



Ultraschall-Sensoren

Ein wichtiger Sensortyp im Bereich der Elektronik ist der Ultraschall-Sensor, der mit akustischen Signalen im nicht hörbaren Bereich arbeitet. Die Einsatzmöglichkeiten für Ultraschall-Sensoren sind vielfältig und reichen von der Signalübertragung, über Entfernungsmessungen bis hin zu unterschiedlichen Anwendungen im Medizinbereich.

Allgemeines

Im Bereich der Sensorik gehören die akustischen Sensoren, bestehend aus Mikrofonen und Lautsprechern, wohl zu den am meisten verbreiteten Sensoren überhaupt. Besonders auf den Hörbereich des Menschen abgestimmte Schallwandler (Mikrofon, Lautsprecher) sind in nahezu allen Bereichen des täglichen Lebens zu finden.

Die Akustik umfasst jedoch alle Bereiche, die mit der Erzeugung, Ausbreitung und dem Empfang von Schallwellen in

Zusammenhang stehen, wozu auch die vom Menschen nicht hörbaren Frequenzbereiche gehören. Die Akustik wird als mechanische Schwingungen in festen, flüssigen und gasförmigen Medien definiert und in folgende Frequenzbereiche unterteilt:

- 0 - 16 Hz Infraschall
- 16 Hz - 16 kHz Hörschall
- 16 kHz - 500 MHz Ultraschall
- mehr als 500 MHz Hyperschall

Neben dem Hörbereich gehört der oberhalb 16 kHz liegende Ultraschallbereich zu den interessantesten Frequenzbereichen,

da hier z. B. für Messaufgaben Geräusche erzeugt werden können, die vom Menschen nicht wahrzunehmen sind. Während der Hörbereich des Menschen bei ca. 16 kHz endet, können viele Tiere bis weit in den Ultraschallbereich Geräusche wahrnehmen. Das beste Beispiel dafür sind Fledermäuse, die sich mit Hilfe von Ultraschallsignalen in der Dunkelheit orientieren. Aber auch der Hörbereich von den meisten Nagetieren liegt weit oberhalb des Menschen. Die unterschiedlichen Hörgrenzen werden z. B. beim Kfz-Marderschreck (Abbildung 1) ausgenutzt, der quasi zufällige Tonfolgen mit hoher Lautstärke direkt



Bild 1: Kfz-Marderschreck auf Ultraschall-Basis

oberhalb des menschlichen Hörbereichs generiert und somit die Tiere vertreibt.

Nur mit Hilfe eines speziellen Konverters ist die Umsetzung von Ultraschallsignalen in den Hörbereich möglich. Der von ELV entwickelte Ultraschall-NF-Konverter (Abbildung 2) bietet diese Möglichkeit und damit vielfältige interessante Hörerlebnisse, die sonst nicht wahrnehmbar sind. Auch das Auffinden von Geräten, die Ultraschallsignale abstrahlen, ist mit diesem Konverter sehr einfach.

Abhängig vom Ausbreitungsmedium unterscheidet man zwischen Körperschall, Flüssigkeitsschall bzw. Hydroschall und Luftschall.

Die von der Schallquelle ausgehende Erregung breitet sich wellenförmig nach allen Seiten des Raumes (konzentrische Kreise um die Schallquelle) aus. Dies trifft sowohl für Schallwellen innerhalb der Hörbarkeitsgrenze als auch außerhalb der Hörbarkeitsgrenze des Menschen zu. Abbildung 3 verdeutlicht diesen Effekt.

In der Messtechnik spielt die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls (Schallgeschwindigkeit), die im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit gering ist, eine besondere Rolle. Zu bedenken ist dabei jedoch, dass die Schallgeschwindigkeit temperaturabhängig ist, wobei in Luft (gasför-

mige Übertragungsmedien) ausgehend von 331,5 m/s bei 0 °C die Berechnung nach folgender Formel erfolgt:

$$v_{\text{Schall}} = 331,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \sqrt{1 + 0,003660992 \cdot \left(\frac{T - 0^\circ\text{C}}{^\circ\text{C}} \right)}$$

Die Ausbreitung des Schalls in Flüssigkeiten hingegen ist ca. um den Faktor 4 schneller.

