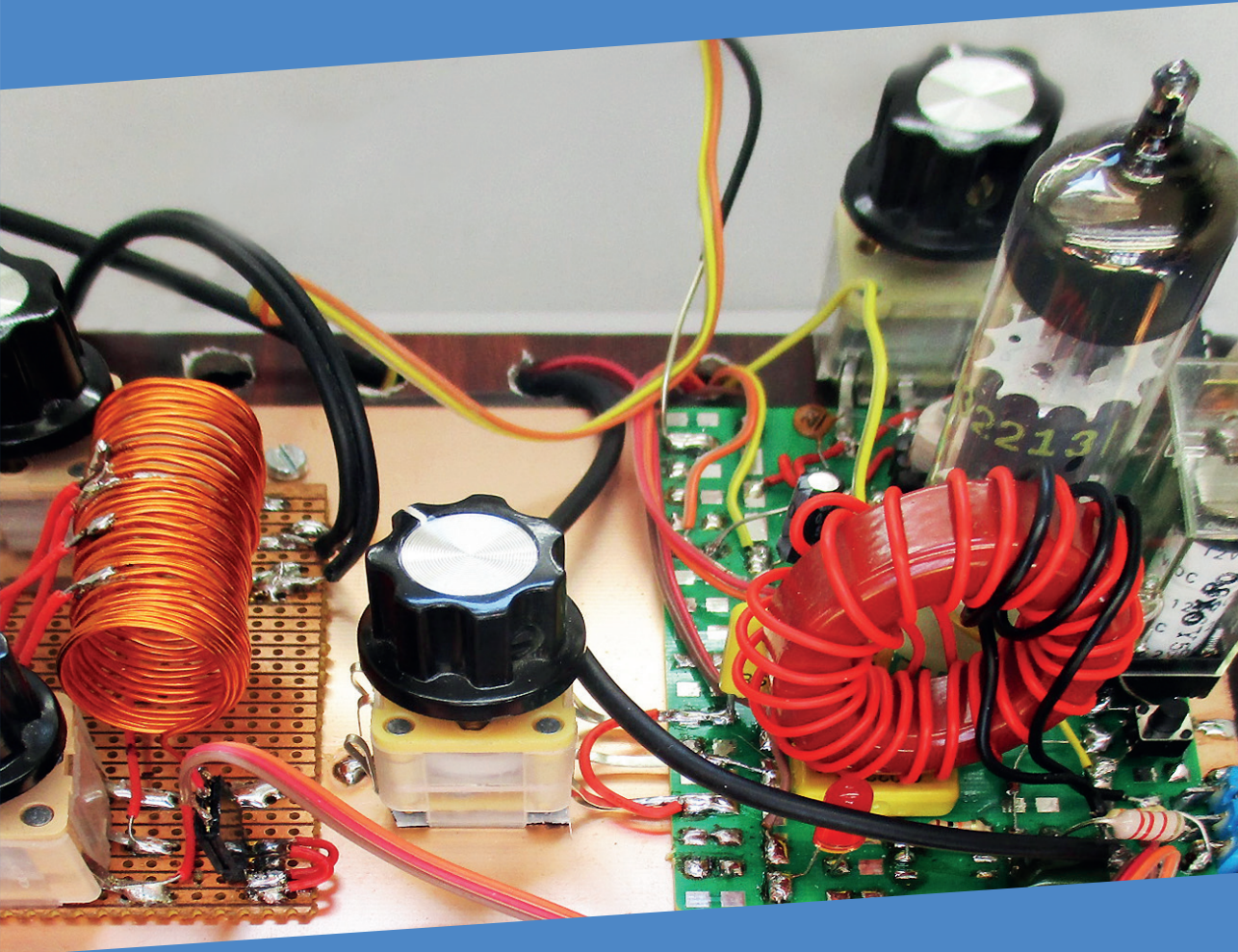


Hochfrequenz- Baubuch

Vom Detektor zum Software Defined Radio



Burkhard Kainka, DK7JD

Hochfrequenz-Baubuch

Vom Detektor zum Software Defined Radio



Burkhard Kainka

● © 2020: Elektor Verlag GmbH, Aachen.

● Alle Rechte vorbehalten.

Die in diesem Buch veröffentlichten Beiträge, insbesondere alle Aufsätze und Artikel sowie alle Entwürfe, Pläne, Zeichnungen und Illustrationen sind urheberrechtlich geschützt. Ihre auch auszugsweise Vervielfältigung und Verbreitung ist grundsätzlich nur mit vorheriger schriftlicher Zustimmung des Herausgebers gestattet.

Die Informationen im vorliegenden Buch werden ohne Rücksicht auf einen eventuellen Patentschutz veröffentlicht. Die in diesem Buch erwähnten Soft- und Hardwarebezeichnungen können auch dann eingetragene Warenzeichen sein, wenn darauf nicht besonders hingewiesen wird. Sie gehören dem jeweiligen Warenzeicheninhaber und unterliegen gesetzlichen Bestimmungen.

Bei der Zusammenstellung von Texten und Abbildungen wurde mit größter Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Verlag, Herausgeber und Autor können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen. Für die Mitteilung eventueller Fehler sind Verlag und Autor dankbar.

● Erklärung

Der Autor und der Herausgeber dieses Buches haben alle Anstrengungen unternommen, um die Richtigkeit der in diesem Buch enthaltenen Informationen sicherzustellen. Sie übernehmen keine Haftung für Verluste oder Schäden, die durch Fehler oder Auslassungen in diesem Buch verursacht werden, unabhängig davon, ob diese Fehler oder Auslassungen auf Fahrlässigkeit, Unfall oder andere Ursachen zurückzuführen sind.

● Satz und Aufmachung: Jack Jamar Graphic Design | Maastricht (NL)

Druck: Ipskamp Printing, Enschede (NL)

● **ISBN 978-3-89576-413-4** Print

ISBN 978-3-89576-414-1 Ebook

ISBN 978-3-89576-415-8 Epub

● Elektor-Verlag GmbH, Aachen

www.elektor.de

Elektor ist Teil der Unternehmensgruppe Elektor International Media (EIM), der weltweit wichtigsten Quelle für technische Informationen und Elektronik-Produkte für Ingenieure und Elektronik-Entwickler und für Firmen, die diese Fachleute beschäftigen. Das internationale Team von Elektor entwickelt Tag für Tag hochwertige Inhalte für Entwickler und DIY-Elektroniker, die über verschiedene Medien (Magazine, Videos, digitale Medien sowie Social Media) in zahlreichen Sprachen verbreitet werden. **www.elektor.de**

Vorwort

Die Hochfrequenztechnik ist eines der Gebiete, auf denen man auch heute noch eigene Ideen in die Tat umsetzen kann. Unzählige Schaltungsvarianten mit besonderen Zielsetzungen geben Raum für sinnvolle Experimente und Projekte. Vieles kann man nicht einfach kaufen. Detektorradios ohne eigene Energiequelle, einfache Röhrenempfänger mit einem Hauch von Nostalgie, die ersten Empfangsversuche mit dem Software Defined Radio oder Spezialempfänger für den Amateurfunk, all dies lässt sich mit wenig Aufwand realisieren.

