Schwingquarze

Alfons Reichert

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung ... 3
2. Schwingquarze ... 4
2.1 Aufbau und Funktion ... 4
2.2 Elektronische Eigenschaften ... 5
2.3 Verwendung ... 11
3. Anwendungsbeispiele ... 12
3.1 Minisender ... 12
3.2 Signalgeber ... 13
3.3 Quarzuhr ... 17
3.3.1 Grundlagen ... 17
3.3.2 Experimente ... 19
3.4 Funkuhr ... 27
3.4.1 Grundlagen ... 27
3.4.2 Zeitzeichensender ... 31
3.4.3 Empfangsschaltungen ... 32
3.4.4 Experimente ... 36
4. Literatur ... 42

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 Schüler und 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 Schüler und 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 Schüler und 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 in Frage stellen 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 und März 2021

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 Funksendern verwendet, der dritte in Präzisionsquarzuhren und der vierte in Quarztaschenuhren, Quarzwanduhren und den entsprechenden Funkuhren.

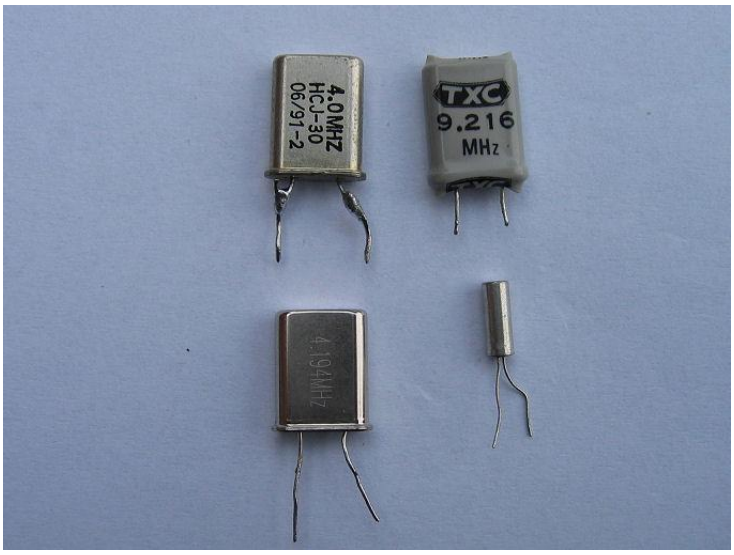

Abb.1: **Schwingquarze**

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).

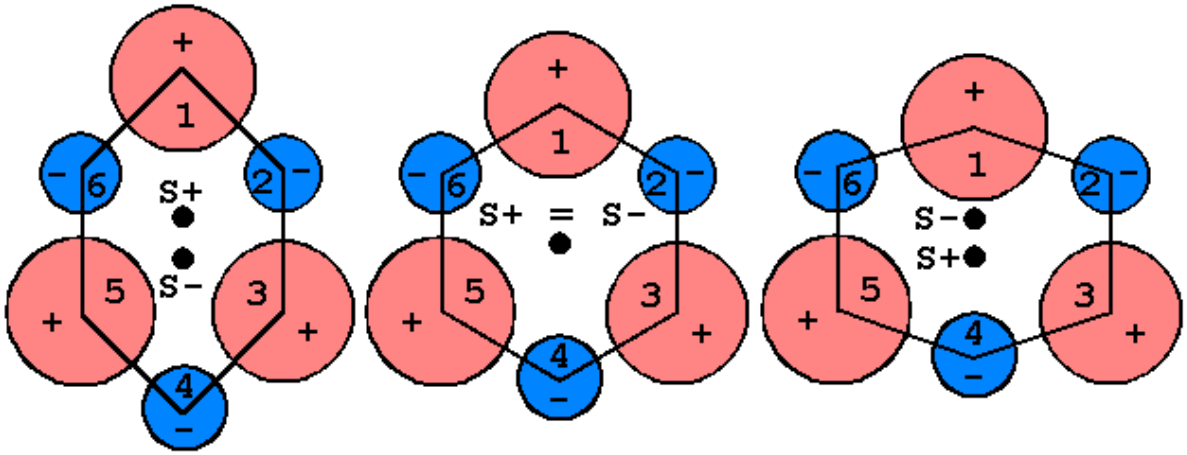

Abb.2: **Verlagerung des positiven bzw. negativen Schwerpunktes**

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 entsprechen große, rote Kugeln 4-fach positiven Siliziumionen, kleine, blaue Kugeln 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.

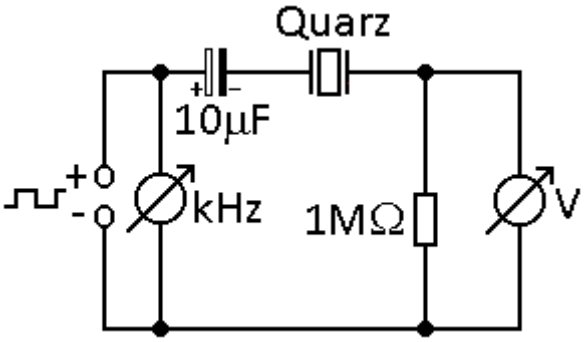

Abb.1: Messschaltung

Als Spannungsquelle dient ein Rechteckgenerator mit einem Frequenzbereich von 10 bis 100 kHz, wenn man einen Schwingquarz mit f = 32,768 kHz (Armbanduhr) oder f = 77,5 kHz (Funkuhr) verwendet. Die Spannung und die Frequenz misst man mit einem Messwerterfassungssystem, etwa cassy mobile mit aufgesteckter Timerbox. Man wählt für die Spannung den Bereich Effektivwerte aus. Alternativ kann man zwei hochohmige Digitalvoltmeter mit Frequenzfunktion verwenden, eines für die Spannung und eines für die Frequenz. Den genauen Versuchsaufbau mit cassy mobile zeigt Abb.2.

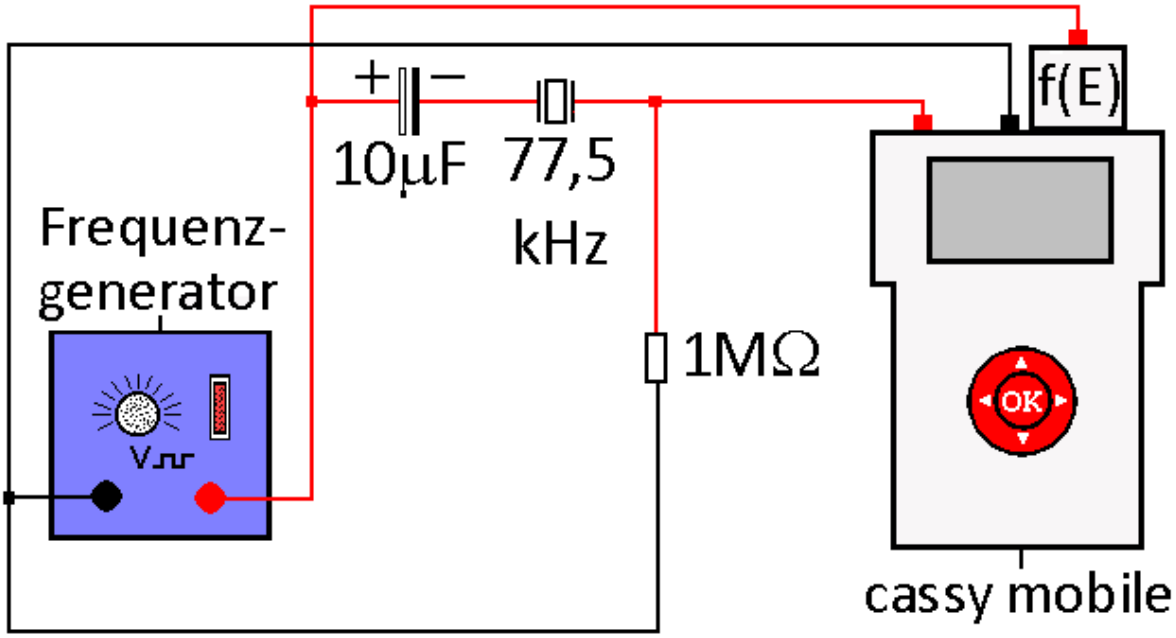

Abb.2: Versuchsaufbau

Man legt eine Effektivspannung von ca. U_{eff} = 2 V an. Fährt man das Frequenzspektrum von f_1 = 77 kHz bis f_2 = 78 kHz in kleinen Schritten in auf- oder absteigender Richtung ab, so erhält man für einen Quarz der Resonanzfrequenz f_R = 77,5 kHz die Messwerte in Tabelle 1

f [Hz]	77010	77122	77166	77265	77307	77392	77443	77470	77501
U[V]	0,36	0,36	0,36	0,37	0,37	0,39	0,42	0,52	1,82
f [Hz]	77502	77513	77533	77585	77639	77711	77824	77929	77998
U[V]	2,05	0,10	0,23	0,31	0,32	0,33	0,34	0,34	0,34

Tabelle 1: Messwerte

und die Messkurve in Abb.3. Aus der Messkurve wird deutlich, dass ein Schwingquarz zwei Resonanzfrequenzen besitzt, eine Resonanzfrequenz f_s für eine Längsschwingung in Stromrichtung in den Zuleitungen und eine zweite Resonanzfrequenz f_p für eine Querschwingung senkrecht dazu. Beide liegen sehr nahe beieinander. Aus Untersuchungen an vielen verschiedenen Quarzen findet man empirisch folgenden Zusammenhang zwischen beiden Frequenzen

$$\frac{f_P}{f_S} = 1{,}0029.$$

Aus der Kurve in Abb.3 erhält man:

$$\frac{f_P}{f_S} = \frac{77{,}513kHz}{77{,}502kHz} = 1{,}00014.$$

Der Quarz verhält sich zugleich wie eine Siebkette mit einem Impedanzminimum und ein Sperrkreis mit einem Impedanzmaximum. Das macht die Abb. 4 deutlich. Sie lässt sich aus der Messkurve 3 nach den Gesetzen im Wechselstromkreis mit folgender Formel berechnen:

$$Z = R * \sqrt{\left(\frac{U}{U_R}\right)^2 - 1} \ .$$

Darin bedeuten:
R : Messwiderstand
U : Eingangsspannung,
U_R : Messspannung an R
Z : Impedanz des Schwingquarzes.

Dabei wurde die Impedanz des Kondensators in der Messschaltung nicht berücksichtigt, da sie sehr viel kleiner ist als die Impedanzen des Messwiderstandes und des Quarzes. Die genaue Eingangsspannung betrug U = 2,18 V.

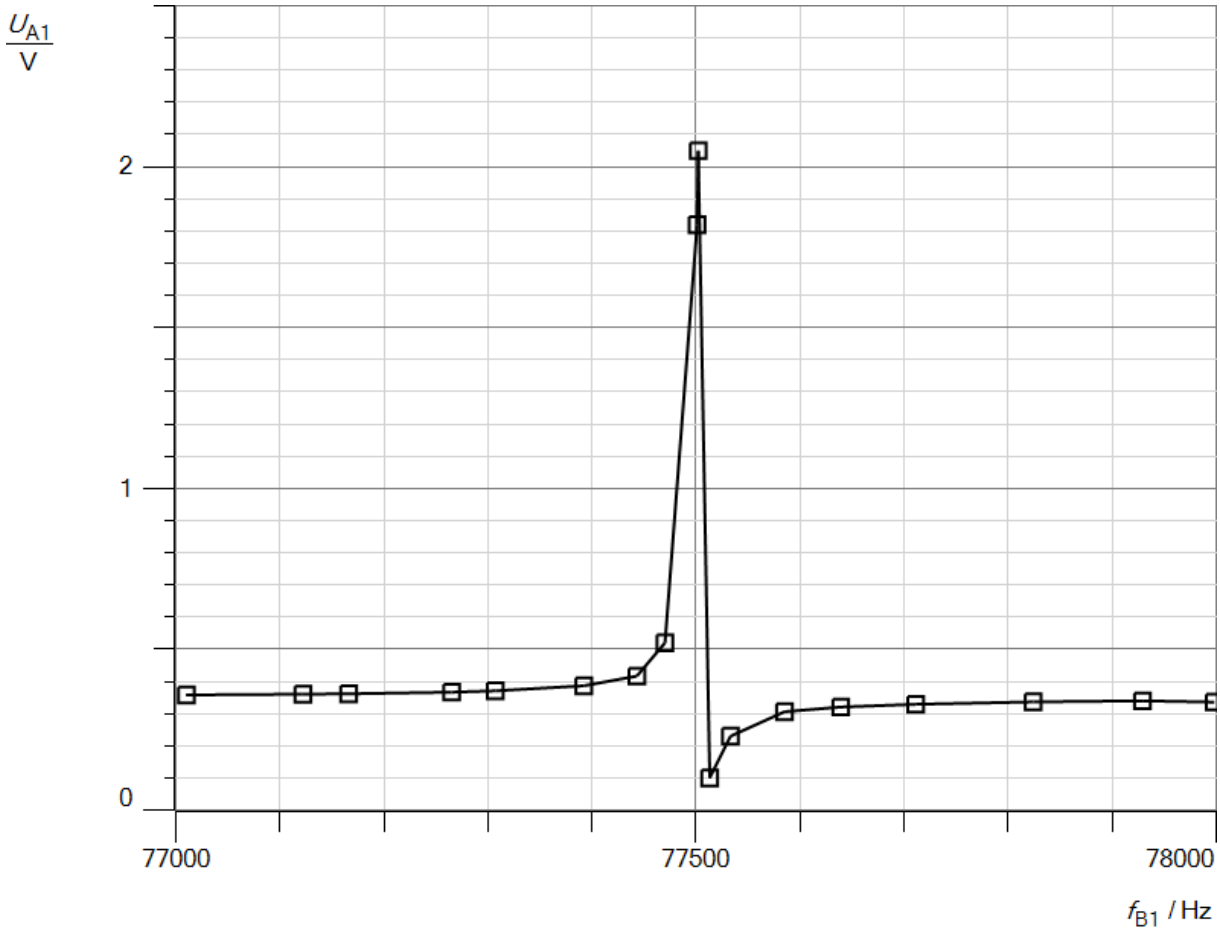

Abb.3: Messkurve

Die Impedanz für die Längsschwingung ist wesentlich kleiner als die Impedanz für die Querschwingung. Im ersten Fall schwingen die Elektronen in der Zuleitung in die gleiche Richtung wie die Elektronen im Quarz. Es fließt in den Anschlüssen ein Wechselstrom, ähnlich wie bei

einem Kondensator. Im zweiten Fall schwingen sie senkrecht dazu, weshalb in den Zuleitungen kein merklicher Strom fließt.

