Ultraschall-Windmessung

Empfang und Erzeugung von Ultraschall

Schallfrequenzen oberhalb des Hörbereiches (f > 20 kHz) werden als Ultraschall bezeichnet.
Zum Empfang von Ultraschall wird meist der piezoelektrische Effekt ausgenützt. Mit Hilfe eines piezoelektrischen Ultraschall-Empfängers und eines Ladungsverstärkers kann der Schalldruck des Ultraschall-Signals in ein elektrisches Signal umgewandelt werden.

Zur Erzeugung von Ultraschall wird der inverse piezoelektrische Effekt herangezogen. Wird der Ultraschall-Sender an eine Wechselspannungsquelle angeschlossen, so verformt sich der Piezokristall mit der Frequenz der Wechselspannung und strahlt Schallwellen ab. Auf diesem Wege können Schallfrequenzen bis 10 MHz erzeugt werden.

Messprinzip der Windmessung mittels Ultraschall

Bei der Ultraschall-Windmessung wird ausgenützt, dass eine ausgesendete Ultraschall- Impulsfolge vom Windfeld mitgeführt wird. Die Windgeschwindigkeit v überlagert sich dabei vektoriell mit der Schallgeschwindigkeit c und die Impulsfolge reist mit entsprechend anderer Geschwindigkeit. Aus der Flugzeit τ_X (time-of-flight) einer Ultraschall-Impulsfolge kann mit der Kenntnis der aktuellen Schallgeschwindigkeit c, der Länge s_X der durchschallten Luftstrecke (siehe Abbildung 3.2) und der Richtung des Windvektors **v**, die mittlere Windgeschwindigkeit v_X entlang dieser Strecke bestimmt werden.

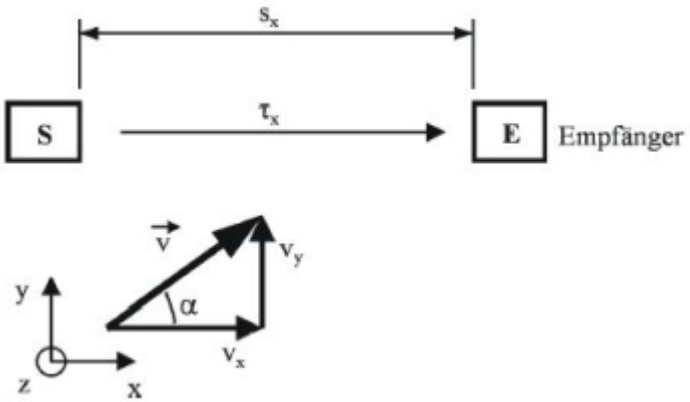

Abbildung 3: Geometrie bei der Flugzeitmessung entlang einer Ultraschall-Messstrecke.
(S...Sender, E...Empfänger)

Unter der Annahme, dass der in Abbildung 3 eingezeichnete Windgeschwindigkeitsvektor **v** in der horizontalen x-y-Ebene liegt und mit der Ultraschall-Sensorik nur die Flugzeit τ_X der Ultraschall-Impulsfolge in x-Richtung gemessen wird, lässt sich folgende Gleichung aufstellen:

$$c + v_x = \frac{s_x}{\tau_x}$$

Um den vollständigen dreidimensionalen Windvektor zu erfassen, müssen die Flugzeiten von Ultraschall-Impulsfolgen entlang dreier zueinander orthogonaler Strecken s_X, s_Y und s_Z gemessen werden.

Das eigentliche technische Problem bei der Ultraschall-Windmessung liegt in der ausreichend genauen Messung der Flugzeiten der Ultraschall-Impulsfolge. Sollen Windgeschwindigkeitsänderungen von Δv =

±0,1 m/s erfasst werden können, so ist es erforderlich, die Flugzeit genauer als $\Delta\tau = \pm 340$ ns zu messen (bei einem Abstand der Sensoren von s = 40 cm und einer Lufttemperatur von 20 °C).

Das angewandte Messprinzip zur Flugzeitmessung von Ultrschall-Impulsen ist in Abbildung 4 dargestellt.