Im weiteren Verlauf dieses Artikels wollen wir uns nun detailliert mit den akustischen Sensoren oberhalb des menschlichen Hörbereichs, den Ultraschall-Sensoren, befassen und auf unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten eingehen.

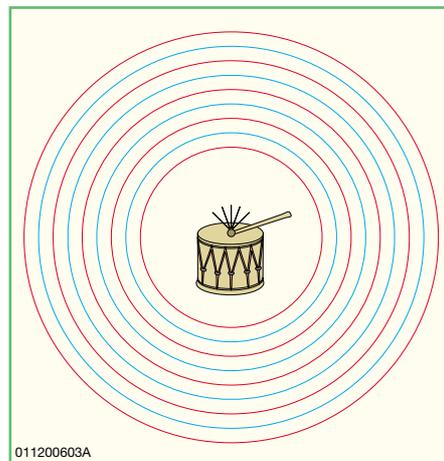


Bild 3: Wellenförmige Verbreitung der Schallwellen nach allen Seiten.

Wie in allen Bereichen der Akustik bestehen die Ultraschall-Sensoren aus Lautsprecher und Mikrofon, die speziell auf den Ultraschallbereich abgestimmt sind und meistens in Piezo-Technik hergestellt werden. In der Regel werden die gleichen Sensoren als Sender und Empfänger benutzt. Es sind am Markt sowohl Sensoren mit einer gemeinsamen als auch mit einer getrennten Sende- und Empfangsmembran vertreten.

In der Messtechnik sind Ultraschall-Sensoren besonders gut zur Abstands- und Entfernungsmessung geeignet (Abbildung 4). Der Ultraschall-Entfernungsmesser in Abbildung 4 kann Entfernungen

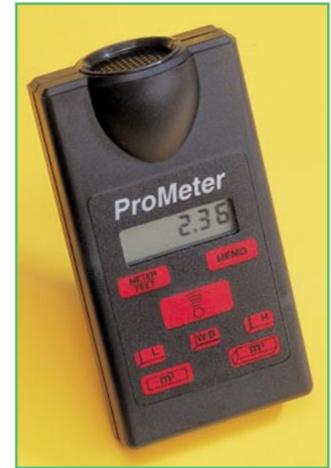


Bild 4: Ultraschall-Entfernungsmesser für Distanzen von 60 cm bis 12 m.

zwischen 60 cm und 12 m mit einer typischen Genauigkeit von 0,5 % ermitteln.

Das reflektierte Echosignal wird in der Regel vom gleichen Sensor, der nun als Empfänger arbeitet, aufgenommen und wieder in ein elektrisches Signal umgewandelt. Die Zeit zwischen dem Senden und dem Empfangen eines Impulses ist direkt proportional zum Abstand des reflektierenden Gegenstands. Die Genauigkeit der Messung ist nun abhängig von der Auflösung der Laufzeitmessung und von der Temperaturkompensation. Ohne Temperaturkompensation würde bei einer Temperaturdifferenz von 30 °C bereits eine Messgenauigkeit von ca. 5 % entstehen.

Damit durch störende Echos fremder Quellen (Mehrfachreflexionen) keine Fehler entstehen, muss in den meisten Anwendungen der Schallabstrahlwinkel durch die mechanische Konstruktion so klein wie möglich gehalten werden.

Mit Ultraschall-Sensoren kann nicht nur der Abstand bzw. die Entfernung von unterschiedlichen Gegenständen gemessen werden, sondern unter Auswertung des „Doppler-Effektes“ ist auch die Bewegungsrichtung und die Bewegungsgeschwindigkeit eines schallreflektierenden Objekts exakt auszuwerten.

Der Doppler-Effekt

Der „Doppler-Effekt“ kommt bei bewegten Schallquellen zustande. Während sich die von einer stehenden Schallquelle ausgehende Erregung (Druckwellen) wellenförmig nach allen Seiten in festen, flüssigen und gasförmigen Medien ausbreitet, kommt bei bewegten Tonquellen die Bewegungsgeschwindigkeit hinzu.