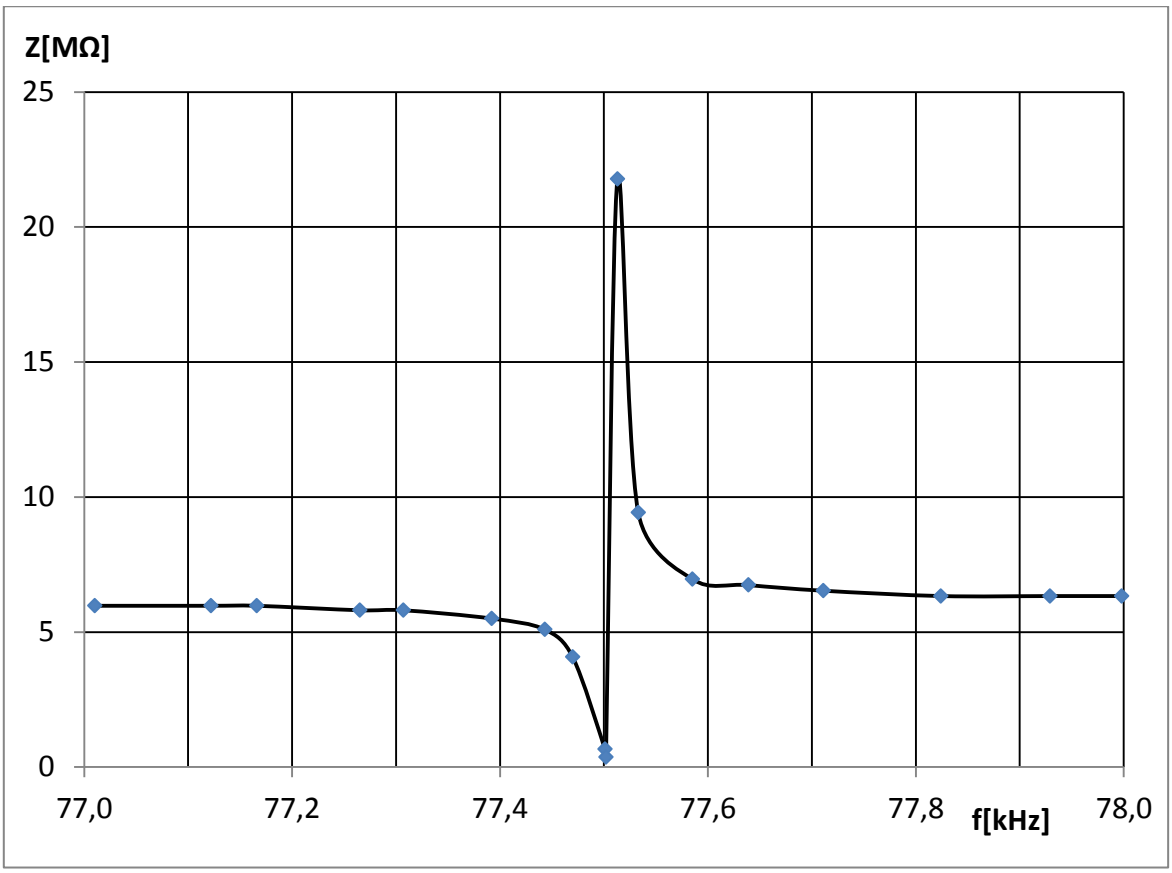

Abb.4: Impedanz Schwingquarz

In vielen Elektronikbüchern findet man als Ersatzschaltung für einen Quarz den Schaltplan in Abb.5.[1),2)]

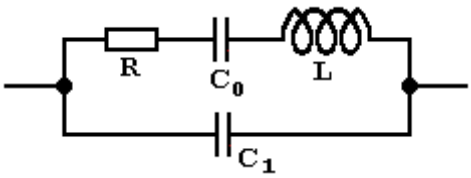

Abb. 5: Ersatzschaltung

Dass diese Ersatzschaltung das Verhalten eines realen Quarzes nur näherungsweise beschreibt, zeigen die folgenden Überlegungen. Für die Impedanz Z_1 der Siebkette, bestehend aus dem Widerstand R, dem Kondensator C_0 und Spule L gilt mit den Gesetzen im Wechselstromkreis:

$$Z_1 = \sqrt{(R^2 + (R_L - R_{C_0})^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C_0}\right)^2}.$$

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

$$Z_2 = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{Z_1^2} + \frac{1}{R_{C_1}^2}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{Z_1^2} + (\omega C_1)^2}}$$

Für einen Quarz mit f = 77,5 kHz gelten näherungsweise folgende Werte[3)]:

$$L = 3{,}12711\ kH$$

$$R = 17\ k\Omega$$

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

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

Wertet man beide Funktionen für diese Angaben mit Excel im Frequenzbereich zwischen f_1 = 75 kHz und f_2 = 80 kHz aus, so ergeben sich Abb. 6 und Abb. 7. Aus ihnen kann man erkennen, dass nur bei der gesamten Ersatzschaltung die Resonanz ähnlich scharf ausgeprägt ist wie bei einem wirklichen Quarz. Die Impedanzen der gesamten Ersatzschaltung liegen bei Frequenzen unterhalb und oberhalb der Resonanzfrequenz tiefer 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 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. Besonders auffällig ist, dass der parallel geschaltete Kondensator C_1 keine zweite Resonanzfrequenz verursacht, wie man sie bei allen realen Quarzen beobachtet, auch wenn sie nicht immer so stark ausgeprägt ist wie beim 77,5kHz-Quarz. Die Ersatzschaltung beschreibt das Verhalten eines wirklichen Quarzes nur näherungsweise. Außerdem erscheinen die elektronischen Daten der Ersatzbauteile sehr unrealistisch. Es gibt keine realen Kondensatoren im fF-Bereich und eine Induktivität im kH-Bereich besitzen nur Spulen mit hoher Windungszahl und einem speziellen Ferritkern. Sie sind in elektronischen Schaltungen eher selten anzutreffen. Die Resonanzfrequenzen lassen sich bei realen Quarzen in geringen Grenzen verändern, in dem man einen Trimmer von 20-60 pF zum Quarz in Reihe oder parallel schaltet. Ein Kondensator mit C = 20 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.

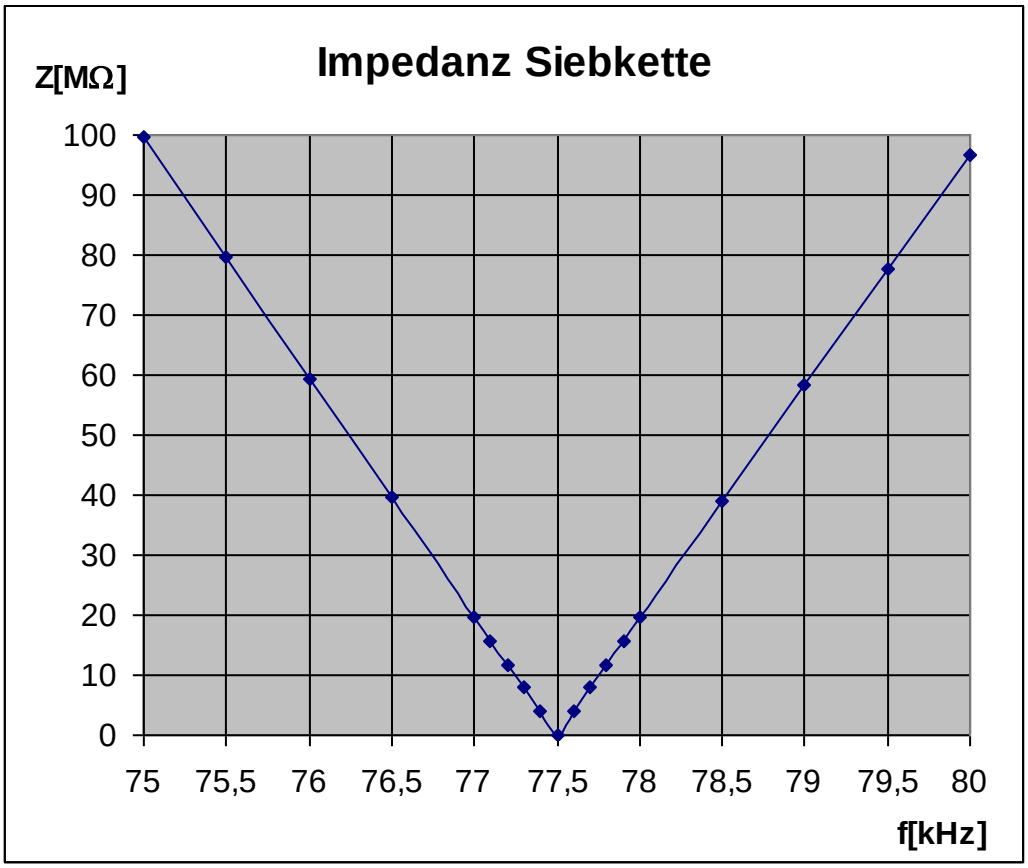

Abb. 6: Impedanz Z_1 der Siebkette

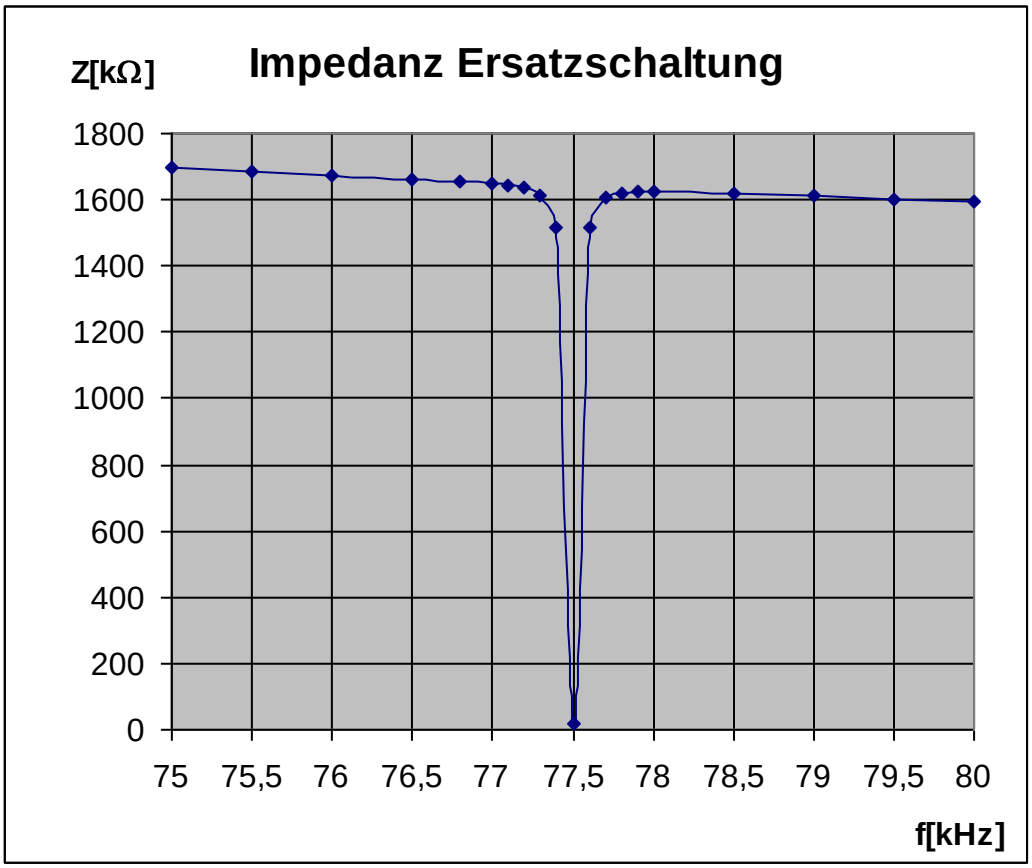

Abb. 7: Impedanz Z_2 der gesamten Ersatzschaltung

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. Vandalen sichere 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 Tintenstrahldrucker 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.

