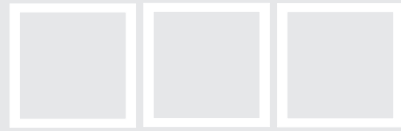


Schwingungen +  
Resonanz  
Versuche

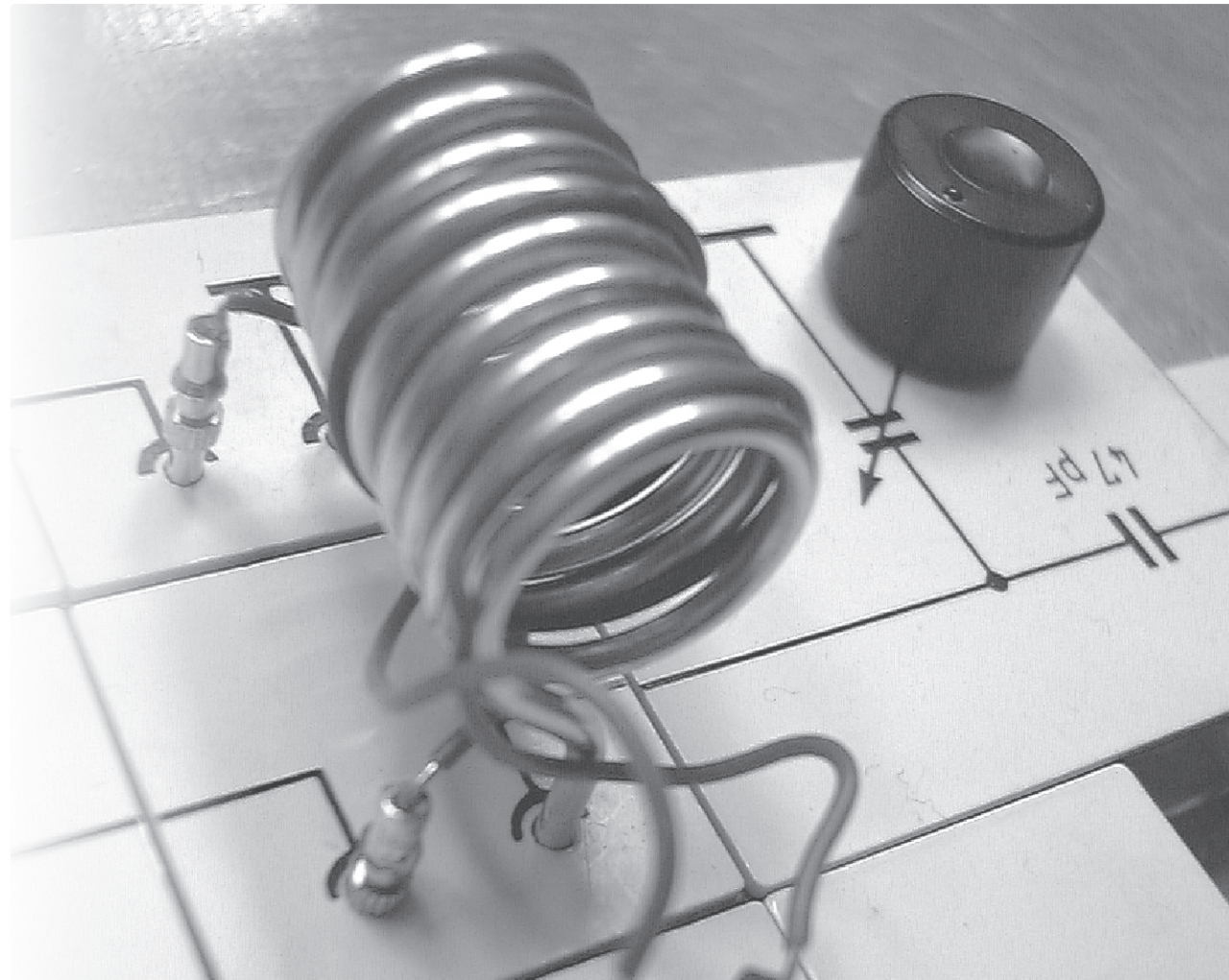




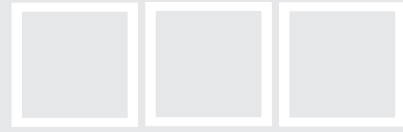
## Anleitungsbuch Schwingungen & Resonanz