Bewegt sich nun die Schallquelle auf den Empfänger zu, so werden die Wellenlängen kleiner und somit die Frequenz des Tonsignals höher, weil der Schall ständig weniger Weg zurücklegen muss. Entfernt



Bild 2: Ultraschall-NF-Konverter

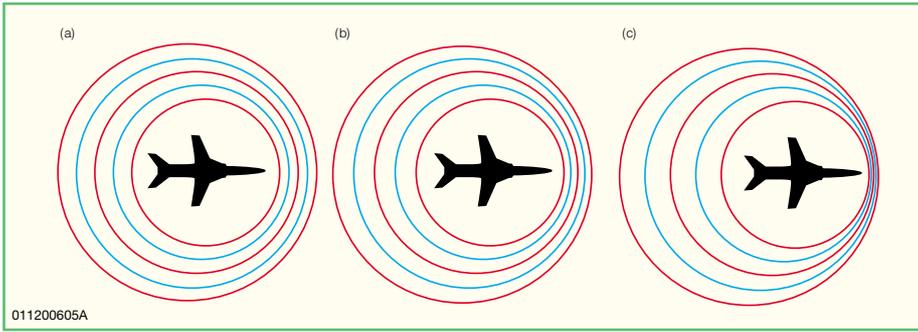


Bild 5: Ausbreitung der Schallwellen eines bewegten Objekts bei geringer (a), hoher (b) und sehr hoher (c) Geschwindigkeit.

sich hingegen die Schallquelle, so wird der Weg für die Schallwellen ständig größer. Für den Empfänger verringert sich dann die Tonfrequenz des ankommenden Signals. Gut beobachten kann man diesen Effekt z. B. bei einem Fahrzeug mit Martinshorn, das an uns vorbeifährt. Abbildung 5 verdeutlicht den Effekt bei bewegten Schallquellen und die Formel 2 a beschreibt die Zusammenhänge, wenn sich die Tonquelle dem Empfänger nähert und die Formel 2 b, wenn sich die Tonquelle vom Empfänger entfernt.

$$2 a: f = f_0 \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{v}{v_{\text{Schall}}}\right)}$$

$$2 b: f = f_0 \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{v}{v_{\text{Schall}}}\right)}$$

Der Doppler-Effekt tritt nicht nur bei Schallwellen, sondern auch bei elektromagnetischen Wellen (Radar) auf.

Einsatzmöglichkeiten für Ultraschall-Sensoren

Aufgrund der physikalischen Eigenschaften sind die Einsatzmöglichkeiten für Ultraschall-Sensoren nahezu grenzenlos, und im rauen Industrieinsatz sind diese Sensoren unempfindlich gegen Staub, Schmutz und Feuchtigkeit. Je nach mechanischer Konstruktion ist der Einsatz in gasförmigen, flüssigen oder festen Medien möglich.

Bevorzugte Einsatzgebiete für Ultraschall-Sensoren sind die Abstands- und Entfernungsmessung, die Füllstandserfassung, die Grenzschichterkennung und die Positionserkennung. Dabei sind sowohl Messabstände bis zu 15 m als auch Erfassungen im Millimeterbereich möglich.

In der Seefahrt bzw. in der Fischereindustrie ist das auf Ultraschall-Sensoren basierende Sonar bzw. Echolot zur detaillierten Erfassung des Bodenprofils oder zum Detektieren von Fischschwärmen nicht mehr wegzudenken. Sonargeräte arbeiten bis zu Tiefen von 350 m und mehr, wobei

i. d. R. Ultraschall-Frequenzen zwischen 100 kHz und 200 kHz genutzt werden. An Bojen angebrachte Ultraschall-Sensoren