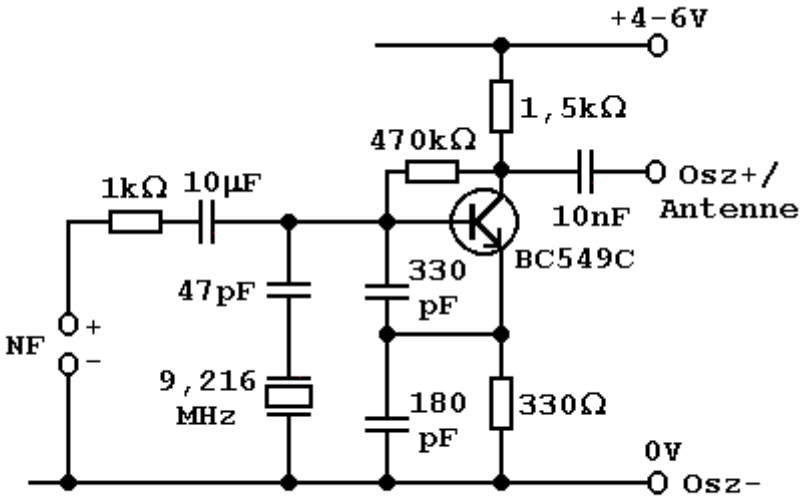

Abb.1: **Schaltplan eines kleinen KW-Minisenders**

Das Herzstück der Schaltung ist ein Oszillator mit 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:

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

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 Ferrerro-Rocher-Dose. Die Zuleitungen verlötet man an verschieden 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.

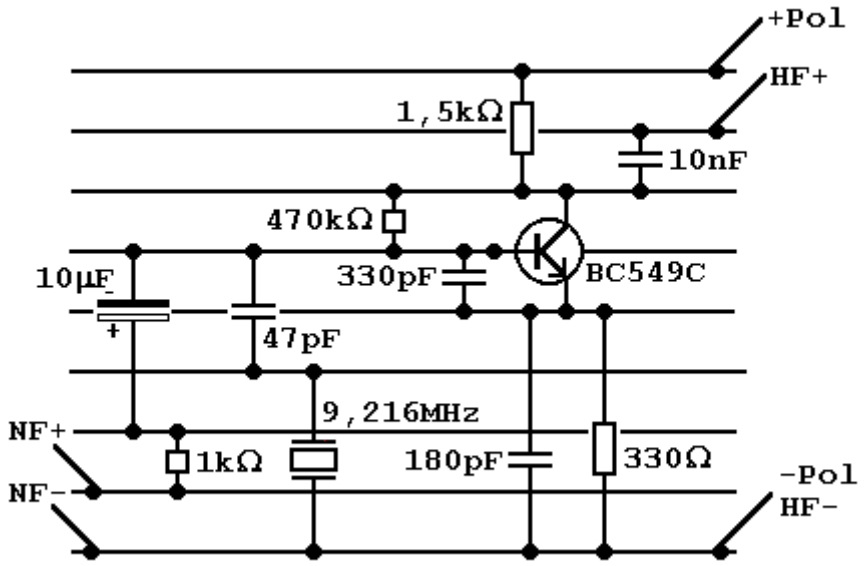

Abb.2: Verschaltung des KW-Minisenders auf einer Lochrasterplatine

3.2 Signalgeber

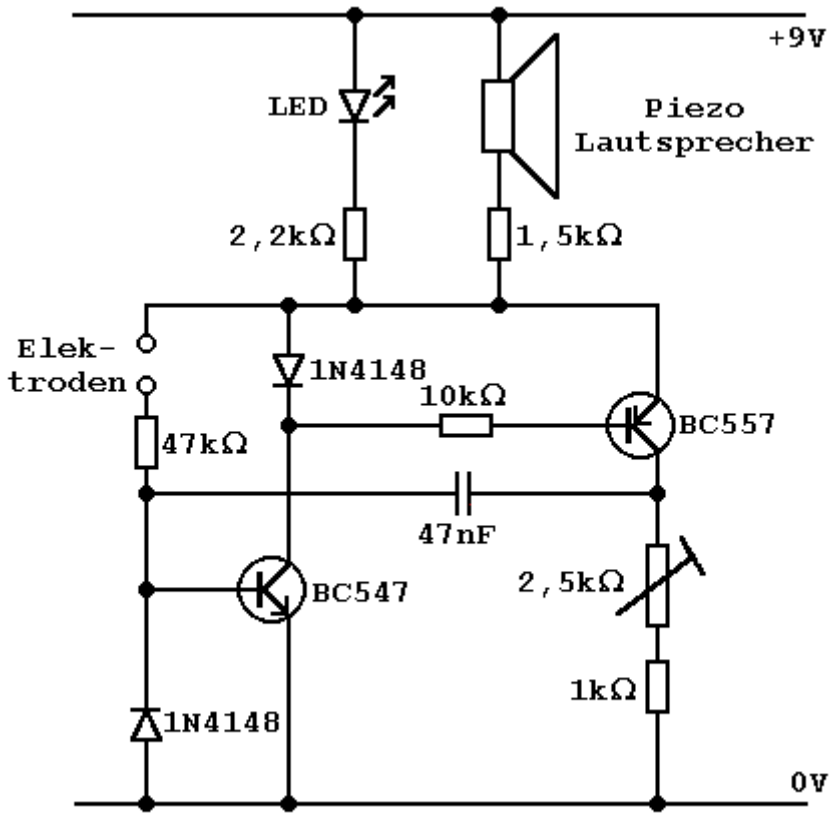

Abb.1: Schaltplan eines Signalgebers

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.
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 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.

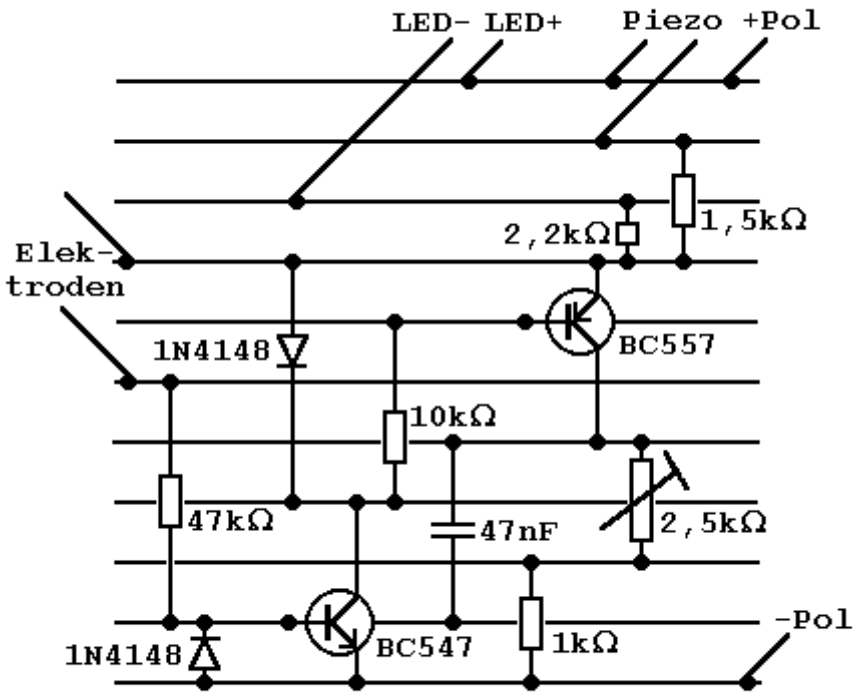

Abb.2: Verschaltung des Signalgebers auf einer Lochrasterplatine

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 Elektroden-

eingang 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, indem 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.
Ferner kann man mit der kleinen Schaltung Glühbirnen 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.

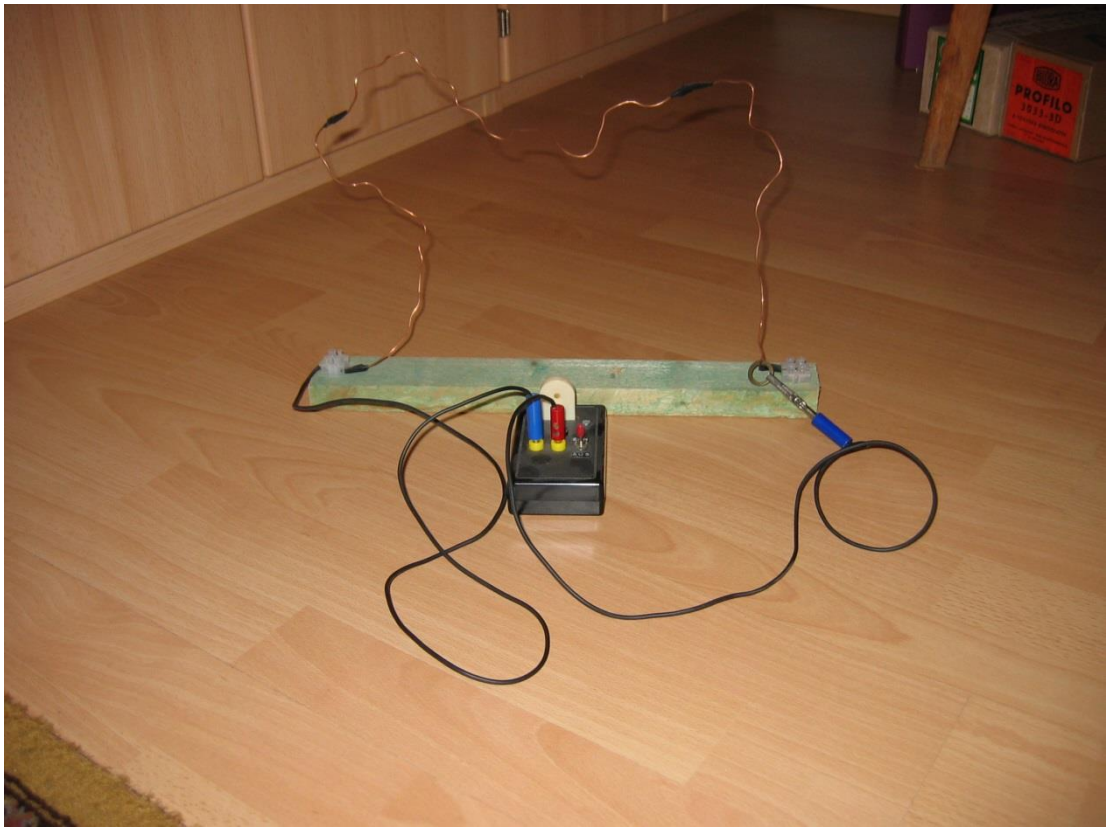

Abb.3: Heißer Draht mit dem Signalgeber

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

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 Lautstärkeregler 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 Anwenderschaltungen 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

Tabelle 1: Messtabelle

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. Deutlich erkennt man bei der Armbanduhr links oben den Quarz in Form eines silbrig grauen kleinen Zylinders, links unten das nur 4*5 mm große IC als schwarze Kreisfläche, in der Mitte oben die Knopfzelle als silbrig graue 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 kHz, der der Wanduhr eine Frequenz f = 4,194304 MHz. Die für den Schwingkreis benötigte Elektronik ist zusammen mit der Frequenzteilerschaltung im IC untergebracht. Die Pinbelegung des ICs 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 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-Segment-Anzeigen, die Leuchtdioden enthalten, oder über ein LCD-Display sichtbar macht.

Abb.1a: Quarzarmbanduhr

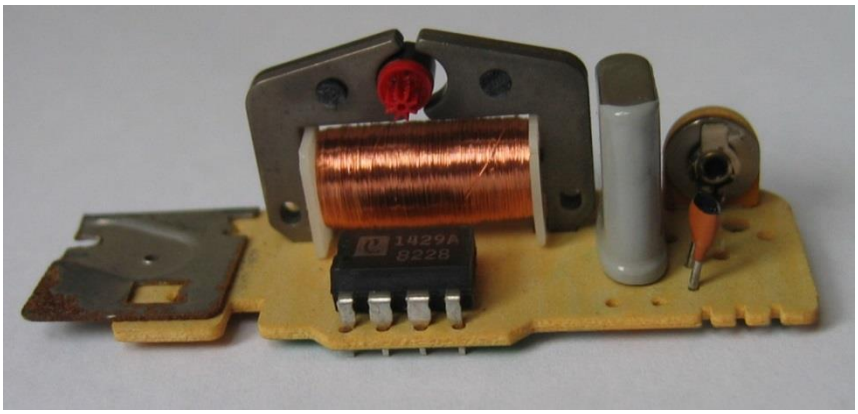

Abb.1b: Quarzwanduhr

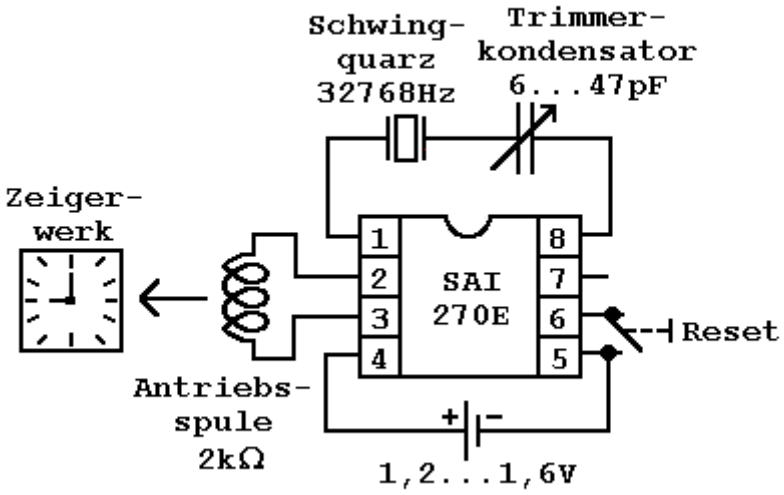

Abb.2: Schaltplan einer Quarzarmbanduhr

3.3.2 Experimente

Zunächst sollen ein paar Versuche beschrieben werden, die man mit einem Uhrwerk durchführen kann, das man aus einer Quarzarmbanduhr ausbaut. Dazu lötet man kurze Kabel an die Ausgänge des Schwingquarzes, der Ankerspule und den Plus- und Minuspol. Man baut das Modul in eine Ferrero-Rocher-Dose ein. Am Deckel befestigt man eine schwarze Buchse für den Minuspol, eine rote für den Pluspol, zwei gelbe für die Schwingungsausgänge und zwei grüne für die Taktausgänge. Man verbindet die Anschlüsse auf der Platine des Moduls über Lötösen mit den entsprechenden Buchsen. Dabei lötet man zwischen den positiven Schwingungsausgang und die betreffende gelbe Buchse einen Kondensator mit C = 22 nF, um die Oszillatorspannung von der Gleichspannung der Batterie zu entkoppeln. Parallel zu den Taktausgängen legt man außerdem einen Piezoquarz EPZ-27MS44, den man zusätzlich mit etwas Tesafilm auf die Innenseite des Deckels klebt. Den fertigen Aufbau zeigt Abb. 3.

