

**Schwingquarze
in der
modernen
Elektronik**

(v. A. Reichert)

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Schwingquarze.....	4
2.1 Aufbau und Funktion	4
2.2 Elektronische Eigenschaften	6
2.3 Verwendung	11
3. Anwendungsbeispiele	12
3.1 Minisender.....	12
3.2 Signalgeber.....	14
3.3 Quarzuhr.....	18
3.3.1 Grundlagen	18
3.3.2 Experimente	19
3.4 Funkuhr	24
3.4.1 Grundlagen	24
3.4.2 Zeitzeichensender	28
3.4.3 Empfangsschaltungen.....	29
3.4.4 Experimente	33
4. Literatur	39

1. Einleitung

Wenn es nach den Physiklehrbüchern geht, so müssen die Schüler wissen, wie ein Massenspektrometer oder ein Zyklotron funktioniert, aber wie eine Quarzuhr oder eine Funkuhr tickt, erfahren sie nicht. Dabei sind alle diese Geräte, vom physikalischen Standpunkt aus betrachtet, technische Anwendungen elektrischer und magnetischer Felder. Sie haben sicherlich alle ihre Daseinsberechtigung, aber die breite Masse der SchülerInnen lässt sich für Physik eher begeistern, wenn man sich mit technischen Errungenschaften auseinandersetzt, die ihnen aus dem Alltag bereits vertraut sind. Physik verliert so für sie ihren elitären, unnahbaren Charakter. Und der Reiz einer Großforschungseinrichtung erschließt sich sowieso allenfalls einigen Physikfreaks unter den SchülerInnen, die man als Lehrer eh nicht mehr für die Physik motivieren muss. Kein Haushalt betreibt schließlich in seinem Garten einen Teilchenbeschleuniger. Quarzuhren oder Funkuhren hängen oder stehen dagegen heute fast in jedem Raum und die meisten Zeitgenossen tragen ständig eine an ihrem Arm mit sich herum. Technische Anwendungen sind schließlich das Salz in der Suppe der Physik. Welchen Eindruck müssen andererseits die SchülerInnen vom Fach Physik erhalten, wenn ihr junger Physiklehrer ihnen gegenüber den Ausschaltknopf als den besten Knopf am Computer bezeichnet oder ein anderer Physikkollege ihnen die Benutzung eines Taschenrechners untersagt mit der Begründung: „Das sei alles Teufelszeug und fördere nur die Denkfaulheit“. Dabei will auch die richtige Bedienung eines Taschenrechners oder Computers gelernt sein, wie ich immer wieder feststelle. Und in den Laboratorien der Hochschulen wird schon die nächste Computergeneration entwickelt, deren Fähigkeiten die heutigen Computer wie mittelalterliche Rechenschieber erscheinen lassen. Die Nanotechnologie macht's möglich. Wundert es einen da noch, dass immer weniger Schüler, von Schülerinnen ganz zu schweigen, sich für Physikleistungskurse oder -grundkurse begeistern können. Solche Lehrer bieten ihnen doch nur Lösungen für Probleme, die sie ohne ihre Fragen gar nicht haben. Ich will hier nicht den Stab brechen über den ganzen Lehrapparat der Physik, denn ich weiß, dass es auch viele engagierte und innovative Kolleginnen und Kollegen gibt, nur erfahren sie von Seiten der Schulaufsicht in der Regel nur wenig Rückendeckung. Innovation wird vielmehr als Infragestellen des Althergebrachten und lieb gewordener Gewohnheiten empfunden, ist daher zumindest lästig und muss somit mit allen Mitteln bekämpft werden. Ich hoffe, einige Kolleginnen und Kollegen greifen dennoch meine Anregungen auf und versuchen, die in diesem Skript vorgestellten Schaltungen und Erklärungen in ihren Unterricht zu integrieren. Interessierte Schülerinnen und Schüler sind ihnen gewiss.

Stolberg im Februar 2007

Mein besonderer Dank gilt meiner Frau fürs Korrekturlesen. Besonders bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Dr. Piester von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt PTB für die zahlreichen, sehr wertvollen Hinweise zum Thema Funkuhr.

2. Schwingquarze

2.1 Aufbau und Funktion

Schwingquarze sind besonders geschliffene, kurze Kristallzylinder aus Siliziumdioxid SiO_2 . Sie werden mit zwei Kontaktelektroden versehen und zum Schutz gegen Umwelteinflüsse in einem Metallgehäuse untergebracht. Manche werden zusätzlich durch eine Plastikhülle geschützt. Abb. 1 zeigt einige typische Schwingquarze für die Anwendung in elektronischen Schaltungen. Ihre Resonanzfrequenzen betragen von links oben nach rechts unten: 4,0 MHz, 9,216 MHz, 4,194 MHz und 32,768 kHz. Die ersten beiden werden z.B. in kleinen Funkseendern verwendet, der dritte in Präzisionsquarzuhren und der vierte in Quarztaschenuhren, Quarzwanduhr und den entsprechenden Funkuhren.

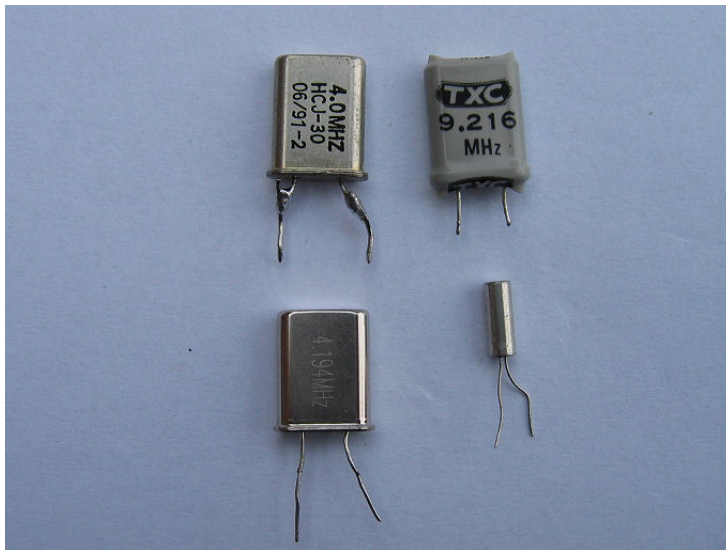


Abb.1: Schwingquarze

Schwingquarze verändern in einem elektrischen Feld ihre Form. Die positiven Siliziumionen werden in Richtung der Feldlinien gezogen, die negativen Sauerstoffionen entgegen der Feldrichtung (s. Abb.2). Ist das Feld von oben nach unten gerichtet, so drängt sich Ion 1 zwischen die Ionen 2 und 6, Ion 4 zwischen 3 und 5 (rechte Zeichnung).

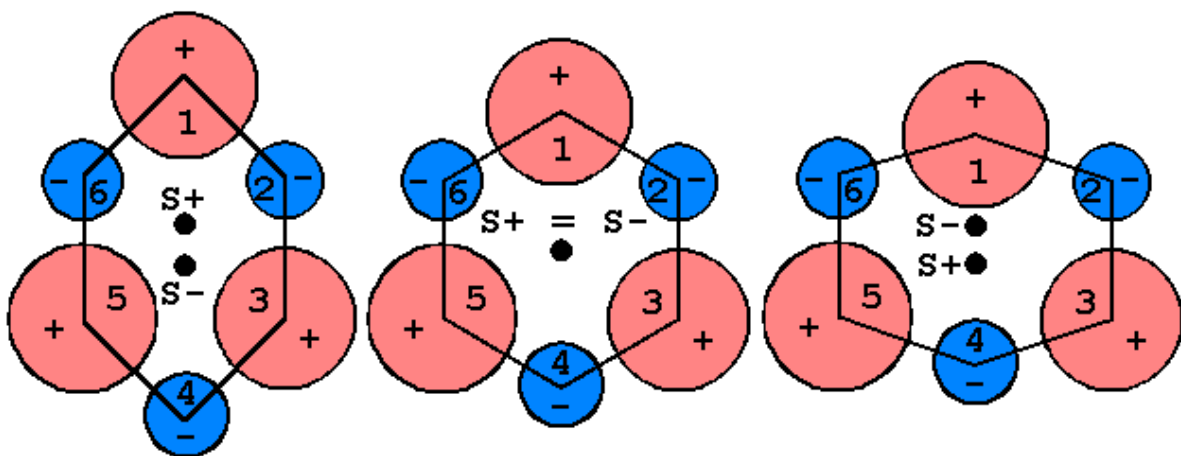


Abb.2: Verlagerung des positiven bzw. negativen Schwerpunktes

Der Kristall wird deformiert. Er wird niedriger und breiter. Bei umgekehrter Feldrichtung werden die Abstände zwischen den Ionen 6, 1 und 2 größer, ebenso die zwischen 3, 4 und 5.

(linke Zeichnung). Der Kristall wird höher und schmaler im Vergleich zum nicht angeregten Zustand, der in der mittleren Zeichnung dargestellt ist. Dabei entspricht eine große, rote Kugel einem 4-fach positiven Siliziumion, eine kleine, blaue Kugel zwei 2-fach negativ geladenen Sauerstoffionen. Regt man einen Quarz mit einem elektrischen Wechselfeld in seiner Eigenfrequenz an, so schwingt er in Resonanz. Wird er umgekehrt durch mechanische Einwirkungen deformiert, so verschieben sich die Si^{4+} -Ionen und O^{2-} -Ionen ein wenig, so dass die Schwerpunkte der positiven und negativen Ladungen nicht mehr zusammen fallen. An den Grenzflächen treten entgegen gesetzte Ladungen auf, die eine Spannung zwischen den Kontaktflächen verursachen. Regt man ihn mechanisch zum Schwingen an, so entsteht zwischen seinen Stirnflächen eine elektrische Wechselspannung, die elektronisch verstärkt werden kann. Sie ist besonders groß, wenn der Kristall in Resonanz schwingt. Die Eigenfrequenz des Quarzes ändert sich nur wenig mit der Temperatur. Er ist daher ein gutes Frequenznormal. Diese Eigenschaft wird in Quarzuhren ausgenutzt. Thermostate halten die Temperatur in Präzisionsuhren konstant. In Atomuhren wird die Frequenz des Piezo-Quarzes (piezein, griech. drücken), wie Schwingquarze auch heißen, ständig mit der Frequenz einer Cs-Spektrallinie verglichen und bei Abweichungen nachgeregelt.

2.2 Elektronische Eigenschaften

Schwingt ein Quarz in Resonanz, so ist die Ladung auf seinen Stirnflächen besonders hoch oder besonders niedrig. Im Wechselfeld fließt dann in den Zuleitungen ein verhältnismäßig hoher bzw. niedriger Umladestrom. Die Impedanz des Quarzes ist gering bzw. hoch. Bei allen anderen Frequenzen liegt sie dazwischen. Außerdem ist die Resonanz sehr scharf ausgeprägt, bei Quarzen für elektronische Schaltungen bis auf 0,01% genau. Dieses Verhalten lässt sich mit der Schaltung nach Abb.1 zeigen.

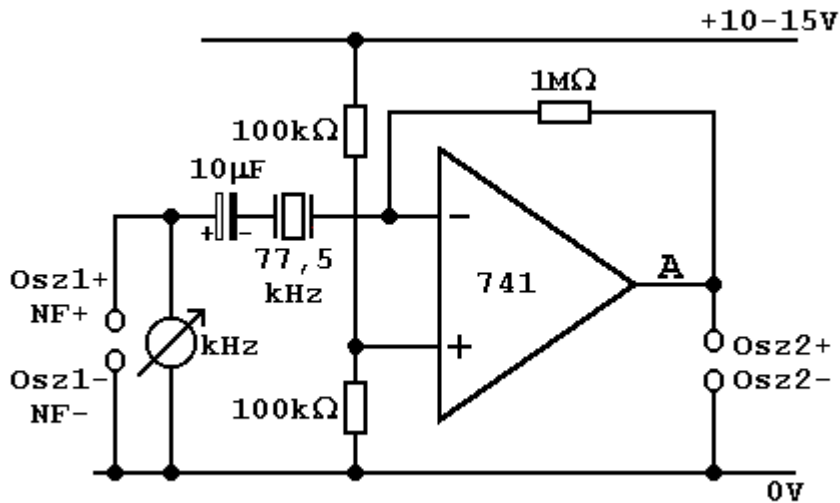


Abb.1: Testschaltung zum Verhalten von Schwingquarzen

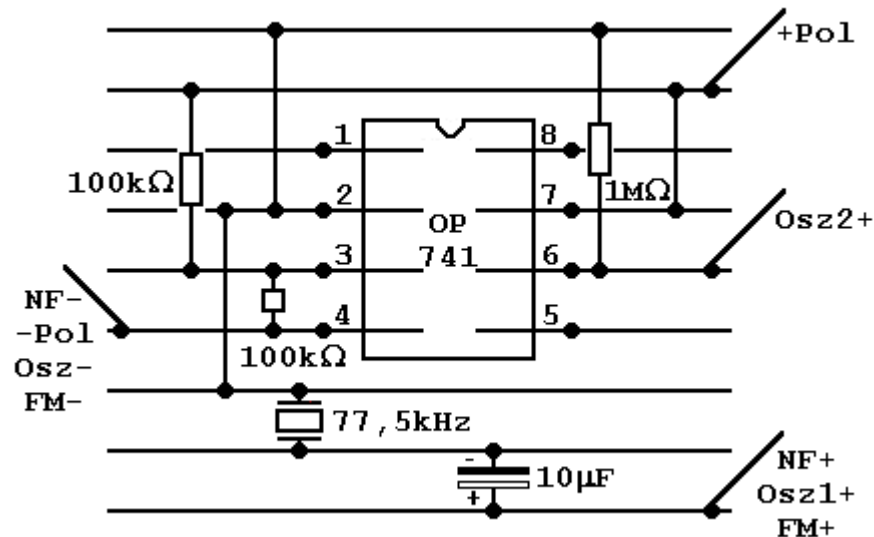


Abb.2: Verschaltung der Testschaltung auf einer Lochrasterplatine

Die Verschaltung auf einer Lochrasterplatine zeigt Abb.2. Die fertige Platine baut man in ein kleines Gehäuse ein, etwa eine leere Mon-Cheri oder Ferrerro-Rocher-Dose, und verlötet die Zuleitungen an Telefonbuchsen, die man im Gehäusedeckel verschraubt. Man benötigt eine rote für den +Pol der Stromquelle, eine grüne für +Pol des Oszillographen, eine gelbe für den +Pol der NF und eine schwarze für den gemeinsamen –Pol der Stromquelle, der NF-Quelle und des Oszillographen. So kann die Schaltung jederzeit mit wenigen Handgriffen im Unterricht in Betrieb genommen werden. Als NF-Quelle dient ein Tonfrequenzgenerator mit einer

Frequenz von 10-100 kHz, wenn man einen Schwingquarz mit $f = 32,768$ kHz (Armbanduhr) oder $f = 77,5$ kHz (Funkuhr) verwendet. Dabei zeigt sich, dass Quarze aus einer Armbanduhr häufig nicht auf ihrer Grundfrequenz in Resonanz schwingen, sondern auf der 1. Oberwelle, also mit $f = 65,536$ kHz.

