

Ultraschall Füllstandsmessung des Wasserstandes einer Zisterne

Für die Messung des Wasserstandes einer Zisterne soll ein Messwertgeber mit Anzeige unter folgenden Randbedingungen entwickelt werden.

Messbereich:	30cm – 250cm
Genauigkeit:	< 2 %
Versorgungsspannung:	12 V
Ultraschallgeber:	UST 40
Ultraschallempfänger:	USR 40
Resonanzfrequenz:	40 kHz

Grundlagen

Akustische Wellen werden an Oberflächen reflektiert. Diesen Effekt wird bei Ultraschall-Entfernungsmessern ausgenutzt, indem die Zeit zwischen Aussenden der Welle bis zum Eintreffen der reflektierten Welle (Echo) gemessen wird. Die Genauigkeit dieser Messung hängt dabei im Wesentlichen von der Wellenlänge und damit von der Frequenz der akustischen Welle ab. Die Wellenlänge λ bestimmt sich zu $\lambda = \text{Ausbreitungsgeschwindigkeit}/\text{Frequenz}$

Schall breitet sich in Luft mit einer Geschwindigkeit von ca. 340 m/s aus, was bei einer Frequenz von 40kHz zu einer Wellenlänge von 8,5 mm führt. Diese 8.5 mm stellen die theoretische Grenze für die erreichbare Genauigkeit dar.

Bei der Ultraschall-Entfernungsmessung sendet man üblicherweise ein kurzes Wellenpaket (Burst) aus, und misst die Zeit bis zum Eintreffen des Echos am Ort des Senders. Die kürzeste messbare Entfernung wird dabei durch die Länge des Wellenpakets bestimmt. Solange der Sender sendet und damit den Empfänger auf Grund der räumlichen Nähe von Sender und Empfänger direkt beeinflusst, ist ein Echo nicht detektierbar.

Sinnvoll ist daher die Aussendung eines möglichst kurzen Bursts von z.B. 10 Schwingungen, was bei einer Frequenz von 40 kHz 250 μs entspricht. Zu beachten ist, dass der in Resonanz betriebene Ultraschallgeber bis zu etwa 1 ms nachschwingt (siehe Bild 5), so dass frühestens nach 1250 μs ein Echo detektiert werden sollte. In 1250 μs legt der Schall ca. 42 cm zurück, so dass die kürzeste detektierbare Entfernung bei ca. $42/2 = 21$ cm liegt. Der Faktor 2 resultiert daher, dass der Schall den Weg zwischen Sender und Oberfläche zweimal durchläuft.

Die längste messbare Entfernung bestimmt sich der aus der Leistung des Senders sowie aus der Empfindlichkeit des Empfängers.

Grundsätzlicher Aufbau:

Der Messwertgeber besteht aus einem Analogteil und einem Digitalteil. Der Analogteil enthält einen Ultraschallgeber, der bei Freigabe durch den Digitalteil einen Ultraschall-Burst aussendet, sowie einen Ultraschallempfänger mit Verstärker, welcher das Echo des Ultraschall-Burst detektiert und dies an den Digitalteil signalisiert.

Der Digitalteil steuert den Analogteil und wertet die Ergebnisse aus. Er sendet zyklisch kurze Freigabepulse an den Analogteil, welche dann den Oszillator freigeben und damit die Aussendung eines Ultraschall-Bursts verursachen. Mit der Startflanke des Pulses wird im Digitalteil ein Zähler getriggert, der die Zeit misst, bis das Echo am Ultraschallempfänger eingetroffen ist. Aus dieser Zeit wird die Entfernung und daraus der Füllstand errechnet und über ein LCD angezeigt.

Analogteil

Der Ultraschallgeber wird von einem Multivibrator angeregt. Der Multivibrator hat gegenüber einem freischwingenden Oszillator den Vorteil, dass er sehr schnell anschwingt, so dass auch kurze Burst-Pakete gesendet werden können. Der Multivibrator wird mit einem NE555 Timer aufgebaut (Bild 1). Über ein Low-Signal am Eingang X1-2 wird der Transistor T2 gesperrt und der RESET Eingang des Timer auf das Potential der Versorgungsspannung gezogen, wodurch der Multivibrator freigegeben wird.