Autor  
Gerd Kopperschmidt

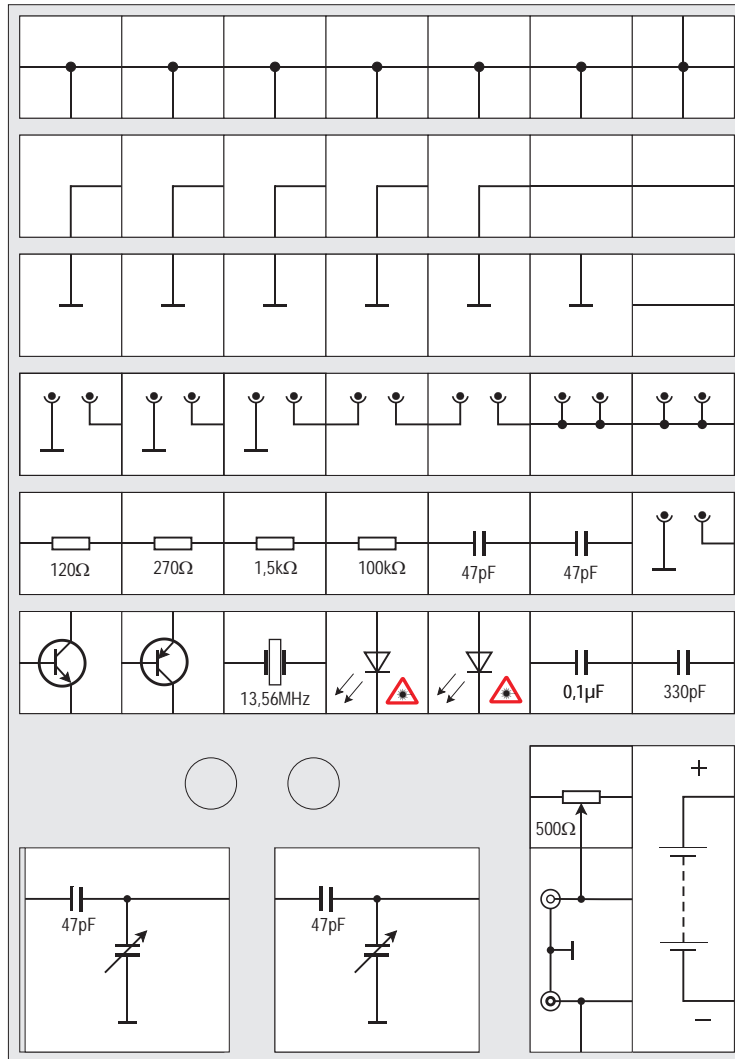
Herausgeber  
Reha Werkstatt Oberrad  
Lectron  
Buchrainstrasse 18  
60599 Frankfurt  
Tel.: +49 (0)69 90 50 12 82  
Fax: +49 (0)69 90 50 12 83  
Email: [lectron@frankfurter-verein.de](mailto:lectron@frankfurter-verein.de)  
[www.lectron.de](http://www.lectron.de)



# Verwendete Bauteile



# Lectron



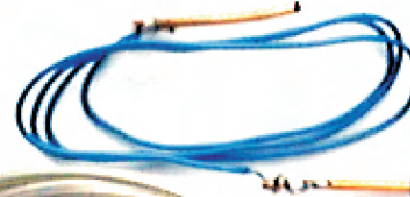
Anzahl	Bezeichnung	Bestell-Nr.
6	Verbindung Masse	2101
3	Verbindung Gerade	2103
6	Verbindung T-Stück	2104
5	Verbindung Winkel	2105
1	Verbindung Kreuzung verbunden	2106
2	Trennbaustein	2112
4	Anschlussbaustein	2113
2	Messbaustein	2114
1	Batteriebaustein 2-polig	2124
1	Cinch - Buchse	2127
1	Widerstand 120 $\Omega$	2202
1	Widerstand 270 $\Omega$	2204
1	Widerstand 1,5 k $\Omega$	2206
1	Widerstand 100 k $\Omega$	2214
1	Potentiometer 500 $\Omega$	2218
1	Kondensator 0,1 $\mu$ F	2302
2	Drehkondensator 220pF / 47pF	2307
1	Kondensator 330 pF	2313
2	Kondensator 47 pF	2314
1	Transistor 2N3704 links o. Basiswid.	2430
1	Transistor 2N3702 rechts o. Basiswid.	2446
2	Leuchtdiode rot superhell	2474
1	Quarzbaustein 13,56 MHz	2475
1	Zubehör (Spulen, Antennen, Aufbauplatte)	2912
1	Anleitungsbuch	3114



Cu -Draht 1 m



Cu -Draht 0,5 m



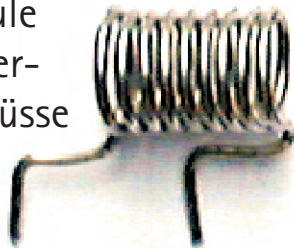
Kleine Aufbauplatte



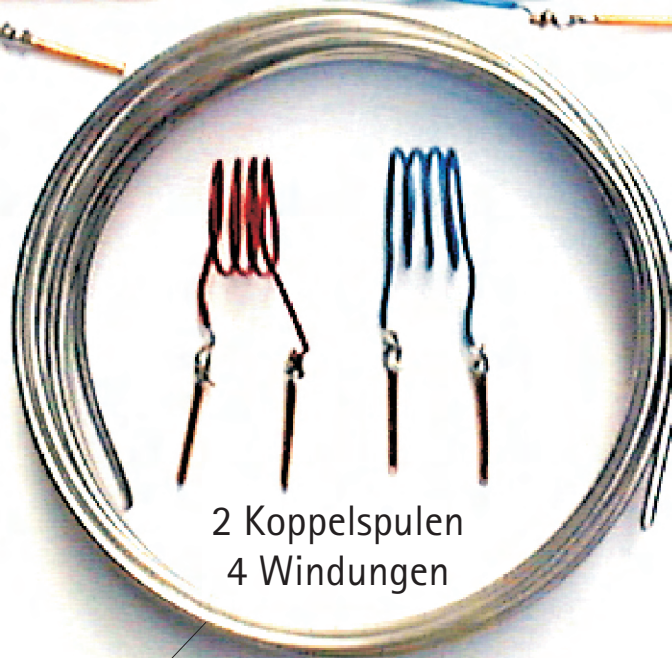
Schwingkreisspule  
9 Windungen  
Al-Draht 2mm $\varnothing$



