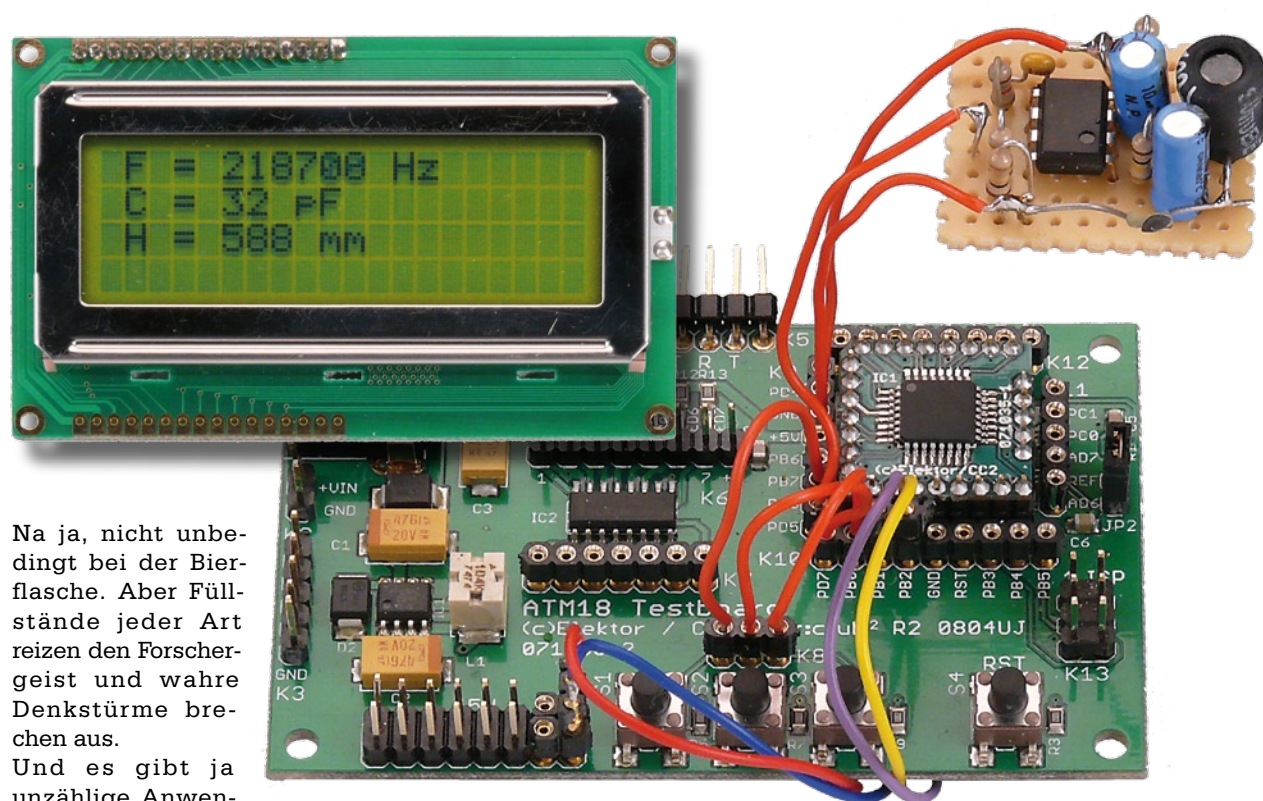


Volle Kanne!

Mit Pico- und Femtofarad zum Füllstand

Von Wolfgang Rudolph (D), Rudolf Pretzenbacher (A) und Burkhard Kainka (D)

Manchmal sind wir Elektroniker schon sehr merkwürdig. Während jedermann seine Bierflasche anschaut und weiß, wie viel noch drin ist, so will der Elektroniker das messen!



Na ja, nicht unbedingt bei der Bierflasche. Aber Füllstände jeder Art reizen den Forschergeist und wahre Denkstürme brechen aus. Und es gibt ja unzählige Anwendungen, in denen man einen Füllstandsmesser einsetzen könnte – von der Regentonne bis zum Heizöltank. Und wir haben keine Zweifel, dass den Lesern dieser Zeitschrift noch viele andere Aufgabenstellungen einfallen werden, in denen ein Füllstandssensor gute Dienste leisten könnte.

Doch wie kann man den Füllstand genau und zuverlässig messen?

Messmethoden

Es gibt ganz unterschiedliche Methoden. In vielen Toilettenspülkästen befindet sich ein Schwimmer, der bei steigendem Wasserstand ab einer gewissen Höhe den Zulauf reduziert und dann ganz abstellt. Hier wird der Sensor, der Schwimmer, über ein

Hebelwerk und ein Ventil gleich zum Aktor. Ein sehr zuverlässiges Prinzip, aber einen Füllstand können wir damit nicht ablesen. Das gleiche Prinzip wurde und wird teilweise auch noch heute für die Tankanzeige in Autos verwendet. Allerdings verstellt der Schwimmer hier kein Ventil, sondern ein Potentiometer. Der veränderliche Widerstand wurde in einem Spannungsteiler benutzt, um ein Milliampereometer „anzutreiben“, wel-

Tabelle 1

Daten der verwendeten Festinduktivität

(stehende Bauform mit mittlerem Nenngleichstrom).

Hersteller: FASTRON,
Typennummer 09 P-103 J-50

Maße: Ø 9,5 mm, Höhe 14 mm,
Rastermaß 5 mm

Induktivität: 10,0 mH (bei 20 kHz)

Eigenresonanzfrequenz (SRF) 0,41 MHz

Nenngleichstrom 90 mA

Widerstand 35,0 Ω

Toleranz: ±5 %

Q min.: 70

ches dann den Tankinhalt anzeigte. Teilweise waren das schlimme Schätzereien.