Versuch 1:
Durchführung:
Man schließt die Uhr an eine geglättete Gleichstromquelle mit einer Spannung U = 1,5 V an oder betreibt sie mit einer Batterie mit U = 1,5 V. Die Schwingungsausgänge verbindet man mit den Spannungseingängen eines Messwerterfassungssystems, etwa cassy mobile. Als Messzeit wählt man t = 200 µs bei einer Auflösung von Δt = 2 µs. Man startet cassy. Die Messung stoppt automatisch nach Ablauf der Messzeit.

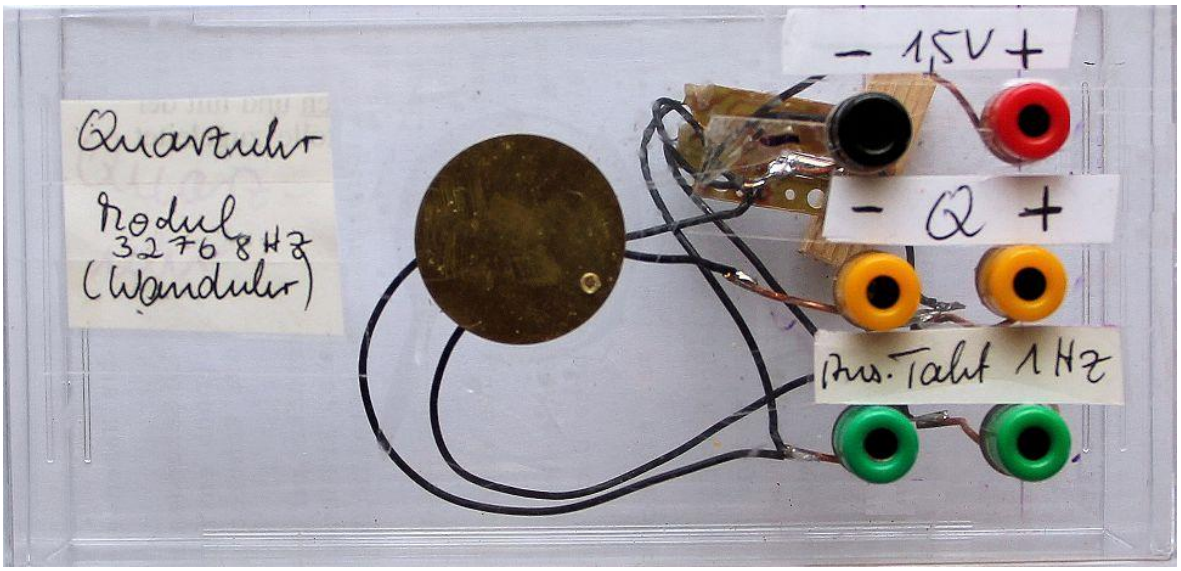

Abb.3: Fertige Schaltung

Beobachtung:
Man erhält die Kurve in Abb.4. Der Piezoquarz knackt leise im 1-Sekundentakt.
Auswertung:
Man bestimmt mit cassy die Periodendauer T. Es gilt:

$$T = 0{,}031ms.$$

Daraus folgt für die Frequenz f

$$f = \frac{1}{0{,}031ms} = 32258\,kHz.$$

Die gemessene Frequenz ist etwas höher als die vom Hersteller angegebene Frequenz. Der Fehler ist vor allem auf die zu geringe Auflösung von cassy mobile zurückzuführen, die nur eine Genauigkeit von maximal Δt = 2 µs zulässt.

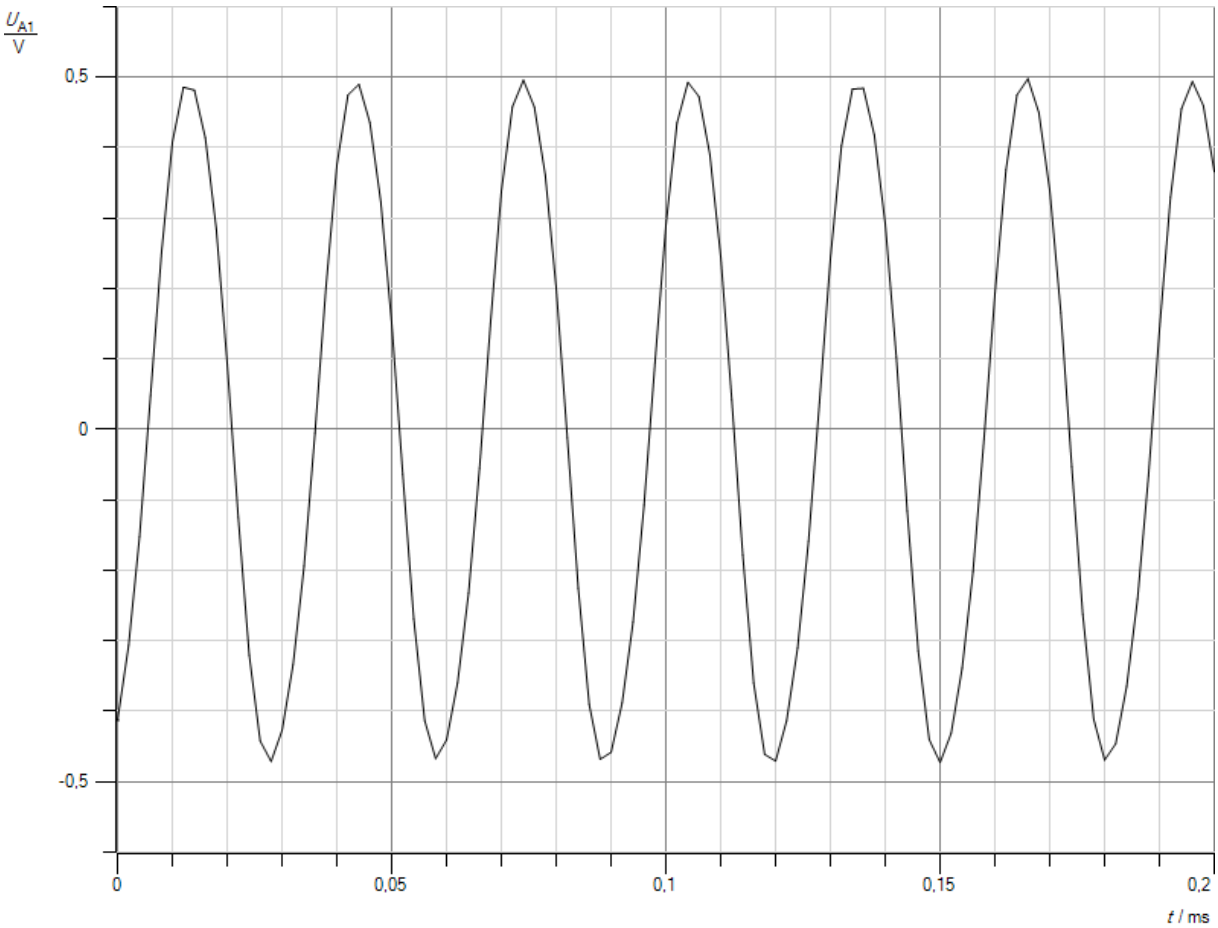

Abb.4: Messkurve

Versuch 2:
Durchführung:
Man schließt die Uhr an eine geglättete Gleichstromquelle mit einer Spannung U = 1,5 V an oder betreibt sie mit einer Batterie mit U = 1,5 V. Die Ausgänge der Erregerspule verbindet man mit einem Messwerterfassungssystem, etwa cassy oder cassy mobile. Als Messzeit wählt man t = 15 s bei einer Auflösung von t = 50 ms. Man startet cassy mobile. Die Messung stoppt automatisch nach Ablauf der Messzeit.
Beobachtung:
Man erhält die Kurve in Abb.5. Der Piezoquarz knackt leise im 1-Sekundentakt.
Erklärung:
Durch den positiven Spannungsimpuls dreht sich der Läufer, der aus einem Rundmagneten (s. Versuch 3) 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 t = 2 s aufeinander folgen, ändert sich die Polung des Erregermagneten mit einer Frequenz von f = 0,5 Hz, der Motor rotiert mit dieser Drehfrequenz. Beim verwen-

deten Piezoquarz spielt die Polung der Signale keine Rolle. Er knackt daher im Sekundentakt, also mit einer Frequenz von 1 Hz.

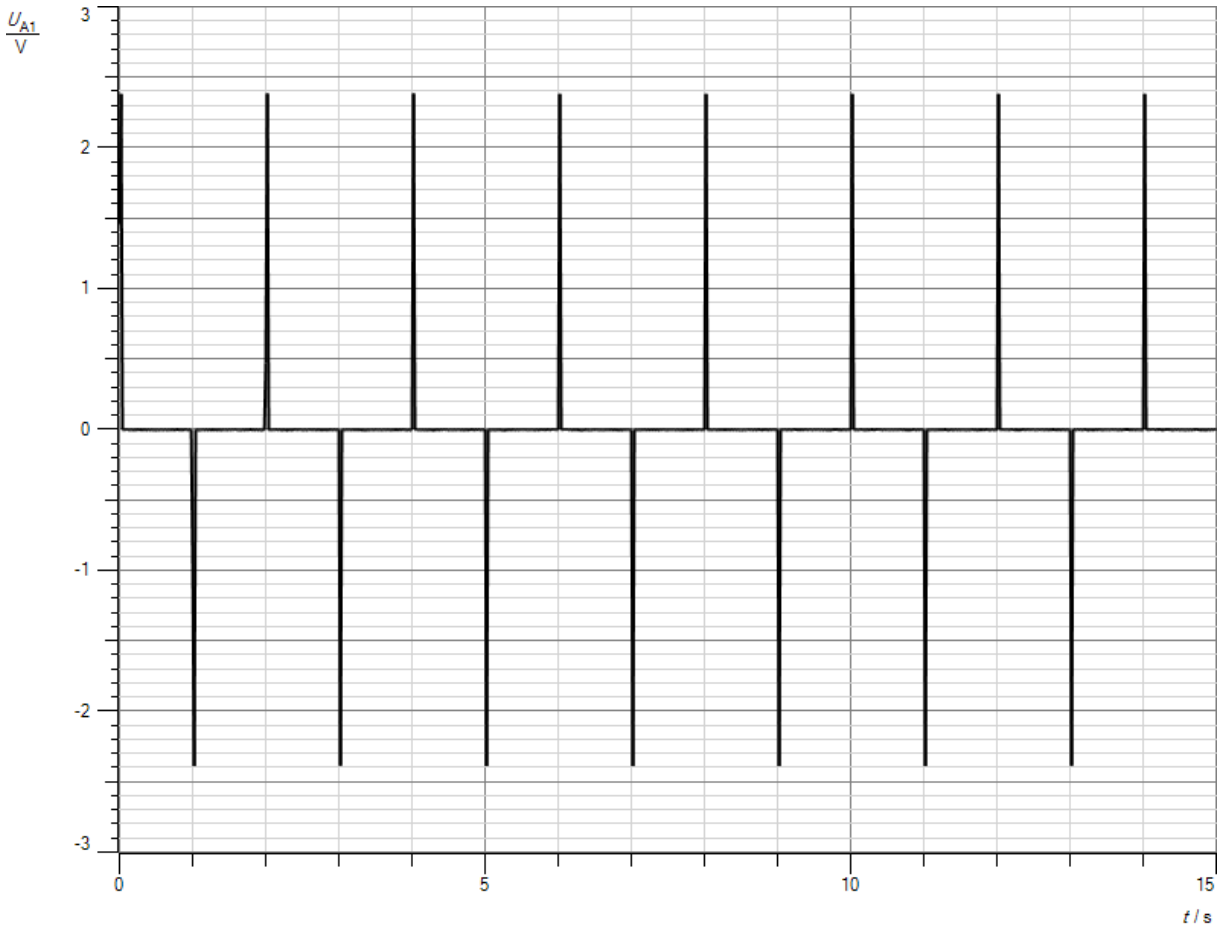

Abb.5: Spannung an der Erregerspule

Versuch 3:
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 Runddauermagnet, dessen eine Halbkreishälfte ein Nordpol, die andere ein Südpol ist.

Für den folgenden Versuch benötigt man einen selbstgebauten Quarzoszillator mit einer Frequenz f = 32,768 kHz. Abb. 6 zeigt seine Schaltung. Den benötigten Quarz lötet man sich einer alten Quarzuhr aus. Die Verschaltung auf einer Lochrasterplatine entnehmen Sie Abb. 7. Wenn man will, kann man sie in ein Gehäuse einbauen. Dann kann man sie jederzeit mit ein paar Handgriffen in Betrieb nehmen. Abb. 8 zeigt die in einer Ferrero-Rocher-Dose untergebrachte Schaltung.