Schwingkreisspule  
9 Windungen, ver-  
schwenkte Anschlüsse



2 Koppelspulen  
4 Windungen



Al-Draht 2mm  $\varnothing$  für Antennenstäbe  
0,1 m (2x) und 1 m (2x)

**Zubehör** (Bestell-Nr.2912 )

# Verzeichnis der Versuche



Versuch	Thema	Seite
	Verzeichnis der Versuche	6
	Zu diesem Kasten	7
1	Quarzoszillator	8
2	Schwingungsnachweis	10
3	Spule	12
4	Schwingkreis	14
5	Schwingkreis m. verkleinerter Induktivität	16
6	HF - Endstufe	18
7	Auskoppeln von HF - Leistung	20
8	Kurzwellen Sender	22
9	Magnetisch gekoppelte Resonanzkreise	24
10	Nachweis der Energieübertragung	26
11	Elektrisch gekoppelte Resonanzkreise	28
12	Kapazitive Kopplung	30
13	Kapazitive Kopplung bei erhöhter Sendeleistung	32
14	Eindraht Energieübertragung	34
15	Energieübertragung über Masseleitung	36
	Notizen	38



## Zu diesem Kasten

Diese Zusammenstellung von Experimenten ist für Besitzer der LECTRON Baukästen »Start- und Ausbausystem«, »Übungssystem« und vor allen Dingen »Radiotechnik« und »Radio-Röhrentechnik« gedacht; Experimentierkästen also, mit denen man Rundfunkgeräte aufbauen kann. Ein wesentlicher Bestandteil der dabei aufgebauten Empfänger sind Schwingkreise, die - in Resonanz zu einer bestimmten Frequenz gebracht - es überhaupt erst ermöglichen, einen gewünschten Sender mit seiner Information aus dem allgemeinen »Wellensalat«, den die Antenne empfängt, zu selektieren.

In 15 praktischen Versuchen lassen sich die wichtigsten Grundlagen und Phänomene zur drahtlosen Energie- und Informationsübertragung leicht erarbeiten. Die meisten dafür benötigten LECTRON Bausteine werden bereits vorhanden sein. Neu ist der Quarzbaustein mit der Frequenz 13,56 MHz, die für wissenschaftliche und experimentelle Zwecke freigegeben ist. Diese Frequenz hat für uns den großen Vorteil, dass die Schwingkreisspulen mit ihren 9 Windungen und die entsprechenden Antennenstäbe noch handliche Ausmaße haben und selbst

leicht hergestellt werden können. Andererseits ist die Frequenz aber auch noch nicht so hoch, dass sich die LECTRON spezifischen seitlichen Kontaktplättchen der Bausteine mit ihrer parasitären Kapazität störend auswirken.

Ein weiterer neuer Baustein ist die superhelle rote LED, die wir allgemein zur Anzeige verwenden.

**Diese LED ist so hell, dass wir keineswegs in den direkten Strahl blicken dürfen; es besteht die Gefahr der Netzhautschädigung.**

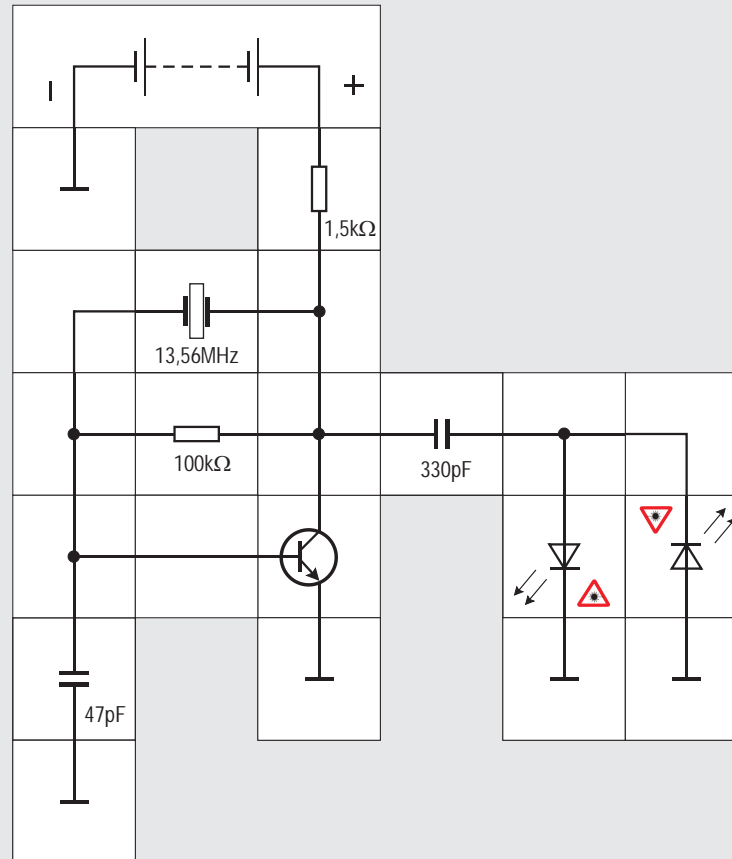
Bei den Versuchen sollte sie immer mit dünnem Seidenpapier abgedeckt werden.