Fährt man das ganze Frequenzspektrum in aufsteigender Richtung ab, so beobachtet man in der Nähe der Resonanzfrequenz des Quarzes am Ausgang des OP den Spannungsverlauf in Abb.3. Dabei sollte man auf Kanal 1 des Oszillographen darauf achten, dass der Tonfrequenz-generator über den gesamten Frequenzbereich ein Signal gleicher Spannung liefert. Anderenfalls muss man sie für einzelne Frequenzen von Hand nachregeln. Die Frequenz misst man am einfachsten zusätzlich mit einem Digitalmultimeter, die häufig neben den üblichen elektrischen Größen auch die Frequenz einer Wechselspannung anzeigen können. Am Oszillographen lässt sie sich nur ungenau bestimmen. Aus dem Versuchsergebnis wird deutlich, dass ein Schwingquarz eigentlich zwei Resonanzfrequenzen besitzt, eine Serienresonanzfrequenz f_s und eine Parallelresonanzfrequenz f_p . Beide liegen sehr nahe beieinander. Aus Untersuchungen an vielen verschiedenen Quarzen findet man empirisch folgenden Zusammenhang zwischen beiden Frequenzen

$$f_p/f_s = 1,0029.$$

Aus der Kurve in Abb.3 erhält man:

$$f_p/f_s = 77,6 \text{ kHz}/(77,4 \text{ kHz}) = 1,0026.$$

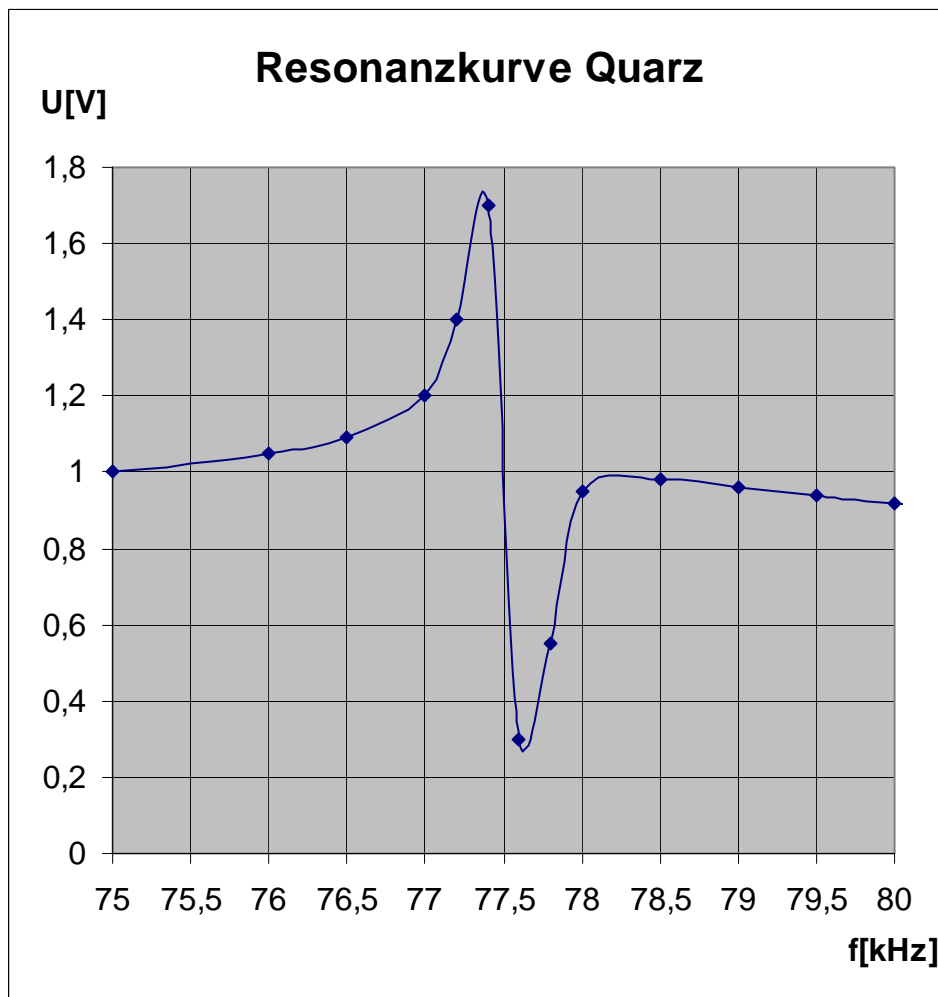


Abb.3: Spannungsverlauf in der Nähe der Resonanz

Der Quarz verhält sich also zugleich wie eine Siebkette mit einem Impedanzminimum und ein Sperrkreis mit einem Impedanzmaximum. Das macht die Abbildung 4 deutlich. Sie lässt sich aus der Kurve 3 mit dem Verstärkungsfaktor V des OP berechnen. Für ihn gilt:

$$V = U_A/U_E = R_1/Z.$$

Darin bedeuten:

U_A : Ausgangsspannung am OP,

U_E : Eingangsspannung am OP,

R_1 : Widerstand im Rückkopplungsweig des OP, hier $1M\Omega$ und

Z : Impedanz des Schwingquarzes.

Stellt man die Gleichung nach Z um, so ergibt sich:

$$Z = R_1*U_E/U_A.$$

Da R_1 und U_E konstant sind, steigt mit sinkender Impedanz die Ausgangsspannung U_A .

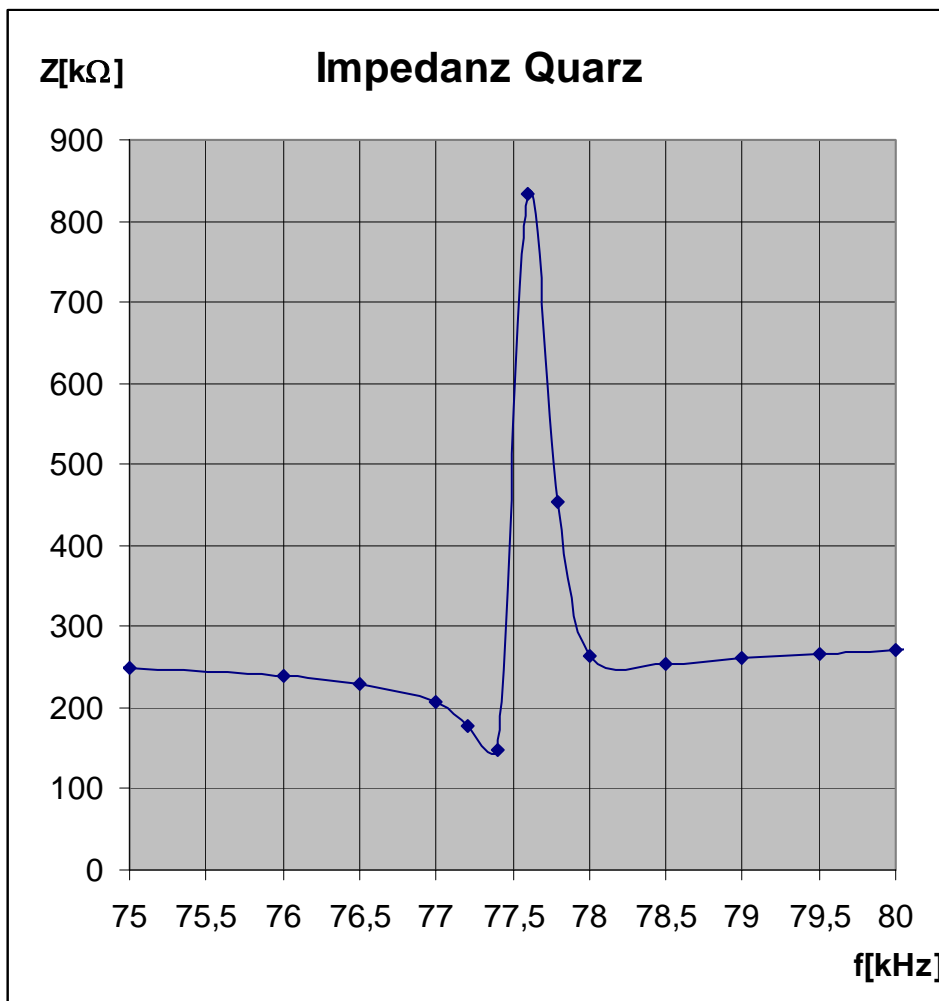


Abb.4: **Impedanz Z des Quarzes in Abhängigkeit von der Frequenz f**

Da ein Schwingquarz zwei Resonanzfrequenzen besitzt, findet man in vielen Elektronikbüchern als Ersatzschaltung für einen Quarz den Schaltplan in Abb.5.^{1),2)}

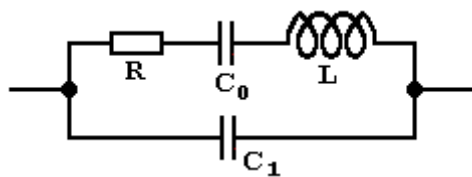


Abb.5: Ersatzschaltbild eines Piezo-Quarzes

Dass diese Deutung nicht ganz richtig ist, zeigen die folgenden Überlegungen. Für die Impedanz Z_1 einer Siebkette, also einer Reihenschaltung aus Widerstand, Kondensator und Spule gilt:

$$Z_1 = \sqrt{R^2 + (R_L - R_{C0})^2}$$

$$= \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/(\omega C_0))^2}.$$

Unter Berücksichtigung des parallel geschalteten Kondensators C_1 erhält man für die Impedanz Z_2 :

$$Z_2 = 1/\sqrt{1/Z_1^2 + 1/R_{C1}^2}$$

Für einen Quarz mit $f = 77,5$ kHz gelten etwa folgende Werte³⁾:

$$L = 3127,11 \text{ H}$$

$$R = 17 \text{ k}\Omega$$

$$C_0 = 1,35 \text{ fF}$$

$$C_1 = 1,25 \text{ pF}$$

Wertet man beide Funktionen für diese Angaben mit Excel aus, so ergeben sich Abb. 6 und Abb. 7.

Aus den Abbildungen kann man erkennen, dass nur bei der gesamten Ersatzschaltung die Resonanz ähnlich scharf ausgeprägt ist wie bei einem wirklichen Quarz. Die Impedanz bei Frequenzen unterhalb und oberhalb der Resonanzfrequenz liegt jedoch wesentlich höher als beim realen Quarz (vgl. Abb.4). Vermutlich ist der in der Literatur angegebene Wert für die Kapazität C_1 zu niedrig. Der Kondensator C_1 bestimmt nämlich bei tiefen und hohen Frequenzen die Impedanz, da er in diesen Bereichen einen sehr viel kleineren Widerstand hat als die Siebkette, weil seine Kapazität sehr viel höher ist als die des Kondensators in der Siebkette. Nur in der Nähe der Resonanzfrequenz kehren sich die Verhältnisse um. Dort heben sich der induktive Widerstand der Spule und der kapazitative Widerstand des Kondensators in der Siebkette gegenseitig auf. Übrig bleibt nur der Ohmsche Widerstand. Und der ist viel kleiner als der kapazitative Widerstand von C_1 . Außerdem liegt er laut Literaturangabe mit $17 \text{ k}\Omega$ wesentlich tiefer als der gemessene Resonanzwiderstand von ca. $150 \text{ k}\Omega$. Besonders auffällig ist jedoch, dass der parallel geschaltete Kondensator C_1 keineswegs eine zweite Resonanzfrequenz verursacht, wie man sie bei allen Quarzen beobachtet. Die Ersatzschaltung beschreibt das Verhalten eines wirklichen Quarzes also nur unzureichend.

Die Resonanzfrequenzen lassen sich bei realen Quarzen in geringen Grenzen verändern, in dem man einen Trimmer von $20\text{-}60 \text{ pF}$ zum Quarz in Reihe oder parallel schaltet. Ein Kondensator mit $C = 20 \text{ pF}$ in Reihe erhöht z.B. die Serienresonanzfrequenz des oben untersuchten Quarzes um ca. $0,06\%$, schaltet man ihn parallel zum Quarz, so sinkt die Parallelresonanzfrequenz etwa um den gleichen Betrag.

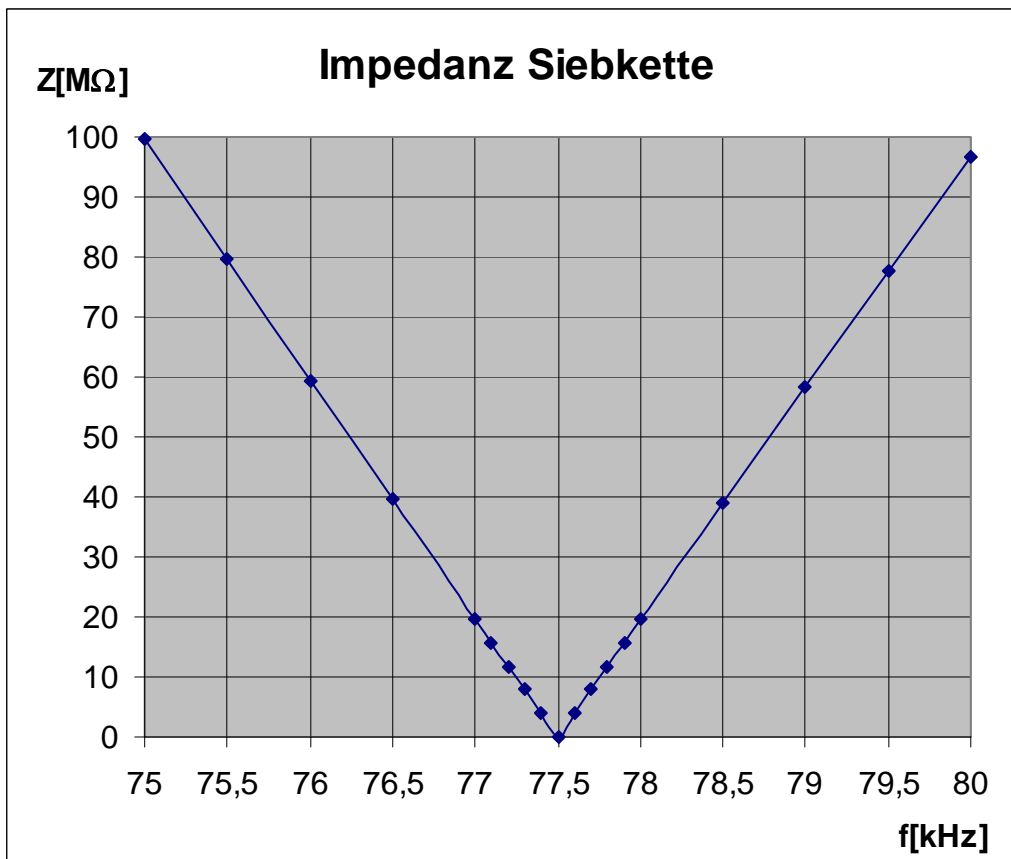


Abb. 6: Abhängigkeit der Impedanz Z von der Frequenz f für die Siebkette

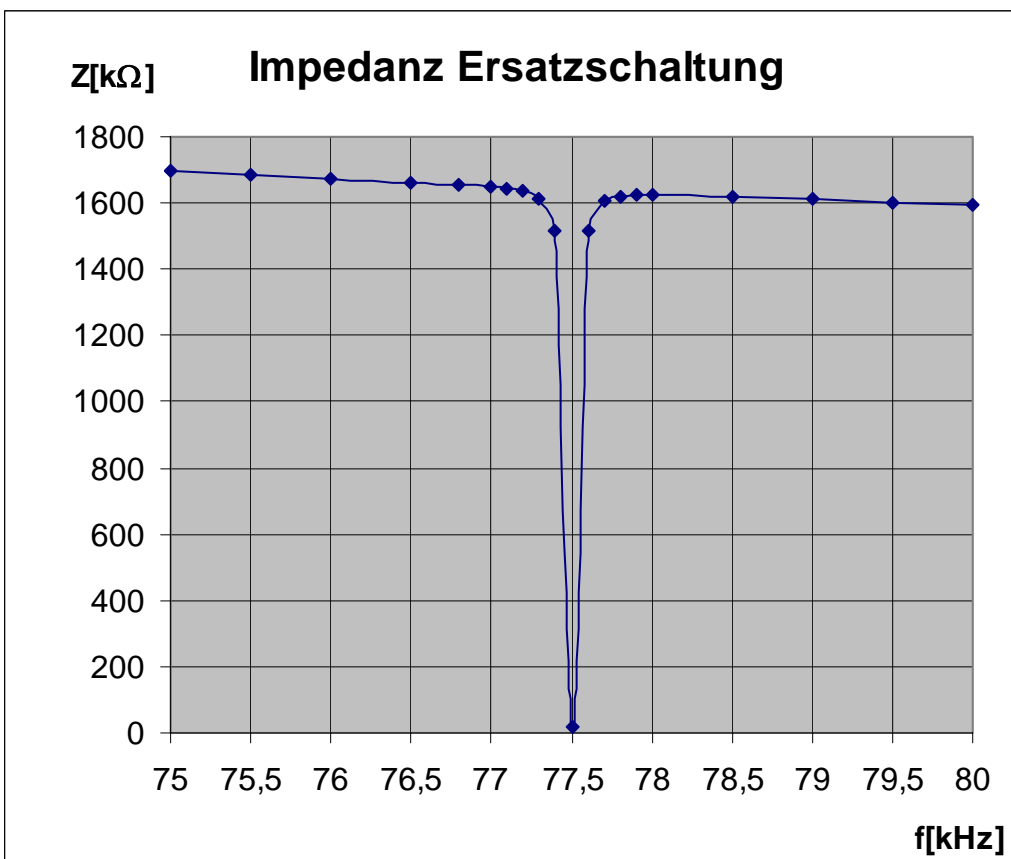


Abb. 7: Abhängigkeit der Impedanz Z von der Frequenz f für die ganze Ersatzschaltung

2.3 Verwendung

Piezo-Quarze findet man heute in vielen elektronischen Schaltungen. Einige Schaltbeispiele, die Sie selbst nachbauen können, lernen Sie in Kapitel 3 kennen. Da die Frequenz der Schwingquarze recht stabil ist, eignen sie sich gut für kleine Funksender, die auf einer möglichst konstanten Frequenz senden müssen. So gewährleisten sie einerseits einen gleich bleibenden Empfang und vermeiden andererseits Störungen benachbarter Sender ähnlicher Sendefrequenz. Die benötigte Bandbreite des Senders sinkt auf ein Minimum, so dass ein Frequenzband mehr Sender unterschiedlicher Frequenz aufnehmen kann. Mit LC-Schwingkreisen ist das ein Problem, da ihre Frequenz wegen der Toleranz und der Temperaturdrift der verwendeten Bauteile doch erheblich schwanken kann. Die gute Frequenzkonstanz der Piezoelemente macht auch die Genauigkeit moderner Quarzuhren erst möglich. Da die Resonanzfrequenzen der Quarze in Uhren im Ultraschallbereich liegen, müssen sie allerdings durch eine Frequenzteilerschaltung auf den Sekundentakt von 1 Hz herunter transformiert werden. Mit dem Ausgangssignal der Teilerschaltung kann man einen Schrittmotor oder einen Digitalzähler direkt ansteuern. Da der Piezokristall wie eine Siebkette wirkt, also wie eine elektronische Schaltung, die aus einem Frequenzspektrum nur eine geringe Bandbreite an Frequenzen durchlässt, eignen sie sich auch hervorragend als elektronische Frequenzfilter, vor allem wenn man sie mit einem Operationsverstärker kombiniert. Diese Fähigkeit wird in Funkuhren ausgenutzt, um aus dem von der Antenne empfangenen Spektrum an Langwellen die DCF77-Frequenz von 77,5 kHz optimal heraus zu filtern.