Lange Zeit war das Radiobasteln der Einstieg in die Elektronik. Inzwischen gibt es auch andere Wege, vor allem über Computer, Mikrocontroller und die Digitaltechnik. Allerdings kommen die analogen Wurzeln der Elektronik oft zu kurz. Die Radiotechnik eignet sich besonders gut als Lernfeld der Elektronik, weil man hier mit den einfachsten Grundlagen beginnen kann. Aber auch die Verbindung zur modernen Digitaltechnik liegt auf der Hand, wenn es z.B. um moderne Abstimmverfahren wie PLL und DDS oder um moderne DSP-Radios geht.

Dieses Buch will einen Überblick geben und eine Sammlung einfacher Projekte vorstellen. Seit der ersten Auflage des Buchs sind viele neue Projekte hinzugekommen. In dieser Neuauflage werden die wichtigsten Schaltungen dokumentiert. Ich möchte Sie unterstützen, eigene Ideen zu entwickeln, eigene Empfänger zu entwerfen und sie zu erproben.

Viel Erfolg und guten Empfang

Burkhard Kainka, DK7JD
www.elektronik-labor.de

Inhalt

- Kapitel 1 • Einleitung 8**

- Kapitel 2 • Detektorradios 10**
 - 2.1 Das Dioden-Radio. 10
 - 2.2 Kopfhörer-Anpassung 13
 - 2.3 Ein Kurzwellendetektor. 14
 - 2.4 Detektor mit Siliziumdiode 17
 - 2.5 Spulen und Schwingkreise. 17
 - 2.6 Resonanzfrequenz und Bandbreite. 20
 - 2.7 Der Röhren-Detektor 25
 - 2.8 Diodenradio mit aktiver Entdämpfung. 26
 - 2.9 Entdämpfung mit Röhren 27

- Kapitel 3 • Das Röhrenaudion 30**
 - 3.1 Trioden-Audion 30
 - 3.2 Zweistufige Empfänger 33
 - 3.3 Audion mit Rückkopplung 34
 - 3.4 Lautsprecherempfang 39
 - 3.5 Audion mit zwei EF95 40
 - 3.6 Kurzwellenaudion 0V2. 42
 - 3.7 Röhren-Audion mit 6 V 44
 - 3.8 Das Kaskodenaudion 45
 - 3.9 Das 6J1-Röhrenradio 52
 - 3.10 80-m-Röhrenaudion 56

- Kapitel 4 • Das Transistoraudion 58**
 - 4.1 Das Eintransistorradio. 58
 - 4.2 Das Kurzwellen-PC-Radio 59
 - 4.3 Transistoraudion mit Rückkopplung 60
 - 4.4 Separate Rückkopplung 63
 - 4.5 Rückkopplung mit Emitterfolger 66
 - 4.6 Mittelwellenempfänger mit TA7642. 67
 - 4.7 Das MW-Retro-radio. 70
 - 4.8 Emitterfolger-Kurzwellen-Audion 72
 - 4.9 Das Retro-Kurzwellenradio 76
 - 4.10 40-m-Kurzwellenaudion 78
 - 4.11 Kurzwellenaudion-Optimierung 81

- Kapitel 5 • HF-Oszillatoren 89**
 - 5.1 LC-Oszillatoren. 89
 - 5.2 Quarzoszillatoren 91
 - 5.3 Amplitudenmodulation 92
 - 5.4 Quarzstabiler Mittelwellen-Modulator 93
 - 5.5 PLL-Taktgenerator ICS307-2 96
 - 5.6 Ein programmierbarer Quarzoszillator. 98

5.7	CW-Sender mit einer EL95	101
5.8	AM-Röhrensender	105
5.9	DDS-Generator mit AD9835	107
5.10	PLL SI5351	111
Kapitel 6	• Direktmischer	114
6.1	Mischertypen	114
6.2	Direktmischer mit BF245	120
6.3	Diodenringmischer	122
6.4	Direktmischer mit NE612	123
Kapitel 7	• AM-Superhetempfänger	127
7.1	AM-Kurzwellenempfänger mit TCA440	127
7.2	AM/FM-Radio mit dem CD2003GP	129
7.3	Der DRM-Empfänger	132
Kapitel 8	• IQ-Mischer und Software Defined Radio	137
8.1	SDRadio	137
8.2	Spiegelunterdrückung	138
8.3	IQ-Mischer	140
8.4	Schaltungs-Optimierung	143
8.5	Software Defined Radio mit USB-Schnittstelle	152
8.6	Das Arduino SDR-Shield	157
Kapitel 9	• Kurzwellen-Antennentechnik	163
9.1	Funkwellen-Ausbreitung	163
9.2	Langdrahtantennen	165
9.3	Vorselektion	166
9.4	Abgestimmte magnetische Antennen	169
9.5	Eine aktive Innenantenne	171
9.6	Antennen-Vorverstärker	174
Kapitel 10	• UKW-Radios	176
10.1	Ein Pendelaudion	176
10.2	Röhren-Pendelaudion	179
10.3	UKW-Radio mit TDA7088	181
10.4	Stereo-Dekoder	185
10.5	Das UKW-Steckmodul	189
10.6	UKW-Radio mit Röhrenklang	191
10.7	DSP-Radio SI4735	193
10.8	PC-Radio mit USB-Anschluss	196
10.9	Das UKW-Heimradio	198
10.10	Das Elektor-DSP-Radio	202
10.11	Der FM-Radiochip BK1079/1068	206
Index	210

1 • Einleitung

Radiobasteln ist ein altes Hobby, das heute wieder hochaktuell ist. Neben dem klassischen Detektorradio sind vom allem Röhrengeräte und neuere Software Defined Radio-Projekte ein Motor der Motivation. Aber auch neuere Entwicklungen in der Halbleitertechnik bringen frischen Schub. So sind z.B. die direkte digitale Synthese (DDS) oder moderne PLL-Chips die Lösung für alle Stabilitätsprobleme im Empfängerbau.

Dieses Buch will einen Überblick über die Empfängertechnik geben und Grundlagen der Hochfrequenztechnik vermitteln. Zahlreiche Schaltungen und Bauvorschläge ebnen den Weg. Wer nur einen einfachen Detektorempfänger oder ein Röhrenaudion bauen will, findet hier die nötigen Rezepte. Und wer tiefer in die Materie einsteigen will und selbst eigene Schaltungen entwickeln möchte, benötigt einige Grundlagen vom Schwingkreis über Antennentechnik bis zu aktiven Bauelementen. Hier findet man das Wichtigste in knapper Form.