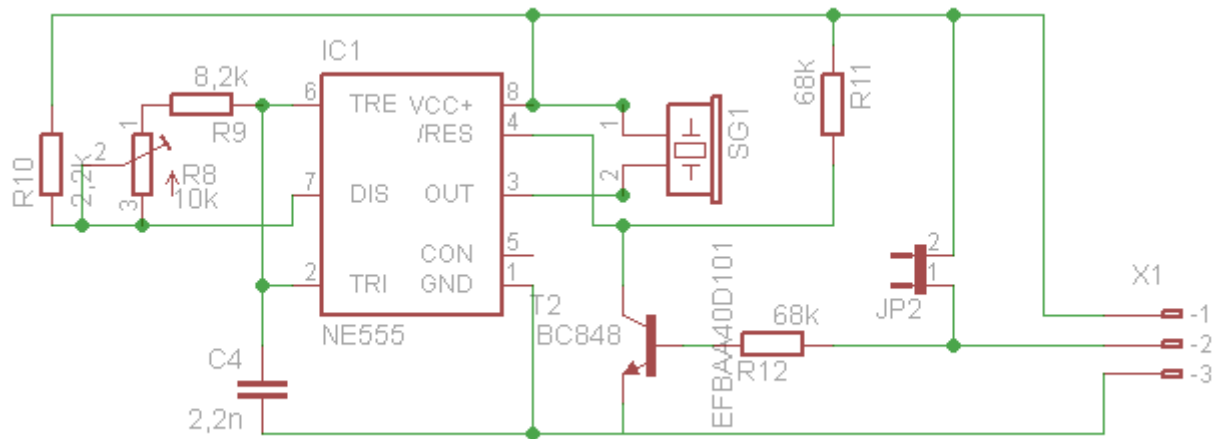


Bild 1: Schaltung des Senderteils

Die Frequenz des Oszillators wird durch die Elemente R8,R9,R10 und C4 bestimmt. Sie berechnet sich zu $f = 1,44 / ((R8+R9+2 \cdot R10) \cdot C4)$ und ist damit im Bereich 21-51 kHz einstellbar. Um ein Taktverhältnis von etwa 50/50 zu erhalten ist es wesentlich dass R10 deutlich kleiner ist als R8 + R9. R10 sollte jedoch nicht kleiner als 1 k gewählt werden, um während der Entladephase von C4 den Strom über R10 in vernünftigen Grenzen zu halten.

Zur Auslegung des Empfängers wird zunächst abgeschätzt, welches Eingangssignal zu erwarten ist. Der Ultraschallgeber UST 40 erzeugt nach Datenblatt bei einer Anregung mit 12V in einem Abstand von 30 cm einen Schalldruck von ca. 110 db bezogen auf den Referenzwert $P_o = 20 \cdot 10^{-6}$ Pascal (Pa). Unterstellt man eine ideale Reflexion des Ultraschalls an der Wasseroberfläche, dann entspricht der minimale Schalldruck am Empfänger dem Schalldruck in 5 m ($2 \cdot 2,5m$) Entfernung.

Die Dämpfung in 5m Entfernung ergibt sich zu $20 \log(30/500) = -24,4$ db
Damit erhält man am Ort des Empfängers einen Schalldruck von $110db - 24,4 db = 85,6 db = 20 \log (P/P_o) = 0,38 Pa$

Der Ultraschallempfänger ist mit einer Empfindlichkeit von ca. -65 db spezifiziert bezogen auf den Referenzwert 1V/Pa was 0,56 mV/Pa entspricht. Damit ist zu erwarten, dass die Empfängerkapsel einen minimalen Signalpegel (minimal weil in 5m Entfernung berechnet) von 0,21 mV erzeugen sollte. I

Um das reflektierte Ultraschallsignal mit Hilfe eines Komparator sicher detektieren zu können, sollte es auf > 100 mV verstärkt werden. Hierzu ist eine Verstärkung von ca. 55- 60 db erforderlich. Eine Verstärkung von 60 db bei einer Frequenz von 40 kHz erfordert bei einer einstufigen Verstärkerstufe einen recht breitbandigen Operationsverstärker. Solche Operationsverstärker neigen zu Instabilitäten, wenn über Streukapazitäten ungewollte Mitkopplungen entstehen. Daher wird eine zweistufige Verstärkung mit einem schmalbandigen Operationsverstärker bevorzugt, die den Vorteil hat, auch bei einem weniger sorgfältigen Layout absolut stabil zu arbeiten.