Die mechanischen Eigenschaften der Schwingquarze erlauben eine Vielzahl weiterer Anwendungen. Es wurden piezoelektrische Stoffe entwickelt, bei denen man durch einen Druck von einigen MPa Spannungen von mehreren kV erzeugen kann. Sie werden in Feuerzeugen oder Gasanzündern verwendet, bei denen die durch einen kräftigen Schlag erzeugte Spannung ausreicht, einen elektrischen Funken zu erzeugen, der das Gas zündet. Mikrofone und Ultraschallempfänger sind weitere Beispiele. Die darin erzeugten kleinen Wechselspannungen werden verstärkt und z.B. über Lautsprecher hörbar gemacht, oder zur Messung der Geschwindigkeit nach dem Dopplerprinzip in Radaranlagen genutzt. Regt man einen Quarzkristall mit einem elektrischen Wechselfeld im Hörbereich an, so sendet er Schallwellen aus. Solche Piezolautsprecher sind heute vielseitig in Gebrauch, etwa in kleinen Signalgebern in Waschmaschinen, Wäschetrocknern, Rauchmeldern, Eierkochern oder kleinen Eieruhren. Vandalensichere Tastaturen erhält man, wenn die Tasten aus Piezokristallen bestehen, die durch den Druck des Fingers unmerklich verformt werden. Die entstehende kleine Spannung wird elektronisch verstärkt und als Tastendruck weiterverwertet. Sie unterliegen keinem mechanischen Verschleiß. Roboter fühlen mit solchen „Kraftsensoren“ aus Piezokristallen. Auch in Tintenstrahldruckern haben die Schwingquarze Einzug gehalten. So verengt ein elektrisch angesteuertes Piezoelement den Tintenkanal und drückt ein Tröpfchen Farbe aus der Düse.

3. Anwendungsbeispiele

3.1 Minisender

Abb.1 zeigt den Schaltplan eines kleinen Minisenders, wie er in Minispionen oder kleinen Funkgeräten eingesetzt wird, allerdings mit einer anderen Sendefrequenz.

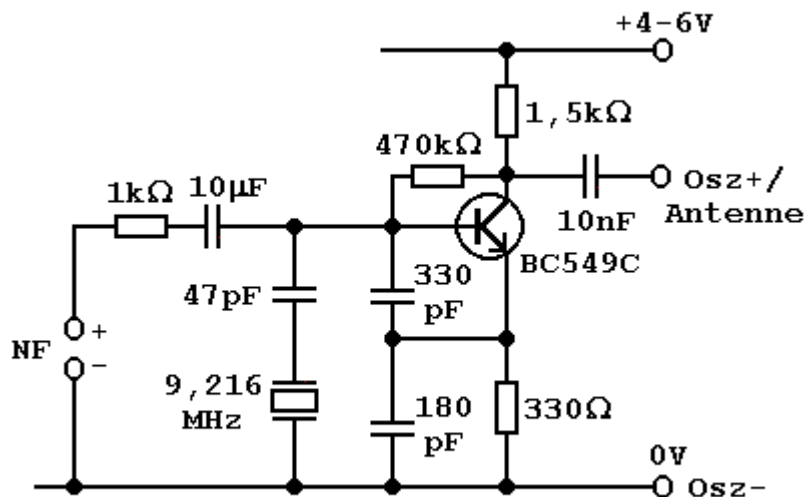


Abb.1: Schaltplan eines kleinen KW-Minisenders

Das Herzstück der Schaltung ist ein Colpitt-Oszillator mit der typischen Emitter/Basis-Rückkopplung. Der Schwingquarz an der Basis des Transistors sorgt dafür, dass sich von den vielen möglichen Schwingungsfrequenzen nur die zu besonders kräftigen Schwingungen aufschaukelt, die der Resonanzfrequenz des Quarzes entspricht. Als Antenne dient ein Kabel, dessen optimale Länge l sich wie folgt berechnen lässt:

$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{4 \cdot 9,216 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 8,13 \text{ m}$$

Die eingespeiste Niederfrequenz bewirkt eine Amplitudenmodulation der HF-Trägerfrequenz. Sie entnimmt man dem Ohrhörerausgang eines Radios oder Walkmans oder einem Tonfrequenzgenerator. Empfangen kann man den Minisender, der nur in geschlossenen Räumen und nur im Unterricht eingesetzt werden darf, mit einem handelsüblichen KW-Weltempfänger auf einer Frequenz von ca. 9,2 MHz. Schließt man den Antennenausgang an einen Oszillographen an, so kann man mit der Schaltung auch die Vorgänge bei Amplitudenmodulation demonstrieren (vgl. A. Reichert: Radiosender/Radioempfänger). Die Verschaltung auf einer Lochrasterplatine finden Sie in Abb.2. Die fertige Platine setzt man am einfachsten in ein kleines Gehäuse ein, etwa eine leere Mon-Cheri oder Ferrero-Rocher-Dose. Die Zuleitungen verlötet man an verschiedenen farbigen Telefonbuchsen, die man am Gehäuse verschraubt. Man benötigt eine rote für den +Pol der Stromquelle, eine grüne für die Antenne/ den Oszillographen, eine gelbe für den +Pol der NF und eine schwarze für den gemeinsamen –Pol der Stromquelle, der NF-Quelle und des Oszillographen. So kann der Sender jederzeit mit wenigen Handgriffen im Unterricht in Betrieb genommen werden.

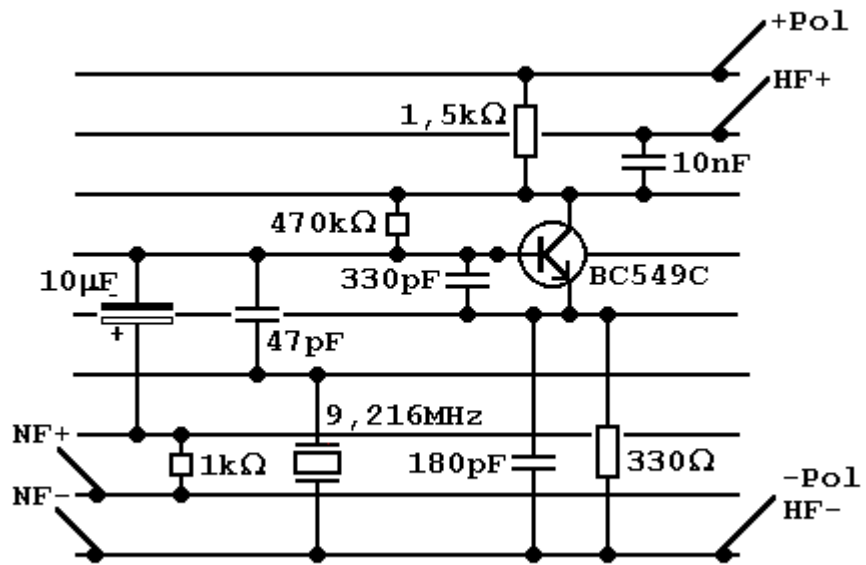


Abb.2: Verschaltung des KW-Minisenders auf einer Lochrasterplatine

3.2 Signalgeber

Ist die Waschmaschine mit dem Waschvorgang fertig oder hat der Trockner die Wäsche trocken, so strahlen sie einen hohen Signalton ab, um die Hausfrau oder den Hausmann auf das Ende des Vorganges hinzuweisen. Abb.1 zeigt eine mögliche Schaltung für einen solchen Signalgeber.

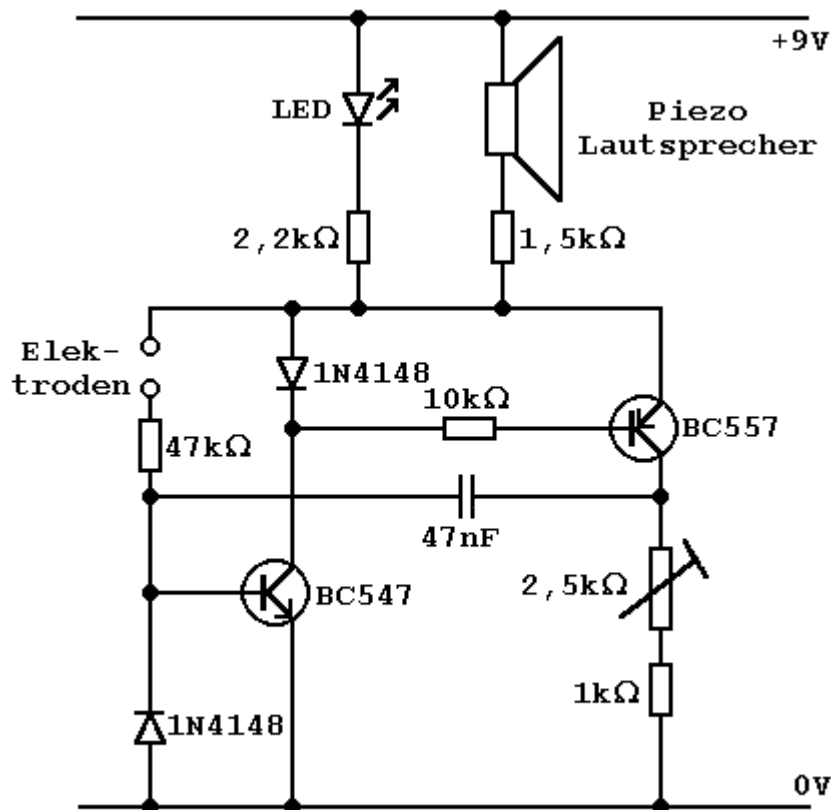


Abb.1: Schaltplan eines Signalgebers

Das Herzstück der Schaltung ist ein astabiler Multivibrator, aufgebaut mit einem komplementären Transistorpaar BC 547 und BC 557. Die Frequenz des Multivibrators wird einerseits durch den Kondensator $C = 47 \text{ nF}$ zwischen den beiden Transistoren und andererseits durch den Messwiderstand zwischen den Elektroden bestimmt. Ist er groß, so gibt der Signalgeber einen tiefen Ton ab. Die Verschaltung auf einer Lochrasterplatine zeigt Abb.2. Die fertige Platine baut in ein kleines Gehäuse ein, das ein Batteriefach für eine 9 V-Blockbatterie enthält.

Diese kleine Schaltung lässt sich im Unterricht vielseitig verwenden. Mit ihr kann man auch bei schlechten Leitern wie nassem Papier, menschlichem Körper usw. die Leitfähigkeit durch eine optische und akustische Anzeige demonstrieren. Die Schüler der unteren Klassen, die noch kein Strommessgerät kennen, sind davon immer wieder fasziniert. Wenn man mit den trockenen oder feuchten Fingern an den Elektroden, die nur aus einfachen Kabeln mit Buchsensteckern bestehen, etwas herumspielt, so kann man die Tonhöhe variieren und fast eine kleine Melodie spielen.

Aber auch in einem so genannten heißen Draht (s. Abb.3) leistet sie am Tag der offenen Tür an unserer Schule immer wieder wertvolle Dienste. Da die Stromaufnahme außerdem sehr gering ist, hält eine 9 V-Blockbatterie lange durch. Den starren, blanken Kupferdraht befestigt man mit zwei Lüsterklemmen auf einem Stück Dachlatte, die man mit Holzschrauben an der

Latte verschraubt. Das eine Ende des Drahtes verbindet man mit dem einen Elektrodeneingang des Signalgebers. In den zweiten Eingang steckt man ein Kabel, an dem sich am anderen Ende eine Krokodilklemme befindet. An ihr ist eine Unterlegscheibe befestigt, die den Metalldraht umschließt. Die Aufgabe besteht nun darin, den Metallring in möglichst kurzer Zeit durch den Metalldraht von einer Seite der Dachlatte zur anderen Seite zu führen, ohne den Metalldraht zu berühren. Ansonsten schlägt der Signalgeber Alarm. Den Schwierigkeitsgrad des heißen Drahtes kann man beliebig steigern, in dem man den Kupferdraht in vielfältiger Weise in alle Richtungen verbiegt oder den inneren Durchmesser der Unterlegscheibe möglichst klein wählt. Für Anfänger sollte man an einigen Stellen des Drahtes Ruhepunkte einrichten, in dem man den Draht mit etwas Isolierband umwickelt.

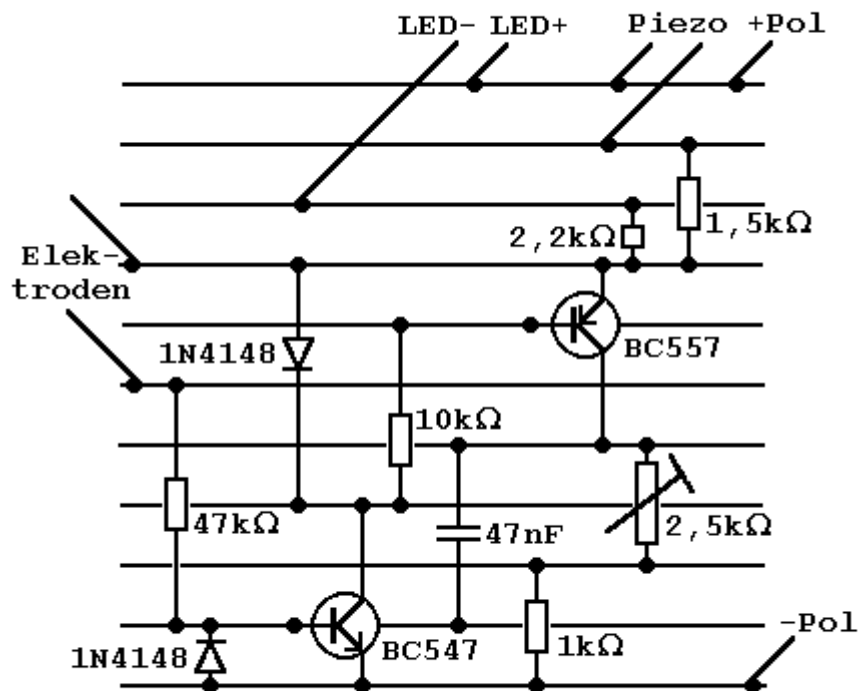


Abb.2: Verschaltung des Signalgebers auf einer Lochrasterplatine

Ferner kann man mit der kleinen Schaltung Glühlampen auf ihre Funktionstüchtigkeit prüfen. Bei kleinen Birnchen ist ein durchgebrannter Glühdraht mit bloßem Auge kaum zu erkennen. Wenn man den Aufbau eines Netzkabels bespricht, so kann man mit ihr außerdem herausfinden, welche Leitungen mit welchem Teil des Steckers verbunden sind. Die verschieden farbigen Drähte lassen sich so als Phase, Nullleiter oder Erdleiter identifizieren. Diesen Test darf man natürlich nur bei ausgeschaltetem Netzstrom durchführen. Der Nachbau lohnt sich also in jedem Falle. Die Schaltung ist auch für Schülerübungen geeignet, da sie mit einer 9 V-Blockbatterie betrieben wird.

Piezo-Schallwandler lassen sich im Unterricht im Themenbereich Akustik auch an anderen Stellen vielseitig einsetzen. Ein paar kleine Versuche mögen das verdeutlichen.



Abb.3: **Heißer Draht mit dem Signalgeber**

Versuch 1:

Durchführung:

Man lötet an einen Piezo-Schallwandler des Typs EPZ-35MS29 zwei Anschlusslitzen und verbindet ihn über einen Klinkenstecker mit dem Ohrhörerausgang eines Radios oder Walkmans. Dabei muss man je nach Gerät den Lautstärkereglern mehr oder weniger weit aufdrehen. Dann drückt man den Piezo-Schallwandler auf den Boden eines leeren Joghurtbechers oder auf den Tisch.

Beobachtung:

Zunächst hört man nur einen leisen Ton. Beim Berühren des Tisches oder des Joghurtbechers wird das Signal erheblich verstärkt.

Erklärung:

Die schwingende Fläche eines Piezo-Schallwandlers ist recht klein, so dass bei den geringen Spannungen am Ohrhörerausgang nur ein schwaches Schallsignal abgestrahlt wird. Der Joghurtbecher und der Tisch wirken wie der Resonanzkasten eines Musikinstrumentes. Die schwingende Fläche wird erheblich vergrößert und damit die Lautstärke.