Heute gibt es eine Vielzahl von moderneren Messmethoden, die in den unterschiedlichsten Anwendungen zum Einsatz kommen. Es gibt hydrostatische und Differenzdruckmessung, Leitfähigkeitsmessung, Messung mittels Licht durch Absorption, Laufzeitmessung mit Ultraschall, Wegmessung mit Mikrowellen und sogar Laufzeitmessung mit Radar-Impulsen.

Vom elektronischen Standpunkt interessant ist auch die kapazitive Messung. Dabei wird die Änderung der Kapazität zwischen zwei Elektroden gemessen. Wenn also in einem Behälter eine Flüssigkeit die Elektroden mehr oder weniger bedeckt, verändert sich die Kapazität dieses „Kondensators“. Diese Änderung hängt von der Dielektrizitätskonstante ϵ der Flüssigkeit ab. Je größer die gemessene Kapazität, desto höher ist der Pegelstand.

Kapazitiv

Sie ahnen es schon: Das ist das Messverfahren, mit dem wir uns hier beschäftigen wollen. Ein Kondensator ist ja für uns ein vertrautes Bauelement. Doch so einfach, wie es sich anhört, ist es natürlich nicht. Es steckt einiges an Mathematik dahinter. Die Grundlage für diesen Artikel hat Rudolf Pretzenbacher mit einem kapazitiven Füllstandsmesser geschaffen, der mit einem einfachen, aber erstaunlich stabilen Oszillator zur Messung und einem AVR-Mikrocontroller zur Auswertung arbeitet. Dieser Füllstandsmesser diente uns als Basis für dieses

CC2-Projekt – und Sie können davon Erstaunliches erwarten: Der Messaufbau ermöglicht es, Kapazitäten vom Nanofarad- bis in den Femtofarad-Bereich zu messen. Falls nicht präsent: 1 Femtofarad ist $1 \cdot 10^{-15}$ F oder ein tausendstel pF.

Doch wie ist eine derartig hohe Auflösung zu erreichen? Unser „Messkondensator“ in der Flüssigkeit ist als frequenzbestimmendes Glied Teil eines Schwingkreises, der wiederum Teil einer Oszillatorschaltung ist. Wird nun ein Messobjekt in den Bereich des Kondensators gebracht, so verstimmt das den Schwingkreis. Je mehr sich die Kapazität des Kondensators durch das eingebrachte Objekt vergrößert, desto niedriger wird die Frequenz. Die Aufgabe des Mikrocontrollers auf unserem ATM18-Testboard ist es nun, die Frequenz zu messen und aus der bekannten Induktivität und der gemessenen Frequenz die Messkapazität zu berechnen.

Das hört sich ganz einfach an, wir müssen aber noch einige Details bedenken.

Der Oszillator

Die Oszillatorschaltung könnte den Schwingkreis durch ihre Eigenkapazität oder durch zu starke Kopplung beeinflussen. Damit dieser Effekt möglichst gering ausfällt, sollte der Schwingkreis eine hohe Leerlaufgüte haben und nur schwach angeregt werden. Wichtig ist also die Wahl der geeigneten Spule.

Wir haben uns für eine stehende Festinduktivität von FASTRON entschieden. Der Typ 09 P-103 J-50 (erhältlich u. a. bei Reichelt) hat eine Induktivität von 10 mH (bei 20 kHz), einen ohmschen Widerstand von 35 Ω und eine Eigenresonanz von 410 kHz. Daraus folgt eine erstaunlich geringe Eigenkapazität von 15 pF. Außerdem gibt der Hersteller eine maximale Leerlaufgüte von 70 an. **Tabelle 1** gibt eine Übersicht über die Daten.

Je höher die Güte eines Kreises, desto geringer ist die Dämpfung. Eine Güte von 70 bedeutet, dass die Amplitude einer „freien“ (gedämpften) Schwingung nach 70 Perioden auf $1/e$ abgesunken ist, was man mit einem Oszilloskop sehr schön beobachten kann. Die Dämpfung ist auf ohmsche Verluste im Drahtwiderstand und auf magnetische Verluste im Kern zurück-

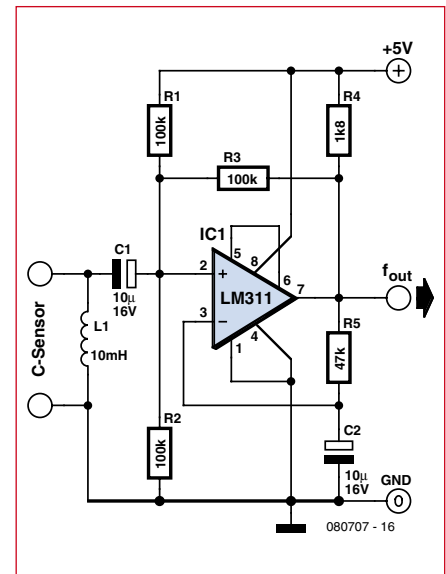


Bild 1. Der Schaltplan des Oszillators, der zur Kapazitätsmessung verwendet wird.

zuführen. Bei einer Induktivität von 10 mH und einer Schwingkreiskapazität von 6300 pF ergibt sich eine Resonanzfrequenz von 20 kHz. Der induktive wie auch der kapazitive Widerstand beträgt 1260 Ω. Setzt man diesen ins Verhältnis zum Gleichstromwiderstand von 35 Ω, ergibt sich eine theoretische Güte von $Q = 36$, der Resonanzwiderstand des Schwingkreises beträgt dann $1260 \Omega \cdot 36 = 45 \text{ k}\Omega$. Bei kleiner Kapazität und höherer Frequenz steigen Güte und Resonanzwiderstand entsprechend an. Für eine hohe Güte muss man ein hohes L/C-Verhältnis anstreben. Bei ca. 3000 pF und 30 kHz ergibt sich rein rechnerisch eine Güte von etwa 70. Bei sehr hohen Frequenzen nehmen die Kernverluste zu und die Güte sinkt wieder. Den größeren Einfluss hat aber die Oszillatorschaltung. Bei großem Resonanzwiderstand reagiert der Schwingkreis besonders empfindlich auf äußere Einflüsse.