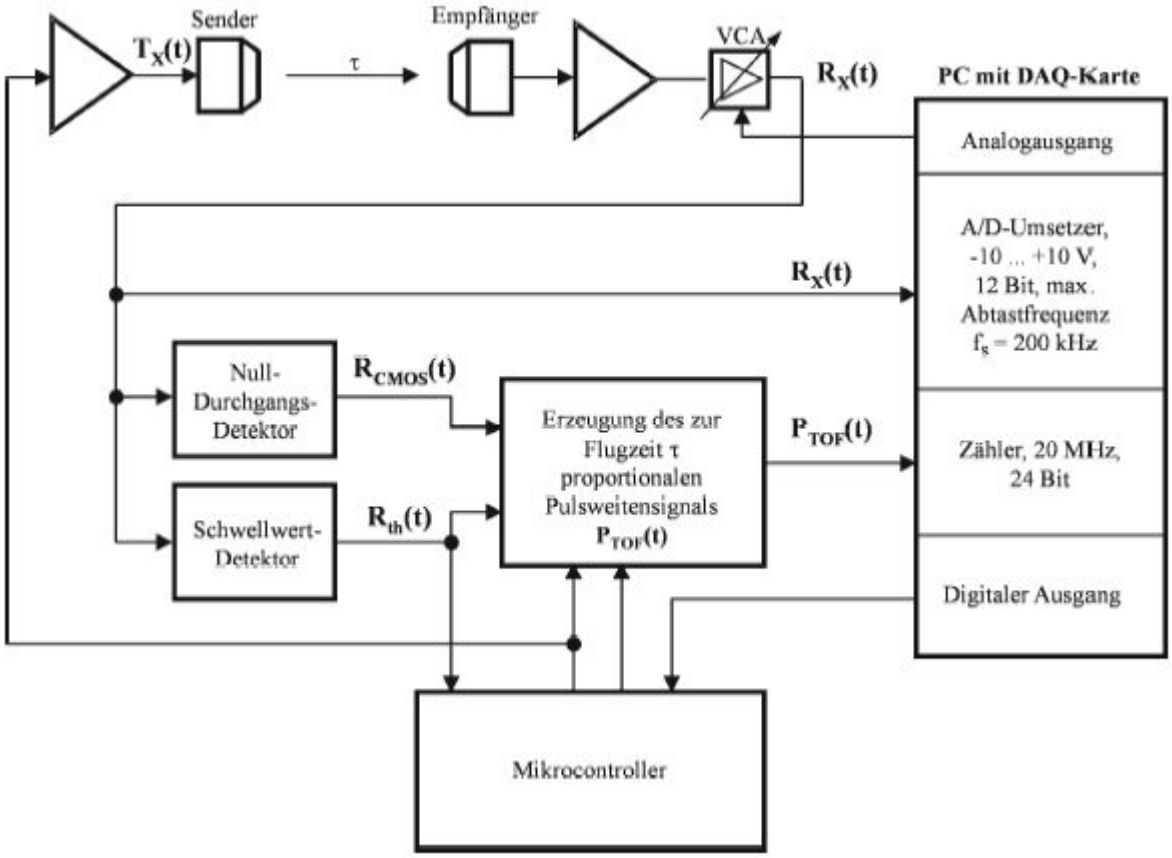

Abbildung 4: Blockschaltbild des selbstentworfenen Messverfahrens zur Flugzeitmessung entlang einer Ultraschall-Messstrecke.

Die zur Abbildung 4 gehörigen Signalverläufe sind in Abbildung 5 dargestellt.