Versuch 2:

Durchführung:

Man lötet an die folgenden Piezo-Schallwandler

- a) **EPZ-20MS64**
- b) **EPZ-27MS44**
- c) **EPZ-35MS29**

jeweils zwei Anschlusslitzen und verbindet sie nacheinander über zwei Bananenstecker mit einem Tonfrequenzgenerator. Man variiert die Frequenz am Tonfrequenzgenerator zwischen

1kHz und 10 kHz bei gleich bleibender Amplitude. Außerdem misst man den Durchmesser der Schallwandler. Um die Resonanzfrequenzen genauer bestimmen zu können, schließt man ein Mikrofon an einen Oszillographen an und hält das Mikrofon in die Nähe des Schallwandlers.

Beobachtung:

Jeder der Schallwandler ertönt bei zwei bestimmten Frequenz f_{R1} und f_{R2} besonders laut. Die beiden Frequenzen liegen nahe beieinander und können mit dem Gehör nicht unterschieden werden. Sie sind umso tiefer, je größer der Durchmesser d des Schallwandlers ist. Da unser Hörempfinden im relevanten Frequenzbereich einen sehr unregelmäßigen Frequenzgang aufweist, kann man die Resonanzen sehr viel genauer bestimmen, wenn man die Schallamplitude mit einem Mikrofon und einem Oszillographen sichtbar macht. Außerdem sind die Resonanzen nicht sehr ausgeprägt, was bei der Wiedergabe eines Frequenzbereiches in Anwendungsschaltungen von Vorteil ist, da sonst einzelne Frequenzen unnatürlich überhöht abgestrahlt würden. Man erhält folgende Messtabelle. Darin ist f_R die vom Hersteller angegebene Resonanzfrequenz.

Schallwandler	f_{R1} [Hz]	f_{R2} [Hz]	f_R [Hz]	d [mm]
EPZ-20MS64	6300	6600	6400±500	20
EPZ-27MS44	4000	4300	4400±500	27
EPZ-35MS29	2500	2700	2900±500	35

Folgerung:

Piezo-Schallwandler weisen, wie in Kapitel 2.2 schon erläutert, zwei Resonanzfrequenzen auf. Sie sind umso tiefer, je größer der Piezokristall und das Metallplättchen sind, auf den der Piezokristall geklebt wurde. Ähnliche Erfahrungen macht man auch bei anderen schwingenden Gegenständen. Die langen Metallplättchen einer Mundharmonika erzeugen die tiefen Töne, die kurzen die hohen. Verkürzt man eine Geigen- oder Gitarrensaite, so wird der Ton höher. Bei einer Blockflöte ist der Ton umso tiefer, je länger die schwingende Luftsäule ist. Außerdem fällt auf, dass die 1. Zahl in der Bezeichnung des Schallwandlers dem Durchmesser in mm entspricht und die 2. die mittlere Resonanzfrequenz angibt, wenn man an die Zahl zwei Nullen anfügt.

Versuch 3:

Durchführung:

Man taucht einen Schallwandler aus Versuch 2 bei seiner Resonanzfrequenz in ein Becherglas mit Wasser.

Beobachtung:

Man hört das Signal auch außerhalb des Wassers.

Folgerung:

Wasser leitet die Schallwellen.

3.3 Quarzuhr

3.3.1 Grundlagen

Schwingquarze sind einer breiten Öffentlichkeit bekannt geworden durch die Quarzuhr. Abb.1a zeigt das Innenleben einer Quarzarmbanduhr, Abb.1b die Elektronik einer Quarzwanduhr.



Abb.1a:
Quarzarmbanduhr

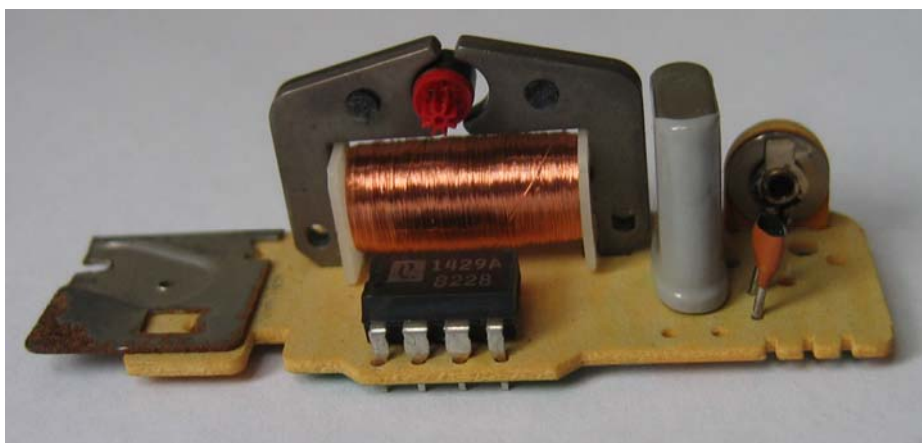


Abb. 1b:
**Quarz-
wanduhr**

Abb.1: Innenleben einer Quarzarmbanduhr

Deutlich erkennt man bei der Armbanduhr links oben den Quarz in Form eines silbriggrauen kleinen Zylinders, links unten das nur 4*5 mm große IC als schwarze Kreisfläche, in der Mitte oben die Knopfzelle als silbriggraue Kreisscheibe und rechts unten die Antriebsspule des

Zeigerwerkes aus rotbraunem Kupferdraht. Bei der Wanduhr sieht man rechts außen den Abstimmkondensator für den Quarz, links daneben als grauen Quader den Schwingquarz, in der Mitte die Erregerspule und den Läufer des Motors, sowie im Vordergrund das IC. Der zweite Kondensator dient möglicherweise dazu, den Steuerimpuls für den Elektromagneten zu erzeugen (s. Versuch 1). Den möglichen Schaltplan einer Quarzuhr entnehmen Sie Abb.2.²⁾ Der Schwingquarz der Armbanduhr hat eine Resonanzfrequenz $f = 32,768 \text{ kHz}$, der der Wanduhr eine Frequenz $f = 4,194304 \text{ MHz}$. Die für den Schwingkreis benötigte Elektronik ist zusammen mit der Frequenzteilerschaltung im IC untergebracht. Die Pinbelegung des IC's variiert je nach Hersteller, stets sind aber jeweils 2 Anschlüsse für den Quarz, die Erregerspule und die Betriebsspannung vorhanden. In modernen Schaltungen fehlt häufig der Abstimmkondensator in Abb.1b bzw. Abb.2. Die Teilerschaltung regelt die Frequenz des Taktgebers auf $f = 0,5 \text{ Hz}$ herunter. Mit dieser Frequenz wird ein kleiner Elektromotor angesteuert, der sich bei jedem Ausgangsimpuls um einen Winkel von 180° weiterdreht und über eine Untersetzung den Sekundenzeiger der Uhr um 6° weiterstellt. Eine weitere Zahnraduntersetzung liefert die Minuten- und Stundenanzeige. Statt eines Zeigerwerkes kann das IC auch einen Digitalzähler takten, der die Sekunden, Minuten und Stunden zählt und mit 7-Segmentanzeigen, die Leuchtdioden enthalten, sichtbar macht.

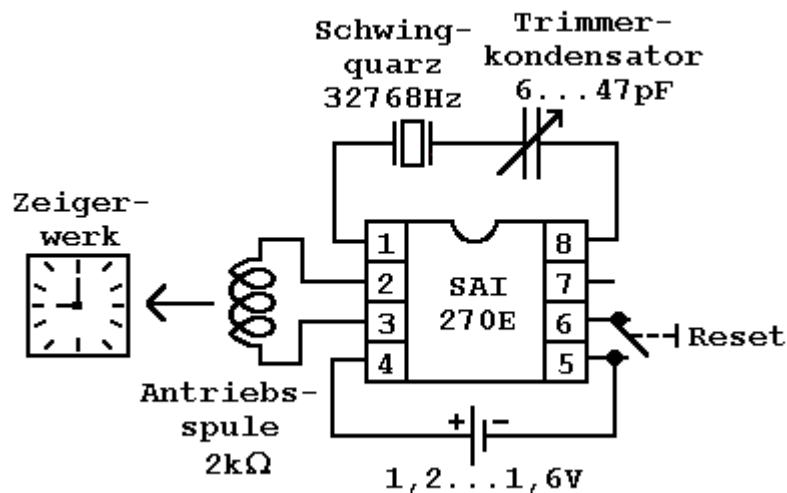


Abb.2: Schaltplan einer Quarzarmbanduhr

3.3.2 Experimente

Zunächst sollen ein paar Versuche beschrieben werden, die man mit einem Uhrwerk durchführen kann, das man aus einer Quarzwanduhr ausgebaut hat. Dazu lötet man an die Schaltung kurze Kabel an die Ausgänge des Schwingquarzes, der Ankerspule und den Plus- und Minuspol.

Versuch 1:

Durchführung:

Man schließt die Uhr an eine Gleichstromquelle mit einer Spannung von 2-3V an oder betreibt sie mit ein oder zwei Batterien von jeweils 1,5 V. Die Ausgänge der Erregerspule verbindet man mit einem Oszillographen. Anschließend legt man die Ausgänge an einen Piezoquarz EPZ-27MS44.

Beobachtung:

Auf dem Schirm beobachtet man die Kurve in Abb.3. Der Piezoquarz knackt leise im 1-Sekundentakt.

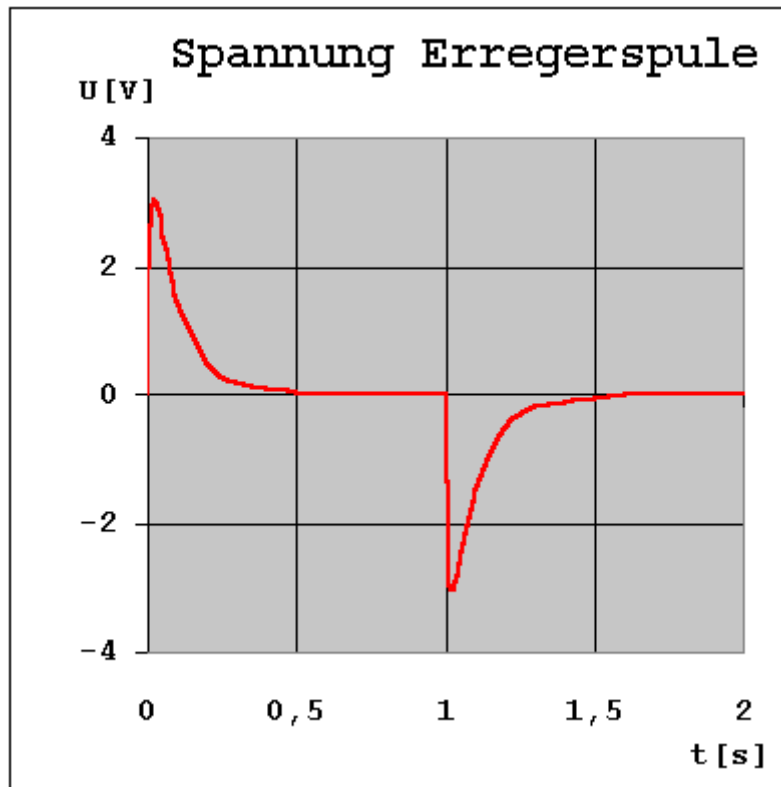


Abb.3: Spannung an der Erregerspule

Erklärung:

Durch den positiven Spannungsimpuls dreht sich der Läufer, der aus einem Rundmagneten (s. Versuch 2) besteht, um 180° , der negative bewegt ihn im gleichen Drehsinn um 180° weiter, so dass er wieder seine Ausgangsstellung erreicht. Da zwei positive Impulse zeitlich in einem Abstand von 2s aufeinander folgen, ändert sich die Polung des Erregermagneten mit einer Frequenz von 0,5 Hz, der Motor rotiert mit dieser Drehfrequenz. Beim verwendeten Piezoquarz spielt die Polung der Signale keine Rolle. Er knackt daher im Sekundentakt, also mit einer Frequenz von 1 Hz.

Versuch 2:

Durchführung:

Man hält den Rotor des Motors an eine Büroklammer. Anschließend dreht man ihn über einer kleinen Kompassnadel.

Beobachtung:

Die Büroklammer wird angezogen, die Kompassnadel dreht sich mit dem Magneten mit.

Folgerung:

Der Läufer des Motors ist ein kleiner Runddauer magnet, dessen eine Halbkreishälfte ein Nordpol, die andere ein Südpol ist.

Versuch 3:

Durchführung:

Man schließt die Ausgänge des Schwingquarzes jeweils an einen Kanal des Oszillographen an. Die Masse des Oszillographen legt man an den Minuspol der Spannungsquelle.

Beobachtung:

Man erhält die Kurve in Abb.4.

Folgerung:

Der Quarz führt eine Sinusschwingung mit seiner Resonanzfrequenz aus, wobei beide Enden um 180° phasenverschoben schwingen.

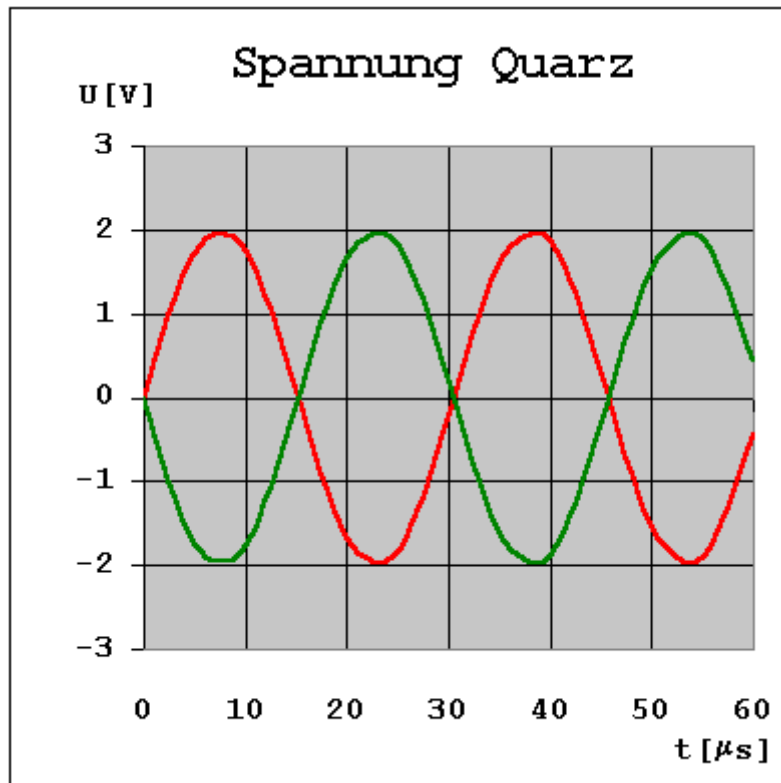


Abb.4: Schwingungen an den Enden des Quarzes

Die in der Quarzuhr verwendeten elektronischen Schaltungen lassen sich mit preiswerten Bauteilen nachbauen. Dabei kann man Bausteine mit Dezimal- oder Duallogik verwenden. Für die folgenden Schaltungen habe ich mich aus drei Gründen für Bauteile mit Zehnerbasis entschieden.

- 1) Die Zehnerlogik ist den Schülern wesentlich vertrauter als die Binärlogik.
- 2) Die Bauteile sind wesentlich billiger, da sie millionenfach in Dezimalzählern eingesetzt werden.
- 3) Bei Dezimalbausteinen kann man an der Teilerschaltung auch die Zehnerunterteilungen der Sekunde, also Dezisekunde ds, Zentisekunde cs, Millisekunde ms und so weiter entnehmen. So kann man den Schülern die unglaubliche Genauigkeit einer Quarzuhr demonstrieren. Diese Überlegungen spielen in Armbanduhren keine Rolle, da die elektronische Schaltung dort nur den Sekundentakt liefert.

Versuch 4 :

Aufbau:

Abb.5 enthält den Schaltplan für einen Taktgeber mit einer Frequenz $f = 1 \text{ MHz}$.²⁾ Das Herzstück der Schaltung sind zwei Inverter, realisiert mit zwei NAND-Gliedern des Bausteins SN7400. Sie schalten sich gegenseitig ein und aus, wobei der Takt des Schaltvorganges durch den Kondensator 10 nF , die beiden $2,2 \text{ k}\Omega$ -Widerstände und durch den Schwingquarz im Rückkopplungszweig bestimmt wird. Der Kondensator 220 nF am Ausgang des zweiten Inverters verhindert Oberschwingungen des Quarzes, da er für hohe Frequenzen nur einen kleinen Widerstand darstellt. Sie werden somit kurzgeschlossen. Über das dritte NAND-Glied kann man den Taktgeber sperren, das vierte NAND-Glied dient dazu, das Signal TTL-kompatibel zu machen, damit man mit dem Ausgang des Taktgebers unmittelbar den TTL-Eingang eines Frequenzteiler oder Digitalzählers ansteuern kann. Die Verschaltung auf einer Lochrasterplatine zeigt Abb.6. Die fertige Platine baut man am einfachsten in ein kleines Ge-

häuse ein, etwa eine leere Mon-Cheri oder Ferrerro-Rocher-Dose. Die Zuleitungen verlötet man an verschiedenen farbigen Telefonbuchsen, die man am Gehäuse verschraubt. Man benötigt eine rote für den +Pol der Stromquelle, eine grüne für den Taktausgang, eventuell eine gelbe für den invertierten Taktausgang und eine schwarze für den –Pol der Stromquelle. So kann der Taktgeber jederzeit mit wenigen Handgriffen im Unterricht in Betrieb genommen werden. Da der invertierte Ausgang meist nicht genutzt wird, kann die gelbe Buchse auch entfallen.