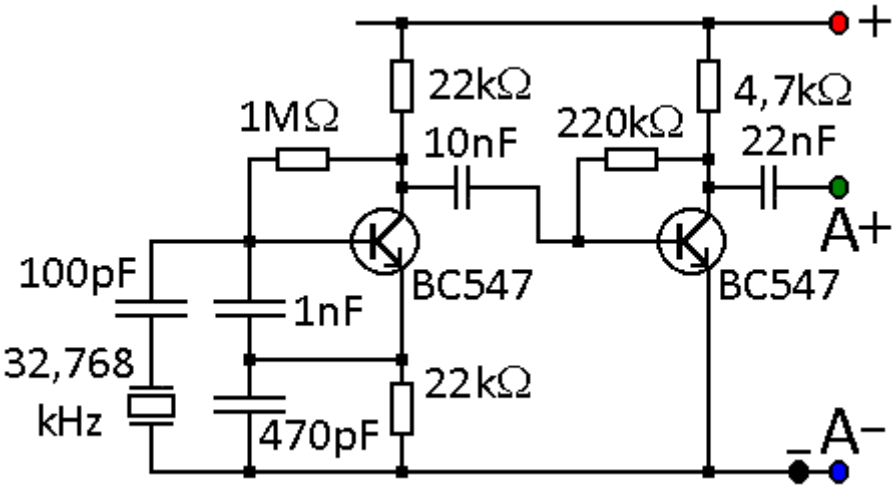

Abb.6: Schaltplan eines Quarzoszillators mit f = 32,768 kHz

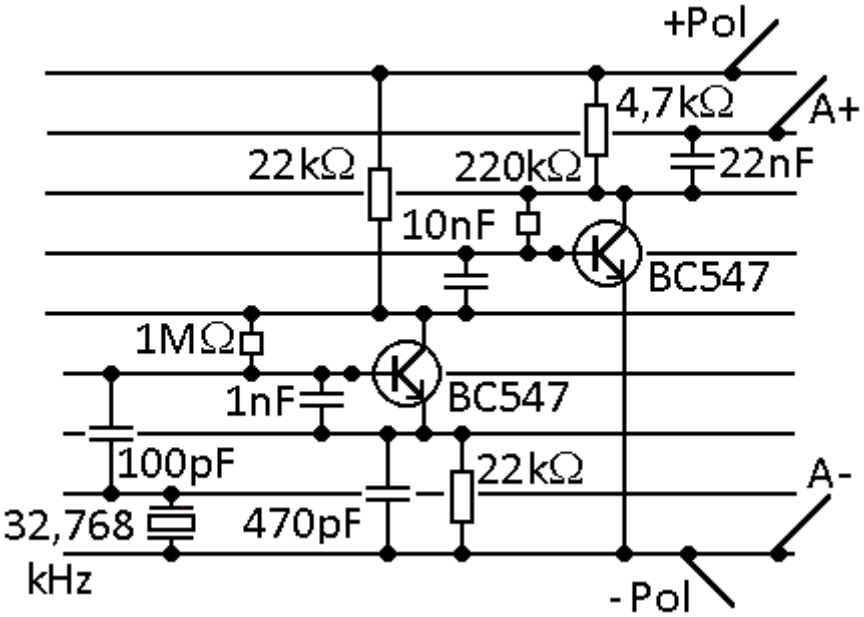

Abb.7: Verschaltung auf einer Lochrasterplatine

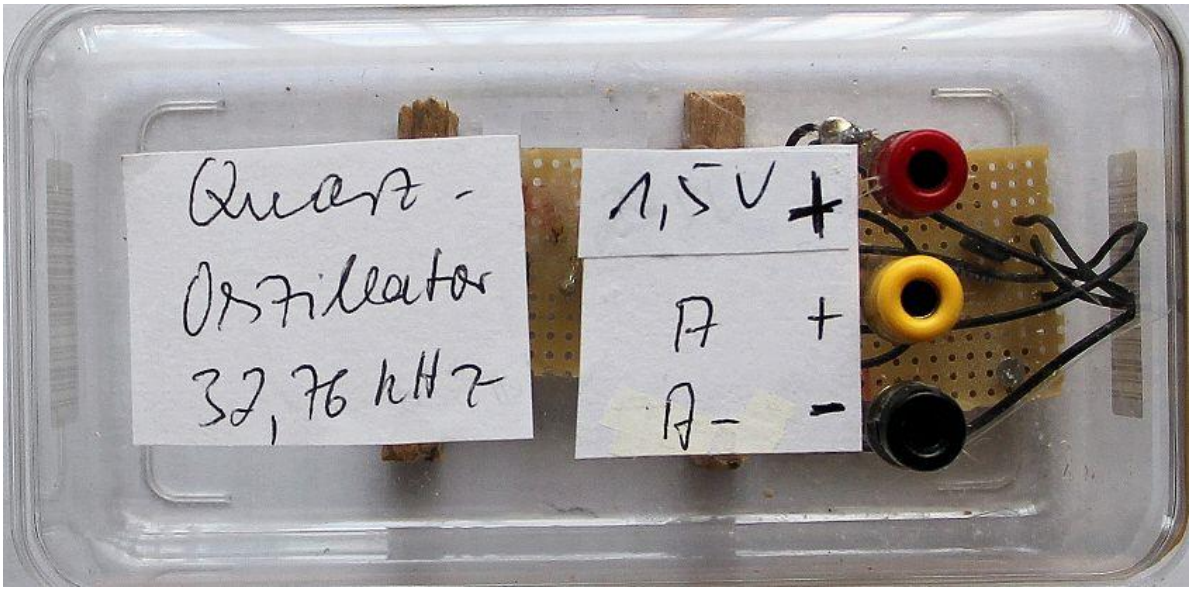

Abb.8: Fertige Schaltung

Versuch 4:
Durchführung:
Man verbindet den Plus- bzw. Minuspol der fertigen Schaltung mit einer geglätteten Gleichspannungsquelle von U = 1,5 V oder einer Batterie mit U = 1,5 V. Man schließt die Ausgänge A- und A+ an den Spannungseingang von cassy mobile an. Man wählt als Messzeit t = 200 µs mit einer Auflösung Δt = 2 µs und als Aufnahmemodus die Option wiederholen. Im Spannungsmenü stellt man die Option Momentanwerte ein. Man startet cassy mobile. Die Aufzeichnung wiederholt sich ständig solange, bis man cassy mobile stoppt.
Beobachtung:
Kurz nach dem Einschalten der Spannungsquelle liegt keine Schwingung vor. Im Zeitraum von ein paar Sekunden schaukeln sich kleine statistischen Oszillationen des Quarzes durch Rückkopplung immer mehr zu einer entdämpften Schwingung auf, bis eine Amplitude von etwa U_0 = 0,7 V erreicht wird. Dann erhält man die Messkurve in Abb. 9.
Auswertung:
Man bestimmt die Periodendauer der Schwingung und erhält

$$T = 0{,}031\ ms.$$

Daraus ergibt sich eine Frequenz f

$$f = \frac{1}{0{,}031ms} = 32258Hz.$$

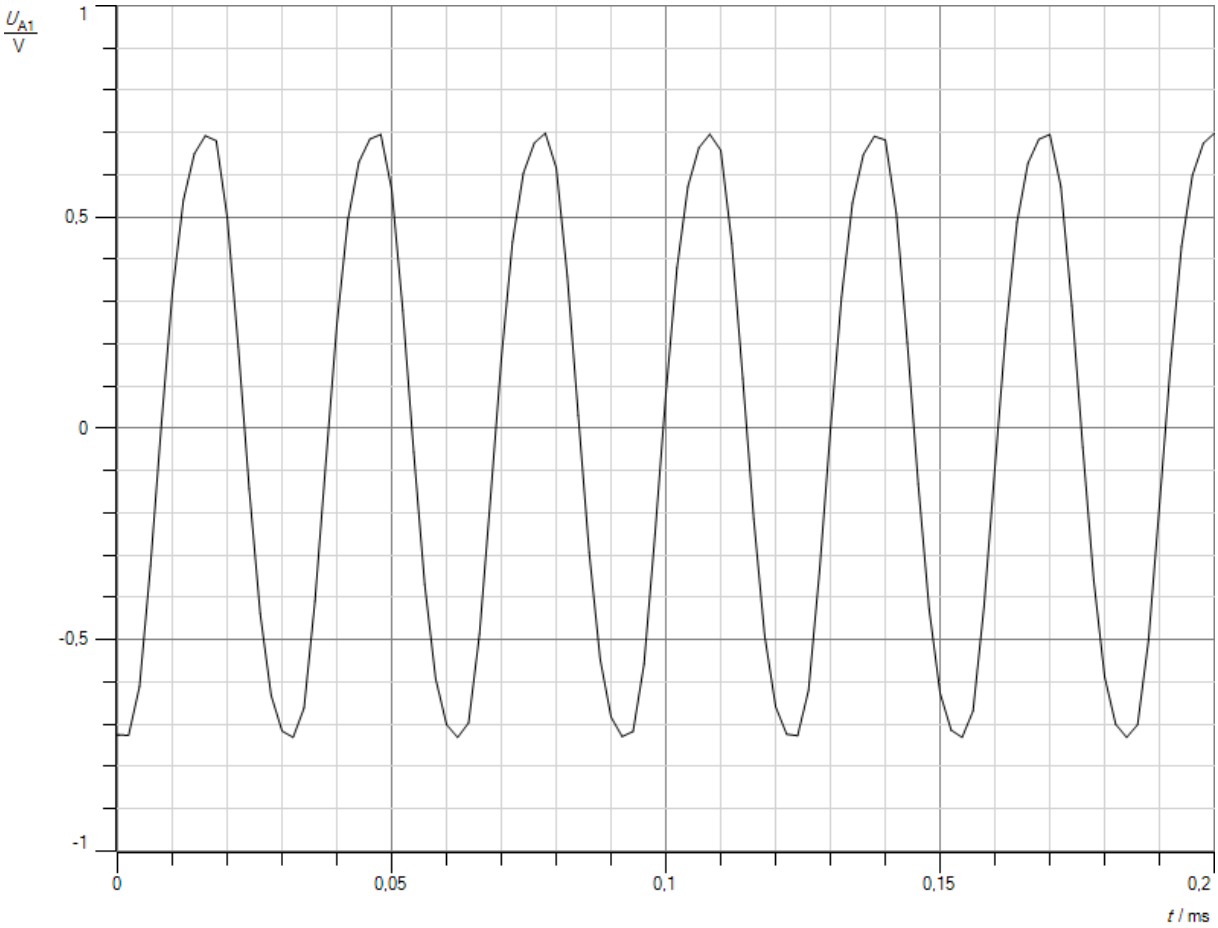

Abb.9: Messkurve

Man überprüft die Frequenz mit einem Digitalmultimeter mit Frequenzfunktion, in dem man die Ausgänge A- und A+ der Schaltung mit den entsprechenden Eingängen des Messgerätes verbindet. Das Messgerät zeigt eine Frequenz f

$$f = 32759Hz.$$

Die Abweichung zwischen dem mit cassy ermittelten Wert und dem direkt gemessenen Wert wird dadurch verursacht, dass cassy mobile an die Grenzen seiner Auflösung stösst und daher das Ergebnis mit einem hohen Messfehler behaftet ist. Um einen besseren Wert zu erhalten, kann man einen Oszillographen oder das große cassy einsetzen. Laut Hersteller besitzen Schwingquarze für Quarzuhren eine genaue Frequenz von f = 32768 Hz. Die gemessene Frequenz ist um 9 Hz kleiner. Da der verwendete Quarz mit einer etwas geringeren Frequenz schwingt, ginge die Quarzuhr etwas nach und zwar pro Takt um t_T

$$t_T = \frac{1}{32759Hz} - \frac{1}{32768Hz} = 8{,}38ns.$$

Das sind pro Sekunde t_S

$$\mathrm{t_S} = 8{,}38\mathrm{ns} * 32768 = 0{,}275\mathrm{ms}.$$

Allerdings kann man durch einen kleinen Zusatzkondensator die Frequenz des Quarzes leicht korrigieren und damit genauer einstellen, wie in Kapitel 2.2 beschrieben.
Die Frequenz des Quarzoszillators wird in der Quarzuhr anschließend auf eine Frequenz f = 0,5 Hz herunter geregelt. Dazu benötigt man eine Frequenzteilerschaltung mit Duallogik. Diese Bausteine sind recht teuer. 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.

Der Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass man dann eine zusätzliche Oszillatorschaltung mit einer Frequenz von z.B. f = 1 MHz, benötigt.

Versuch 5 :
Aufbau:
Abb. 10 enthält den Schaltplan für einen Taktgeber mit einer Frequenz f = 1 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 kΩ-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. 11. 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 verschieden farbigen Telefonbuchsen, die man am Gehäuse verschraubt. Man benötigt eine rote für den Pluspol der Stromquelle, eine grüne für den Taktausgang, eventuell eine gelbe für den invertierten Taktausgang und eine schwarze für den Minuspol 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.

