocks so gering wie möglich halten
- programmierbar sein
- logische Bausteine integriert haben die, durch eine Invertierung des Signals, eine Verdoppelung der Burstspannung realisieren (+/-5Volt)

Die Entscheidung ist auf den Programmable System on Chip (PsoC) CY8C29466 gefallen.

Die Hauptfunktion dieses Bausteins ist eine möglichst verzögerungsfreie, synchronisierte 40kHz Burstspannung aus der 1MHz Burstspannung des GP2 Chips zu erzeugen. Durch Verwendung der internen logischen Bausteine (Zähler, Komparatoren, Inverter) wurde diese mit einer relativ konstanten Gesamtverspätung von ca. 20 Nanosekunden generiert.

Die Gesamtverspätung ist temperaturabhängig, aber dieser Nebeneffekt wird in dieser Etappe des Projektes vernachlässigt.

Um ein Layout für den PSoC CY8C29466 zu vermeiden und um Zeit zu gewinnen, ist die Entscheidung getroffen worden ein PSoCEval Board (worauf der CY8C29466 Chip implementiert ist) zu verwenden.

Die dazu gehörende Software Entwicklungsumgebung (Programmer und Designer) haben es ermöglicht, relativ schnell, die gewünschten Ergebnisse zu erzielen.

2.3.1 Software

Das Programm zur Messung und Ausgabe der Luftgeschwindigkeit auf dem Display wurde mit Code-Composer (Programmiersprache C) von Texas Instruments geschrieben.

Die wichtigen Softwareblöcke bei dieser Applikation sind:

- Steuerung der Messung (siehe Beschreibung Acam Chip)
- Steuerung der Umschaltung
- Interpretation der Daten
- Umwandlung der Zeitmessung in Geschwindigkeit (m/s)
- Ansteuerung des Displays
- Nullpunktkalibration des Messsystems

Nullpunktkalibration

Der Aufbau mit den Ultraschalltransducern ist noch sehr empfindlich und muss daher oft rekaliibriert werden.

Wie oben bereits erwähnt haben Faktoren wie Temperatur, Druck, Feuchte und die Materialstabilität einen Einfluss auf den Nullpunkt.

Um diesen Nullpunkt anzupassen ist im Quellcode ein veränderbarer Wert vorgesehen worden (long), anhand dessen der Nullpunkt kalibriert werden kann.

2.3.2 Tests

Diese Ausbaustufe ist im Vergleich zu einem Flügelradanemometer getestet worden:

Testergebnisse:

Bei kleineren Geschwindigkeiten ($<1\text{ m/s}$) war ein Vergleich nicht möglich, da der Flügelradanemometer nicht reagierte: In den Bereichen 1 m/s bis 40 m/s war die Wiederholbarkeit des Flügelradanemometers besser, weil die Kalibration des Ultraschallanemometers immer wiederholt werden musste: Ab 40 m/s waren keine Vergleiche möglich, da der Flügelradanemometer nicht mehr entsprechend reagierte.

Als Strömungsquellen wurden für niedrige Geschwindigkeiten (bis 7 m/s) ein PC-Kühlkörper-Ventilator verwendet. Für höhere Geschwindigkeiten ($7\text{--}40\text{ m/s}$) wurde ein Kompressor (bis 6 bar) verwendet. Um die Luftgeschwindigkeit zu variieren wurde die Entfernung zwischen Strömungsquelle und Messgerät geändert. Um möglichst gleichmäßige Strömungsverhältnisse zu erzielen wurden die Strömungsquellen an Rohren mit unterschiedlichen Längen (je nach zu erzielende Luftgeschwindigkeit) angeschlossen.

Die Messungen sind bei zwei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt worden, um die Temperaturabhängigkeit dieses Messprinzips zu eruieren. Es soll dabei erwähnt werden, dass eine Temperaturkompensation aufgrund der Ergebnisse notwendig wird. Diese thermische Kompensation wird jedoch erst in den nächsten Ausbaustufen folgen.