Da die Ultraschallempfangskapsel recht hochohmig ist, wird ein nicht invertierender Verstärker mit ca. 30 db Verstärkung je Stufe verwendet. Verwendet wird ein Standardoperationsverstärker wie der LM358 oder der TL072.

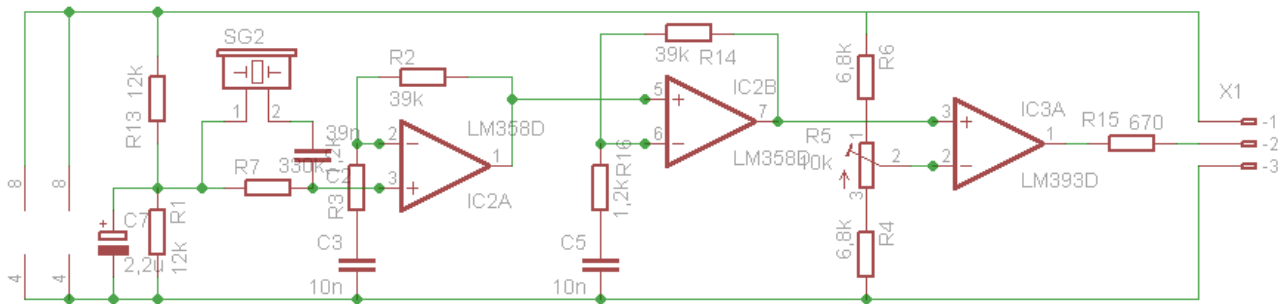


Bild 2: Schaltung des Empfängers

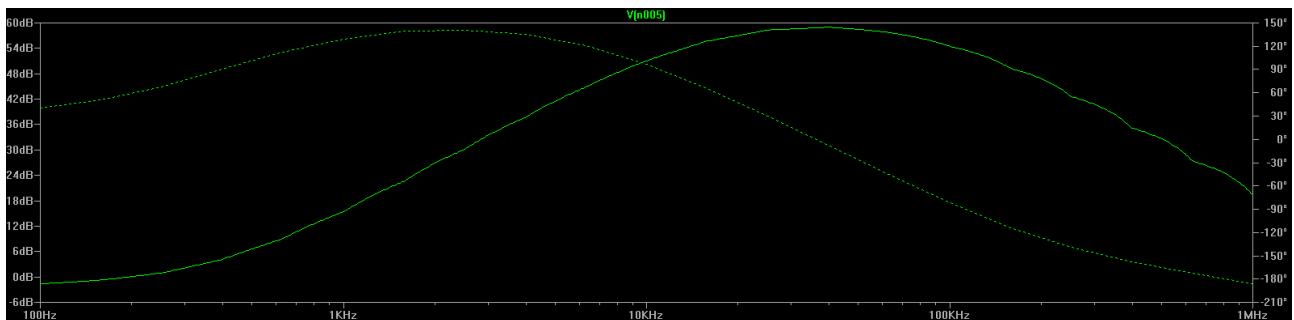


Bild 3: Übertragungsfunktion des Verstärkers

Die beiden Operationsverstärker IC2A Und IC2B sind als Hochpass-Verstärker beschaltet. Mit dem inhärenten Tiefpassverhalten des Operationsverstärker ergibt sich ein Bandpass, dessen Mittenfrequenz bei ca. 40 kHz liegt. Der nachfolgende schnelle Komparator ICA3 arbeitet als Detektor. Der Pegel am invertierenden Eingang des Komparators wird so eingestellt, dass er im stationären Zustand (kein Ultraschallecho) ca. 100 mV oberhalb des Ausgangs der Verstärkerstufe liegt, so dass der Ausgangstransistor (offener Kollektor-Ausgang) des Komparators durchgeschaltet und das Ausgangssignal X1-2 auf Nullpotential zieht. Das Signal wird im Digitalteil über einen Pull-up Widerstand auf die positive Versorgungsspannung (5V) aufgeschaltet. Der Widerstand R15 dient lediglich der Kurzschlussfestigkeit des Ausgangs.