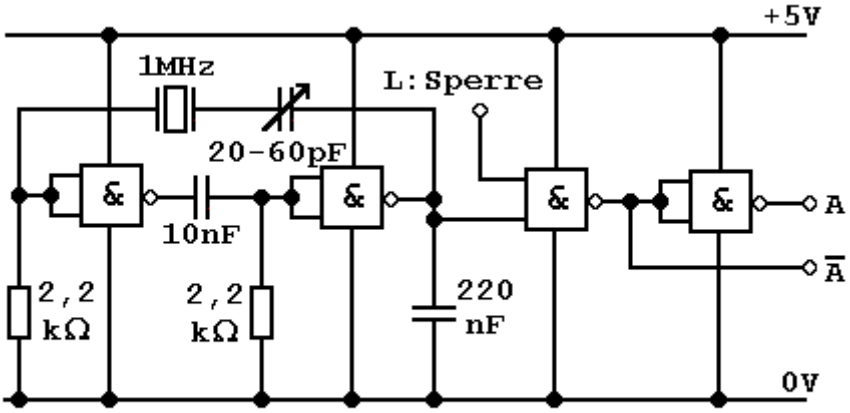

Abb. 10: Schaltplan eines Taktgebers

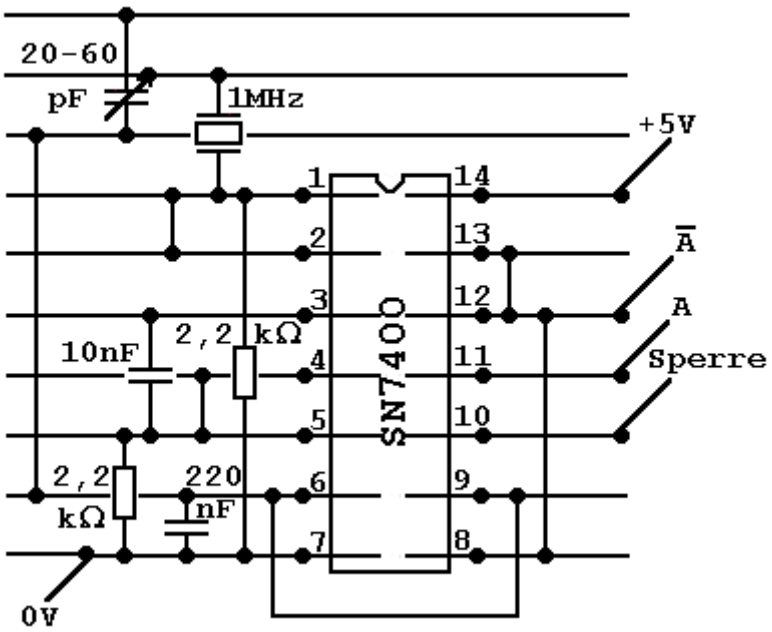

Abb. 11: Verschaltung des Taktgebers auf einer Lochrasterplatine

Durchführung:
Mit dem Ausgang des Taktgebers steuert man den Eingang eines in jeder Physiksammlung vorhandenen Digitalzählers oder eines Digitalvoltmeters mit Frequenzfunktion an.
Beobachtung:
Der Zähler zählt die Mikrosekunden. Das Digitalmultimeter zeigt eine Frequenz f

$$f = 0{,}9998MHz$$

an.
Erklärung:
Der Schwingquarz schwingt mit einer Frequenz f = 1MHz, seine Periodendauer beträgt also

$$T = 1\mu s.$$

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

Versuch 6:
Aufbau:
Dazu dient die Schaltung in Abb.12.

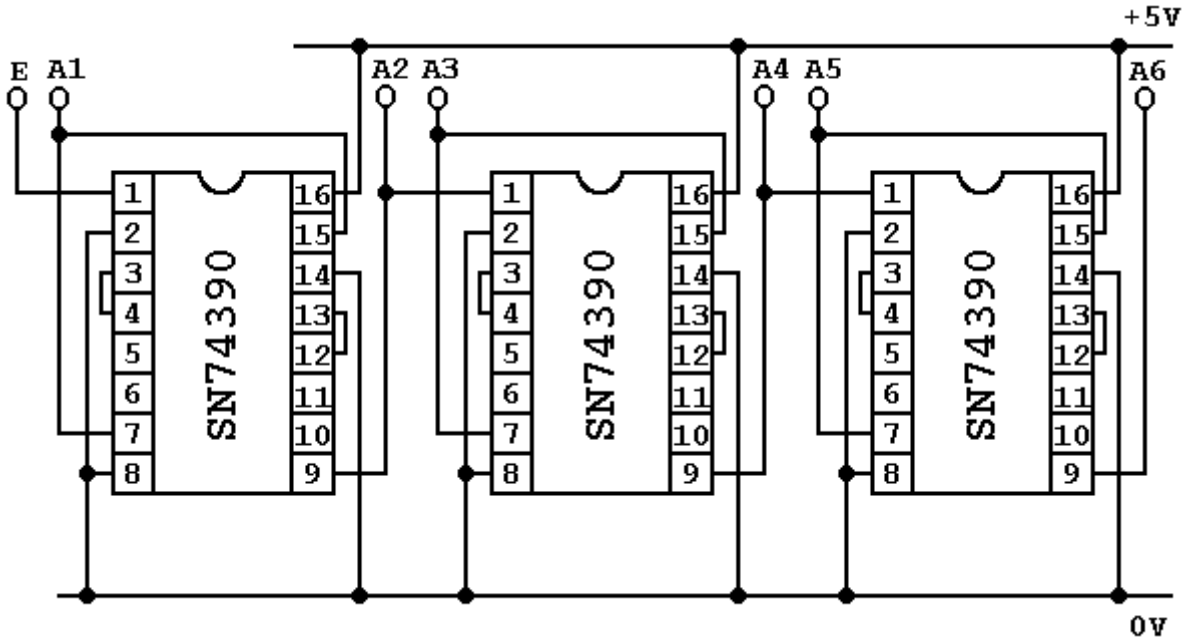

Abb. 12: Frequenzteilerschaltung

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 Schaltlitze 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 verschieden farbigen Telefonbuchsen, die man am Gehäuse verschraubt. Man benötigt eine rote für den Pluspol der Stromquelle, sechs grüne für die Taktausgänge A1…A6, eine gelbe für den Eingang E und eine schwarze für den Minuspol der Stromquelle. So kann der Fre-

quenzteiler 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.

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)

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 jede Minute als 1 ausgestrahlt. Da es sechzigmal gesendet wird, können auch Uhren mit ungüns-

tigen 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.

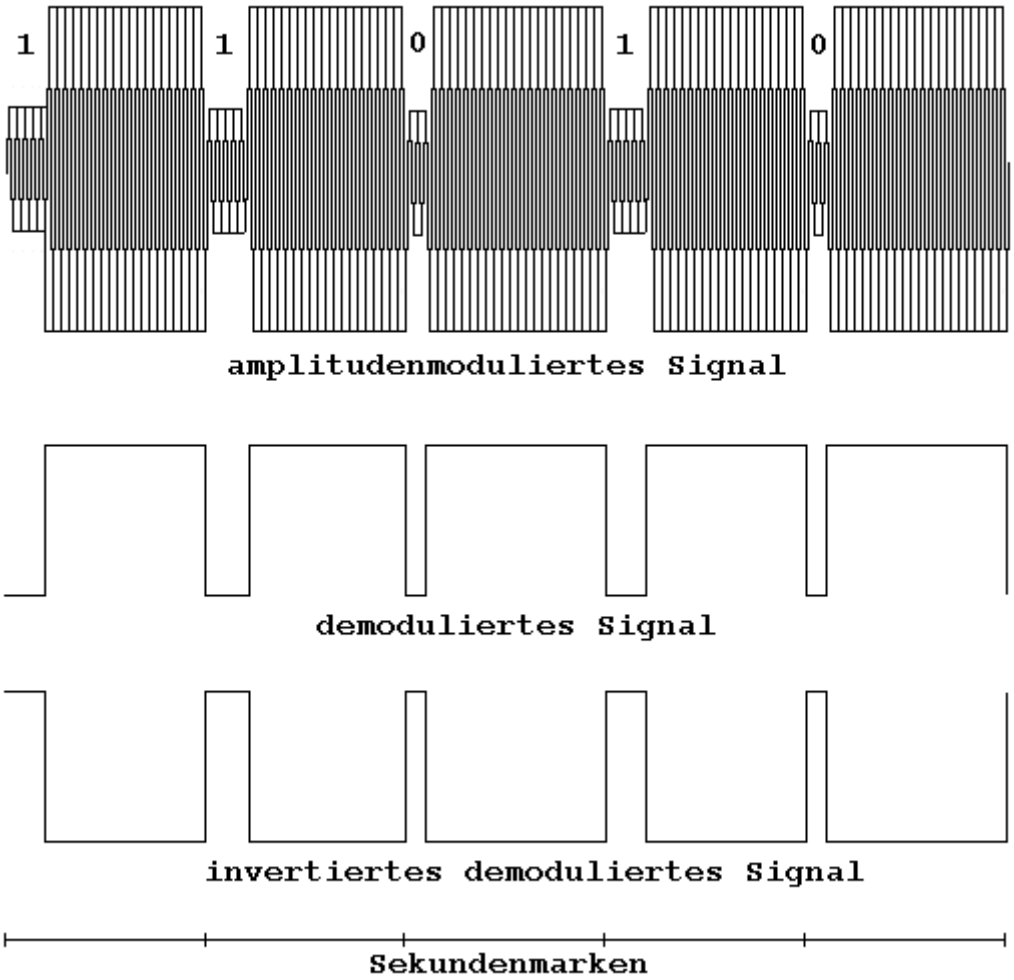

Abb.1: Zeitzeichensignal

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	**Monat Einerstelle**
46	0,1	0,2	
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	
58	0,1	0,1	**Prüfbit**

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.

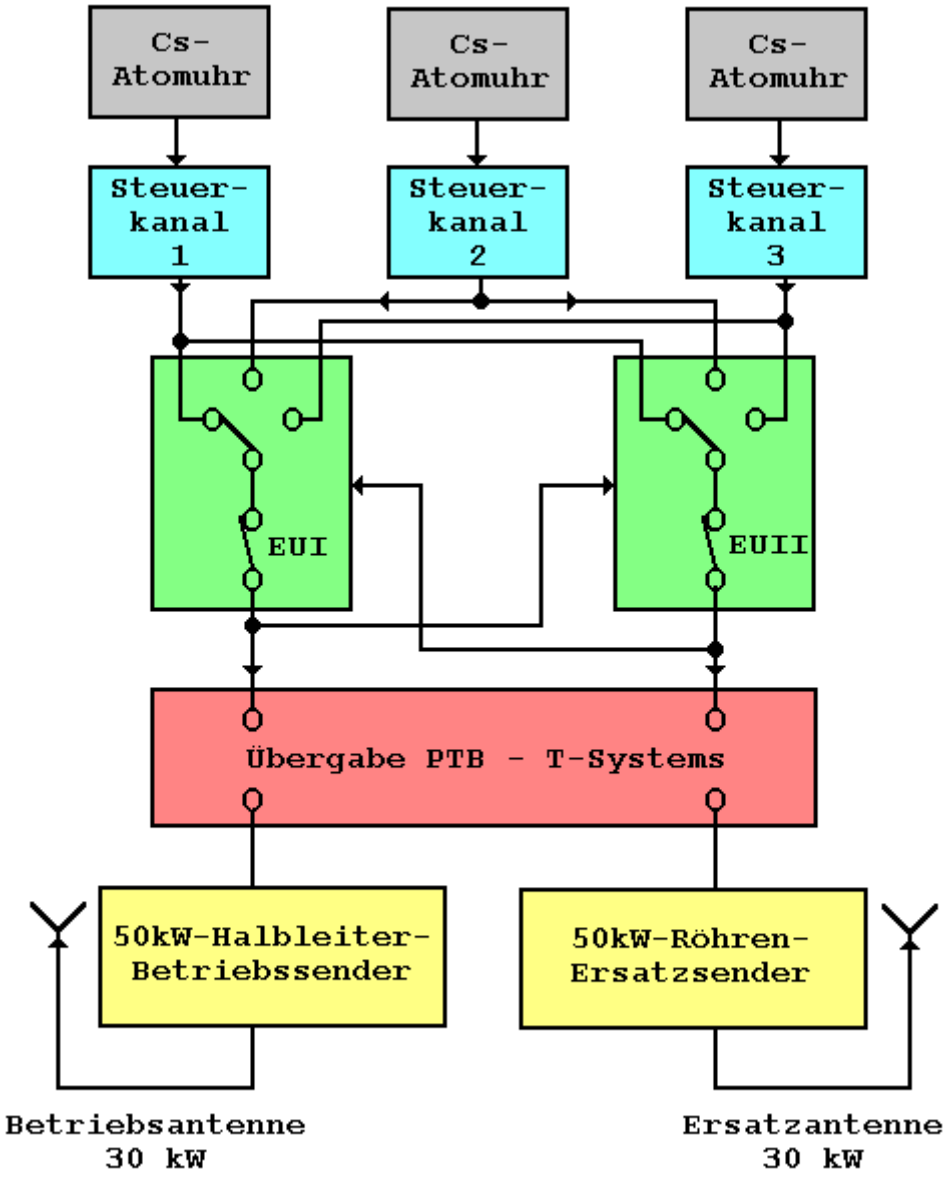

Abb.1: Blockschaltplan der Steuereinrichtungen des Senders[5)]

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 anderen 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 Betriebssender 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