Bild 1 zeigt den verwendeten Oszillator, der mit einem Komparator LM311 aufgebaut ist. Der Komparator vergleicht die Eingangsspannung mit einer Referenzspannung und setzt die Sinusschwingungen am Schwingkreis in ein Rechtecksignal am Ausgang um. Dieses regt über einen Rückkopplungswiderstand die Schwingungen an. Am nichtinvertierenden Eingang sorgt ein Spannungsteiler für die halbe Betriebsspannung. Der invertierende Eingang erhält eine Vergleichsspannung, die

Listing 1

Kapazitätsmessung

```

Config Timer0 = Timer
    , Prescale = 64
Config Timer1 = Counter
    , Edge = Falling
    , Prescale = 1
On Ov0 Tim0_isr
On Ov1 Tim1_isr
Enable Timer0
Enable Timer1

Do
    Ticks = 0
    Enable Interrupts
    Waitms 1100
    Disable Interrupts
    Lcdpos = 2 : Lcdline
    = 1 : Lcd_pos
    Lcdtext = "Freq = "
    Lcdtext = Lcdtext
    + Str(freq)
    Lcdtext = Lcdtext
    + " Hz "
    Lcd_text
    Print Freq;
    Print " Hz"
    C = Freq / 10000000
    C = 1 / C
    C = C * C
    C = C / 39.48
    If Pinb.0 = 0 Then C0 = C
    C = C - C0
    Print Fusing(c , "#.###");
    Print " pF"
    Lcdpos = 2 : Lcdline
    = 2 : Lcd_pos
    Lcdtext = "Cap ="
    Lcdtext = Lcdtext +
    Fusing(c , «#.###»)
    Text = Fusing(c , «#.###»)
    Lcdtext = Text
    Lcdtext = Lcdtext
    + « pF «
    Lcd_text
    Waitms 10
Loop

Tim0_isr:
    '1000 µs
    Timer0 = 6
    Ticks = Ticks + 1
    If Ticks = 1 Then
        Timer1 = 0
        Highword = 0
    End If
    If Ticks = 1001 Then
        Lowword = Timer1
        Freq = Highword * 65536
        Freq = Freq + Lowword
        Ticks = 0
    End If
Return

Tim1_isr:
    Highword = Highword + 1
Return

```

sich durch Integration der Ausgangsspannung bildet. Der Oszillator stellt daher selbst seinen Arbeitspunkt ein, schwingt sicher an und erzeugt ein symmetrisches Rechtecksignal am Ausgang.

Was die Beeinflussung des Schwingkreises durch den Oszillator angeht, so muss man vor allem einen Blick auf die Widerstände werfen. Der Spannungsteiler mit zweimal 100 k Ω dämpft (belastet) den Kreis mit 50 k Ω . Dazu kommt aber ein negativer Rückkopplungswiderstand von 100 k Ω geteilt durch die effektive Spannungsverstärkung. So ergeben sich stabile Schwingungen bis zu Messkapazitäten von über 100.000 pF. Die Leerlauf Frequenz beträgt ca. 350 kHz, woraus sich eine effektive Kapazität von ca. 20 pF ergibt. Die Spule selbst trägt 15 pF dazu bei, die Eingangskapazität des LM311 und die übrigen Schaltungskapazitäten schlagen mit 5 pF zu Buche.

Wenn man sich das Signal an der Spule mit einem Oszilloskop ansieht, erkennt man bei der höchsten Frequenz eine Signalamplitude von ca. 1 V und eine gewisse Abweichung von der reinen Sinusform. Man könnte sich also sogar noch eine schwächere Anregung leisten. Andererseits sinkt die Amplitude mit steigender Messkapazität deutlich ab, das Signal wird schwächer und sinusförmiger. Bei 100 nF schwingt der Oszillator immer noch bei 4,9 kHz und 0,1 V Amplitude. Irgendwo darüber reiben die Schwingungen ganz ab.

Jetzt kommt es noch auf die Stabilität der Frequenz an. Dass die Schaltung selbst nur 5 pF zur Kreiskapazität beiträgt, ist schon mal günstig. Es bleibt noch die schwierige Frage nach der Temperaturkonstanz der Spule. Hier helfen nur praktische Experimente. Um das Ergebnis vorweg zu nehmen: Die Stabilität reicht aus, um im Elektronik-Labor mit dem Musteraufbau auf Lochrasterplatine (**Bild 2**) eine Auflösung von 0,001 pF = 1 fF (Femtofarad, welch selten gehörtes Wort!) zu erreichen. Die Frequenzmessung ist übrigens nicht der begrenzende Faktor. Bei 350 kHz und 20 pF wird eine Änderung von 1 Hz durch eine Kapazitätsänderung von nur ca. 0,1 fF bewirkt. Allerdings ist die effektive Konstanz etwas geringer.