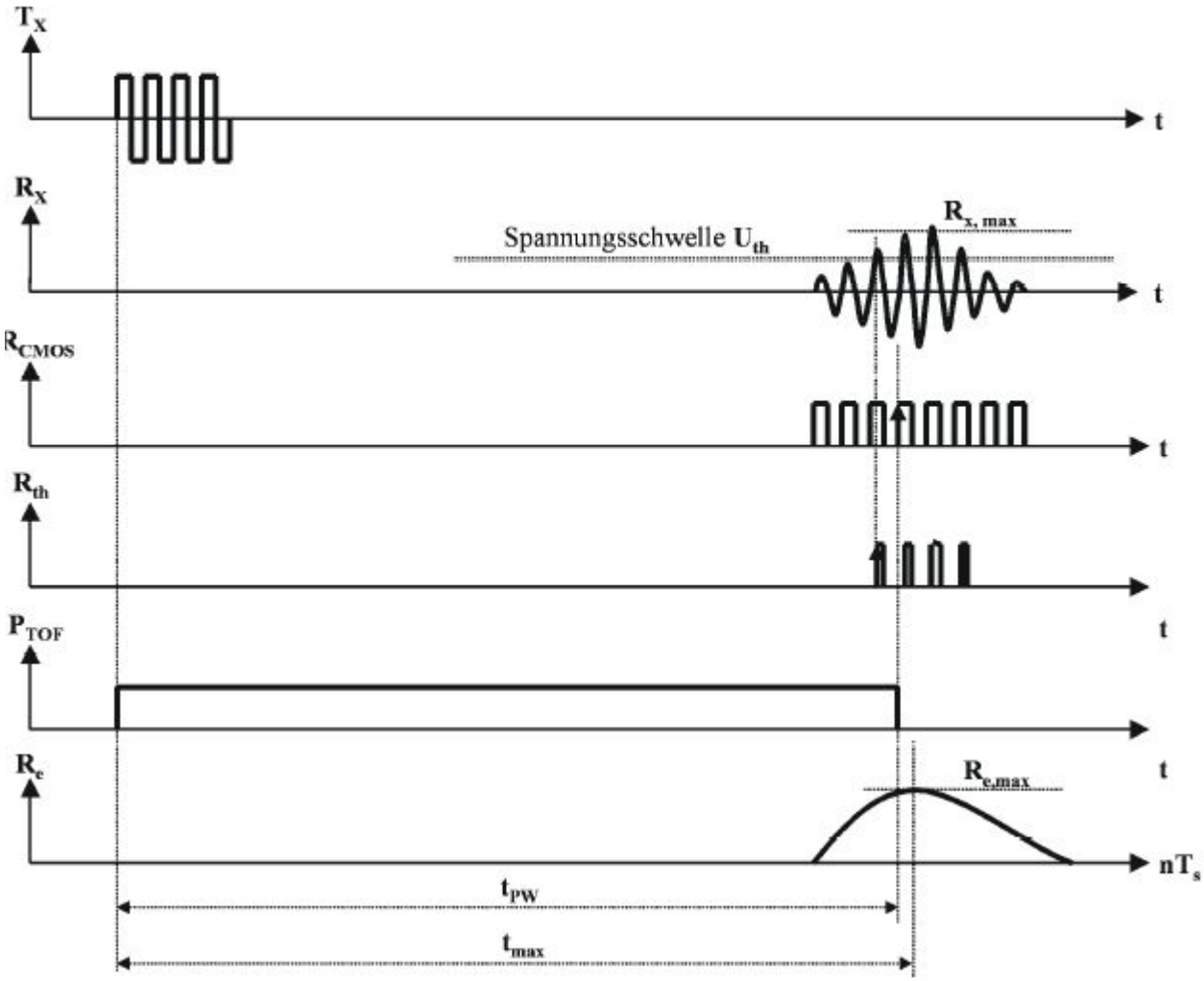

Abbildung 5: Signale beim selbstentwickelten Flugzeit-Messverfahren.

Messablauf zur Ermittlung der Flugzeit entlang einer Ultraschall-Strecke nach Abbildung 4 und 5:

- Mit dem Beginn des Aussendens der Ultraschall-Impulsfolge Tx(t) wird das CMOS-Signal $P_{TOF}(t)$ auf HIGH gesetzt. Gleichzeitig wird auch mit der Abtastung des empfangenen Ultraschall-Signals $R_x(t)$ durch die DAQ-Karte (Datenerfassungskarte) begonnen. Das abgetastete Signal $R_x(t)$ wird im Folgenden mit $R_x(nTs)$ bezeichnet ($T_s = 1/f_s$ ist das Abtastintervall).
- Sobald die Amplitude des empfangenen Signals $R_x(t)$ eine bestimmte Spannungsschwelle U_{th} das erste Mal überschreitet, setzt die nächste steigende Flanke des CMOS-Signals $R_{CMOS}(t)$ das Signal $P_{TOF}(t)$ auf LOW zurück.
- Die Pulsweite t_{PW} des Signals $P_{TOF}(t)$ wird mit einem schnell getakteten Zähler (20 MHz, 24 Bit), der Teil der DAQ-Karte ist, gemessen.
- Aus dem digitalisierten Signal $R_x(nT_s)$ wird per Software durch Gleichrichtung und digitale Tiefpass-Filterung die Einhüllende $R_e(nT_s)$ gewonnen.
- Zusätzlich wird die Einhüllende $R_e(nT_s)$ interpoliert, um die zeitliche Auflösung zu erhöhen. Die Position t_{max} des Amplitudenmaximums $R_{e,\,max}$ ist somit genauer bestimmbar.
- Die Flugzeit τ der Ultraschall-Impulsfolge ist direkt proportional der Pulsweite t_{PW}. Bei der Messung von t_{PW} können jedoch Fehler in der Größenordnung von einer oder mehreren Periodendauern des empfangenen Ultraschall-Signals R_x auftreten. Diese Fehler können durch Kenntnis von t_{max} mathematisch korrigiert werden.

Abbildung 6: Das realisierte Ultraschall-3D-Anemometer. Im Metallgehäuse befindet sich die Schaltung zur Ultraschall-Windmessung.