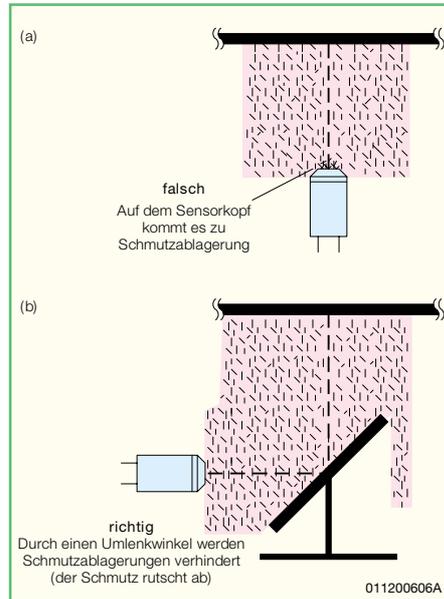


Bild 6: Montage eines Ultraschall-Sensors in verschmutzter Umgebung.

als Einparkhilfe.

Besonders wichtig sind Ultraschall-Sensoren im Bereich der Medizintechnik, wo mit Hilfe der „Doppler-Sonographie“ unterschiedlich dichte Gewebe und Grenzflächen im Körper untersucht werden können. Ein Teil der Schallwellen wird von diesen Flächen reflektiert und als Echo wieder vom Sensor empfangen. Ein Computer rekonstruiert daraus das auszuwertende Bild. Sogar die Flussrichtung und die Fließgeschwindigkeit des Blutes im Körper kann durch genaue Auswertung des „Doppler-Effekts“ ermittelt werden.

Mit Ultraschall-Sensoren sind im Bereich der Wettermesstechnik Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsaufneh-

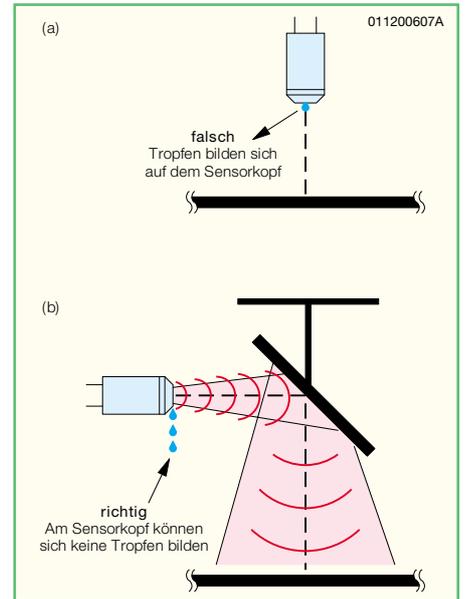


Bild 7: Durch eine geeignete Montage kann in einem Flüssigkeitsbehälter Kondensat am Sensorkopf verhindert werden.

können Pegelstände erfassen, und in Kfz-Stoßstangen integrierte Sensoren dienen

mer ohne bewegte Teile (Ultraschall-Anemometer) realisierbar. Das Ultraschallsig-

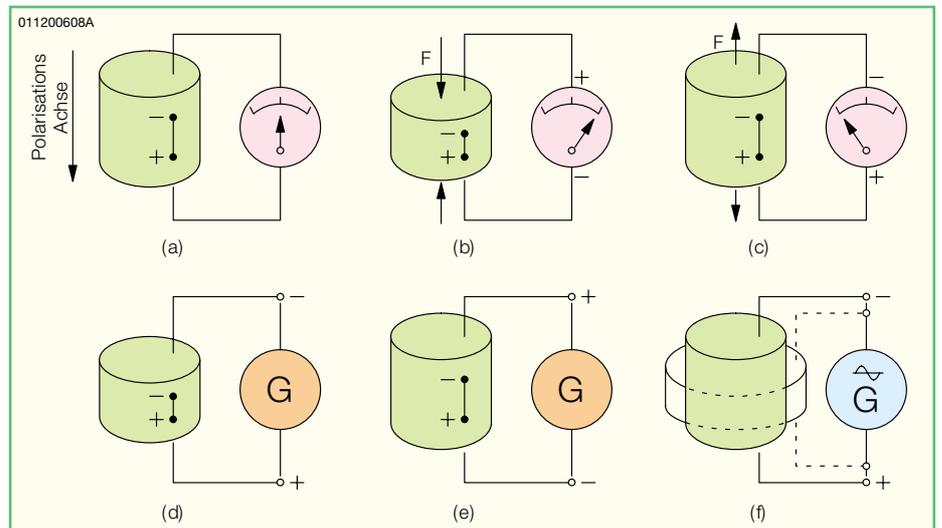


Bild 8: Mit dem Piezo-Effekt wird mechanische Energie in elektrische Energie gewandelt und umgekehrt.