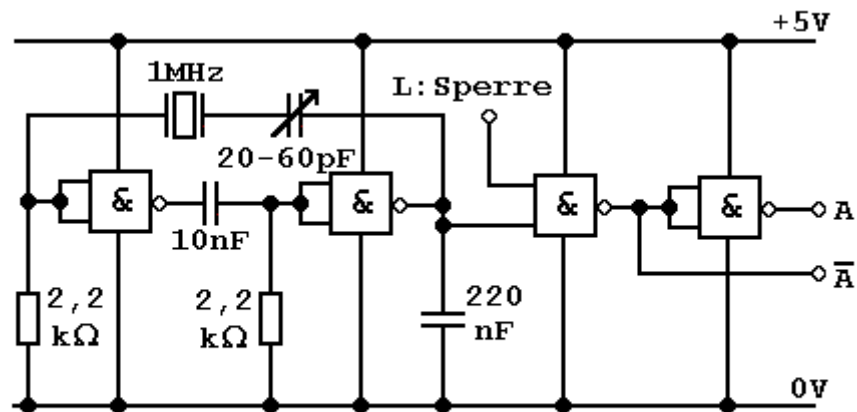


Abb.5: Schaltplan eines Taktgebers

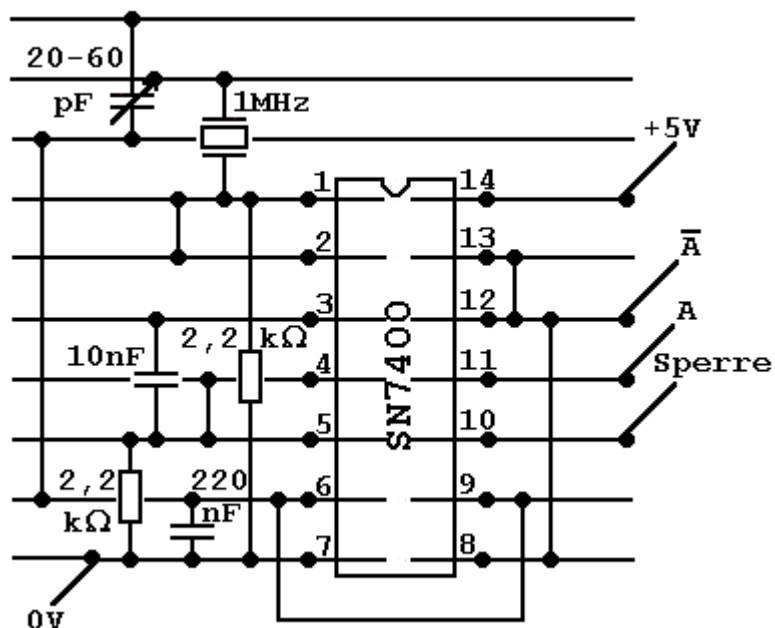


Abb.6: Verschaltung des Taktgebers auf einer Lochrasterplatte

Durchführung:

Mit dem Ausgang des Taktgebers steuert man den Eingang eines in jeder Physiksammlung vorhandenen Digitalzählers direkt an.

Beobachtung:

Der Zähler zählt die Mikrosekunden μs .

Erklärung:

Der Schwingquarz schwingt mit einer Frequenz von 1MHz, seine Periodendauer beträgt also 1 μ s.

Um größere Zeitintervalle zu messen, etwa Millisekunden oder Sekunden, muss man die Frequenz des Schwingkreises herunterteilen.

Versuch 5:

Aufbau:

Dazu dient die Schaltung in Abb.7. Man verschaltet sie am einfachsten auf einer IC-Platine mit drei Steckplätzen. In sie lötet man drei 16-polige IC-Fassungen ein, die man nach dem Plan mit kleinen Stücken Schalllitze verbindet. An den Ausgängen A1 bis A6 kann man die herunter geteilte Schwingung des Taktgebers entnehmen. Die fertige Platine baut man am einfachsten in ein kleines Gehäuse ein, etwa eine leere Mon-Cheri oder Ferrerro-Rocher-Dose. Die Zuleitungen verlötet man an verschiedenen farbigen Telefonbuchsen, die man am Gehäuse verschraubt. Man benötigt eine rote für den +Pol der Stromquelle, sechs grüne für die Taktausgänge A1...A6, eine gelbe für den Eingang E und eine schwarze für den -Pol der Stromquelle. So kann der Frequenzteiler jederzeit mit wenigen Handgriffen im Unterricht in Betrieb genommen werden. Jeder Ausgang kann den Eingang eines Digitalzählers steuern.

Durchführung:

Man verbindet den Ausgang A des Taktgebers mit dem Eingang E der Teilerschaltung. An die verschiedenen Ausgänge schließt man den Digitalzähler an.

Beobachtung:

A3 liefert einen Millisekundentakt, A4 einen Zentisekundentakt, A5 einen Dezisekundentakt und A6 einen Sekundentakt am Digitalzähler.

Erklärung:

Am Ausgang A1 ist die Eingangsfrequenz um den Faktor 10, an A2 um den Faktor 100 usw., am Ausgang A6 um den Faktor 1000000 unterteilt.

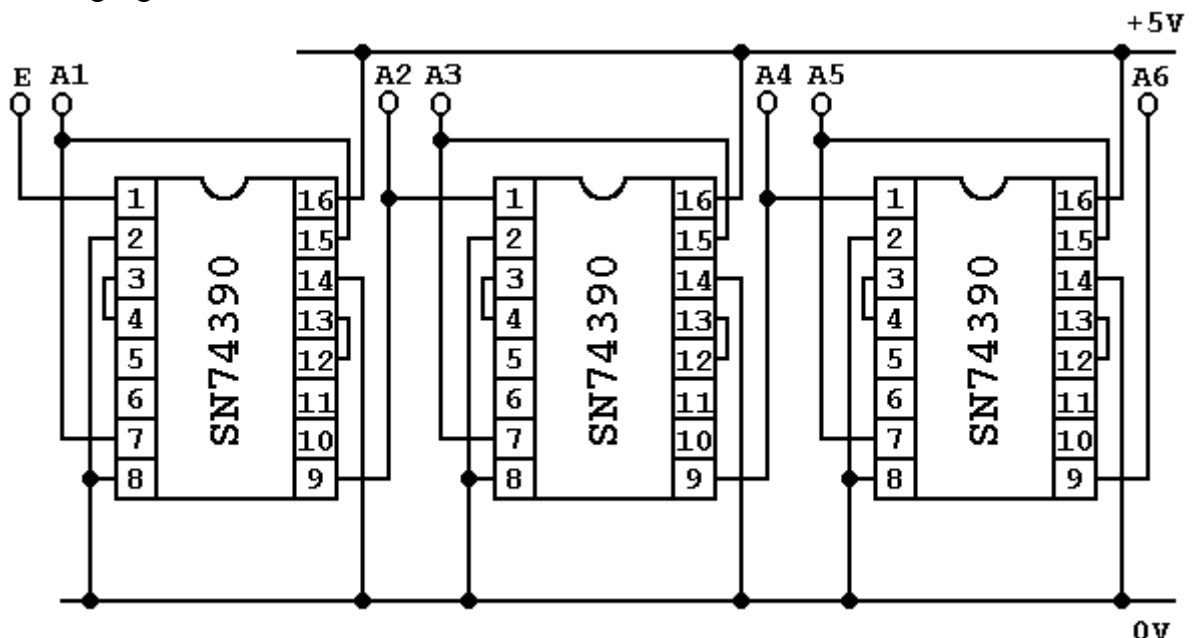


Abb.7: Frequenzteilerschaltung

3.4 Funkuhr

3.4.1 Grundlagen

Funkuhren empfangen die von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) ausgesendete koordinierte Weltzeit UTC. Sie wird ermittelt aus der Internationalen Atomzeit TAI, erzeugt durch zahlreiche Atomuhren, und der dem Sonnenstand angepassten Weltzeit UT1. Beide driften wegen der durch die Gezeitenreibung verursachten langfristigen Abbremsung der Erdrotation immer weiter auseinander. Sie werden daher durch Schaltsekunden einander angepasst, so dass sie nie mehr als 0,9 s voneinander abweichen. So entsteht die koordinierte Weltzeit UTC. Sie wird in kodierter Form von einem Langwellensender mit dem Rufzeichen DCF 77 mit einer Leistung von 50 kW ausgestrahlt. D steht für Deutschland, C kennzeichnet allgemein Langwellensender, F ist die Abkürzung für Frankfurt. Der Zeitsender steht in Mainflingen bei Frankfurt. Da er mehrere Trägerfrequenzen abstrahlt, bezeichnet die Zahl 77 noch seine ungefähre Sendefrequenz. Sie beträgt 77,5 kHz. Der Zeitsender hat eine Reichweite von ca. 2000 km. Die Trägerfrequenz wird amplitudenmoduliert (s. Abb.1)

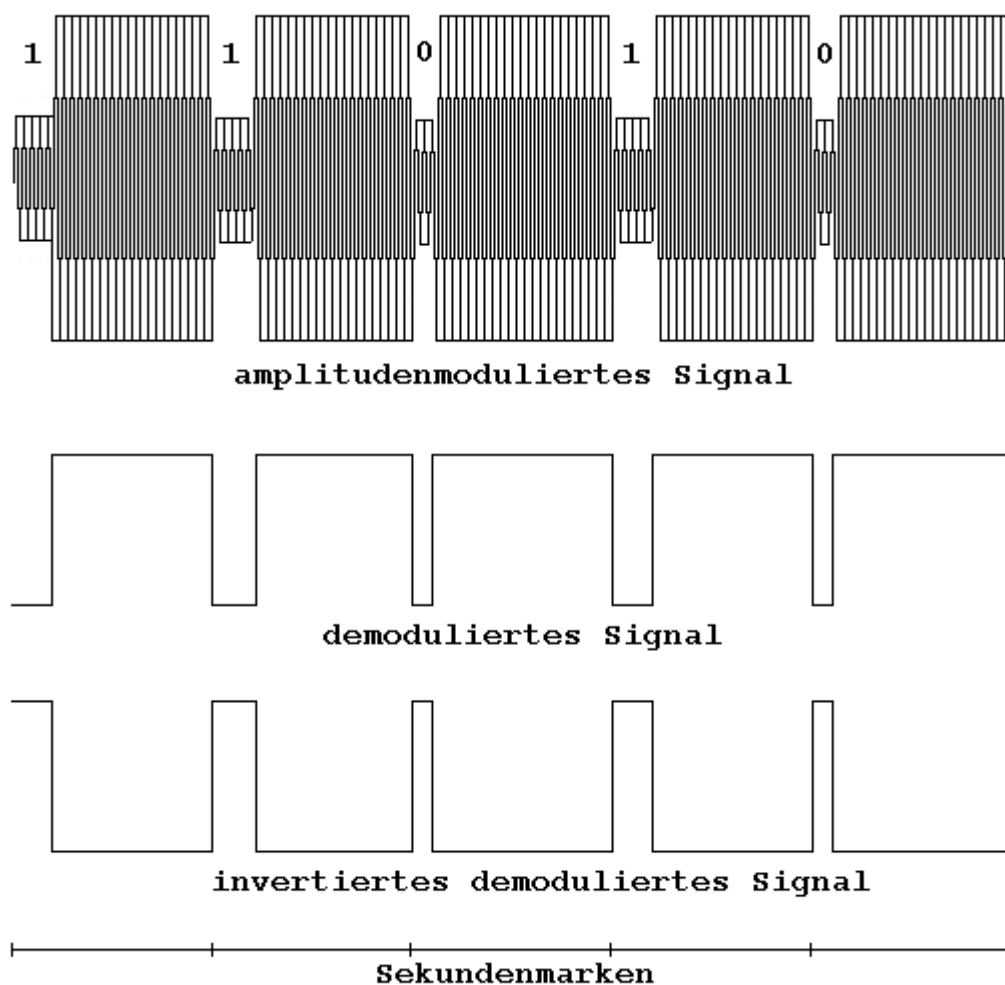


Abb.1: Zeitzeichensignal

Die gesamte Zeitinformation wird während einer Minute übertragen. Jeder Sekunde ist dabei ein Bit an Information zugeordnet. Besitzt das Bit den Wert Null, so wird zu Beginn der betreffenden Sekunde die Amplitude der Trägerfrequenz für 100 ms auf 25% ihres Maximalwertes abgesenkt, bei einer 1 als Informationseinheit für 200 ms. Nach der Demodulation im Empfänger und der Invertierung des Signals liegen die Informationen als eine Folge von 60 kurzen bzw. langen Impulsen vor.

Sie werden mit einem Mikrochip ausgewertet und in Dezimalzahlen umgesetzt. Übertragen wird dabei einerseits die Uhrzeit für die folgende Minute in Minuten und Stunden und das Datum in der Form Tag, Wochentag, Monat und Jahr. Die Minuten sind in den Sekundenmarken 21 – 27, die Stunden in den Bits 29 – 34 verschlüsselt. Der Kalendertag liegt in kodierter Form in den Sekundenpulsen 36 – 41, der Wochentag in den Sekundenmarken 42 - 44, der Kalendermonat in den Sekundenbits 45- 49 und das Kalenderjahr in den Bits 50- 57 vor. Die restlichen Bits dienen anderen Zwecken, etwa als Prüfbits, oder der Übertragung von Schaltsekunden, der Umstellung von Sommer- auf Winterzeit usw. Die Bits 1 – 14 haben keine feste Kodierung. Sie werden nur bei Bedarf belegt. Die Sekundenmarke 15 gibt an, welche Sendeantenne benutzt wird. Der Sender besitzt nämlich eine Hauptantenne und eine Reserveantenne (s. Kapitel 3.4.2). Wert 0 bedeutet Hauptantenne, Wert 1 Reserveantenne. Bit 16 kündigt einen Wechsel zwischen Mitteleuropäischer Sommerzeit MESZ und Mitteleuropäischer Zeit MEZ an, wenn es auf 1 liegt. Es wird eine Stunde lang vor dem Wechsel als 1 ausgestrahlt. Da es also sechzig mal gesendet wird, können auch Uhren mit ungünstigen Empfangsbedingungen den Wechsel fristgerecht vollziehen. Mit den Sekundenmarken 17 und 18 wird angezeigt, ob sich die gesendete Zeitinformation auf die Mitteleuropäische Zeit MEZ oder die Mitteleuropäische Sommerzeit MESZ bezieht. Hat Bit 17 den Wert 0 und Bit 18 den Wert 1, so liegt MEZ vor, besitzt Bit den Wert 1 und Bit 18 den Wert 0, so herrscht MESZ. Bit 19 kündigt eine Schaltsekunde an, wenn es auf 1 liegt. Es wird ebenfalls eine Stunde lang vor dem Einfügen der Schaltsekunde ausgestrahlt. Das Sekundenbit 20 hat immer den Wert 1. Es kündigt die Übertragung von Uhrzeit und Datum an. Damit die Funkuhr die empfangenen Signale den übertragenen Informationen richtig zuordnen kann, wird die Amplitude in der 59. Sekunde nicht abgesenkt. Sie enthält quasi ein totes Bit. Zeit und Datum werden nach dem Verfahren in Tabelle 1 kodiert.⁴⁾ Die Kodierung wird verständlicher mit einem Beispiel. Die Bits haben z. B. die Werte in Tabelle 2. Insgesamt ergeben sich also 59 Minuten, 15 Stunden, 25 Tage, 11 Monate und 6 Jahre. Außerdem ist der 6. Tag der Woche. Es ist also Samstag, 25.11.06, 15:59 Uhr. Prüfbit 28 ergänzt das aus 7 Bit bestehende Wort für die Minute, Prüfbit 35 das aus 6 Bit bestehende Wort für die Stunde und Prüfbit 58 das aus 22 Bit bestehende Wort fürs Datum jeweils auf eine gerade Zahl von Einsen. Enthält also das Minutenwort eine gerade Zahl von Einsen, so hat Prüfbit 28 den Wert 0, anderenfalls den Wert 1. Ähnliches gilt für die Prüfbits 35 und 58, bezogen auf das Stundenwort bzw. das Datumswort.