Messergebnisse Time-of-Flight Ultraschallanemometer bei 23°C

Luftquelle Kompressor für Geschwindigkeiten von $7\text{--}40\text{ m/s}$

Luftquelle Ventilator für Geschwindigkeiten von $0\text{--}7\text{ m/s}$

Luftgeschwindigkeit

Messung mit:

Flügelradanemometer in m/s	Ultraschallanemometer in m/s	Offset (Korrektur) m/s	
0	0.2		0.65
5.3	5.4		0.65
10.1	12.5		0.65
15	15.1		0.65
19.8	20.2		0.65
25.2	24.9		0.65
30	32.2		0.65
35.2	35.5		0.65
39.7	39.4		0.65

Messergebnisse Time-of-Flight Ultraschallanemometer bei 12°C

Luftquelle Kompressor für Geschwindigkeiten von 7...40m/s

Luftquelle Ventilator für Geschwindigkeiten von 0...7m/s

Luftgeschwindigkeit

Messung mit:

Flügelradanemometer in m/s	Ultraschallanemometer in m/s	Offset (Korrektur) m/s	
0	0.1		0.88
5.2	5.1		0.88
10.1	12.4		0.88
15.2	14.8		0.88
19.7	20		0.88
25.2	24.8		0.88
30.1	31.8		0.88
35.3	35.3		0.88
39.6	39.4		0.88

3 Diskussion

Die Ergebnisse dieser Ausbaustufe stellen in einer überzeugenden Weise die Realisierbarkeit eines kompakten low-cost Ultraschallanemometers klar. Die nächsten Etappen sollten eine Verbesserung des mechanischen Aufbaus, sowie eine kompaktere Messelektronik erzielen.

3.1 Mechanischer Aufbau

Die Problematik der Strömungsgeschwindigkeitsmessung wird durch die face-to-face Anordnung der Ultraschalltransducer, parallel zur Strömungsrichtung verdeutlicht. Diese Anordnung führt dazu, dass die Sensoren sich vor allem bei höheren Geschwindigkeiten direkt im Windschatten stehen und somit nicht die „wahre“ Geschwindigkeit gemessen werden kann.

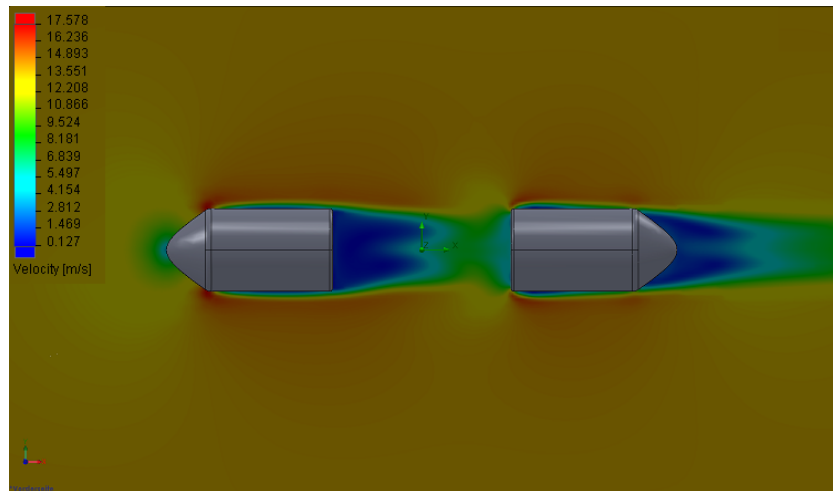


Abbildung 9: (Sicht von Oben) Durch die face-to-face Anordnung besteht schon bei einer Strömungsgeschwindigkeit von ca.14m/s also 50 km/h auf der halben Messstrecke kompletter Windschatten

Eine Möglichkeit ist, die Sensoren nicht parallel, sondern schräg zur Strömungsrichtung anzuordnen. Das Signal wird somit zwar nicht so stark durch die Strömung beeinflusst, dies kann aber durch die Software korrigiert werden.