Frequenzmessung

Also los! Die Frequenzmessung gab es ja schon mal im Bascom-Kurs Teil 4 (Elektor 12/2008). Der Zähler-Eingang

Handkapazität

Folgendes ist zu beobachten, wenn man die Hand in die Nähe des Oszillators (Bild 1 und 2) führt: Auch wenn kein Messkabel angeschlossen ist, wird eine Kapazitätsänderung von einigen Femtofarad gemessen. Näherungsweise ergab sich in Abhängigkeit vom Handabstand:

5 cm	0,005 pF
4 cm	0,009 pF
3 cm	0,020 pF
2 cm	0,040 pF
1 cm	0,100 pF

Das ist physikalisch interessant: Die so genannte Handkapazität ist unter Radiobastlern bekannt und berücksichtigt. Wenn ein Eigenbau-Empfänger nicht ausreichend abgeschirmt ist, kann man oft durch Annäherung mit der Hand die Frequenz leicht verstimmen. Manchmal macht man aus der Not eine Tugend und nutzt diesen Effekt zur Feinabstimmung beim SSB-Empfang.

ist T1 (PD5), das Ergebnis liegt bei einer Torzeit von 1 s in Hz vor. Sie wird ganz ohne Korrektur und Schminke mit 9600 Baud an den PC gemeldet. Bleibt noch die Umrechnung in die Kapazität. Hier wird eine Single-Variable eingesetzt. Die Umrechnungsformel muss in Bascom in mehrere kleine Rechenschritte aufgelöst werden. Man muss dabei etwas aufpassen, dass Zwischenwerte niemals extrem klein oder extrem groß werden, weil das Genauigkeit kosten könnte. Die Reihenfolge der Rechenschritte spielt hier also eine gewisse Rolle. Die 10 mH der Spule stecken in einem Faktor 10.000.000. Der tiefere Sinn ist, dass am Ende Pico-farads herauskommen. Falls genaue Vergleichsmessungen zeigen, dass die Induktivität der Spule zum Beispiel um 1 % nach unten abweicht, ist hier die richtige Stelle für eine Korrektur. Die Spule hat eine Nenntoleranz von 5%. Damit werden auch Kapazitäten mit etwa 5% Genauigkeit bestimmt.

Die Leerlaufkapazität C_0 beträgt etwa 20 pF. Der genaue Wert hängt natürlich von vielen Dingen ab. Dazu gehören Bauteiltoleranzen, der Aufbau der Platine und vielleicht sogar das verwendete Lötzinn, weil die Dielektrizitätskonstante des Flussmittels sich im Bereich einiger Femtofarad auswirken dürfte. Da hilft nur eine Nullpunktkalibrierung. Nichts leichter als das: Wenn der Anwender auf eine Taste drückt, die

Ebenfalls erwünscht ist die Handkapazität bei Musikern, die ein Theremin spielen. Durch die Bewegung der Hand verstimmt man einen Oszillator und verändert damit einen Ton stufenlos. Einen Test kann man auch mit diesem Oszillator machen. Eine Kupferplatine von der Größe einer Eurokarte (100 mm * 160 mm) wird als Gegenelektrode angeschlossen. Der Resonanzkreis des Oszillators hat dann ca. 17 pF mehr, die Frequenz sinkt auf ca. 260 kHz. Damit kommt man in den Langwellenbereich. Mit einem Radio ist dort bereits etwas zu hören. Mit etwas Glück findet man eine Interferenz mit einem Langwellensender. Und schon kann man Musik machen - ausreichendes Geschick vorausgesetzt. Wahrscheinlich werden dabei alle Katzen weglaufen, aber wir wollen ja nur den Effekt ausprobieren und verstehen und Lydia Kavina (Theremin-Virtuosin und Großnichte des Theremin-Erfinders) keine Konkurrenz machen. Die relevanten Kapazitätsänderungen um ca. 0,1 pF ergeben sich dank der größeren Gegenelektrode auf einer Abstimmstrecke von ca. 5 cm.

am Port B0 angeschlossen ist, so wird die aktuelle Kapazität als Nullwert C_0 übernommen. Das ist unverzichtbar, denn wenn man ein Messkabel anschließt, kann dieses allein schon 10 pF haben. Vor der eigentlichen Messung wird also erst einmal genullt, und schon hat man wieder eine optimal erreichbare Genauigkeit.

Die Ausgabe der Messwerte erfolgt auf zwei Wegen: Über die serielle Schnittstelle und über das bekannte LCD mit 2-Draht-Interface. Die LCD-Software wurde dazu etwas überarbeitet, weil sie zunächst nicht mit den Timer-Interrupts kooperieren wollte. Das Problem waren die verwendeten Variablen-Übergaben an die Subs. Alle Variablen wurden deshalb global deklariert. Außerdem wurde das Timing verbessert, um die Übertragung noch sicherer zu machen – siehe Listing 1.

Nun zeigt das Programm die aktuelle Frequenz und die Kapazität an. Damit lassen sich auch Messungen zur thermischen Stabilität durchführen. Man erwärmt zum Beispiel die Spule mit der Hand und beobachtet die Änderungen. Bei einer Temperaturerhöhung von ca. 20 °C auf etwa 30 °C steigt die gemessene Kapazität um ca. 0,15 pF an. Wenn es also nur darum geht, unbekannte Kondensatoren zu identifizieren, spielt die Temperatur kaum eine Rolle. Wenn man aber tatsächlich auf wenige Femtofarad genau

messen möchte, muss der Oszillator erst ein paar Minuten einlaufen und dann genullt werden. Im Bereich von einigen Minuten ändert sich das Messergebnis um weniger als 5 fF.

Kapazitätsmessungen

Vor allem Freunde hoher Frequenzen haben immer etwas zu messen – zum Beispiel Drehkondensatoren: Bevor ein echter Radiobastler ein altes Radio auf den Müll wirft, baut er zumindest den Drehko aus. So etwas ist ja nicht mehr an jeder Ecke zu bekommen. Das Recycling-Teil muss dann natürlich gemessen werden, damit man weiß, was man da hat. 8 pF bis 520 pF? Super!