Bit Nr.	Binärwert	Dezimalwert	Bedeutung
21	0,1	0,1	Minuten Einerstelle
22	0,1	0,2	
23	0,1	0,4	
24	0,1	0,8	
25	0,1	0,10	Minuten Zehnerstelle
26	0,1	0,20	
27	0,1	0,40	
28	0,1	0,1	Prüfbit
29	0,1	0,1	Stunden Einerstelle
30	0,1	0,2	
31	0,1	0,4	
32	0,1	0,8	
33	0,1	0,10	Stunden Zehnerstelle
34	0,1	0,20	
35	0,1	0,1	Prüfbit
36	0,1	0,1	Tag Einerstelle
37	0,1	0,2	
38	0,1	0,4	
39	0,1	0,8	
40	0,1	0,10	Tag Zehnerstelle
41	0,1	0,20	
42	0,1	0,1	Wochentag
43	0,1	0,2	
44	0,1	0,4	
45	0,1	0,1	
46	0,1	0,2	Monat Einerstelle
47	0,1	0,4	
48	0,1	0,8	
49	0,1	0,10	Monat Zehnerstelle
50	0,1	0,1	Jahr Einerstelle
51	0,1	0,2	
52	0,1	0,4	
53	0,1	0,8	
54	0,1	0,10	Jahr Zehnerstelle
55	0,1	0,20	
56	0,1	0,40	
57	0,1	0,80	Prüfbit
58	0,1	0,1	

Tabelle1: Kodierverfahren der PTB für die Zeit- und Datumsangabe

Bit Nr.	Binärwert	Dezimalwert	
21	1	1	9 Minuten
22	0	0	
23	0	0	
24	1	8	
25	1	10	50 Minuten
26	0	0	
27	1	40	
28	0	0	Prüfbit
29	1	1	5 Stunden
30	0	0	
31	1	4	
32	0	0	
33	1	10	10 Stunden
34	0	0	
35	1	1	Prüfbit
36	1	1	5 Tage
37	0	0	
38	1	4	
39	0	0	
40	0	0	20 Tage
41	1	20	
42	0	0	6. Wochentag
43	1	2	
44	1	4	
45	1	1	1 Monat
46	0	0	
47	0	0	
48	0	0	
49	1	10	10 Monate
50	0	0	6 Jahre
51	1	2	
52	1	4	
53	0	0	
54	0	0	0 Jahre
55	0	0	
56	0	0	
57	0	0	
58	0	0	Prüfbit

Tabelle 2: Kodierte Angabe: Samstag, 25.11.06, 15:59

3.4.2 Zeitzeichensender

In Abb.1 ist die Sendeeinrichtung des Zeitzeichensenders als Blockschaltbild dargestellt.

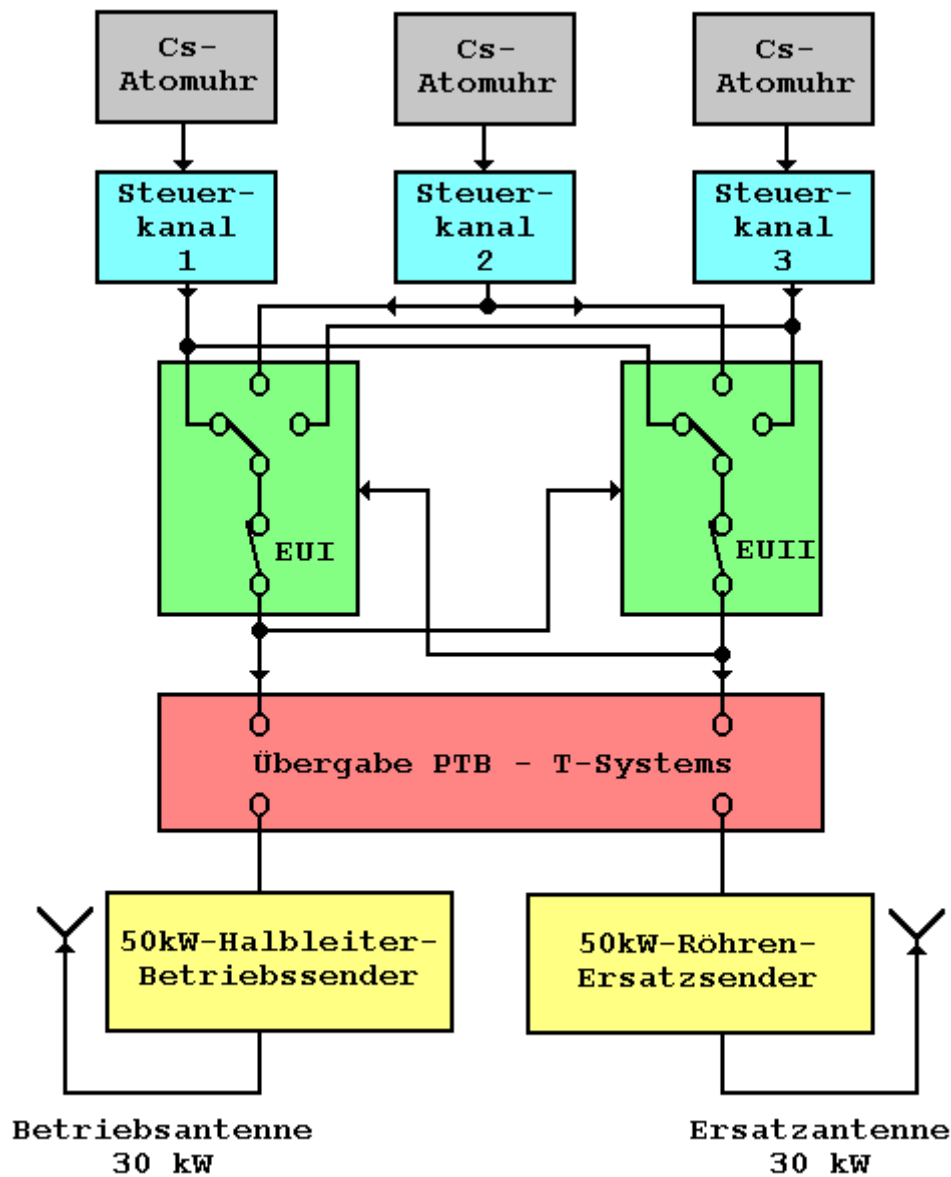


Abb.1: Blockschaltplan der Steuereinrichtungen des Senders⁵⁾

Sie befindet sich in Mainflingen bei Frankfurt und wird gemeinsam von der Physikalisch-Technischen-Bundesanstalt PTB und der Telekomtochter T-Systems betrieben. Die Steuereinrichtungen sind in einem gesonderten Raum der Sendeanlage untergebracht. Das Trägersignal von 77,5 kHz und die Sekundenmarken werden aus drei unabhängigen Caesium-Atomuhren gewonnen und je einem Steuerkanal zugeführt. Außerdem steht noch eine Rubidium-Atomuhr bereit. Jeder Kanal kann im Prinzip den Sender steuern. Um zu vermeiden, dass Fehlsignale ausgesendet werden, werden die Signale der drei Steuerkanäle zunächst in zwei elektronischen Umschaltern EUI und EUII verglichen. Steht dabei das Signal des den Sender steuernden Kanals im Widerspruch zu dem der beiden anderen Kanäle, so wird automatisch auf einen der beiden Reservekanäle umgeschaltet. Fällt ein Kanal wegen einer Störung aus, so liefert jeder der beiden Umschalter nur so lange ein Ausgangssignal, wie die Signale der beiden an-

deren Kanäle übereinstimmen. Widersprechen sich die Signale aller drei Kanäle, schalten sich die beiden Umschalter gegenseitig ab. Ist alles in Ordnung, so wird das DCF-Steuersignal an die von T-Systems betriebenen Sendeanlagen übergeben. Seit Januar 1998 steht als Betriebs-sender ein luftgekühlter 50 kW-Halbleitersender zur Verfügung. Sein Endverstärker besteht aus 48 Einzelmodulen mit je etwas mehr als 1 kW Ausgangsleistung. Ihre Ausgangsspannungen werden addiert. Der bis dahin verwendete Röhrensender dient als Ersatzsender, auf den bei Störfällen oder Wartungsarbeiten am Hauptsender umgeschaltet wird. So ist gewährleistet, dass die Zeitzeichen der PTB rund um die Uhr verfügbar sind. Beide Sendeantennen sind vertikale Rundstrahlantennen. Die Ersatzantenne ist 200 m hoch. Die normale Betriebsantenne besitzt nur eine Höhe von 150 m. Weitere Informationen finden Sie im Internet unter www.ptb.de.⁵⁾

3.4.3 Empfangsschaltungen

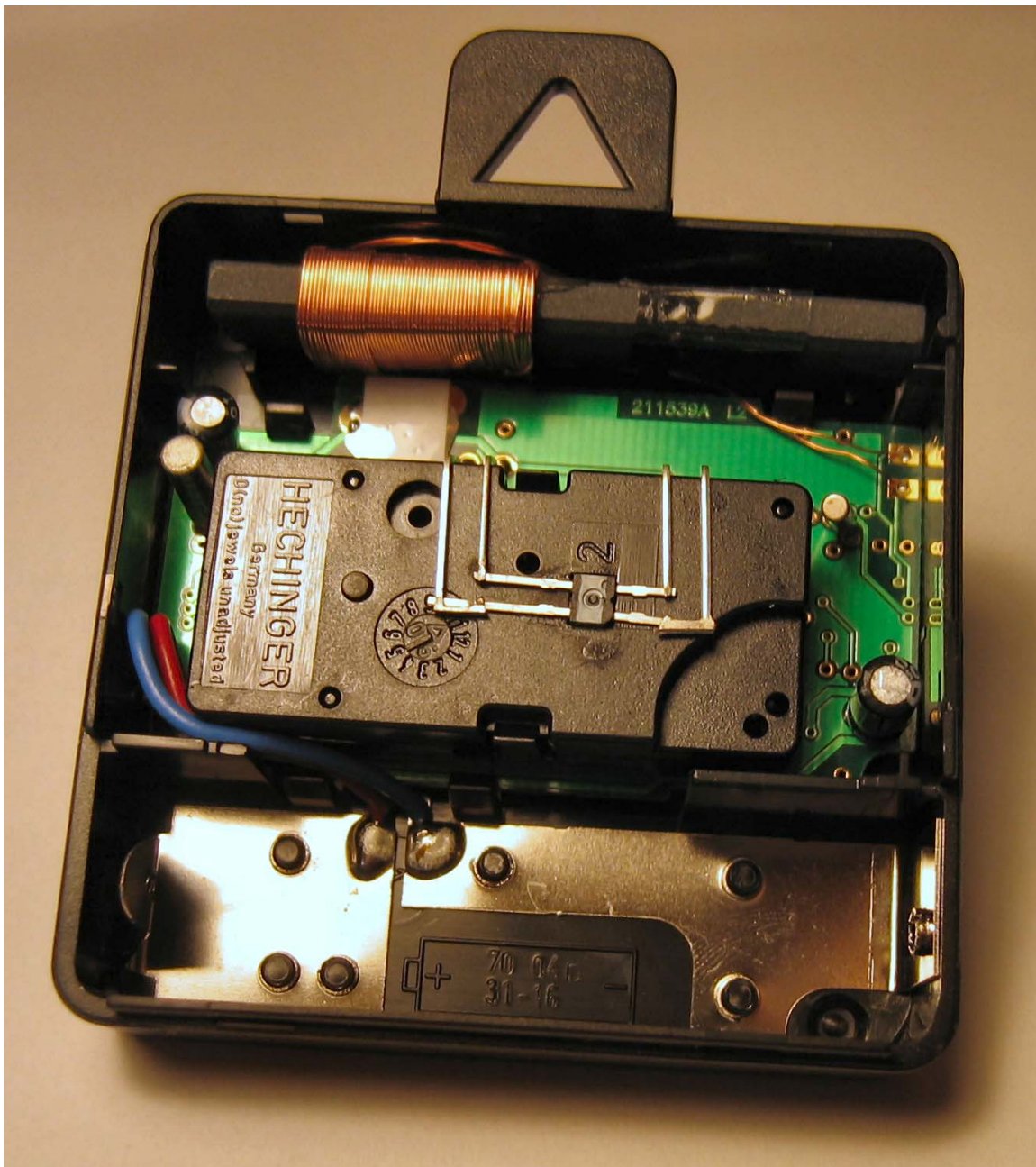


Abb.1: Innenleben einer Wand-Funkuhr

Abb.1 zeigt das Innenleben und Abb.2 den grundsätzlichen Aufbau einer modernen Funkuhr. In Abb.1 erkennt man deutlich die Ferritantenne und die beiden Schwingquarze am rechten bzw. linken Rand. Einer dient im Empfänger als Filter, der andere steuert den Mikroprozessor. Eine vollständige Anleitung zum Nachbau einer Funkuhr wurde in der Elektronikzeitschrift ELV-Journal, Ausgabe 2/99 und 3/99⁶⁾ (s. Abb.3) veröffentlicht. Allerdings ist der Bastelaufwand schon recht groß und nur für erfahrene Bastler zu empfehlen, zumal einige Bausteine in SMD-Technik ausgeführt sind und demgemäß nicht ganz einfach zu verlöten sind.

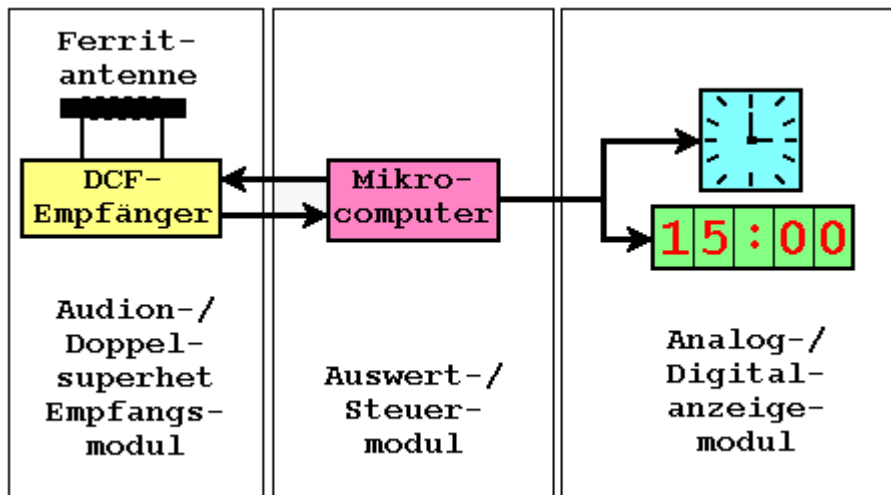


Abb.2: grundsätzlicher Aufbau einer Funkuhr

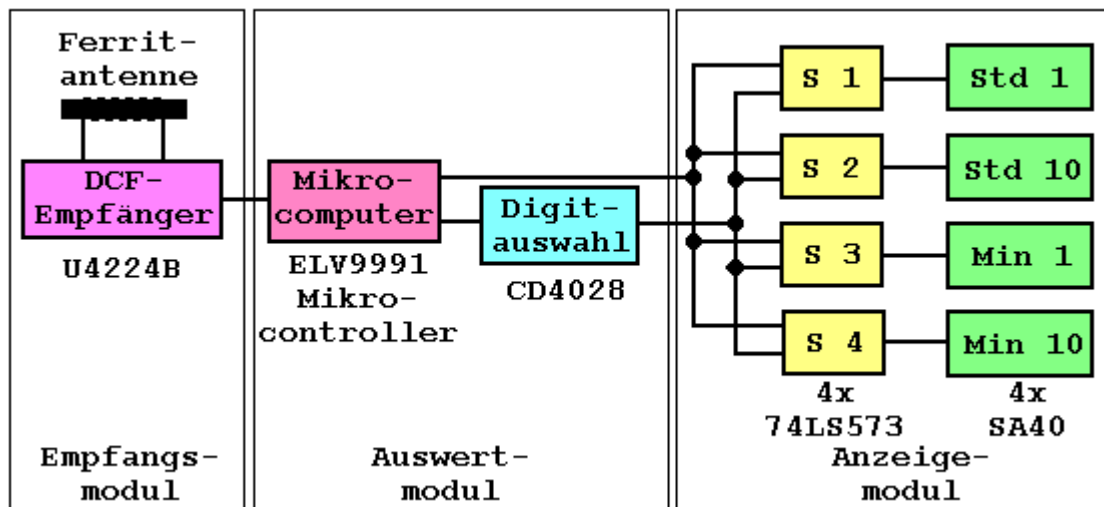


Abb.3: Blockschaubild der ELV-Funkuhr

Aus Abb.2 und Abb.3 wird deutlich, dass eine Funkuhr aus drei Modulen zusammengesetzt ist, dem Empfangsmodul, dem Auswert- und Steuermodul und dem Anzeigemodul. Im Empfangsmodul nutzt man die aus der Radiotechnik bekannten Schaltungen zum Empfang elektromagnetischer Wellen, entweder eine Audionempfängerschaltung oder eine Superhetempfängerschaltung (vgl. A. Reichert: Radiosender/Radioempfänger). Sie sind als integrierte Bausteine im Handel erhältlich (s. Kapitel 3.4.4). Beide wurden für die speziellen Empfangsbedingungen der Funkuhr weiterentwickelt. Zum einen werden die Zeitsignale auf Langwelle mit sehr großer Wellenlänge übertragen. Daher kommt als Antenne nur eine Ferritantenne in Frage. Allerdings sollte sie möglichst kurz sein, damit sie ins kleine Gehäuse der Funkuhr passt. Zum zweiten muss der Empfänger sehr selektiv nur für eine einzige Frequenz und nicht für ein Frequenzband ausgelegt sein. Zum dritten ist die Bandbreite des empfangenen Zeitzei-

chensignals sehr gering. Sie beträgt im Mittel nur 7,5 Hz, da sich das Signal aus einzelnen Sekundenimpulsen der Länge 0,2 s bzw. 0,1 s zusammensetzt. Daher muss die Zwischenfrequenz des Superhetempfängers ebenfalls gering sein. Optimal sind 2,5 kHz. Der Oszillator der Mischstufe hätte dann eine Frequenz

$$f_1 = 77,5 \text{ kHz} + 2,5 \text{ kHz} = 80 \text{ kHz} \text{ oder}$$

$$f_2 = 77,5 \text{ kHz} - 2,5 \text{ kHz} = 75 \text{ kHz}.$$

Die möglichen Spiegelfrequenzen von 82,5 kHz bzw. 72,5 kHz liegen jedoch sehr nahe bei der Empfangsfrequenz von 77,5 kHz. Sie ließen sich somit im Empfangskreis nicht sauber vom Zeitzeichensignal trennen. Der Empfang wäre gestört. Lösen lässt sich das Problem mit einem Doppelsuperhetempfänger (s. Abb.4). In ihm verwendet man zwei Zwischenfrequenzen. Die erste ist relativ hoch und beträgt z.B. 27,5 kHz, erzeugt durch eine erste Oszillatorfrequenz von 50 kHz. Die Spiegelfrequenz liegt dann bei 22,5 kHz. Als zweite Zwischenfrequenz verwendet man 2,5 kHz. Man benötigt dafür eine zweite Oszillatorfrequenz von 25 kHz. Ihre Spiegelfrequenz beläuft sich ebenfalls auf 22,5 kHz. Beide Spiegelfrequenzen haben einen genügend großen Abstand zur DCF-Frequenz von 77,5 kHz. Sie können daher im Empfangskreis sauber vom Zeitzeichensignal getrennt werden. Die zweite Mischstufe kann auch durch einen Frequenzdiskriminator ersetzt werden. Mit seinem Ausgangssignal regelt man über eine Kapazitätsdiode die Frequenz des ersten Oszillators nach. Die benötigten Mischungsfrequenzen können durch Frequenzteiler aus der Taktfrequenz des Mikroprozessors gewonnen werden. Dann benötigt man keine eigenen Oszillatoren. Der HF-Filter kann als einfacher RC-Hochpass mit einer Grenzfrequenz von 50 kHz oder als Quarzfilter mit 77,5 kHz ausgelegt sein. Als ZF-Filter werden aktive RC-Filterschaltungen verwendet. Der Verstärkungsfaktor des Verstärkers kann über Spannungsimpulse, die vom Mikroprozessor erzeugt werden, eingestellt werden.