Audionempfänger und einfache Transistorradios für Mittel- oder Kurzwelle lassen sich schnell und einfach aufbauen und bringen eine Menge Spaß. Zugleich kann man hier die ersten Erfahrungen mit der HF-Technik sammeln. Moderne Direktmischerkonzepte mit Ringmischer und DDS oder PLL oder einfache Software Defined Radios erlauben bereits den Aufbau universeller Empfänger für Amateurfunk und digitale Betriebsarten. Vieles ist dank moderner Bauelemente einfacher geworden, allerdings benötigt man die entscheidenden Informationen. Grundsätzlich werden hier nur solche Bauteile eingesetzt, die man leicht bekommen kann. Teilweise existieren auch Platinenlayouts von Elektor oder fertige Baugruppen und Geräte.

Meine eigene Motivation für die HF-Technik kommt aus dem Amateurfunk, wobei ich von Anfang an meine Sender und Empfänger selbst gebaut habe. Nach einer längeren Pause hat dann der digitale Rundfunk DRM wieder neuen Auftrieb gebracht. Es war eine Herausforderung, ausreichend stabile Empfänger zu bauen, um DRM-Signale zuverlässig zu dekodieren. Auch eine Renaissance des Röhrenbastelns brachte viele Berührungspunkte zur HF-Technik, wobei besonders die Verwendung kleiner Anodenspannungen ab 6 V die Experimente vereinfachte. Ein weiteres Thema waren IQ-Mischer und das Software Defined Radio.

Damit ist auch mein altes Interesse am Amateurfunk wieder neu erwacht. Lange Zeit hatte ich es akzeptiert, dass an meinem Wohnort keine brauchbare Amateurfunkantenne zu errichten war. Mit Hilfe neuerer Techniken und vor allem verbesserter Messtechnik ist es mir mittlerweile aber doch gelungen, einfache und unscheinbare Antennen zu bauen, die ausreichend störsicheren Empfang ermöglichen und auch als Sendeantenne für kleinere Leistungen einsetzbar sind. Auf die Weise mir ist der Amateurfunk wieder möglich geworden und bietet ständigen Anlass für weitere Entwicklungen.

Auch beruflich gab es immer wieder Berührungspunkte zur Radiotechnik. Insbesondere ging es um die die Entwicklung von Bausätzen für den Kosmos-Verlag und den Franzis-Verlag sowie um Artikel und Projekte für Elektor. Und auch die Firma AK Modul-Bus

brachte immer wieder neue Aufgaben, die in Projekte für den Schulunterricht oder für Hobby-Elektroniker mündeten. Oft wurden Themen wie Röhrentechnik, DRM-Empfang, Software Defined Radio oder DSP-Radio erst mit AK Modul-Bus entwickelt und dann zu einem Elektor-Projekt gemacht. In diesem Buch werden zu vielen Projekten die einzelnen Stufen der Entwicklung dokumentiert.

2 • Detektorradios

Radio hören ohne Batterie oder eine andere Energiequelle, das geht nur mit dem Detektorempfänger. Diese einfachste aller Radioschaltungen hat daher über die Jahrzehnte nichts von ihrem Reiz verloren. In der Frühzeit der Radiotechnik war der Detektorempfänger ein verbreitetes Konzept. Der richtige Einstieg in die HF-Technik gelingt heute wie vor 90 Jahren mit dem Detektorradio. Dabei muss man nicht unbedingt historische Geräte nachbauen und selbst gefertigte Kristalldetektoren einsetzen. Mit einer Germanium- oder Schottkydiode ist vieles einfacher. Es geht auch ohne extrem lange Antennen und hochempfindliche Kopfhörer. Ein bereits vorhandener Lautsprecherverstärker wie z.B. eine PC-Aktivbox macht das erste Radio zu einem Kinderspiel.

2.1 Das Dioden-Radio

Der einfachste Empfänger besteht nur aus einer langen Antenne, einem Erdanschluss, einer Germanium-Diode und einem hochohmigen Kopfhörer. Statt einer Germaniumdiode kann ebenso eine Schottkydiode verwendet werden. Die Stromversorgung erfolgt durch die Antenne selbst. Sie muss daher relativ lang sein. Meist reicht ein ausgespannter Draht von ca. 10 Metern. Der Bauvorschlag geht von einem hochohmigen Kopfhörer mit 2 k Ω aus, funktioniert aber ebenso mit einem 600- Ω -Typ. Niederohmige Kopfhörer moderner Bauform haben oft nur 32 Ω und lassen sich nur mit einem passenden Übertrager verwenden (vgl. Kap. 2.2).

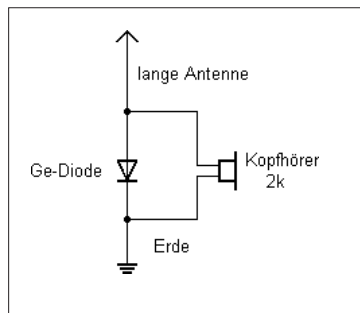


Bild 2.1: Das Diodenradio

Es können alle Ge-Dioden von Typ AA112 bis AA144 und alle Schottkydioden BAT41 bis BAT86 eingesetzt werden. Das einfache Radio ist nicht selektiv, d.h. es empfängt alle starken Sender gleichzeitig. Wenn nicht ein starker Sender in der Nähe alle anderen über-tönt, hört man vor allem abends sehr viele Sender, die in ihrer Lautstärke schwanken.

Die gewünschte Selektion erreicht man durch einen Schwingkreis aus Spule und Drehkondensator. Mit einem Drehkondensator bis 320 pF und einer Spule mit 300 μ H überstreicht man den ganzen Mittelwellenbereich. Die Spule kann als Luftspule mit 90 Windungen auf eine Papprolle mit einem Durchmesser von 4 cm aufgewickelt werden.

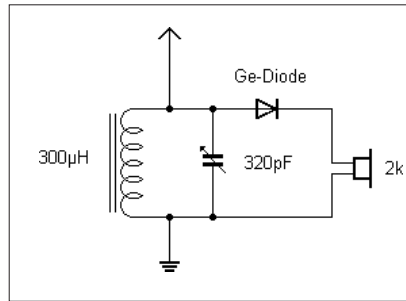


Bild 2.2 Diodenradio mit Schwingkreis

Dieses Radio ist nicht sehr trennscharf und erreicht auch noch nicht die maximal mögliche Lautstärke. Wichtig ist eine sorgfältige Anpassung von Antenne und Gleichrichter, die man durch Anzapfungen der Spule erreichen kann. Kap. 2.2 zeigt ein Beispiel für einen Mittelwellenempfänger mit veränderbarer Anpassung.

Was tut eigentlich die Diode in einem Empfänger? Die Antwort erfordert einen kurzen Exkurs in die Theorie. Ein Sender erzeugt eine hochfrequente Schwingung, die über einen Sendemast abgestrahlt wird. Eine Antenne am Empfangsort liefert dann eine kleine Spannung derselben Frequenz, also z.B. 720 kHz für den ehemaligen Sender Langenberg. Mittelwellensender tragen ihre Informationen, also Sprache und Musik, in Form einer Amplituden-Modulation (AM). Die Spannung der Hochfrequenzschwingung ändert sich dabei im Takt der niederfrequenten Schwingungen.