Alle für die 15 Versuche benötigten Bausteine sind auf Seite 6 im Überblick mit ihren Bestellnummern abgebildet, so dass man leicht feststellen kann, welche einem davon in der Sammlung fehlen; sie können bei LECTRON problemlos als Einzelteil bezogen werden. LECTRON bietet darüber hinaus die Zusatzteile (2 Spulen, 4 Antennenstäbe, 3 Drähte mit Steckern für Koppelspulen, kleine Aufbauplatte) als Zubehör an (Bestell-Nr. 2912).

Obwohl alle Experimente mit dem Batteriebaustein dargestellt sind, empfiehlt sich der Einsatz des Netzteils (Bestell-Nr. 2601), das neuerdings mit 11,5 V auch etwas höhere Spannungen als 9 V abgibt.

Hat man alle Versuche sorgfältig und erfolgreich

durchgeführt, so kann man auch leicht durchschauen, wie moderne Zauberkünstler es schaffen, beispielsweise einfach in der Hand gehaltene Leuchtstoffröhren zum Leuchten zu bringen, ohne dabei selbst Schaden zu nehmen. Wenn man es richtig anstellt, sind hochgespannte und hochfrequente Ströme für den menschlichen Körper nämlich ungefährlich. Die Energieübertragung beruht dabei durchweg auf der Energiekopplung zwischen abgestimmten Schwingkreisen. Der Serbokroate Nikola Tesla (1856 - 1943) hat in Amerika um 1900 damit in spektakulären Versuchen viel Aufsehen erregt und auch heute kann man mit Tesla Transformatoren, die nach den hier vorgestellten Prinzipien arbeiten, ein staunendes Publikum verblüffen. Solche Versuche sprengen allerdings die Möglichkeiten des LECTRON Systems und sind teilweise auch nicht ungefährlich. Wer in dieses Gebiet tiefer eindringen möchte, findet leicht entsprechende Literatur (z. B. Günter Wahl, Experimente mit Tesla Energie, Franzis - Verlag, ISBN 3772356958) und viele Gleichgesinnte über das Internet. Es ist allerdings auch viel Dubioses dabei und man sollte nicht alles glauben, was dort geboten wird. Die Phänomene und scheinbaren Widersprüchlichkeiten, die Tesla bei seinen Versuchen nutzte, sind heute bestens bekannt und erforscht.







einmal Schwingungen erzeugen. Das geschieht am einfachsten mit einem Oszillator, prinzipiell bestehend aus einem Verstärker und einer Rückkopplung, die im Wesentlichen die Aufgabe hat, das Ausgangssignal phasenrichtig wieder dem Eingang zuzuführen. Damit dieses Gebilde Schwingungen erzeugt, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:

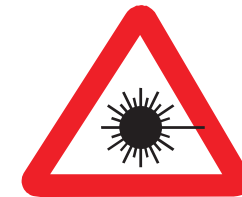
1. Die AMPLITUDENBEDINGUNG; sie besagt, dass ein Oszillator nur dann schwingen kann, wenn der Verstärker die (stets vorhandene) Abschwächung im Rückkoppler kompensiert.
2. Die PHASENBEDINGUNG; sie besagt, dass eine Schwingung nur dann zustande kommt, wenn Ein- und Ausgangsspannung in Phase sind.

Es gibt unzählige Oszillatorgrundschaltungen mit einer Transistorstufe und Rückführungen über RC- oder LC-Glieder, die dann die Oszillatorfrequenz und die Schwingungsform festlegen; sie sind bereits in anderen Lectron Experimentierkästen beschrieben. Hier wollen wir als Rückführung einen Quarz verwenden, der den Vorteil hat, dass die Oszillatorfrequenz äußerst stabil ist. Für experimentelle Zwecke ist eine Frequenz im Kurzwellenbereich mit genau 13,56 MHz freigegeben, die wir nutzen wollen.

Der Versuchsaufbau zeigt einen npn-Transistor in Emitterschaltung; Ein- und Ausgangssignal haben

eine Phasenverschiebung von  $180^\circ$ , der Quarz in der Rückführung muss also eine weitere Verschiebung um  $180^\circ$  bewerkstelligen, damit beide Signale in Phase sind.

Ohne Hilfsmittel können wir natürlich nicht sehen oder hören, ob die Schaltung schwingt. Deswegen sind zwei antiparallel geschaltete Leuchtdioden über einen Koppelkondensator von 330 pF an den Ausgang angeschlossen. Er sperrt die Gleichspannung ab und lässt nur die Wechselspannung durch, wobei sein kapazitiver Widerstand bei dieser Frequenz circa  $36 \Omega$  beträgt.