Aber auch unbekannte SMD-Kondensatoren, Kapazitätsdioden, FET- oder Röhren-Eingangskapazitäten und Kabelkapazitäten sind messbar. Und sogar die Länge eines Kabels. Da hat man zum Beispiel eine schon angebrauchte Rolle Koaxkabel. Ehe man das Kabel durch einen (nicht mehr genutzten) Schornstein schiebt, wüsste man natürlich gerne, ob es bis unten reicht. Man hat ja schon mal von fluchenden Männern auf hohen Dächern gehört. ;-)

Mit unserem Kapazitätsmesser ist das Problem ganz einfach lösbar. Die Kapazität pro Meter Kabel verrät das Datenblatt. Das beliebte 50-Ω-Kabel RG58 hat zum Beispiel 100 pF/m. Fehlen Datenblattwerte, misst man eben ein Kabelstück bekannter Länge (zum Beispiel von einem Meter) und ermittelt so die pF/m. Wenn man diesen Wert kennt, kann man leicht von der Kabelkapazität auf die Länge zurückrechnen (Kapazität des Kabels geteilt durch Kapazitätswert pro Meter ergibt Länge in Meter). Dass das Kabel auch eine Induktivität hat, spielt keine Rolle, weil weit unterhalb der $\lambda/4$ -Resonanz gemessen wird. Bei 100 kHz hat man ja immerhin eine Wellenlänge von 3 km.

Füllstandsmessung

Als Füllstandsmesser wird ein Plexiglasröhrchen (Polycarbonat) mit zwei Anschlussstutzen versehen. So zentrisch wie möglich wird innerhalb des Röhrchens ein mit Polyethylen isolierter Schaltdraht (PE-Isolation) gespannt, und das Röhrchen wird oben und unten wasserdicht verschlossen (Bild 3). Der Leiter des Schaltdrahtes muss vom Innenraum des Röhrchens

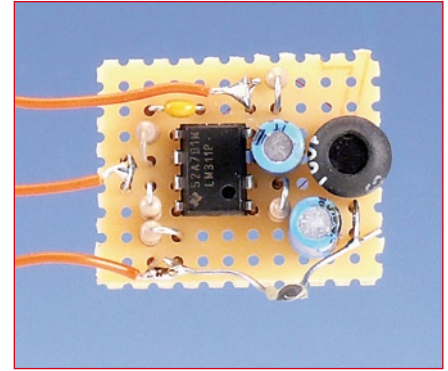


Bild 2. Musteraufbau des Oszillators auf einem Stück Lochrasterplatine.

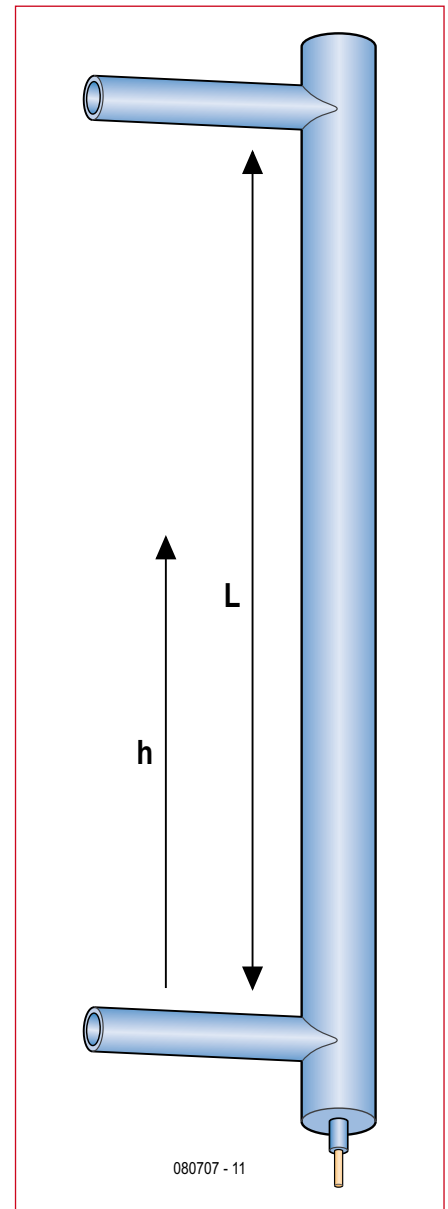


Bild 3. Der Füllstandssensor ist ein Rohr mit isoliertem Innenleiter, das einen zylindrischen Kondensator bildet. L ist die Länge des aktiven Rohrs (mit Alu-Folie umwickelt) und h ist die Höhe des Wasserstands.

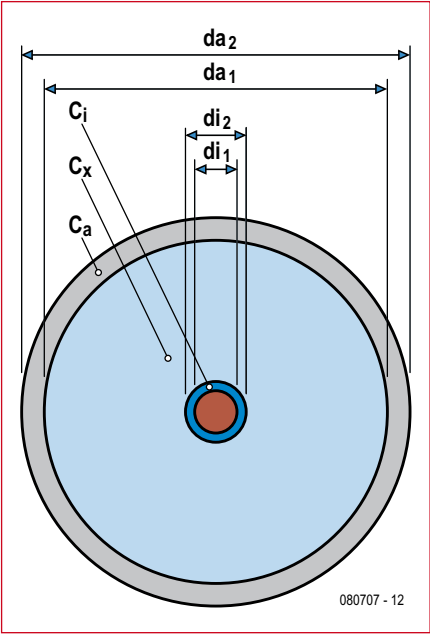


Bild 4. Die Schichten des vom Messrohr gebildeten Kondensators.