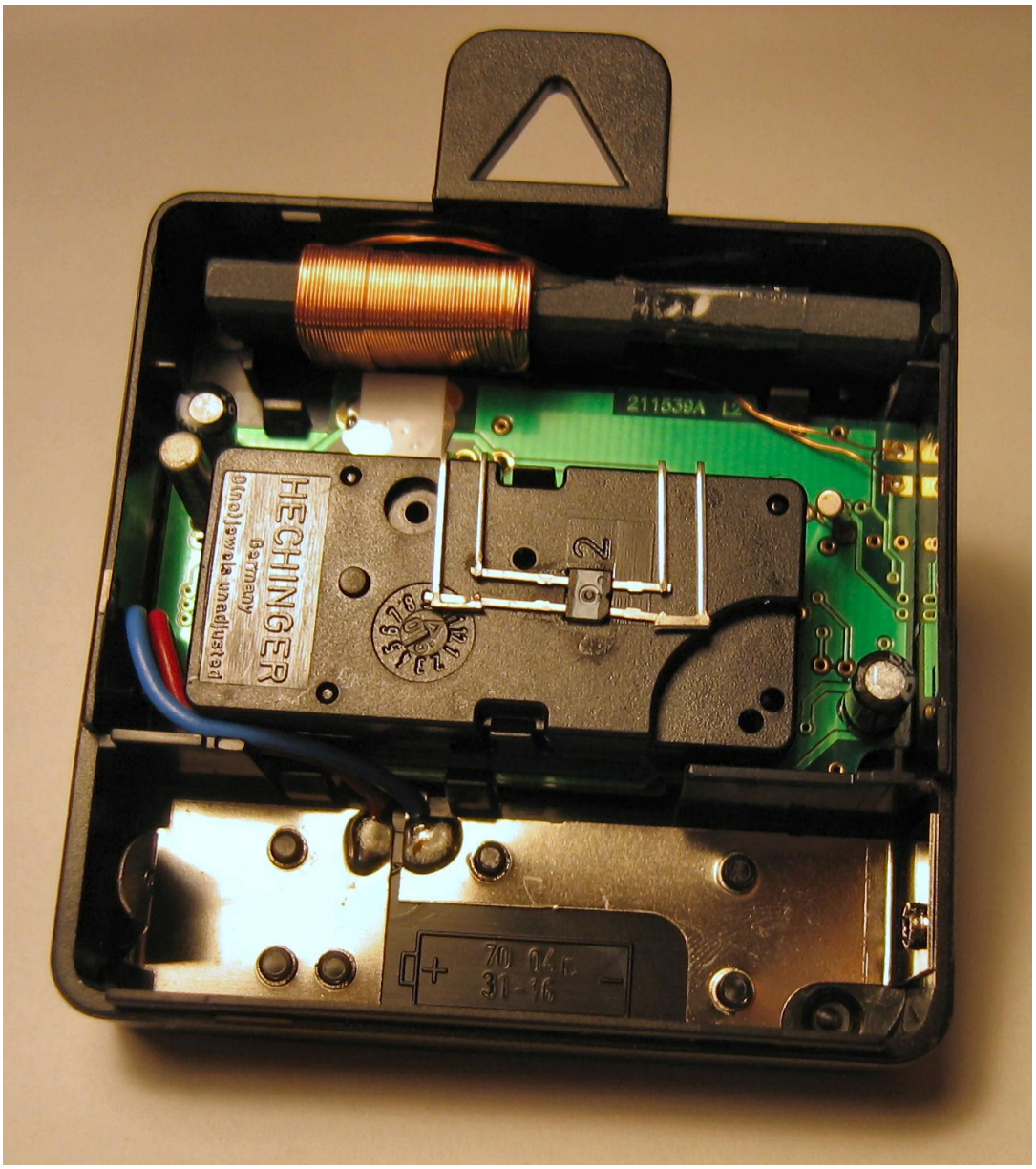

Abb.1: Innenleben einer Wand-Funkuhr

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 mit f = 77,5 kHz dient im Empfangskreis als Filter, der andere mit f = 32,768 kHz steuert die Quarzuhr im Mikroprozessor. Eine vollständige Anleitung zum Nachbau einer Funkuhr wurde in der Elektronikzeitschrift ELV-Journal, Ausgabe 2/99und 3/99[6)] (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.

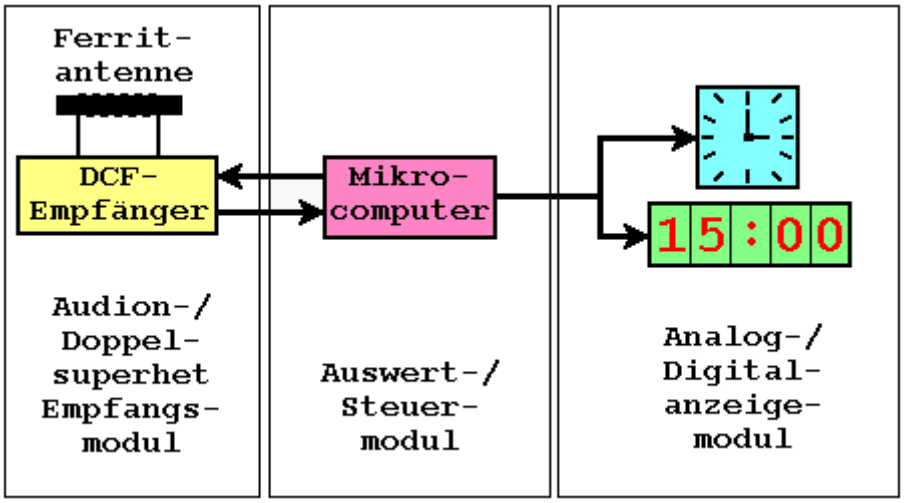

Abb.2: grundsätzlicher Aufbau einer Funkuhr

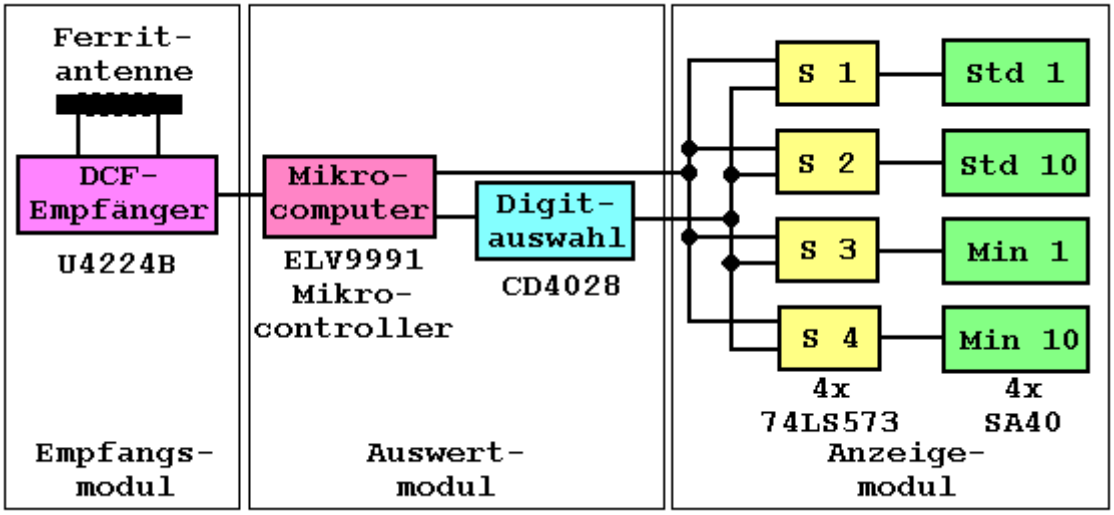

Abb.3: Blockschaltbild der ELV-Funkuhr

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 Zeitzeichensignals 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

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

bzw.

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

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).

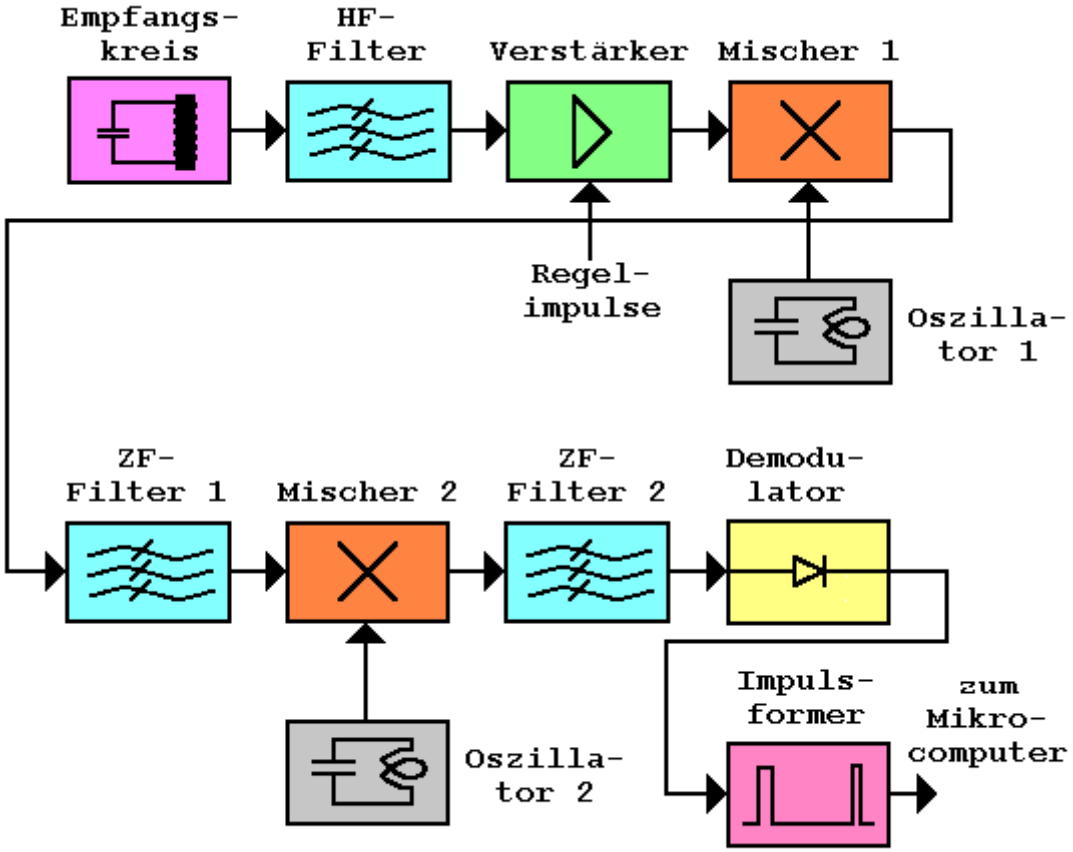

Abb.4: Doppelsuperhetempfänger

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 da-

für 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.

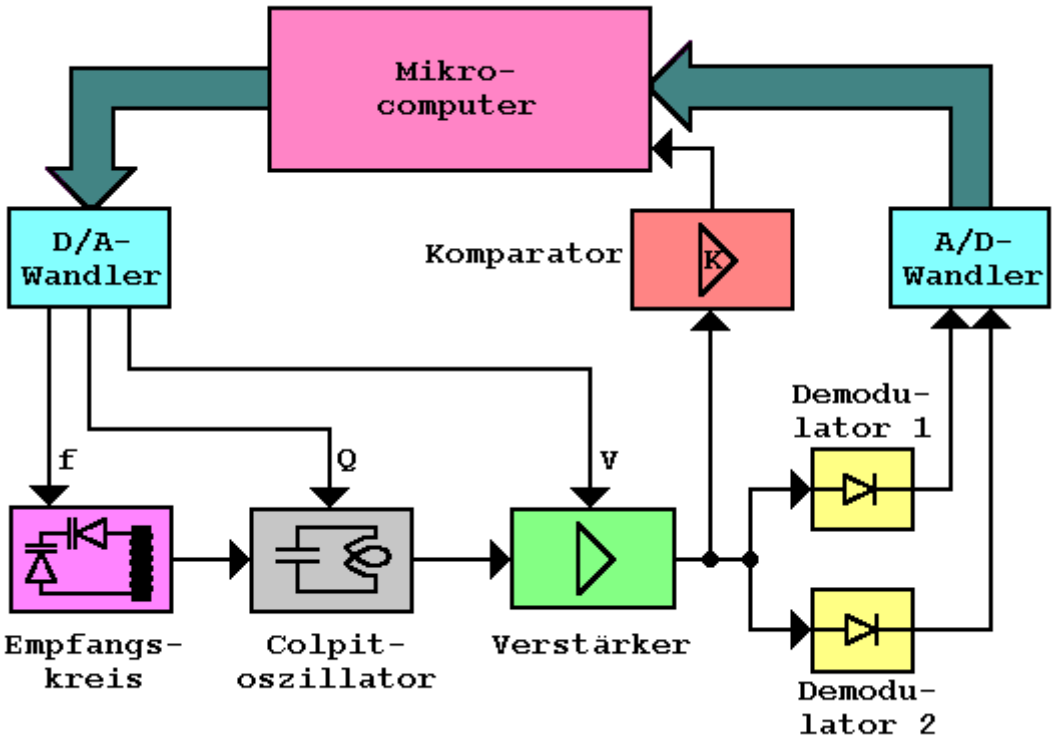

Abb.5: mikrocomputergesteuerter Audionempfänger[4)]

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 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. Hilberg[4)].
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 Frequenzteilerschaltung 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 kodierten Zeitinformationen nicht dekodiert werden und sie sich daher nicht automatisch einstellen. In der Regel wertet der Mikrochip jedoch die kodierten Informationen 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 LEDs 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 Schaltlitze 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 Schräubchen 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.