Digitalteil

Der Digitalteil (Bild 4) des Messwertgebers ist denkbar einfach. Er besteht im Wesentlichen aus einem Festspannungsregler (IC2) zur Erzeugung der Versorgungsspannung für den Controller, einem Standard PIC Controller (IC1) mit externem Oszillator sowie einem LCD Display (EADOG) zur Ausgabe des Füllstandes.

Der Widerstand R7 dient als Pull-up Widerstand, um den offenen Kollektor-Ausgang des Komparators im Analogteil bei gesperrtem Ausgangstransistor auf das Potential der Versorgungsspannung zu ziehen. Die Leuchtdiode (LED2) dient der Fehlerausgabe und die Konnektoren X3,X4 und X5 sind für die ISP Programmierung des Controllers erforderlich. Der Tasten S1 erlaubt das manuelle Rücksetzen der Schaltung falls der Programmablauf e.g. durch Störungen auf der externen Spannungsversorgung unterbrochen wurde.

Die Konnektoren X1 und X2 dienen als Schnittstelle zum Analogteil sowie zur externen Spannungsversorgung (X2-1 = 12 V; X2-2 = GND). Der Konnektor X6 erlaubt den Anschluss eines Relais. Das kann z.B. genutzt werden, um eine Förderpumpe bei "Füllstand tief " tief zu stoppen und somit ein Trockenlaufen der Pumpe zu verhindern.

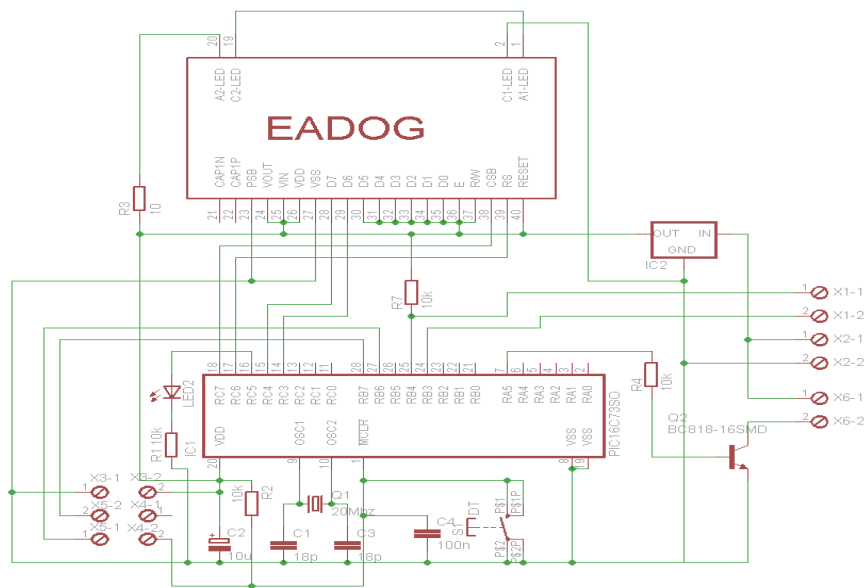


Bild 4: Digitalteil des Messwertgebers

Auch die Software des Controllers ist denkbar einfach. In einer endlosen Schleife wird einmal je Sekunde über Port B3 der Oszillator des Analogteils für 250 μ s freigegeben und ein interner Zähler gestartet. Nach 1250 μ s (Wartezeit bis Ultraschallgeber abgeklungen ist) wird dann zyklisch Port B4 bis zum Eintreffen des Echos oder bis zum Überschreitung einer maximalen Wartezeit (Timeout) überprüft. Der interne Zähler ist dabei derart normiert, dass eine "Zähleinheit" der doppelten Laufzeit über einen Abstand von 1cm (=59 μ s) entspricht. Der Inhalt des Zählers beim Eintreffen des Echos entspricht dabei also der Entfernung bis zur Wasseroberfläche. In der LCD Anzeige wird hingegen der Füllstand in der Zisterne angezeigt. Dieser ergibt sich aus der Differenz zwischen

"Montagehöhe des Analogteils über dem Nullniveau der Zisterne" – "gemessene Entfernung"

Die "Montagehöhe des Analogteils über dem Nullniveau der Zisterne" ist im Programm als Parameter UE (190 cm) hinterlegt.