Bild 9: Ultraschall-Sensoren (Sender und Empfänger)

nal wird dann von der Windgeschwindigkeitskomponente überlagert und die durch den „Doppler-Effekt“ entstehende Frequenzverschiebung ausgewertet.

Ultraschall-Sensoren sind wartungsfrei und in der Regel gegen Umwelteinflüsse hermetisch gekapselt. In rauher Industrieumgebung ist durch eine geeignete Montage sicherzustellen, dass sich keine größeren Schmutzablagerungen auf dem Sensorkopf bilden können. In Flüssigkeitsbehältern kann ebenfalls durch eine geschickte Anordnung des Sensors verhindert werden, dass sich Kondensat am Sensorkopf bildet und somit die Resonanzfrequenz beeinflusst. Abbildung 6 und 7 zeigen, wie auf einfache Weise mit Hilfe von Umlenkwellen Schmutzablagerungen bzw. Flüssigkeitstropfen verhindert werden können.

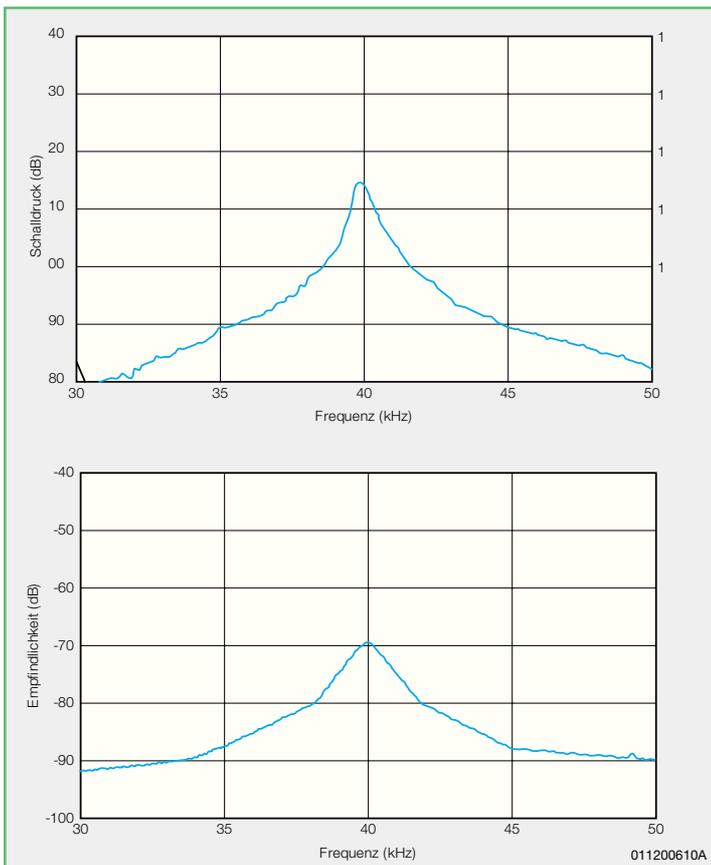


Bild 10: Empfindlichkeit und Schalldruck-Pegel der in Abbildung 9 gezeigten Ultraschall-Sensoren in Abhängigkeit von der Frequenz.

Aufbau von Ultraschall-Sensoren

In nahezu allen Ultraschall-Sensoren sind Piezo-Kristalle eingesetzt, die üblicherweise in Resonanz betrieben werden. In den meisten Sensor-Konfigurationen arbeiten die Piezo-Kristalle dann abwechselnd als Sender und Empfänger. Aufgrund der hohen Güte schwingen Piezo-Kristalle jedoch recht lange nach, was wiederum zur Folge hat, dass keine sehr geringen Abstände messbar sind. Der Resonator schwingt noch, wenn das reflektierte Echo eintrifft. Abhilfe schaffen da Sensoren mit getrennter Sende- und Empfangsmembran, mit denen Erfassungen im Nahbereich ab ca. 20 mm möglich sind oder der Einsatz von getrennten Sende- und Empfangssensoren.