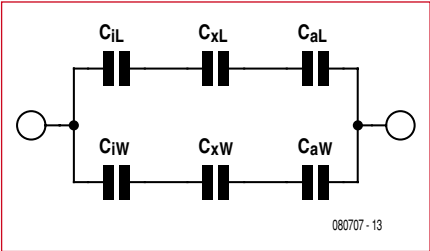


Bild 5. Ersatzschaltbild des Messrohrs.

vollkommen galvanisch getrennt sein. Zwischen den beiden Anschlussstutzen wird das Röhrchen nun mit Alufolie so gleichmäßig wie möglich umwickelt und anschließend wird die Folie mit einem blanken Anschlussdraht mit Isolierband fixiert. Dieser blanke

Anschlussdraht und das aus dem Röhrchen herausragende Ende des Schalt drahtes bilden die Anschlusselektroden für den Messkondensator. Ein Zylinderkondensator ist ein rotations symmetrisches Gebilde, und somit kann die Kapazität ziemlich praxisge recht mit

$$c = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot l}{\ln\left(\frac{da}{di}\right)}$$

angegeben werden, wenn die Länge viel größer als der Durchmesser ist. In der Formel sind:
 ϵ_0 = Dielektrizitätskonstante im Vakuum und Luft ($8,854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm)
 ϵ_r = relative Dielektrizitätskonstante (Materialkonstante)
 l = Länge des Zylinders
 da = Durchmesser bei der äußeren Elektrode (hier da_2)
 di = Durchmesser der inneren Elektrode (hier di_1)

Fasst man die Konstanten zusammen und reduziert man m auf mm , so erhält man die Gleichung:

$$c = \frac{0,0556 \cdot \epsilon_r \cdot l}{\ln\left(\frac{da}{di}\right)} \text{ pF/mm}$$

Besteht nun ein Zylinderkondensator aus mehreren konzentrischen Schichten, so bildet jede Schicht eine Teilkapazität (hier Ca, Cx, Ci). Die Gesamtkapazität ergibt sich nun aus der Serienschaltung der Teilkapazitäten (Bild 4). Teilt man nun den Zylinderkondensator in jenen Teil, der bereits mit Wasser oder einer anderen Flüssigkeit gefüllt ist (CW) und in jenen Teil, der noch mit Luft gefüllt ist (CL), so erhält man als Kapazität des ganzen Röhrchens $CR = CW + CL$ (also eine Parallelschaltung), wobei der Teil in Wasser eine Länge h und der Teil in Luft eine Länge

Tabelle 2

Messrohrdaten zum Diagramm in Bild 6

Steigrohr-Außendurchmesser:	12 mm
Steigrohr-Innendurchmesser:	8,5 mm
Steigrohr-Länge:	300 mm
Innenelektrode Leiterdurchmesser:	0,4 mm
Innenelektrode Außendurchmesser:	0,6 mm
Dielektrizitätskonstante Steigrohr:	3,0
Dielektrizitätskonstante Innenelektrode:	2,3
Dielektrizitätskonstante Elektrolyt:	83

(L-h) besitzt. Das Ersatzschaltbild der Anordnung ist in Bild 5 dargestellt. Die relative Dielektrizitätskonstante von Luft (ϵ_r) ist 1,0, während die von Wasser abhängig von der Temperatur zwischen 55 und 88 beträgt (ca. 83 bei 10°C). Die Dielektrizitätskonstante von transparentem Kunststoff liegt bei 3,0 (Polystyrol, Polycarbonat) beziehungsweise 3,2 (Acrylglas), und die der Schalthaltdrahtisolierung bei 2,3 (Polyethylen) beziehungsweise zwischen 4 und 5 (PVC).

Das ist für unsere Messzwecke prima, da sich für die Teilkapazitäten Cx in Luft und Wasser ein ziemlich großer Unterschied ergibt.

Für die Teilkapazitäten in luftgefülltem Teil gilt:

$$C_{iL} = \frac{0,0556 \cdot 2,3 \cdot (l-h)}{\ln\left(\frac{di_2}{di_1}\right)}$$

$$C_{xL} = \frac{0,0556 \cdot 1 \cdot (l-h)}{\ln\left(\frac{da_1}{di_2}\right)}$$

$$C_{aL} = \frac{0,0556 \cdot 3 \cdot (l-h)}{\ln\left(\frac{da_2}{da_1}\right)}$$

Die Teilkapazitäten im wassergefülltem Teil sind:

$$C_{iW} = \frac{0,0556 \cdot 2,3 \cdot h}{\ln\left(\frac{di_2}{di_1}\right)}$$

$$C_{xW} = \frac{0,0556 \cdot 83 \cdot h}{\ln\left(\frac{da_1}{di_2}\right)}$$

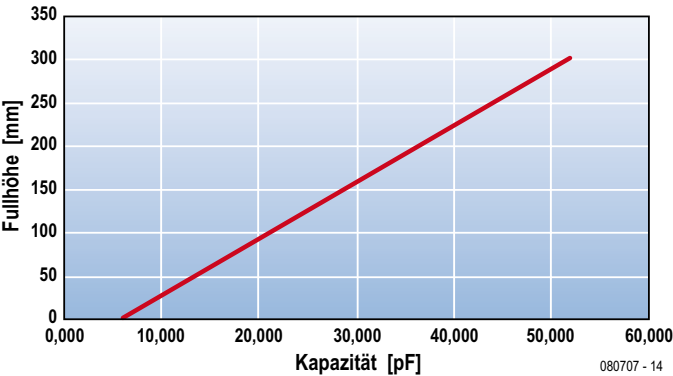


Bild 6. Linearer Anstieg der Kapazität mit der Füllhöhe.