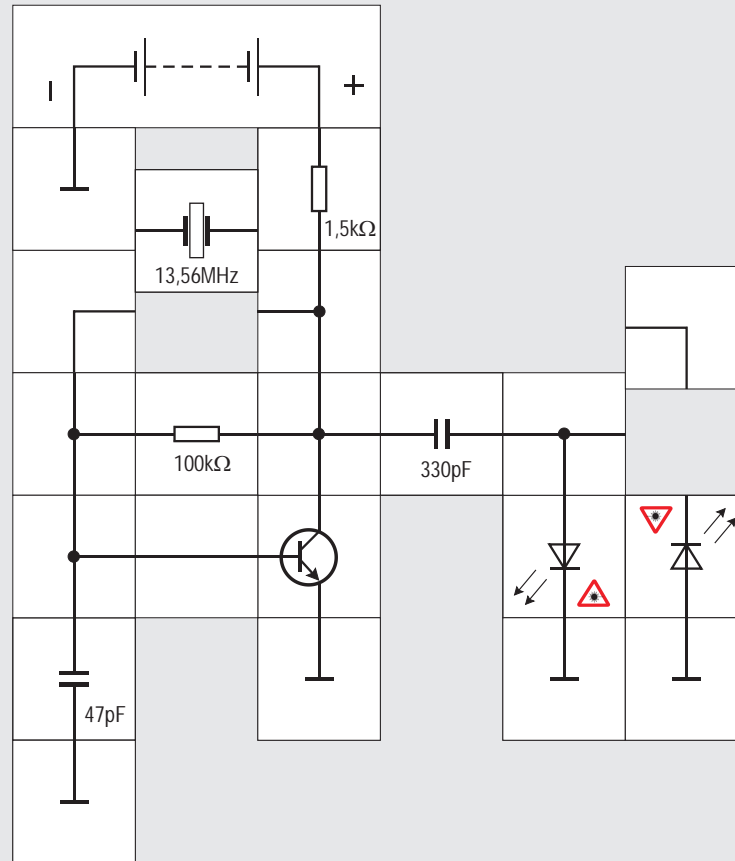
**Die eingesetzten Leuchtdioden sind superhelle Typen; wir sollten um Netzhautschädigungen zu vermeiden, niemals direkt in den Strahl blicken.**

Legen wir die Batteriespannung an, leuchten beide, was ein eindeutiges Zeichen darauf ist, dass der Oszillator schwingt.

## Versuch 1

### Quarzoszillator

Um mit Schwingungen Energie und Information übertragen zu können, müssen wir zunächst erst





## Versuch 2

### Schwingungsnachweis

Die Schwingungen unseres kleinen Senders lassen sich mit einem Kurzwellenradio (Weltempfänger) nachweisen. Der Empfänger sollte zweckmäßigerweise eine optische Empfangsanzeige besitzen, die bei 13,56 MHz im 21 m Band dann anspricht. Wir brauchen keine Antenne anzuschließen, das Sendersignal ist im Nahbereich ausreichend stark. Da wir nur den Träger ohne aufmodulierte Information senden, wird nichts zu hören sein. Lediglich das Rauschen, das der Empfänger abgibt, wenn er keine Station empfängt, verschwindet.

Entfernen wir den Quarz aus der Schaltung, leuchten die Dioden nicht mehr, ein Zeichen, dass ihr Leuchten durch die HF - Energie zustande kommt. Auch nur eine Leuchtdiode am Ausgang leuchtet nicht: Sie richtet die Hochfrequenzspannung gleich, womit sich der Koppelkondensator so weit auflädt, bis die Diode sperrt.

Ein Schwingquarz besteht aus einem dünnen Siliziumdioxid - Plättchen, dessen beide Seiten kontaktiert sind. Das Plättchen lässt sich mit elektrischen Feldern zu mechanischen Schwingungen anregen. (Piezoelektrischer - Effekt) Ein Schwingquarz verhält sich elektrisch wie ein Schwingkreis hoher Güte (10000 und mehr). Die Frequenzstabilität liegt in der Größenordnung von  $\Delta f/f = 10^{-6} \dots 10^{-10}$ . Sein Verhalten lässt sich gut durch das angegebene Ersatzschaltbild beschreiben. Die Größen L und C sind durch die mechanischen Eigenschaften sehr gut definiert. R ist ein kleiner ohmscher Widerstand, der die Dämpfung charakterisiert.  $C_0$  fasst die Zuleitungs- und Elektrodenkapazitäten zusammen. Typische Werte für einen Quarz dieser Frequenz sind:

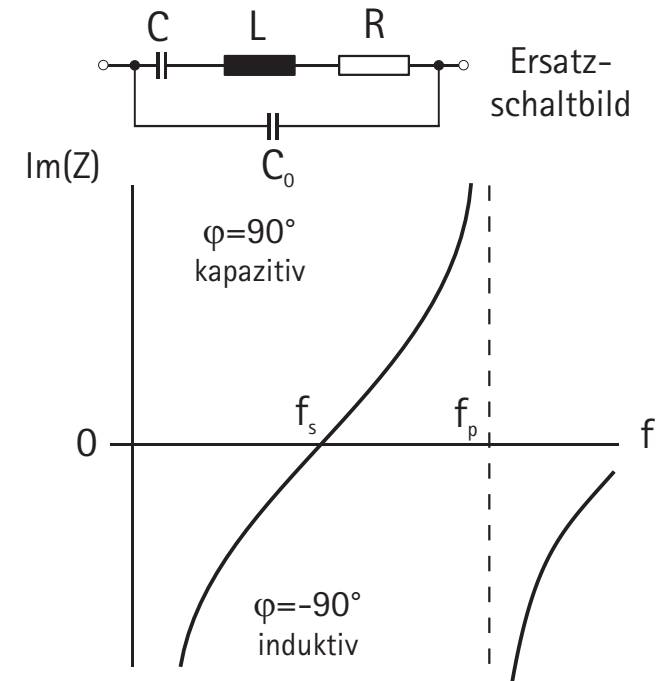
$L = 100 \text{ mH}$ ,  $R = 100 \Omega$ ,  $C = 0,015 \text{ pF}$ ,  $C_0 = 5 \text{ pf}$ .