Wie bereits erwähnt, werden Ultraschall-Sensoren vorwiegend aus piezoelektrischen Keramiken hergestellt, wobei die prinzipielle Funktionsweise auf dem so genannten Piezo-Effekt beruht, der in Abbildung 8 dargestellt ist.

Wird auf ein Piezo-Kristall Druck ausgeübt, d. h. wird dieser verformt, so entsteht eine elektrische Spannung. Umgekehrt verformt sich die Piezo-Keramik beim Anlegen einer elektrischen Spannung. Die Piezo-Keramik kann sowohl eine mecha-

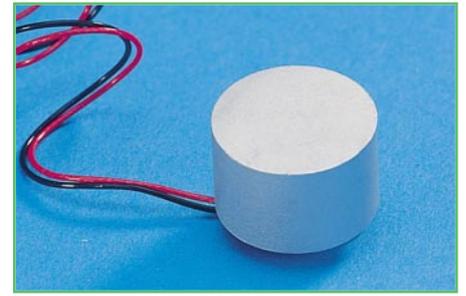


Bild 11: Wasserdicht gekapselter Sensor

nische Energie in eine elektrische Energie umwandeln als auch umgekehrt.

Abbildung 8 a zeigt den Kristall im Ruhezustand, in Abbildung 8 b wird die Keramik zusammengedrückt und in Abbildung 8 c auseinander gezogen. Je nach Deformationsrichtung polt sich die entstehende Spannung um.

Der in Abbildung 8 d dargestellte Keramik-Zylinder zieht sich zusammen, wenn eine elektrische Spannung angelegt wird, die die gleiche Polarität aufweist, wie die Polarisationsspannung der Keramik, während bei entgegengesetzter Polarität der Zylinder sich verlängert. Durch Anlegen einer Wechselfspannung, wie in Abbildung 8 f, wird die Piezo-Keramik zum Schwingen angeregt.

Für die Signalquelle wirkt der Kristall wie ein Kondensator, der bei niedrigen Frequenzen recht hochohmig ist und erst bei höheren Frequenzen (einige kHz) Leistung aufnimmt und diese in mechanische Energie (Schallwellen) umsetzt.

Abbildung 9 zeigt die praktische Ausführung von einem Ultraschallsender und einem Ultraschall-Empfänger, die jeweils für eine Resonanzfrequenz von 40 kHz optimiert sind. Beide Sensorgehäuse sind absolut identisch. Die Empfindlichkeit des Empfängers und der Schalldruckpegel des Senders in Abhängigkeit von der Frequenz, sind in Abbildung 10 zu sehen.

Der Sensor in Abbildung 11 ist ebenfalls wasserdicht gekapselt und kann wahlweise als Sender oder Empfänger eingesetzt werden. Die Grafik in Abbildung 12 zeigt die Richtcharakteristik dieses Sensors. **ELV**

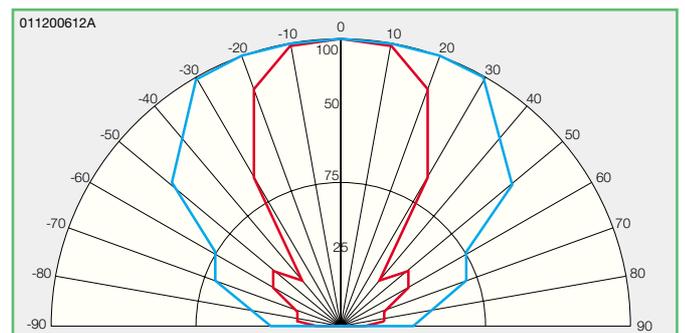


Bild 12: Richtcharakteristik des in Abbildung 11 dargestellten Ultraschall-Sensors.