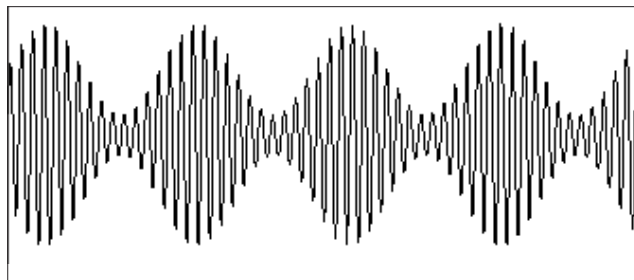


Bild 2.3: Amplitudenmodulation

Dieses Signal bleibt in einem Kopfhörer unhörbar, weil nur Frequenzen bis ca. 20 kHz als Schall wahrnehmbar sind. Die Trägheit der Membran führt dazu, dass sie praktisch nicht schwingt. Die niederfrequente Modulation muss erst durch Gleichrichtung des Signals zurückgewonnen werden. Deshalb reicht eine Diode, um das HF-Signal zu demodulieren. Der mittlere Strom des gleichgerichteten Signals entspricht wieder dem ursprünglich aufmodulierten NF-Signal.

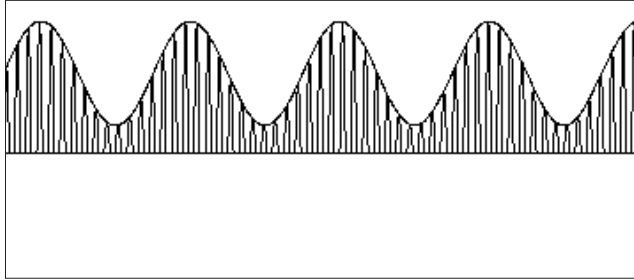


Bild 2.4: Demodulation durch Gleichrichtung

Die ersten Detektor-Radios verwendeten Kristall-Detektoren. Es wurden Bleiglanz- oder Pyrit-Kristalle benutzt. Beides sind Schwefel-Verbindungen und kommen als Erze (Bleierz, Eisenerz) in der Natur vor.

Bild 2.5 zeigt einen Kristallhalter mit einem Bleiglanzkristall aus der Anfangszeit der Radiotechnik. Eine Spiralfeder aus Stahldraht stellt den Kontakt her. Die Funktion kann mit dem Komponententester des Oszilloskops erprobt werden. Man muss etwas probieren, um eine geeignete Stelle auf dem Kristall zu finden und eine typische Diodenkennlinie zu erkennen.

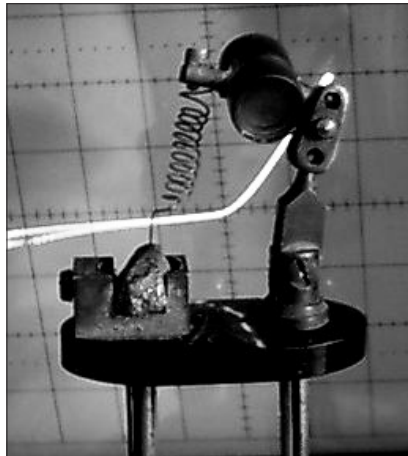


Bild 2.5: Ein historischer Detektorkristall

Der Kristall wurde mit Erfolg in einem Diodenradio eingesetzt. Ganz ohne Verstärker konnten zahlreiche starke Sender gehört werden. Man kann auch heute noch mit natürlichen Mineralien selbst einen Detektor bauen. Pyrit bildet regelmäßige, goldfarbene Würfel-Kristalle im Gestein. Bleiglanz ist schwarz und hat kleine glänzende Flächen. Ein experimenteller Detektor kann mit einer Stecknadel aufgebaut werden. Dazu testet man verschiedene Stellen des Kristalls, bis man eine gute Gleichrichterwirkung erzielt.

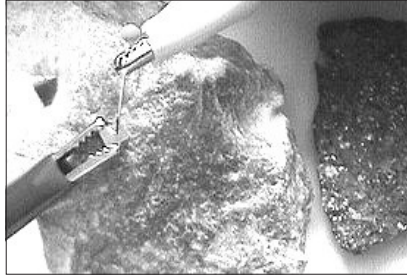


Bild 2.6: Pyrit und Bleiglanz in Naturform

2.2 Kopfhörer-Anpassung

Ältere Bauvorschläge für Detektorradios gehen von hochohmigen Kopfhörern mit $2 \times 2000 \Omega$ aus, die aber leider nur noch schwer zu bekommen sind. Heute verwendet man statt dessen preiswerte Kopfhörer für den Walkman mit zweimal 32Ω . Dieser Typ ist ebenfalls für ein Diodenradio einsetzbar, wenn man einen Übertrager zur Anpassung verwendet. Dafür eignet sich auch ein Trafo aus einem Steckernetzteil. Nimmt man ein Netzteil mit umschaltbarer Spannung (3/4,5/6/9/12V) ohne den Gleichrichter und den Siebelko, dann kann man sogar das Übertragungsverhältnis umschalten und damit die optimale Anpassung suchen.

Bei einem Diodenradio ist die richtige Antennenanpassung der Schlüssel zum Erfolg, da keine Energie verschwendet werden darf. Die Schwingkreisspule hat daher mehrere Anzapfungen. Mit insgesamt 80 Windungen HF-Litze auf einem 10 mm dicken Ferritstab liegt man für den Mittelwellenbereich richtig. Lange Antennen müssen an einer tieferen Anzapfung angeschlossen werden, um den Kreis nicht zu stark zu bedämpfen. Man sollte einfach alle Anzapfungen probieren, bis der Empfang am besten ist. Alternativ zu den Spulenzapfungen kann auch ein Antennenkondensator verwendet werden. Eine größere Kapazität ergibt eine stärkere Kopplung.

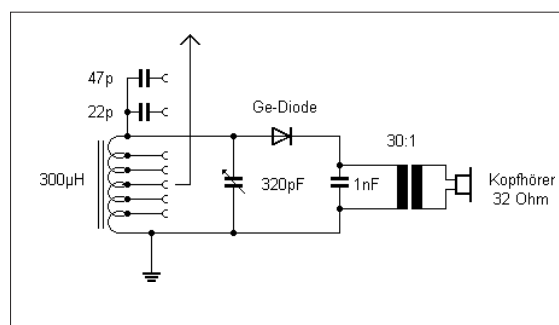


Bild 2.7: Übertrager zur Anpassung

Bei einem solch einfachen Radio kommt es auf eine gute Antenne an. Oft eignet sich eine Dachrinne als Antenne. Sie darf dazu nicht geerdet sein. Das Regenrohr aus Zink ist oft unten in ein Abflussrohr einzementiert und damit isoliert. Es reicht also ein Drahtanschluss und schon hat man die beste Antenne. Für den Fall, dass der Empfang auch für den Kopfhörer zu leise ist, kann man die Aktivboxen des PCs anschließen.