Bei der Audionschaltung erhöht man die Selektivität durch eine ständige Kontrolle der Empfangsfrequenz mit Hilfe des Mikrochips. Nach dem Einschalten der Funkuhr wird dazu zunächst die Entdämpfung des Colpit-Oszillators in kleinen Schritten über den D/A-Wandler erhöht. Setzt Resonanz ein, wird die Resonanzfrequenz am Ausgang des Verstärkers über den Komparator mit der gewünschten Frequenz $f = 77,5 \text{ kHz}$ verglichen und über die beiden Kapazitätsdioden gegebenenfalls nach geregelt (s. Abb.5). Außerdem neigen Audionempfänger durch Rückkopplung des Oszillators auf die Antenne zum Aufschaukeln unkontrollierbarer Eigenschwingungen, wenn die Antenne sich in der Nähe des Oszillators befindet. Zunächst mussten daher bei Funkuhren mit Audion externe Antennen benutzt werden. Heute wird die Amplitude der Schwingungen vom Mikrochip nachgeregelt. Der Istwert der Amplitude wird dazu über den zweiten Demodulator erfasst. Seine Zeitkonstante ist mit 1 s so groß, dass er das modulierte Signal glättet. Der so gewonnene Mittelwert der Amplitude wird über einen A/D-Wandler dem Mikrocomputer zugeführt. Dieser reguliert über den D/A-Wandler die Verstärkung des Verstärkerbausteins und die Entdämpfung des Oszillators, bis die Spannung am Verstärkerausgang einen festen, vorgegebenen Sollwert erreicht hat. So wird wildes Schwingen selbst bei räumlicher Nähe von Ferritantenne und Oszillator unterdrückt. Außerdem wird erreicht, dass unabhängig von der Entfernung Empfänger-Sender immer ein gleich großes Ausgangssignal vorliegt. Der erste Demodulator hat eine Zeitkonstante von 20 ms und dient der Signalerkennung. Die genaue technische Umsetzung dieses Regelkreises finden Sie in „Funkuhren“ von W. Hilberg⁴⁾.

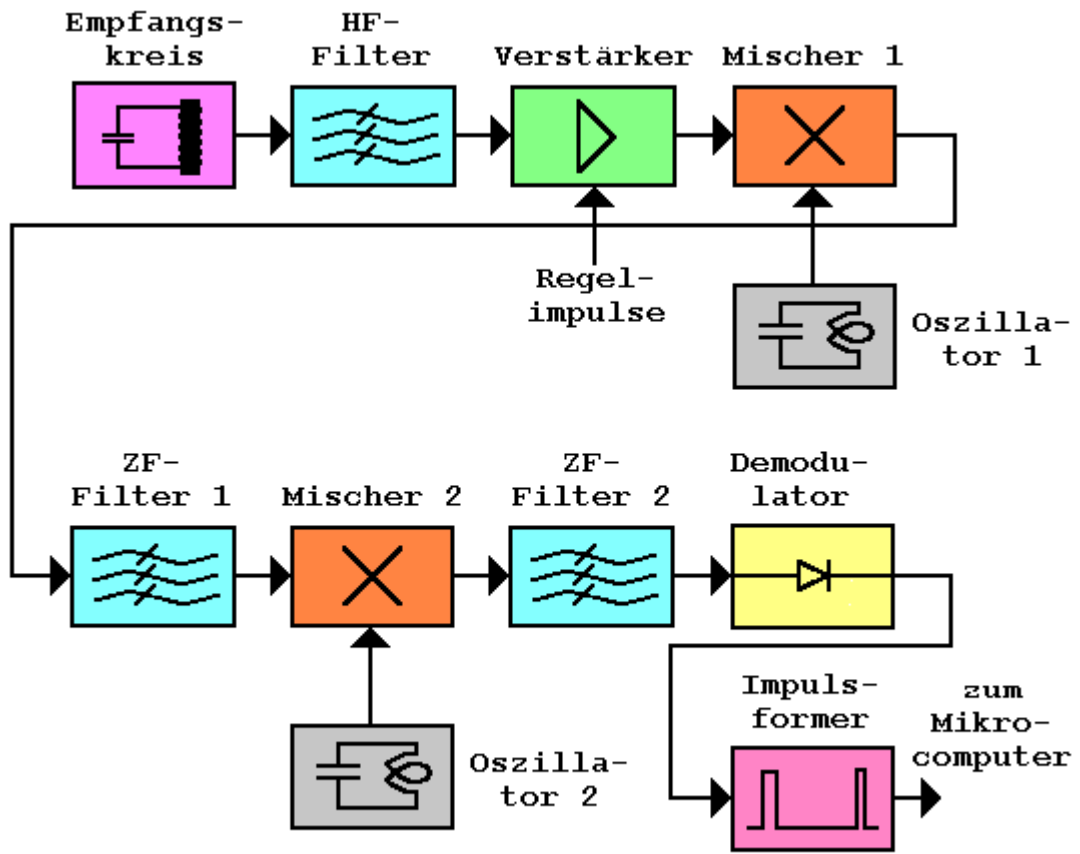


Abb.4: Doppelsuperhetempfänger

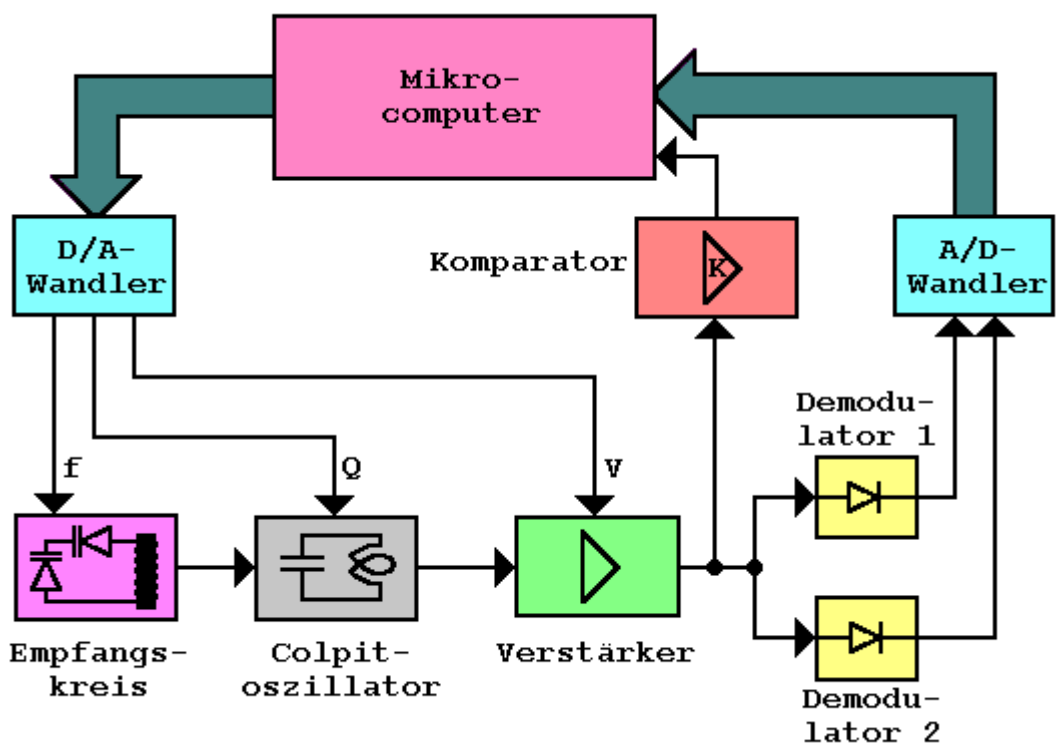


Abb.5: mikrocomputergesteuerter Audionempfänger⁴⁾

Der Mikroprozessor muss je nach Empfangs- und Anzeigemodul verschiedene Aufgaben erfüllen. Wird ein Audionempfänger verwendet, so sorgt er

- 1) für die Frequenznachführung des Empfangskreises,
- 2) für die Entdämpfung des Colpitoszillators und
- 3) für die Regelung des Verstärkungsfaktors des Verstärkers.

Bei einem Doppelsuperhetempfänger stellt er gegebenenfalls die benötigten Mischfrequenzen zur Verfügung und regelt die Verstärkung des Verstärkers. In jedem Fall muss er eine Quarzuhr enthalten, damit beim Ausbleiben des DCF-Signals die Funkuhr eine korrekte Zeit anzeigt. Ferner muss er die Zeitzeichensignale auswerten und in passende Signale zur Steuerung des Anzeigemoduls umsetzen. In manchen Funkuhren werden dazu nur die Sekunden- und Minutenmarken der internen Quarzuhr mit den empfangenen Marken des Zeitzeichensenders synchronisiert. Das geschieht durch Auslassen einzelner Teilerimpulse in der Frequenzteiler-schaltung der integrierten Quarzuhr. Man spricht von synchronen Funkuhren. Sie haben allerdings den Nachteil, dass sie nach einem Stromausfall komplett neu justiert werden müssen, da in ihnen die kodierte Zeitinformation nicht dekodiert werden und sie sich daher nicht automatisch einstellen. In der Regel wertet der Mikrochip jedoch die kodierte Information aus und nutzt sie zur Steuerung der Anzeige. Bei der Funkuhr des ELV-Journals (s. Abb.3) stellt der Mikrochip die Daten zum Betrieb der 7-Segmentanzeigen an seinem Ausgang bereit. Er enthält also einen BCD-zu-7-Segment-Decoder. Die Segmenteinheit, die gerade angesteuert werden soll, wird über den BCD-zu-Dezimal-Decoder CD4028 ausgewählt. Die Daten werden dabei in einem Zwischenspeicher, bestehend aus 4 TTL-Bausteinen 74LS573, abgelegt und von dort an die vier 7-Segment-Anzeigen SA 40 über einen Freigabe-Eingang weitergeleitet. Man erhält so statische Signale, die den DCF-Empfang nicht beeinträchtigen. Außerdem kann wahlweise das Datum oder die Uhrzeit angezeigt werden. Die Punkte zwischen der Stunden- und Minutenanzeige werden über zwei LED's realisiert. Ferner wird über eine Fotodiode die Umgebungshelligkeit erfasst und zur Steuerung der Helligkeit des Displays genutzt.

Besitzt die Funkuhr Zeiger, so muss der Mikrocomputer die Steuersignale für die Schrittmotoren liefern. Deren momentane Stellung wird mit einer Reflexionslichtschranke erfasst und dann entsprechend nachgeregelt.

In modernen Funkarmbanduhren steuert der Mikrochip das LC-Display.

3.4.4 Experimente

Die im Folgenden beschriebenen Versuche können mit dem DCF-77-Empfangsmodul (s. Abb.1) der Firma Reichelt (www.reichelt.de) durchgeführt werden. Es kostet ca. 15,- €.

Um die Signale besser auswerten zu können, empfiehlt es sich, das Modul um eine akustische oder optische Anzeige des DCF-77-Signals zu erweitern. Sie lassen sich ohne großen Aufwand selbst zusammenlöten. Die Abb. 2 und 3 zeigen die benötigten Schaltungen. Die Verdrahtungen auf einer Lochrasterplatine entnehmen sie den Abb. 4 und 5.

Das Empfangsmodul verbindet man mit drei kurzen Stücken Schalllitze mit einer der Schaltungen. Die Anschlüsse des Moduls sind mit +UB für die positive Betriebsspannung, GND für den -Pol, DCF für das invertierte Zeitzeichensignal und EIN bezeichnet. Die Bedeutung der Lötstelle EIN ist mir nicht bekannt. Sie bleibt frei. Vermutlich dient sie der Regelung des Verstärkungsfaktors des integrierten Verstärkers. Leider gibt es zu dem Modul kein Datenblatt des Herstellers. Lediglich die Betriebsspannung wird auf der Internetseite der Firma Reichelt mit 1,8 – 5 V angegeben. Die selbstgebaute optische bzw. akustische Anzeige ist für eine Betriebsspannung von 5 V ausgelegt. Die Anzeigeeinheiten und das DCF-Modul können daher mit einer gemeinsamen Spannung von 5 V betrieben werden. Man verwendet eine Low-Current-LED, da sie nur 2 mA benötigt. Der Piezo-Schallwandler enthält eine eingebaute Elektronik, deren Ton auf ca. 2000 Hz eingestellt ist. Empfangsmodul und gewünschtes Anzeigemodul baut man am einfachsten in eine Ferrero-Rocher- oder Mon-Cheri-Dose ein. Dazu

werden sie auf zwei kleine Holzleisten (6x6mm) geschraubt, die man anschließend am Gehäuseboden mit ein paar Tropfen Patex verklebt. Die Ferritantenne befestigt man mit einer Plastikkabelschelle und einer Plastikschraube am Deckel der Dose, um den Empfang nicht durch Eisenteile zu beeinträchtigen. Die Anschlüsse führt man über Telefonbuchsen nach außen, die ebenfalls am Gehäusedeckel verschraubt werden. Benötigt werden vier Stück, eine rote für den +Pol, eine schwarze für den –Pol, eine blaue für das DCF-Signal und eine grüne für das invertierte DCF-Signal. Die grüne Buchse kann auch entfallen, da für die Auswertung des Zeitzeichensignals mit der Messwerterfassung eines Computers eines der beiden DCF-Signale ausreicht. Die LED setzt man in eine Plastikfassung ein und klemmt sie in ein passendes Loch des Deckels (s. Abb.6). Alternativ lötet man den Piezo-Signalgeber auf eine kleine Platine, die man mit zwei Schraubchen am Gehäusedeckel befestigt. Dabei sollte man zur besseren Abstrahlung des Tones im Bereich der Schallfläche des Piezo-Schallwandlers ein etwas größeres Loch in den Deckel bohren.