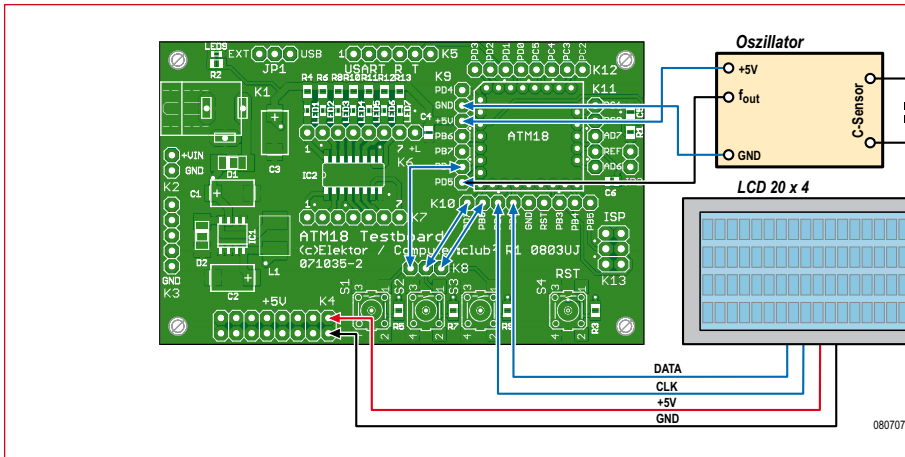


Bild 7. Verdrahtungsplan der ATM-18-Applikation zur Füllstandsmessung.

$$CaW = \frac{0,0556 \cdot 3 \cdot h}{LN\left(\frac{da2}{dal}\right)}$$

Bemüht man nun ein Tabellenkalkulationsprogramm, um den Zusammenhang resultierende Gesamtkapazität zu Wasserstand sichtbar zu machen, entdeckt man, dass dieser Zusammenhang bei Verwendung einer festen Dielektrizitätskonstanten von Wasser 100 % linear ist. **Bild 6** zeigt die Kapazität in Abhängigkeit vom Füllstand bei der in **Tabelle 2** angegebenen Steigrohr-Dimensionierung. Nun kann man mit dem Steigrohrkondensator und einer mehr oder weniger bekannten Induktivität einen Parallelschwingkreis aufbauen, die Resonanzfrequenz messen und mit der bekannten Schwingkreisformel

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{(L \cdot C)}}$$

die Steigrohrkapazität errechnen - und damit die Wasserstandshöhe im Steigrohr ermitteln.

Misst man nun die Kapazität bei leerem Steigrohr C_{min} bei $h=0$ und die Kapazität bei vollem Steigrohr C_{max} bei $h=L$, ergibt sich der Zusammenhang über die Geradengleichung:

$$h = \frac{L \cdot (G_{gemessen} - C_{min})}{C_{max} - C_{min}}$$

Damit spielen weder die mechanische Genauigkeit des Aufbaus noch die Genauigkeit der Referenzinduktivität, noch die Absolutgenauigkeit der Frequenzmessung, das Vorhandensein von parasitären Kapazitäten und die Dielektrizitätskonstanten der eingesetzten Stoffe eine Rolle.

Die Oszillatoreinheit (Bild 2) sollte so nahe wie möglich am Sensor angebracht sein, um einerseits parasitäre Leitungskapazitäten und anderer-

Listing 2

Berechnung der Füllhöhe und Kalibrierung

```
Hmin = 0.0
Hmax = 300.0
Getminmax
If Cmax <= Cmin Then
    Cmin = 7.0
    Cmax = 52.0
End If

...

Sub Calclevel
    'ensure that: Hmax>Hmin
    and Cmax>Cmin
    If Cap < Cmin Then
        Cap = Cmin
    K = Hmax - Hmin
    D = Cmax - Cmin
    If D = 0 Then D = 0.01
    ,avoid division by zero
    K = K / D
    D = -k
    D = D * Cmin
    Y = Cap * K
    Y = Y + D
    Yfix = Y
End Sub

'Calibrate Minimum Value
Sub Calibmin
    Print „Minimum Calibration“
    Bitwait Pind.7 , Set
    Cmin = Cap
    Print "Cmin" ; Cfix ; " pF"
    Eadr = Eadrcmin
    Writeeprom Cmin , Eadr
End Sub

'calibrate Maximaum Value
Sub Calibmax
    Print «Maximum Calibration»
    Bitwait Pind.6 , Set
    Cmax = Cap
    Print "Cmax" ; Cfix ; " pF"
    Eadr = Eadrcmax
    Writeeprom Cmax , Eadr
End Sub
```

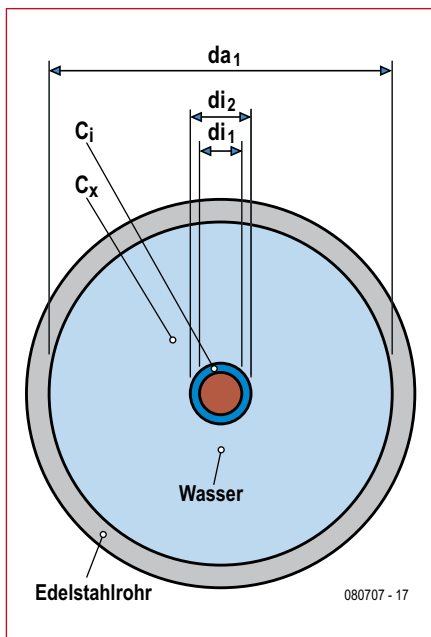


Bild 8. Vereinfachter Aufbau des Sensors mit einem Messrohr aus Edelstahl oder Kupfer und einem isolierten Messingröhrchen als Innenleiter.

seits eine Beeinflussung der Sensorleitungskapazitäten durch nahe leitende Gegenstände zu minimieren.