Der Quarz besitzt eine Serien- und eine Parallelresonanz mit den Resonanzfrequenzen  $f_s$  und  $f_p$ :

$$f_s = 1/2\pi\sqrt{LC} \quad f_p = f_s \cdot \sqrt{1+C/C_0}$$

Wir sehen, dass  $f_s$  nur von dem gut definierten Produkt LC abhängt, während bei  $f_p$  das wesentlich schlechter definierte  $C_0$  mit ein geht.

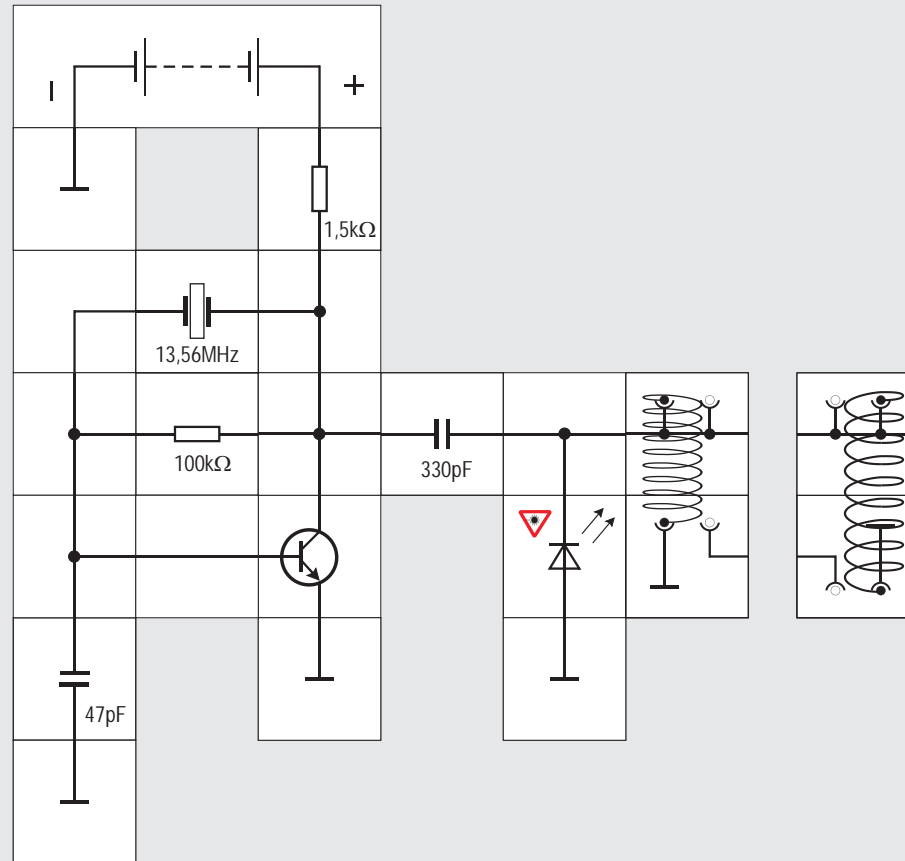
Möchte man die Frequenz eines Quarzoszillators in einem kleinen Bereich variieren, braucht man lediglich einen Kondensator  $C_s$  mit dem Quarz in Reihe zu schalten, der groß gegen C ist. Die neue Se-

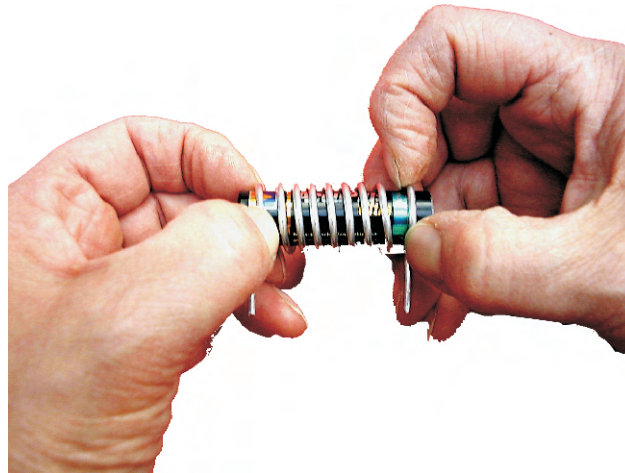


rienresonanzfrequenz  $f_s'$  und die relative Frequenzänderung sind dann:

$$f_s' = f_s [1 + C/2(C_0 + C_s)] \quad \Delta f/f = C/2(C_0 + C_s)$$

$f_p$  wird durch  $C_s$  nicht verändert. Lassen wir  $C_s \rightarrow 0$  gehen, können wir  $f_s'$  maximal bis in die Nähe von  $f_p$  bringen, wie der Vergleich mit den beiden Ausdrücken zeigt.