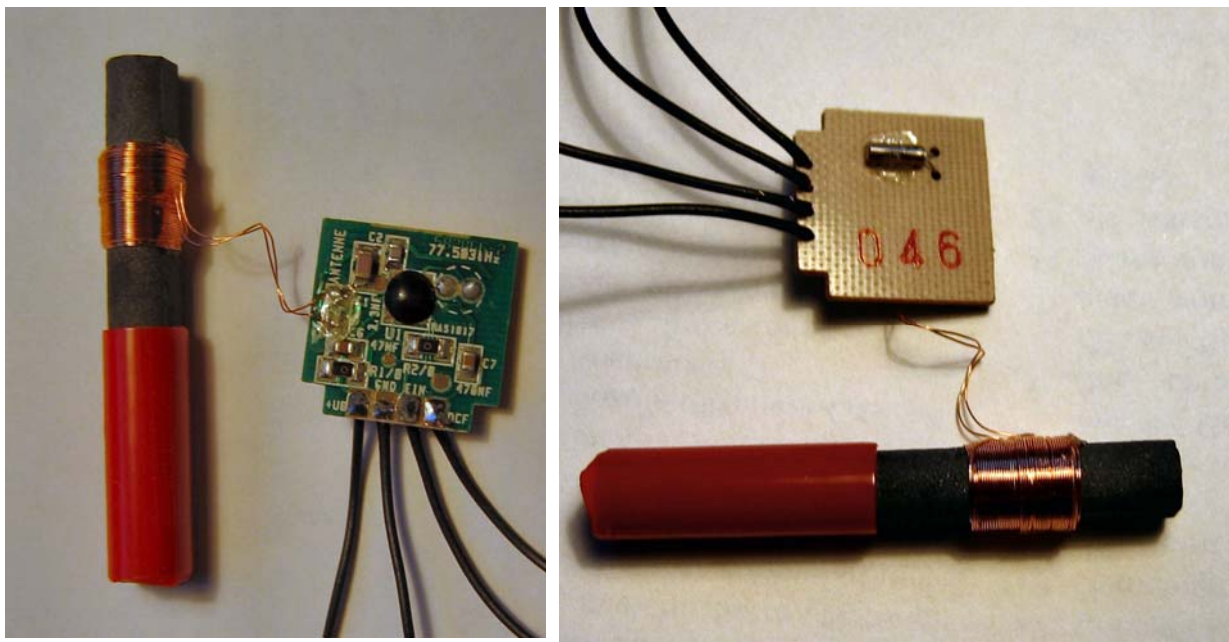


Abb.1: DCF-77-Empfangsmodul mit Schwingquarz der Frequenz $f = 77,5 \text{ kHz}$

Sollte der Physikraum in einem modernen Stahlbetonschulgebäude untergebracht sein, so kann der Empfang relativ schwach sein. Sie sollten dann das Modul möglichst in der Nähe eines Fensters aufstellen. Notfalls müssen sie auf die serielle DCF77-Funkuhr der gleichen Firma ausweichen, die wesentlich empfangsstärker ist. Sie ist mit ca. 52,- € jedoch sehr teuer. Ursprünglich ist sie als DCF-Empfänger für die serielle Schnittstelle von Computern konzipiert. Die mitgelieferte Software ließ sich jedoch weder unter Windows 98 noch XP vollständig installieren. Aber für die folgenden Versuche ist sie bestens geeignet, zumal sie schon über eine optische Anzeige per LED verfügt. Den seriellen Anschlussstecker ersetzen sie durch drei verschieden farbige Bananenstecker. Das grüne Kabel ist der –Pol der Schaltung, das blaue und weiße Kabel können sie zusammenfassen. Sie bilden den +Pol für den Empfänger und die Leuchtdiode. Die benötigte Betriebsspannung beträgt 5 V. Am orangefarbenen Kabel steht das invertierte DCF-Signal als eine Folge von kurzen und langen Impulsen zur Verfügung. Sie können direkt mit einem Messwerterfassungssystem aufgezeichnet werden.

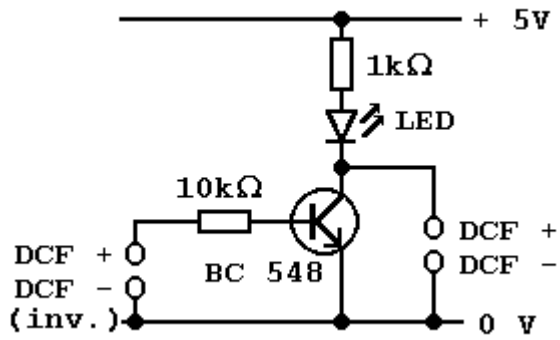


Abb.2:
optische Anzeige
des DCF-77-Signals

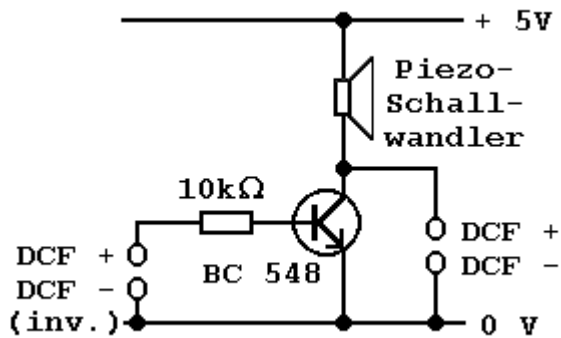


Abb.3:
akustische Anzeige
des DCF-77-Signals

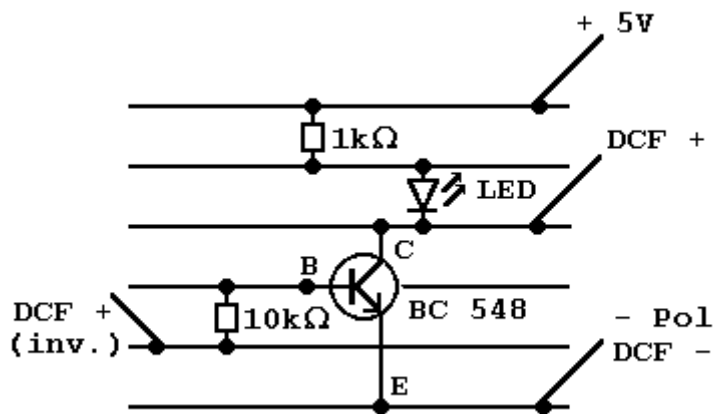


Abb.4:
Verdrahtungsplan des opti-
schen Anzeigemoduls

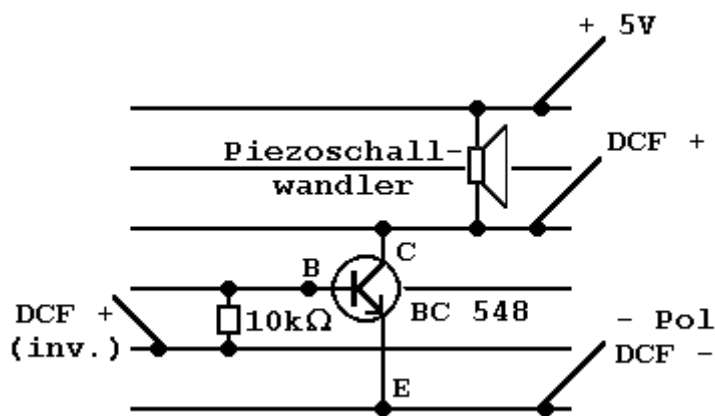


Abb.5:
Verdrahtungsplan des akusti-
schen Anzeigemoduls

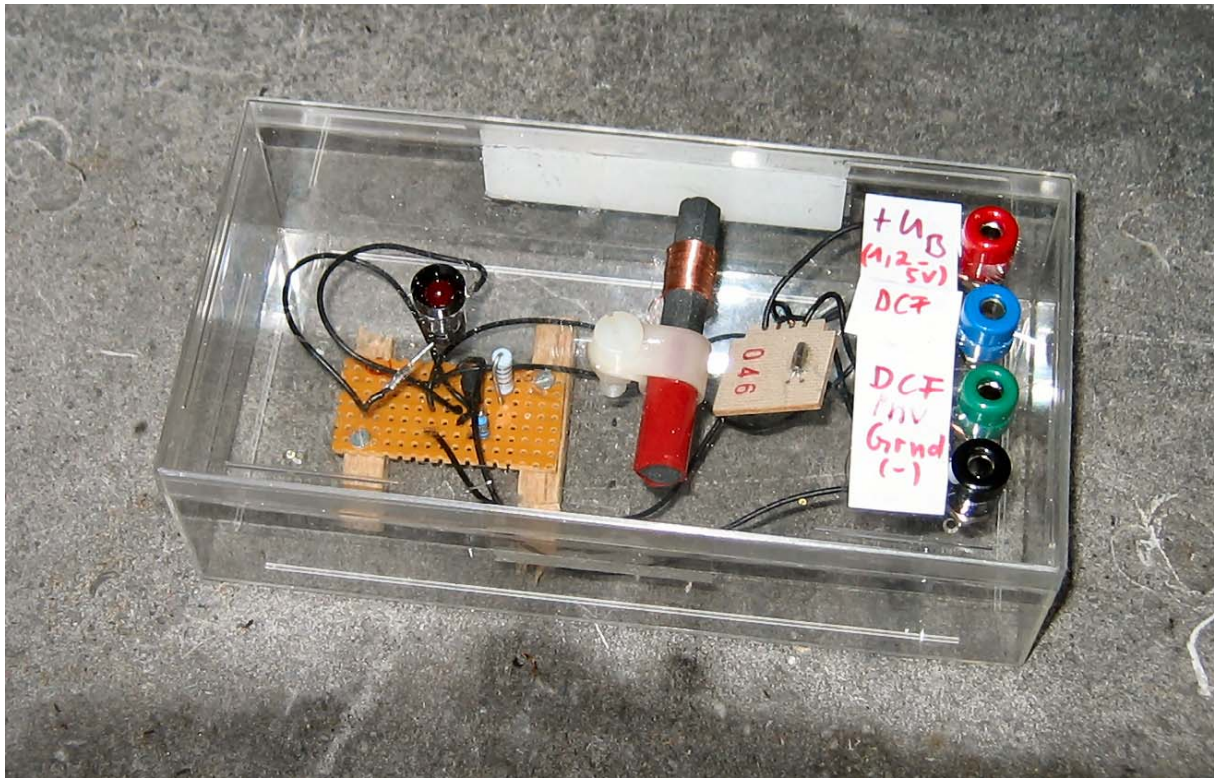


Abb.6: Empfangsmodul mit optischer Anzeige

Versuch 1:

Aufbau:

s. Abb.6

Durchführung:

Man schließt das Empfangsmodul an die Spannungsquelle an und stellt es dann so auf, dass die LED hell leuchtet, bzw. ein konstanter lauter Ton aus dem Lautsprecher ertönt. Man wartet, bis die LED blinkt bzw. der Lautsprecher kurze oder lange Tonsignale abstrahlt. Sobald die Sekundenmarke aussetzt, zählt man 21 Impulse der LED bzw. des Piezoschallwandlers ab und notiert sich ab dann 15 Sekunden lang, ob ein langer oder kurzer Impuls empfangen wird. Dazu sollte man sich vorher eine Liste mit 15 Strichen anlegen und bei einem langen Signal den Strich durchstreichen. Da die Impulse sehr schnell aufeinander folgen, kommt man sonst leicht aus dem Takt. Mit etwas Übung gelingt es sehr gut. Möchte man das Datum ermitteln, so muss man nach dem Aussetzen der Sekundenmarken 36 Impulse zählen und anschließend die Länge von 22 Impulsen notieren.

Beobachtung:

Man hört bzw. sieht eine Folge von kurzen und langen Impulsen.

Auswertung:

Beispiel: Man beobachtet folgende Impulsabfolge:

3 lange, 2 kurze, 1 langer, 4 kurze, 1 langer, 1 kurzer, 1 langer, 2 kurze.

Die Uhrzeit beträgt dann 14:27 Uhr, wie man mit Hilfe der Tabelle 2 in Kapitel 3.4.1 ermitteln kann. Entsprechend kann man mit dem Datum verfahren.

Versuch 2:

Aufbau:

s. Abb.1

Durchführung:

Man schließt den DCF-Ausgang der Schaltung an den analogen Eingang eines Messwerterfassungssystems, z.B. Cassy der Firma Leybold an. Man wählt als Aufzeichnungsgerät den Oszillographen aus. Die Messzeit des Systems stellt man auf 15 Sekunden bzw. beim Datum auf 22 Sekunden an. Anschließend verfährt man wie in Versuch 1, notiert sich die Länge der Impulse jedoch nicht auf einem Blatt Papier, sondern startet das Messwerterfassungssystem nach dem entsprechenden Sekundenvorlauf. Anschließend druckt man die erhaltene Kurve aus und verteilt sie an die SchülerInnen zur Auswertung. Zeichnet man ein ganzes Minutenintervall auf, so erhält man beide Informationen in einem Durchgang. Allerdings kann man dann manche Impulse nicht immer ganz eindeutig als lang oder kurz identifizieren, da die Auflösung recht gering ist.

Beobachtung:

Man erhält z.B. die Kurve in Abb. 7.

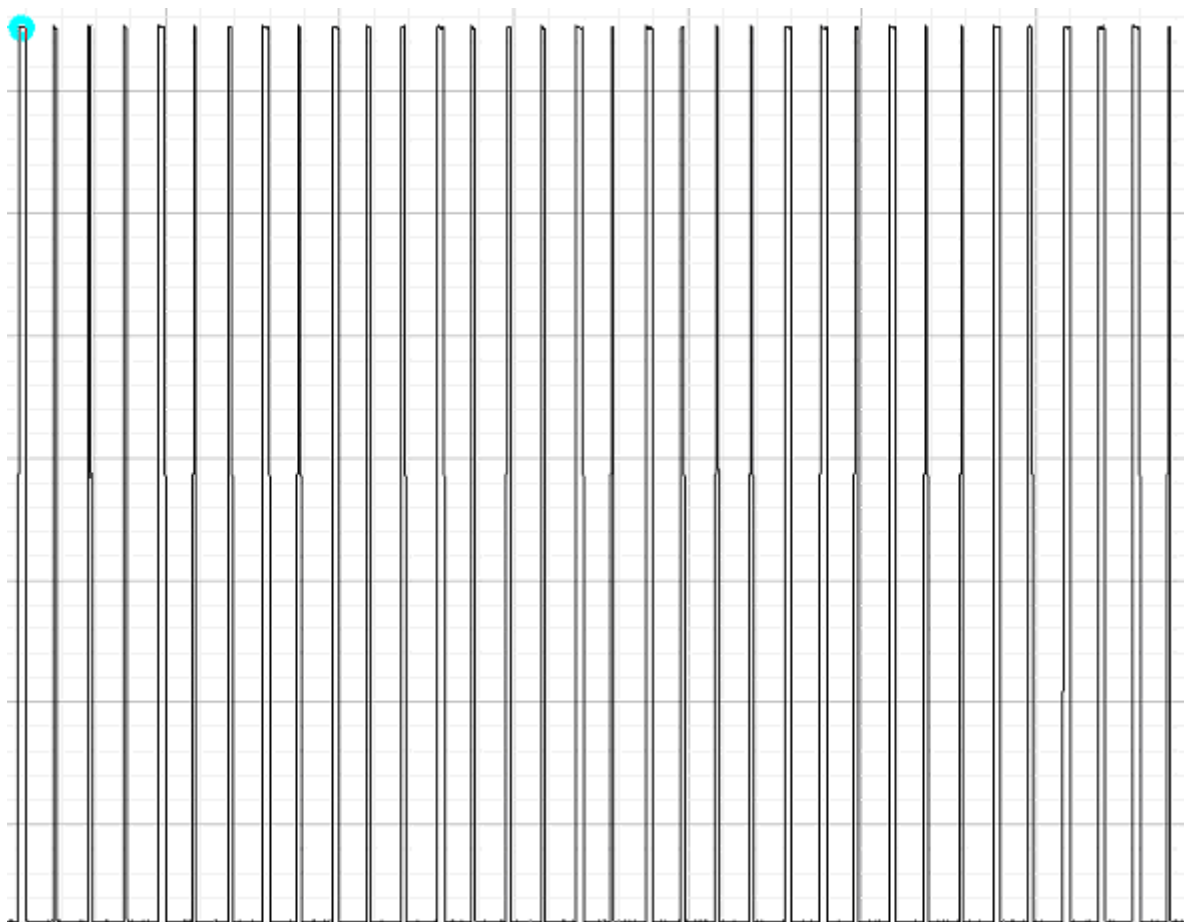


Abb.7: Beispielkurve mit Cassy

Auswertung:

Aus der Kurve liest man folgende Bitreihenfolge ab:

1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 0 0 0 1 1 0 1 0 0 1 0 1 1 1 0 .

Dabei entspricht das 1. Bit der Kurve (blauer Punkt) dem 20. Bit der Codierung. Daher muss man die Bitreihe wie folgt unterteilen:

1/0001/001/0/1001/00/0/1010/00/110/1001/0/1110
 8 4 9 0 5 0 3 9 0 7.

Unter den Binärzahlen stehen die dazugehörigen Dezimalwerte. Die nächsten vier Bits der Zehnerstelle des Jahres fehlen in der Graphik. Sie waren alle 0. Daraus ergibt sich folgendes Datum:

Mi, 05.09.2007; 09.48 Uhr

4. Literatur

- 1) Dieter Nährmann, Das große Werkbuch der Elektronik Band 4, Poing 1998
- 2) Hrsg. Jean Pütz, Einführung in die Digitalelektronik Band 1-3, Köln 1983
- 3) Hrsg. Wolfgang Hilberg, Funkuhrtechnik, München 1988
- 4) Hrsg. Wolfgang Hilberg, Funkuhren, München 1983
- 5) Dirk Piester, Peter Hetzel, Andreas Bauch, Zeit- und Normalfrequenzverbreitung mit DCF77, PTB-Mitteilungen 114 (2004), Heft 4, erhältlich unter www.ptb.de
- 6) DCF-Funkuhr mit 100 mm LED-Großdisplay, ELV-Journal 2/99 und 3/99.