Erfahrungen

Die Schaltung arbeitet in meiner Zisterne sehr genau und zuverlässig. Obwohl die Auswertung auf Einzelmessungen beruht, werden die Messergebnisse bis auf 1cm reproduziert. Bild 5 zeigt das aufgezeichnete Ultraschallsignal am Ausgang der Verstärkerschaltung des Analogteils (PIN 7 IC2)

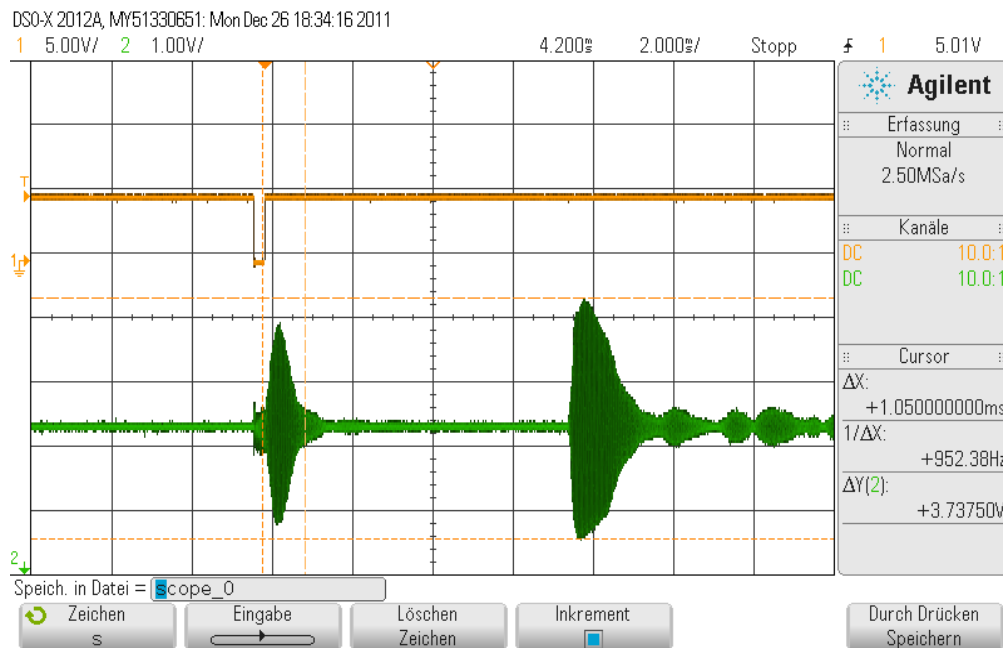


Bild 5: Ultraschallsignal am Verstärkerausgang.

Deutlich zu erkennen ist, dass der Ultraschallgeber nach der kurzen Anregung von 250 μ s (obere Kurve in orange) noch für ca. 1ms nach schwingt. Diese Zeit muss abgewartet werden, bevor mögliche Echosignale ausgewertet werden. Nach ca. 8 ms tritt dann das tatsächliche Echo ein. Um ein fehlerfreies Arbeiten des Messwertgebers zu gewährleisten ist der Montageort für den Analogteil so auszuwählen, dass störende Reflexionen aus dem Nahfeld (20-30 cm) weitgehend ausgeschlossen werden. Auch sollte die Elektronik des Analogteils gegen Umwelteinflüsse (Spritzwasser) geschützt aufgebaut werden. Die versuchsweise Montage des Ultraschallgebers in einem Tauchrohr führte wegen genau dieses störenden Reflexionen zu unbrauchbaren Ergebnissen (Bild 6).



Bild 6: Ultraschallsignal mit Störreflexionen aus dem Nahfeld