Software

Das Bascom-Projekt `Level.bas` verwendet auch das LCD und die serielle Schnittstelle. Auf dem LCD wird zusätzlich zu der Frequenz und der Kapazität nun auch der Füllstand in mm angezeigt. Zwei Tasten an PD6 und PD7 dienen der Kalibrierung, wobei die Kalibrierdaten im EEPROM gespeichert werden. Die voreingestellten Daten ordnen eine Kapazität von 7 pF der Höhe 0 mm zu und 52 pF der Höhe 300 mm. Stellt man eine Höhe von 0 mm ein, dann wird die genaue Messkapazität durch einen Druck auf die erste Taste (PD7) in Cmin übernommen und gespeichert. Dann füllt man das Messrohr bis 300 mm und übernimmt entsprechend den Kapazitätsmesswert mit der zweiten Taste (PD6) in Cmax. Die Daten sind nun permanent gespeichert und stehen beim

nächsten Start wieder zur Verfügung (siehe **Listing 2**).

Unter Berücksichtigung der parasitären Leitungskapazitäten von ca. 33 pF stimmen die Messergebnisse erstaunlich genau mit den theoretisch ermittelten Werten überein. Dies lässt darauf schließen, dass auch die Methode über die rein theoretische Berechnung (ohne MIN-MAX Kalibrierung) bei Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit des Elektrolyten mit erträglichem Aufwand realisierbar ist.

Wie bereits vorher erwähnt, funktioniert diese einfache Variante nur, wenn man davon ausgeht, dass die Dielektrizitätskonstante des Elektrolyten (hier Wasser) nach der Kalibrierung halbwegs konstant bleibt. Der Fehler bei Temperaturänderungen des Elektrolyten hängt von den mechanischen Dimensionen des Messröhrchens ab und beträgt beim Testaufbau ca. 1 mm/20 °C.

Ist dies nicht akzeptabel, muss zusätzlich noch die Temperatur des Elektrolyten gemessen und aus einer Tabelle die aktuelle Dielektrizitätskonstante ermittelt werden. Die einfache Kalibriermöglichkeit funktioniert dann leider nicht mehr, und der Flüssigkeitsstand muss über die theoretischen Gleichungen ermittelt werden. In diesem Fall ist die Genauigkeit bei der Steigrohrherstellung, die Exaktheit der Dielektrizitätskonstanten von Röhrchen- und Innenleiterisolierung sowie die Genauigkeit der Referenzinduktivität und der Frequenzmessung für ein gutes Messergebnis sehr wichtig. Ebenfalls muss die parasitäre Zuleitungskapazität genau ausgemessen werden.

Materialauswahl

Als Innenleiter eignet sich ein mit PE (Polyethylen) isolierter Draht besser als ein mit PVC isolierter, da die Dielektrizitätskonstante von PE ziemlich genau zwischen 2,28 und 2,3 liegt. Man kann auch ein Stück Koax-Kabel verwenden,

bei dem man den Außenmantel und das Schirmgeflecht entfernt. Ist das Dielektrikum transparent, handelt es sich um Solid Polyethylen mit $\epsilon_r = 2,3$. Das Röhrchen kann natürlich auch aus Glas bestehen (ϵ_r zwischen 6 und 8). Noch einfacher wird der Aufbau, wenn man zulässt, dass der Sensor mit dem Elektrolyten in galvanischen Kontakt treten darf und der Elektrolyt eine elektrische Leitfähigkeit besitzt (wie zum Beispiel normales Wasser). In diesem Falle fungiert der Elektrolyt als Außenleiter des Kondensators (siehe **Bild 8**). Auch hier ergibt sich wieder ein linearer Zusammenhang zwischen Kapazität und Füllhöhe. Die Temperaturabhängigkeit des Elektrolyten ist weitestgehend ausgeschaltet, sofern dessen Leitfähigkeit viel größer ist als die Leitfähigkeit der Isolierung des Innenleiters. Dies ist zum Beispiel bei Leitungswasser immer gegeben.

Die Herstellung des Sensors ist ein bisschen knifflig, da die Innenelektrode auf einer Seite nicht befestigt werden kann. Am einfachsten ist es, man nimmt ein dünnes Messingröhrchen (vom Baumarkt) und isoliert dieses mit einem Schrumpfschlauch, sodass das Messing nicht mit dem Elektrolyten in Berührung kommt. Nun ist nur noch die Kunst gefragt, Messingröhrchen und Edelstahl- oder Kupferrohr an einer Halterung derart zu befestigen, dass die beiden Rohre so konzentrisch wie möglich sind. Je nach Außenrohrdurchmesser eignet sich ein durchgebohrter Kunststoff-Sektkorken recht gut. Achtung: Entlüftungsbohrung nicht vergessen!

(080707e)

Zusatzinformationen und Downloads:

Auf der Webseite zu diesem Artikel unter www.elektor.de/080707 finden Sie neben den Bascom-Dateien auch die Beschreibung des kapazitiven Füllstandsmessers von Rudolf Pretzenbacher und seine in C programmierte Firmware mit Quellcode zum Download.

Das ATM18-Projekt im Computer:club²

ATM18 ist ein gemeinsames Projekt von Elektor und dem Computer:club² (www.cczwei.de). Die neuesten Entwicklungen und Anwendungen des ATM18-Systems stellt Wolfgang Rudolph vom Computer:club² jeden Monat in der Sendung CC²-tv bei NRW-TV vor. Das hier beschriebene Projekt mit dem ATM18-AVR-Board ist in der **Sendung 29** von CC²-tv zu sehen, die am **19. März 2009** erstmals gesendet wird.

CC²-tv wird von NRW-TV als Kabelprogramm in NRW und als Livestream im Internet gesendet (www.nrw.tv/home/cc2). Als Podcast gibt es CC²-tv bei www.cczwei.de und – ein paar Tage später – auch bei www.sevenload.de.