## Versuch 3

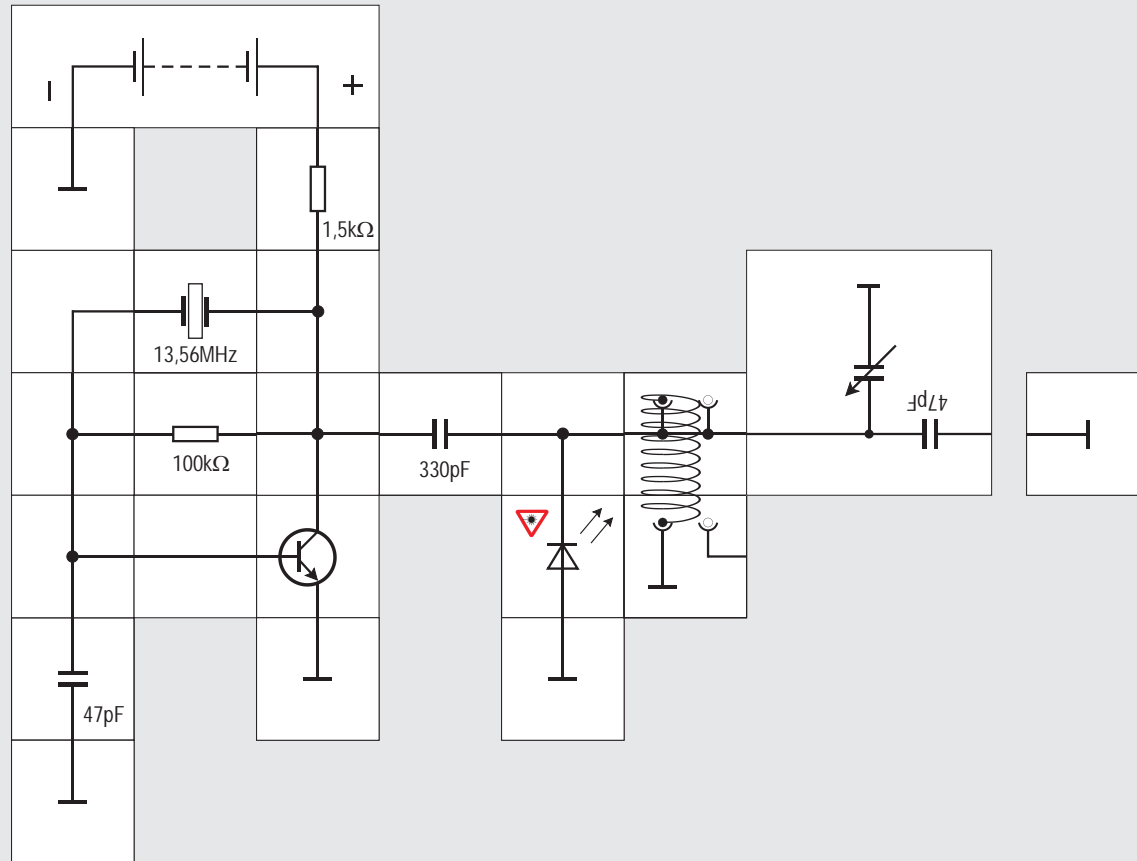
### Spule

Wir wollen nun unseren Oszillator mit einem aus Spule und Kondensator bestehenden Schwingkreis ausstatten. Dazu entfernen wir zunächst die eine Leuchtdiode aus dem Versuchsaufbau und setzen an ihre Stelle die Schwingkreisspule mit 9 Windungen aus Al-Blankdraht. Sie ist als freitragende Luftspule mit einer Mignon - Batterie als Wickelkörper

gewickelt worden und hat deswegen einen Innendurchmesser von 14 mm. Es empfiehlt sich immer dann, wenn die Spule in die Länge gezogen oder zusammen gedrückt werden soll, eine Batterie als Wickelkörper wieder einzusetzen; die Spule behält dann die Form und die einzelnen Windungen lassen sich besser auf gleichmäßigen Abstand voneinander ausrichten. Zunächst setzen wir sie in den Masseanschluss des Anschlussbausteins und in einen Messbaustein.

Die Spule dient jetzt zum Ableiten des Gleichstroms; trotzdem wird die verbliebene Leuchtdiode gar nicht oder allenfalls nur schwach leuchten. In unserem Versuchsaufbau sind im Augenblick die einzelnen Windungen der Spule relativ dicht zusammengedrückt und die Spule hat eine höhere Induktivität (circa  $0,4\mu\text{H}$  bis  $1,0\mu\text{H}$ ) als es der Fall ist, wenn wir die Windungen auseinander ziehen. Wir können das leicht bewerkstelligen, indem wir den Anschlussbaustein um  $180^\circ$  drehen und das entsprechende andere Loch im Messbaustein benutzen. Auch in dieser Anordnung wird die Leuchtdiode allenfalls schwach leuchten. Bei der Frequenz von 13,56 MHz ist der induktive Widerstand der Luftspule nur ungefähr  $80\Omega$  und der Spannungsabfall an ihr zu klein als dass die Flussspannung der Diode merklich überschritten wird.