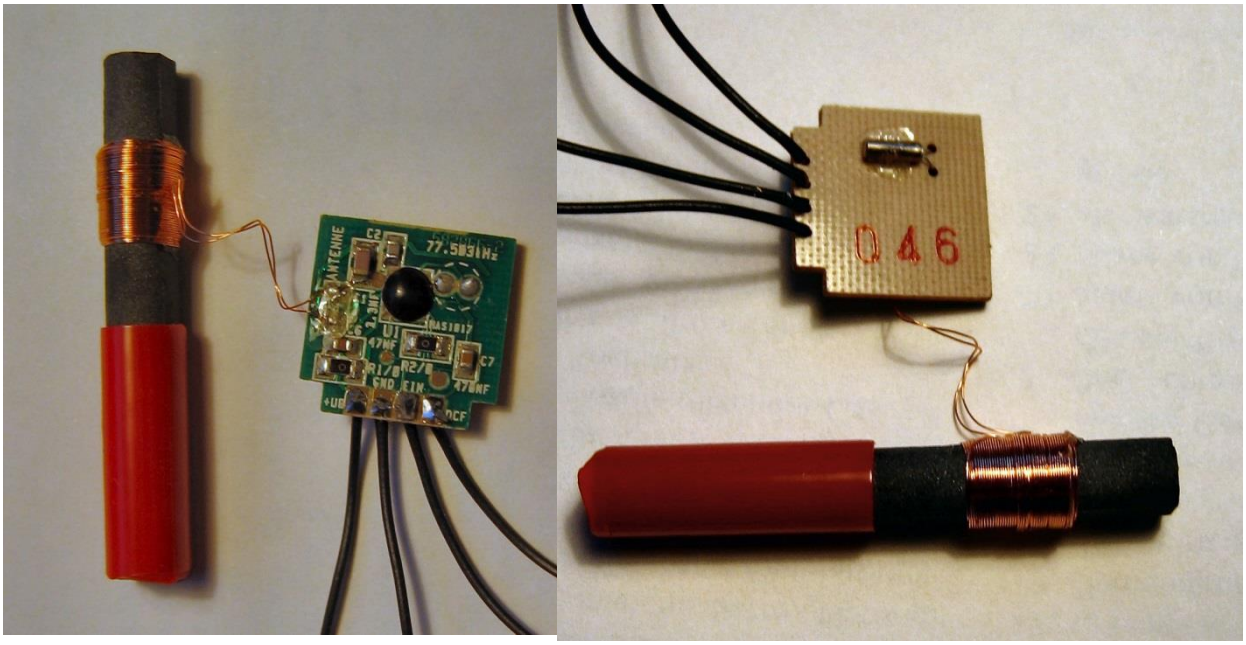

Abb.1: DCF-77-Empfangsmodul mit Schwingquarz der Frequenz f = 77,5 kHz

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.

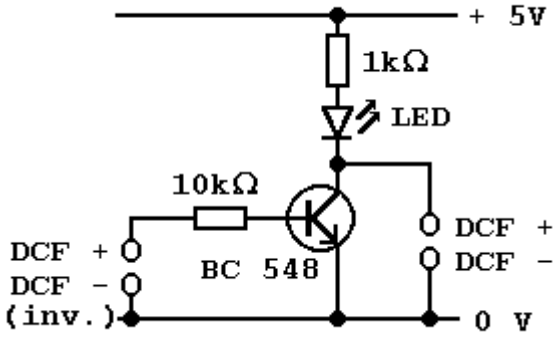

Abb.2:
optische Anzeige des DCF-77-Signals

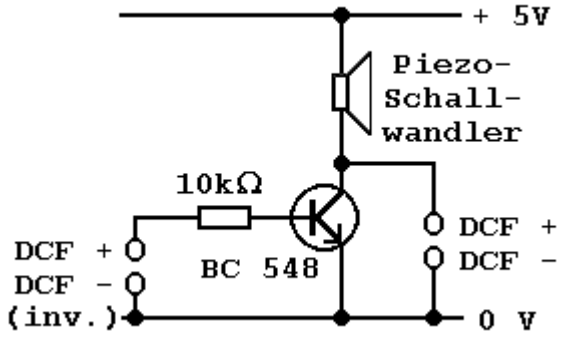

Abb.3:
akustische Anzeige des DCF-77-Signals

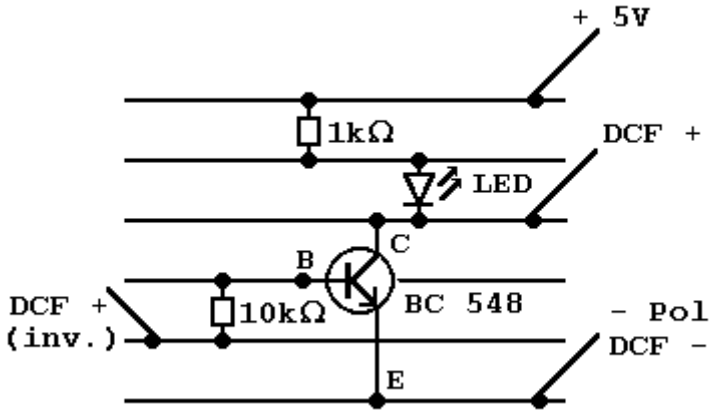

Abb.4:
Verdrahtungsplan des optischen Anzeigemoduls

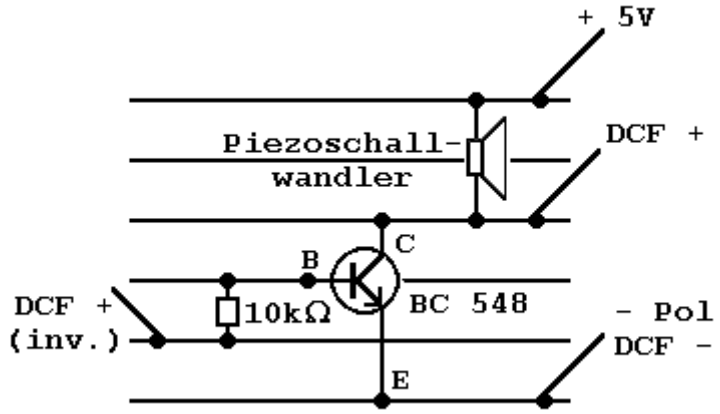

Abb.5:
Verdrahtungsplan des akustischen Anzeigemoduls

<u>Versuch 1:</u>
Aufbau:
Den benötigten Versuchsaufbau zeigt Abb. 6.

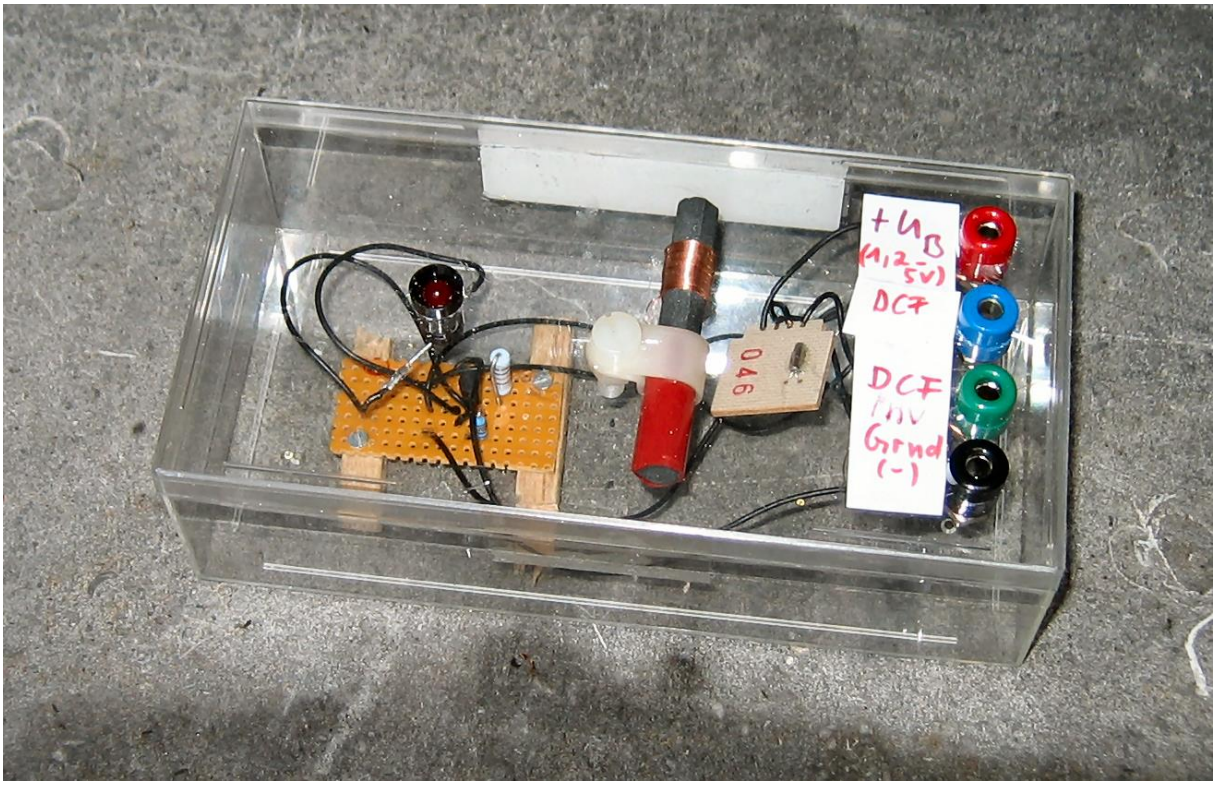

Abb.6: Empfangsmodul mit optischer Anzeige

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.

<u>Versuch 2:</u>

Aufbau:

Den benötigten Versuchsaufbau zeigt Abb.6.

Durchführung:

Man schließt den DCF-Ausgang der Schaltung an den analogen Eingang eines Messwerterfassungssystems, z.B. Cassy der Firma Leybold an. 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 und Schüler 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.

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 10 .

Dabei entspricht das 1. Bit der Kurve 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

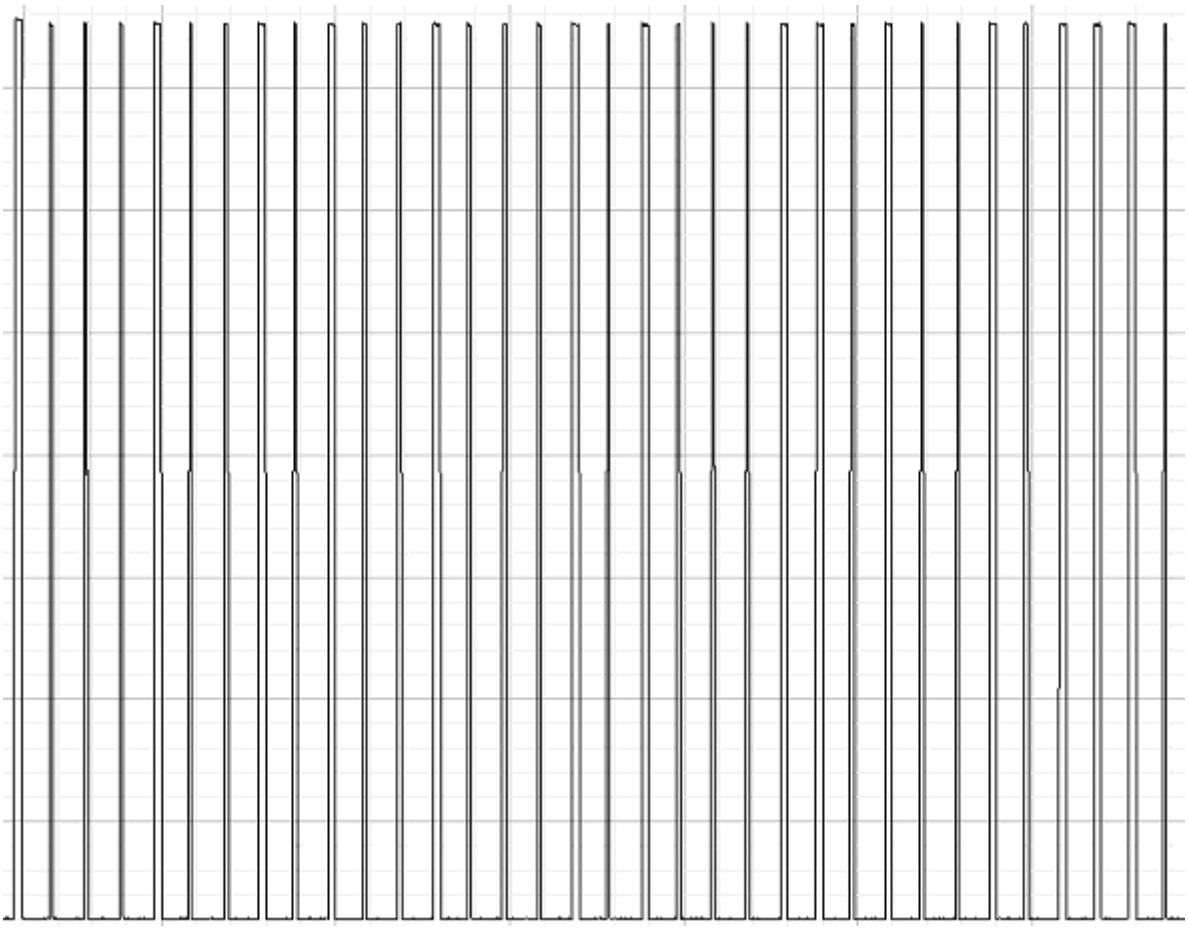

Abb.7: Beispielkurve mit Cassy

4. Literatur

1) Dieter Nührmann, 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.