Eine andere gute Antenne ist manchmal das Heizungssystem einer Wohnung. Zwar sind die Rohre meist an einer Stelle geerdet, die Gesamtlänge aller Rohre kann aber als eine wirksame Schleifenantenne arbeiten. In vielen Fällen erhält man so hohe Antennenspannungen gegenüber Erde.

2.3 Ein Kurzwellendetektor

Die meisten älteren Vorschläge zum Bau von Detektorradios zielen auf den Empfang des Mittelwellen-Ortssenders, den es aber in vielen Ländern nicht mehr gibt. Hier dagegen geht es um den Fernempfang auf Kurzwelle. Tatsächlich ist es auf Kurzwelle sogar einfacher, die ersten Erfolge zu erzielen. Das hat mehrere Gründe: Die Grundversorgung auf Mittelwelle ist nicht mehr gegeben, da die meisten Sender abgeschaltet wurden. Nur wenige europäische Länder wie England, Italien und Spanien betreiben noch Mittelwellensender. Auf Kurzwelle dagegen ging es dagegen immer schon um große Reichweiten, d.h. vor allem die Auslandsdienste der einzelnen Länder sind hier zu hören. Der altbewährte AM-Rundfunk ist deshalb auf Kurzwelle so aktiv wie eh und je.

Auf höheren Frequenzen braucht man kleinere Spulen, die wesentlich leichter herzustellen sind. Während eine gute Mittelwellenspule einen Ferritstab und schwer zu beschaffende HF-Litze braucht, kommt man auf Kurzwelle mit etwas isoliertem Kupferdraht aus. Ein spezieller Spulenkörper mit Ferritkern ist nicht erforderlich, sondern man kann irgendeinen isolierenden Körper nehmen.

Für den ersten Versuch soll eine Spule mit insgesamt 25 Windungen und vier Anzapfungen gewickelt werden. Als Wickelkörper wurde die 8 mm dicke Isolierhülse eines Bananensteckers verwendet. Ebenso gut geeignet ist z.B. ein Stück eines Kugelschreibers. Zwei Löcher im Abstand 1 cm helfen die Drahtenden zu fixieren. Es werden dann jeweils fünf Windungen gewickelt, eine Schlaufe verdrillt und die folgenden Windungen aufgetragen. Die fertige Spule wird an einen Abschnitt Pfostenstecker mit sechs Kontakten gelötet.

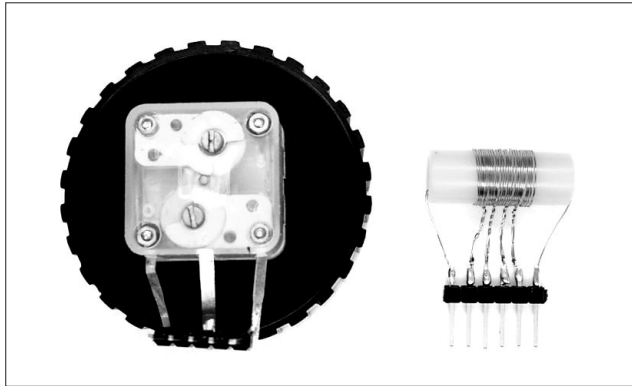


Bild 2.8: Drehkondensator und Spule

Das ganze Radio soll auf einer Experimentier-Steckplatine aufgebaut werden. Auch der Drehkondensator wird deshalb mit Pfostensteckern verlötet. Beide Teile lassen sich dann leicht auf das Experimentierfeld setzen. Es fehlen nur noch die Diode und eine Kopfhörer-Anschlussbuchse mit angelöteten Verbindungsdrähten. Der Vorteil dieser Aufbautechnik besteht vor allem darin, dass man leicht andere Schaltungsvarianten ausprobieren kann.

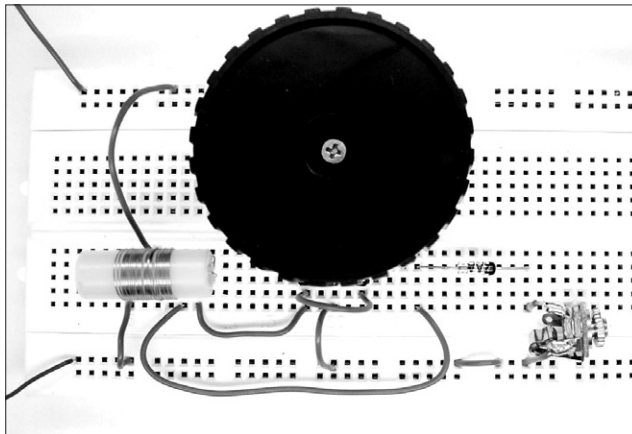


Bild 2.9: Probeaufbau auf einer Steckplatine

Die jeweiligen Spulenanzapfungen für den Antennenanschluss und die Diode sind variabel und können experimentell verändert werden. Beide Hälften des Drehkondensators werden parallel geschaltet. Falls nur der obere Bereich ab 10 MHz gehört werden soll, reicht auch die kleinere Seite mit nur 80 pF.

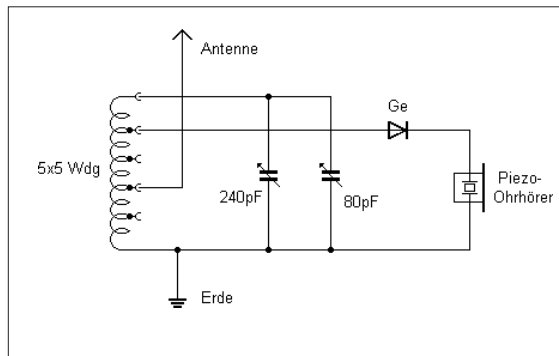


Bild 2.10: Schaltbild des Kurzwellen-Detektors

Das Radio benötigt einen hochohmigen Kopfhörer wie z.B. einen piezokeramischen Kristallohrhörer oder einen dynamischen Kopfhörer mit zweimal 2 k Ω . Niederohmige Typen mit 32 Ω können nicht direkt eingesetzt werden, sondern erfordern einen zusätzlichen Übertrager (vgl. Kap. 2.2). Mittelohmige Kopfhörer mit 600 Ω lassen sich ebenfalls schon direkt einsetzen.

Für den Detektor eignen sich eine Germaniumdiode oder eine Schottkydiode. Entscheidend ist die geringe Schwellenspannung beider Typen. Eine Germaniumdiode besitzt auch in Sperrichtung eine geringe Leitfähigkeit. Dies ist wichtig für den Einsatz eines hochohmigen Kristallhörers. Mit einer Schottkydiode kann sich der Hörer als Kondensator so weit aufladen, dass die Diode vollständig sperrt. In diesem Fall muss ein zusätzlicher Widerstand von 100 k Ω parallel zum Hörer verwendet werden.