Wie erwähnt ist eins der Ziele des Sensors auch die Erkennung der Anströmrichtung, daher wäre ein V-förmiger Aufbau eine optimale Lösung.

Der Aufbau besteht aus zwei Messstrecken die V-förmig in einem Winkel von ca.75° zueinander aufgebaut sind.



Abbildung 10: V-förmiger Aufbau des Sensorholders

Um zu verhindern, dass der, in Fluid-Anströmrichtung gerichtete Sensor nicht den anderen verdeckt und so eine Messung erschwert, sind die Sensoren zusätzlich noch in einem Winkel von ca. 26 Grad geneigt. Der Abstand zwischen den beiden Ultraschall-Wandlern soll 35mm betragen.

3.2 Applikationen des low-cost Ultraschallanemometers

Die nachfolgende Entwicklung eignet sich, im Gegensatz zu anderen Ultraschall Anemometer Entwicklungen sehr gut als Applikation für Flugzeuge, Fahrzeuge, Schiffe (vor allem Segelschiffe) und als Windbelastungsmessung bei Immobilien.

4 Fazit

Die durchgeführten Arbeiten deckten die Schritte, die zu einer professionellen Neuentwicklung gehören. Dazu gehört eine technische Recherche über den aktuellen Stand der Technik. Eine Recherche über den neu zu entwickelnden Sensor mit einer vereinfachten Marktanalyse. Vor der Entwicklung fand eine Machbarkeitsstudie statt, mit der nachgewiesen wurde, ob dieses Prinzip funktionsfähig ist. Basierend auf dieser Machbarkeitsstudie folgten die ersten Entwicklungsstufen. Schlussendlich wurde die Funktionalität durch Verbesserung der Sensormechanik optimiert.

Die Ergebnisse bilden eine exzellente Basis für die nächsten Ausbaustufen.

Zu den Ausbaustufen gehören die Erweiterung der Sensorfunktionalität mit der Erkennung der Anströmrichtung. Dazu sollen ausführliche Feldtests in Verbindung mit den erzielten Erneuerungen folgen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Time-of-Flight Prinzip veranschaulicht anhand eines Schwimmers.....	5
Abbildung 2: Darstellung des Piezoeffekts. Veranschaulichung der Verformung der Piezokeramik durch die Spannung (NDT Resource Center).....	6
Abbildung 3: Ausbreitung des Ultraschallsignals (NDT Resource Center).....	7
Abbildung 4: Umsetzung des Sensorholders (maschinelle Bearbeitung)	7
Abbildung 5: Animation der Interferenz des Ultraschallsignals bei einem flachen Ausgang (NDT Resource Center)	8
Abbildung 6: Schematische Abbildung des 40kHz Ultraschallwandlers.....	8
Abbildung 7: Blockschemata des Aufbaus mit 40kHz Ultraschallwandlern	9
Abbildung 8: Seitenansicht des Ultraschallanemometers mit Display.....	10
Abbildung 9: (Sicht von Oben) Durch die face-to-face Anordnung besteht schon bei einer Strömungsgeschwindigkeit von ca.14m/s also 50 km/h auf der halben Messstrecke kompletter Windschatten.....	14
Abbildung 10: V-förmiger Aufbau des Sensorholders.....	14

Quellenverzeichnis

Bednarczyk, D./Fleische, F./Könnecke, R./Sturm, M./Torabi, R./Südmeyer, H. (2001): Der Piezo-Effekt

Inoson (2011): PCM Ultraschall System, http://www.inoson.de/d_pcm.html, (13.12.2011)

Lau, H. (2011): Ultraschall Windmesser <http://www.technik.dhbw-ravensburg.de/~lau/ultraschall-anemometer.html>, (20.09.2011)

Metz, H. (2011): Warum stürzte der Airbus 330 ab?

<http://www.lehrerfreund.de/in/technik/1s/warum-stuerzte-der-airbus-330-ab>, (24.12.2011)

NDT Resource Center: Wave Interference

<http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/WaveInterference.htm>, (24.12.2011)