Als Antenne eignet sich am besten ein frei aufgehängter Draht mit 10 m Länge. Aber auch ein kürzerer Draht von 3 m Länge, der möglichst hoch im Zimmer ausgespannt wird, reicht bereits für erste Erfolge. Bei vorsichtiger Abstimmung des Drehkondensators (Drehkos) findet man vor allem am Abend mehrere Sender, die ausreichend laut gehört werden können. Oft sind in einer Einstellung zwei oder drei Sender gleichzeitig zu hören. Die auf Kurzwellen üblichen Schwankungen der Feldstärke führen dazu, dass mal der eine und mal der andere Sender klar hervortritt. Die einzelnen Rundfunkbänder sind zwar klar zu trennen, nicht aber nahe beieinander liegende Sender. Die Trennschärfe ist also noch nicht optimal.

Die im Schaltbild verwendeten Anzapfungen sind nur grobe Richtwerte. Man sollte also versuchen, das Optimum an Lautstärke und Trennschärfe zu finden, was in der beschriebenen Aufbautechnik leicht durchführbar ist. Dabei gelten folgende Faustregeln: Tiefere Anzapfungen für Antenne und Diode verbessern die Trennschärfe, verringern aber die Lautstärke. Je länger die Antenne ist, desto tiefer muss die Antennenanzapfung liegen. Eine zu hoch gewählte Antennenanzapfung kann die Lautstärke verringern und führt zu geringerer Trennschärfe. Diese Zusammenhänge lassen sich experimentell leicht nachvollziehen. Weiter unten werden sie auch noch mit der passenden Theorie untermauert.

2.4 Detektor mit Siliziumdiode

Germaniumdioden sind weniger weit verbreitet als Siliziumdioden, wie z.B. die 1N4148, die meist verwendete Universaldiode. Die Schaltung nach Bild 2.11 verwendet eine Siliziumdiode mit einer zusätzlichen Vorspannung. Außerdem wurde hier ein Koppelkondensator zum Anschluss an einen Verstärker eingesetzt.

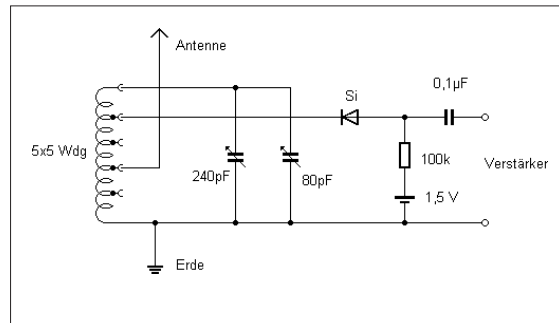


Bild 2.11: Siliziumdetektor mit Vorspannung

Eine Siliziumdiode benötigt in Durchlassrichtung für einen merklichen Strom eine Spannung von ca. 0,5 V. Da die HF-Spannung am Schwingkreis nur in Ausnahmefällen solch hohe Pegel erreicht, verwendet man meist Germaniumdioden mit einer Schwellenspannung unter 0,2 V. Hier wird jedoch ein geringer Gleichstrom von ca. 10 μA durch die Si-Diode geleitet. Dadurch stellt sich automatisch die richtige Vorspannung an der Diode ein. So können sogar Signale mit Spannungen unter 100 mV demoduliert werden.

Die Schaltung lässt sich zwar direkt an einem Kopfhörer betreiben, besser geht es jedoch mit einem Lautsprecherverstärker. Gut geeignet ist z.B. ein aktiver PC-Lautsprecher. Der eingebaute NF-Verstärker bietet eine ausreichende Verstärkung und zugleich einen hohen Innenwiderstand in der Größenordnung von 100 k Ω . Damit erreicht man eine geringere Dämpfung des Schwingkreises und eine bessere Trennschärfe. Außerdem ist der Verzicht auf einen Kopfhörer und eine bessere Lautstärke auf die Dauer entspannender. Im Vergleich zum Detektorempfänger mit Kopfhörer kann man sich eine tiefere Anzapfung der Antenne und damit eine bessere Trennschärfe leisten.

2.5 Spulen und Schwingkreise

Für die vorgestellten Schaltungen wurde jeweils die Induktivität der Spule angegeben und ein Bauvorschlag mit Maßen und Wickelaten gezeigt. Oft kommt es aber vor, dass man eine Schaltung ändern will oder einen anderen Spulenkörper hat und die Anzahl der erforderlichen Windungen selbst bestimmen muss. Oder man hat irgendwelche Spulen aus alten Geräten, die man modifizieren und anpassen kann. In jedem Fall ist es nützlich, Spulen selbst berechnen zu können.

Allgemein muss unterschieden werden, ob eine Spule auf einen magnetisierbaren Kern (Ferrit oder Eisenpulver) oder als so genannte Luftspule ganz ohne Wickelkern oder auf einen Isolierkörper gewickelt wird. Hier sollen zunächst Luftspulen betrachtet werden. Eine Spule für einen Kurzwellen-Schwingkreis hat z.B. 20 Windungen, einen Durchmesser von 16 mm und eine Länge von 35 mm. Sie hat eine Induktivität von rund 3 μH und erreicht mit einem Drehkondensator bis 300 pF eine untere Frequenzgrenze von ca. 5,3 MHz. Wie man das berechnet, soll hier gezeigt werden. Außerdem gibt es ein einfaches Hilfsprogramm, das die Arbeit erleichtert.

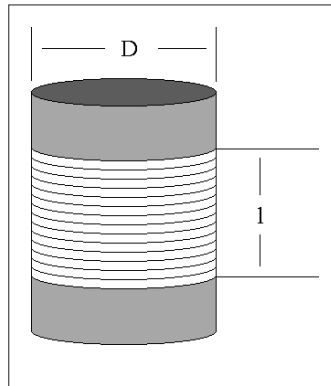


Bild 2.12: Aufbau einer Luftspule

Allgemein gilt für eine lange Spule mit $l > D$ mit der Windungszahl n , der Querschnittsfläche A in m^2 und der Länge l in m :

$$L = \mu_0 * n^2 * A / l$$

mit der magnetischen Feldkonstanten $\mu_0 = 4 \pi * 10^{-7} \text{ Vs/Am} = 1,2466 * 10^{-6} \text{ Vs/Am}$. Die Formel gilt eigentlich nur für eine unendlich lange Spule, kann jedoch in brauchbarer Näherung bis zu einer Länge von $l = D$ verwendet werden. Bei einer kurzen Spule mit gleicher Windungszahl steigt die magnetische Kopplung zwischen den einzelnen Windungen, womit sich eine höhere Induktivität ergibt. Umgekehrt verkleinert ein Auseinanderziehen der Windungen die Induktivität, was manchmal zum Abgleich von Spulen ausgenutzt wird.

Die obige Formel lässt sich für einen kreisrunden Spulenquerschnitt zur folgenden Näherungsformel vereinfachen, wobei diesmal der Durchmesser D und die Länge l der Spule in mm angegeben werden:

$$L = 1 \text{ nH} * n^2 * D^2 / \text{mm}^2 / (l / \text{mm})$$

In dieser Formel steckt die Näherung $\pi * \pi = 10$ mit einem Fehler von ca. 1,3 %. Man kann aber ohnehin keine Wunder an Genauigkeit erwarten, weil auch die Spulenform, besonders das Verhältnis von Länge und Dicke, die Drahtstärke und sogar die Umgebung

der Spule die Induktivität beeinflussen. Daher reicht es für viele Zwecke, wenn man eine Luftspule auf 10 % genau berechnen kann.

Oft verwendet man HF-Spulenkörper mit Ferrit-Schraubkernen. Die Induktivität vergrößert sich durch den Kern z.B. bis vierfach oder auch mehr. Durch mehr oder weniger weites Eindrehen des Schraubkerns kann die Spule abgeglichen werden. Ferritkerne werden für bestimmte Frequenzbereiche gefertigt, in denen sie geringe Energieverluste aufweisen.

Wesentlich größere Induktivitäten erreicht man durch geschlossene Kerne mit oder ohne Luftspalt. Der Luftspalt verkleinert zwar die Induktivität der Spule, ermöglicht jedoch eine größere Magnetisierung, d.h. der Kern selbst gelangt erst bei größeren Strömen in die magnetische Sättigung. Gebräuchlich sind Ringkerne, Transformatorkerne in E-I-Form und geschlossene Topfkerne.

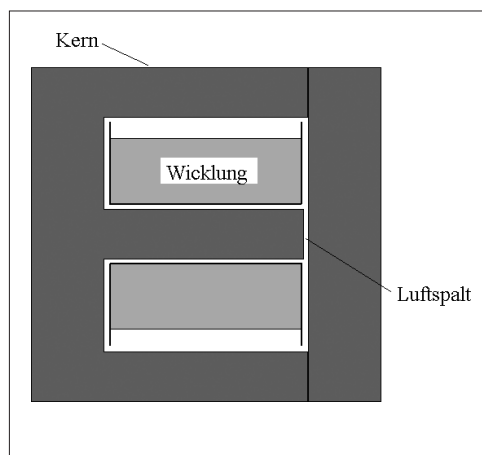


Bild 2.13: Aufbau einer Spule mit Ferritkern

Die Induktivität hängt außer von der Windungszahl stark vom verwendeten Material und von der Geometrie des Kerns ab. Eine theoretische Berechnung wie für die Luftspule ist daher nicht ohne weiteres möglich. Stattdessen gibt der Hersteller für jeden Kern einen A_L -Wert in nH/n^2 an.

$$L = A_L * n^2$$

Ein Amodon-Ringkern T37-2 hat nach den Herstellerangaben bei 100 Windungen eine Induktivität von $40 \mu\text{H}$. Das entspricht einem A_L -Wert von 4 nH/n^2 . Trägt man 30 Windungen auf, dann erhält man eine Induktivität von

$$L = 30 \cdot 30 \cdot 4 \text{ nH} = 3600 \text{ nH} = 3,6 \mu\text{H}.$$

Die Ringkernspule eignet sich dann wie eine Luftspule zum Aufbau eines HF-Schwingkreises. Außer dem A_L -Wert ist auch noch der vorgesehene Frequenzbereich eines Kerns wichtig. Der Amidon-Typ xxx-2 hat die Kennfarbe rot und eignet sich für Frequenzen bis 30 MHz.

2.6 Resonanzfrequenz und Bandbreite

Schaltet man eine Spule und einen Kondensator zusammen, dann entsteht ein Schwingkreis. Elektrische Energie kann ähnlich wie bei einem Pendel zwischen Spule und Kondensator hin und her schwingen, wobei eine definierte Resonanzfrequenz f auftritt. Der Schwingkreis führt eine freie Schwingung aus, nachdem er durch einen kurzen Stromstoß angeregt wurde.

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L \cdot C}}$$

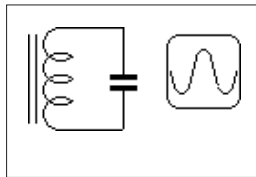


Bild 2.14: Die Spule im Schwingkreis

Schwingkreise werden oft in Stromkreisen mit unterschiedlicher Frequenz oder mit Frequenzgemischen eingesetzt. Ströme und Spannungen unterscheiden sich dann je nach Frequenz. Der Parallelschwingkreis besitzt einen komplexen Widerstand Z mit einem scharfen Maximum bei der Resonanzfrequenz f_0 . Bei dieser Frequenz gilt $R_C = R_L$, wobei sich die Ströme durch Spule und Kondensator wegen ihrer gesamten Phasendifferenz von 180 Grad gerade aufheben. Ein idealer Schwingkreis ohne jede Dämpfung hätte bei der Resonanzfrequenz eine unendlich große Impedanz.

In der Praxis tritt jedoch durch Energieverluste am ohmschen Widerstand des Spulendrahtes, durch magnetische Verluste des Spulenkerns und durch elektromagnetische Abstrahlung eine Dämpfung der Schwingung auf, sodass sich ein endlicher Resonanzwiderstand ergibt. Man kann vereinfachend alle Verluste einem parallelen Verlustwiderstand R zuordnen.

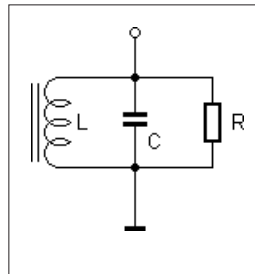


Bild 2.15: Resonanzkreis mit Verlustwiderstand

Für jeden Schwingkreis kann man eine Güte Q angeben, die umgekehrt proportional zur Bandbreite des Kreises ist. Q lässt sich leicht ermitteln, wenn der parallele Dämpfungswiderstand R ins Verhältnis zur induktiven Widerstand $R_L = 2 \pi f L$ oder zum kapazitiven Widerstand $R_C = 1/(2\pi f C)$ bei der Resonanzfrequenz gesetzt wird.

$$Q = R/R_L \text{ bzw. } Q = R/R_C$$

Erregt man einen Schwingkreis mit einem konstanten Wechselstrom I variabler Frequenz bzw. über eine Wechselstromquelle mit hohem Innenwiderstand, dann ist die Schwingkreisspannung proportional zum Betrag des komplexen Widerstands Z . Im Resonanzfall ist die Spannung am höchsten. Je kleiner die Dämpfung der Schwingung durch Energieverluste jeglicher Art bzw. je größer die Güte des Schwingkreises, desto höher steigt die Resonanzspannung. Zu beiden Seiten der Resonanzfrequenz lassen sich Punkte auf der Resonanzkurve bestimmen, bei denen die Spannung auf den Faktor $1/\sqrt{2} = 0,707 = -3 \text{ dB}$ abgefallen ist. Der Frequenzabstand dieser Punkte wird als die Bandbreite b des Kreises bezeichnet. Zwischen Resonanzfrequenz f_0 , Bandbreite b und Güte Q des Kreises besteht der Zusammenhang $b = f_0/Q$.

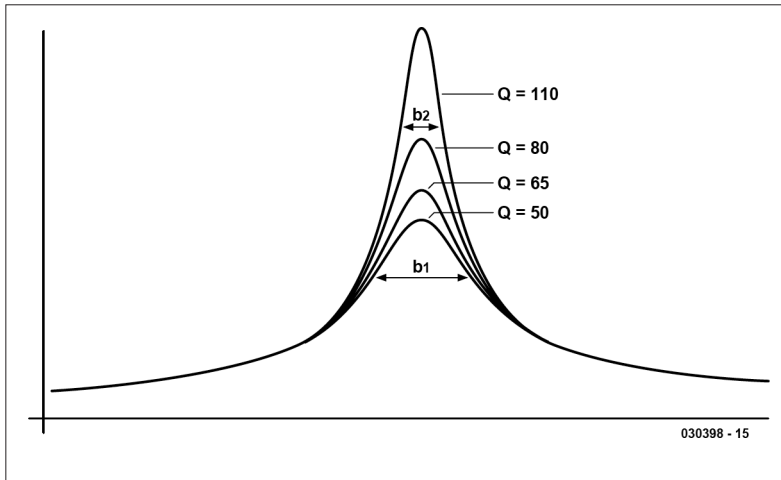


Bild 2.16: Resonanzkurven unterschiedlicher Güte

Bild 2.16 zeigt Resonanzkurven unterschiedlicher Güte. Bei $Q = 50$ ergibt sich eine größere Bandbreite b_1 als bei $Q = 110$ mit der Bandbreite b_2 . Zugleich erkennt man bei höherer Güte eine zunehmende Resonanzüberhöhung. Damit schaukelt sich der Schwingkreis bei der Resonanzfrequenz stärker auf. Weitab von der Resonanzfrequenz unterscheiden sich die Resonanzkurven dagegen kaum.

Die Dämpfung des Kreises und damit seine Güte, wird praktisch immer durch einen Serienwiderstand und durch einen Parallelwiderstand bewirkt. Der Serienwiderstand geht auf die Drahtwicklung zurück, ist aber für eine bestimmte Frequenz durch den Skin-Effekt größer als der Gleichstromwiderstand. Der Parallelwiderstand wird durch die Anschlussimpedanz in der Schaltung bestimmt. Aber auch ein Eisen- oder Ferritkern hat Verluste, die sich durch einen Parallelwiderstand angeben lassen. Bei gleicher Induktivität benötigt eine Spule mit Kern weniger Windungen und hat daher geringere Kupferverluste. Dafür hat man aber nun die Verluste im Kern. Bei sehr hohen Frequenzen ab etwa 100 MHz sind reine Luftspulen aus dickem, versilberten Draht besser, bei mittleren Frequenzen um 10 MHz erreicht man die beste Güte mit einem geschlossenen Kern wie z.B. einem Ringkern. Luftspulen sind aber bis herab zu etwa 1 MHz eine Alternative. Spulen und Transformatoren für den NF-Bereich kommen dagegen fast nie ohne einen Kern aus.

Meist ist bei sorgfältigem Aufbau der Spule eine Güte im Bereich bis etwa $Q = 100$ erreichbar. Ein Schwingkreis wird jedoch auch durch die angeschlossene Schaltung oder durch eine Antenne bedämpft. Dieser Dämpfung wirkt man durch eine lose Kopplung des Schwingkreises durch eine kleine Hilfswicklung, eine Spulenanzapfung oder durch einen geeigneten Kondensator entgegen. Bei direktem Anschluss an einen Verstärker sollte dessen Innenwiderstand sehr hoch sein, um die Dämpfung klein zu halten.

Für die Berechnung von Spulen und Schwingkreisen wurde das kleine Visual-Basic-Programm LCFR geschrieben, das man auf der Homepage des Autors findet. Das Programm

berechnet die Induktivität von Luftspulen und von Spulen mit Kern, deren A_L -Wert bekannt ist. Außerdem können die Resonanzfrequenz und der induktive Widerstand R_L der Spule bei dieser Frequenz bestimmt werden, wenn man außer der Induktivität noch eine Kapazität angibt. Das Programm besteht aus drei Bereichen, die unabhängige Rechnungen durchführen und nur aus praktischen Überlegungen in eine Oberfläche gegossen wurden. Im oberen Teil werden Luftspulen berechnet, im mittleren Kernspulen. Unten findet man eine Berechnung der Resonanzfrequenz und des induktiven Widerstands. An jeder Stelle führt eine Veränderung der Eingangsgrößen sofort zu einem neuen Ergebnis. Die jeweils zuletzt berechnete Induktivität einer Spule wird automatisch in die untere Berechnung übernommen. Das Programm ist geeignet, um „mal eben“ neue Parameter auszuprobieren. Die angezeigten drei Nachkommastellen für die Induktivität sollen nicht als Hinweis auf die Rechengenauigkeit verstanden werden, sondern die Berechnung von Spulen in einem weiten Bereich von wenigen nH ($1 \text{ nH} = 0,001 \text{ } \mu\text{H}$) bis zu vielen mH ($1 \text{ mH} = 1000 \text{ } \mu\text{H}$) ermöglichen.

The screenshot shows a software window titled "LCFR" with three distinct calculation sections, each with input fields and a result display:

- Top Section (Air Core Solenoid):** Inputs: d/mm (10), l/mm (10), n (10). Result: $L = 1 \text{ } \mu\text{H}$.
- Middle Section (Core Solenoid):** Inputs: $n\text{H}/r^2$ (10), n (10). Result: $L = 1 \text{ } \mu\text{H}$.
- Bottom Section (Resonance and Inductive Reactance):** Inputs: $L/\mu\text{H}$ (1), C/pF (100). Results: $f = 15915.963 \text{ kHz}$ and $R_L = 99.9 \text{ Ohm}$.

Bild 2.17: Berechnung von Spulen

Wenn man einen bestimmten Schwingkreis aufbauen möchte, könnte man zunächst die Kapazität vorgeben, dann die Induktivität berechnen und schließlich für einen gegebenen Kern oder Spulenkörper die Windungszahl bestimmen. Oft geht es aber weniger systematisch besser, d.h. man wählt einen Spulentyp und probiert dann unterschiedliche Induktivitäten und Kapazitäten, bis das Ergebnis passt. Die Frage könnte z.B. lauten, mit welchen Standardwerten einer Festinduktivität und eines Kondensators kann ein Schwingkreis aufgebaut werden, der in einer gegebenen Schaltung eine bestimmte Resonanzfrequenz hat. Mit Probieren kommt man hier oft schneller zum Ziel als mit einer systematischen Berechnung. Im Folgenden sollen einige Beispiele gezeigt werden:

Auf einer Papprolle mit einem Durchmesser von 42 mm soll eine Spule mit $300 \text{ } \mu\text{H}$ für ein Mittelwellen-Detektorradio gewickelt werden. Der Drahtdurchmesser sei 0,5 mm, d.h. 100 Windungen würden eine Spulenlänge von 50 mm ergeben. Jetzt kann man einfach verschiedene Werte ausprobieren und kommt auf ca. 90 Windungen. Der Drehkonden-