04

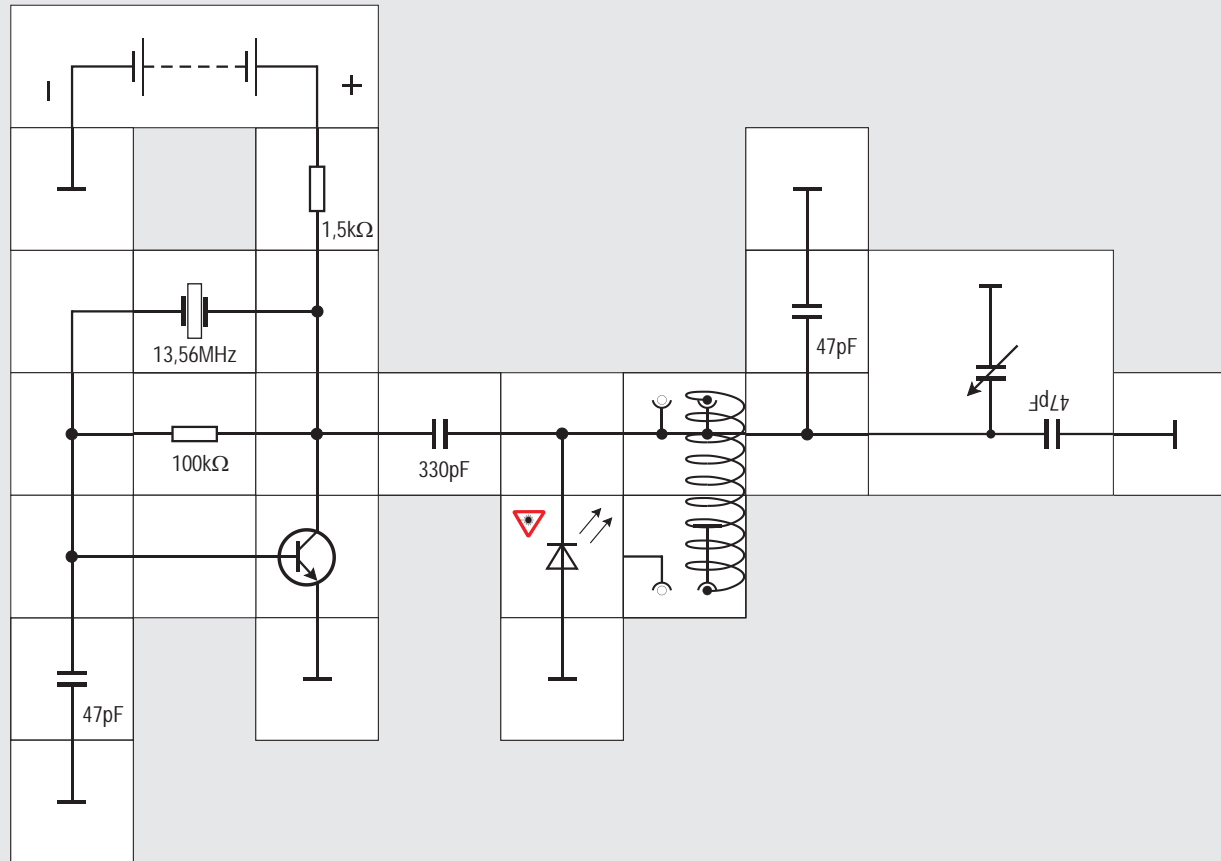




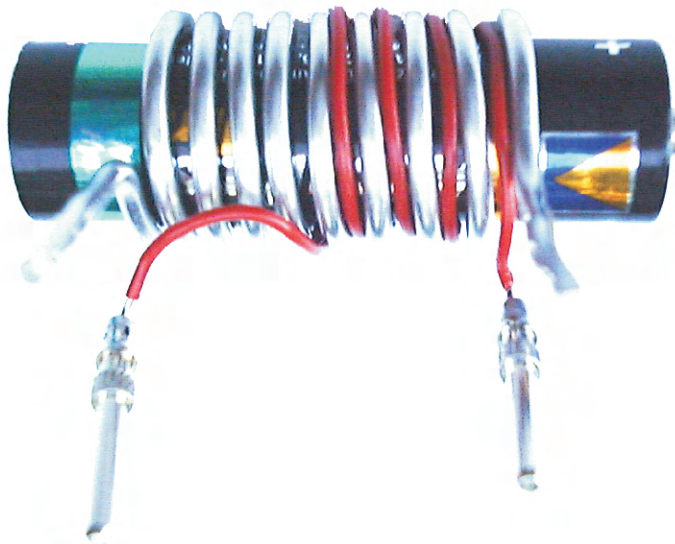
## Versuch 4

### Schwingkreis

Obwohl wir über die Länge der Spule ihre Induktivität einstellen können, der Einstellbereich reicht etwa von  $0,6\mu\text{H}$  (Länge 30mm) bis  $1,2\mu\text{H}$  (Länge 15mm), wollen wir zum Abgleich des Schwingkreises den Drehkondensator verwenden. Setzen wir ihn parallel zur Spule, so bildet er mit ihr einen Parallelschwingkreis, der bekanntlich bei der Resonanzfrequenz einen hohen Widerstand hat. Durch Drehen am Einstellknopf finden wir den passenden Kapazitätswert heraus und sehen am hellen Aufleuchten der Diode, dass der Schwingkreis eine relativ große Bandbreite hat. Er wird nämlich durch den Oszillator und die Leuchtdiode stark bedämpft. Versuchsweise können wir parallel zum Drehkondensator den internen  $47\text{pF}$  Kondensator schalten und werden dann eine andere Einstellung erhalten, bei der die Leuchtdiode ihre maximale Helligkeit hat.







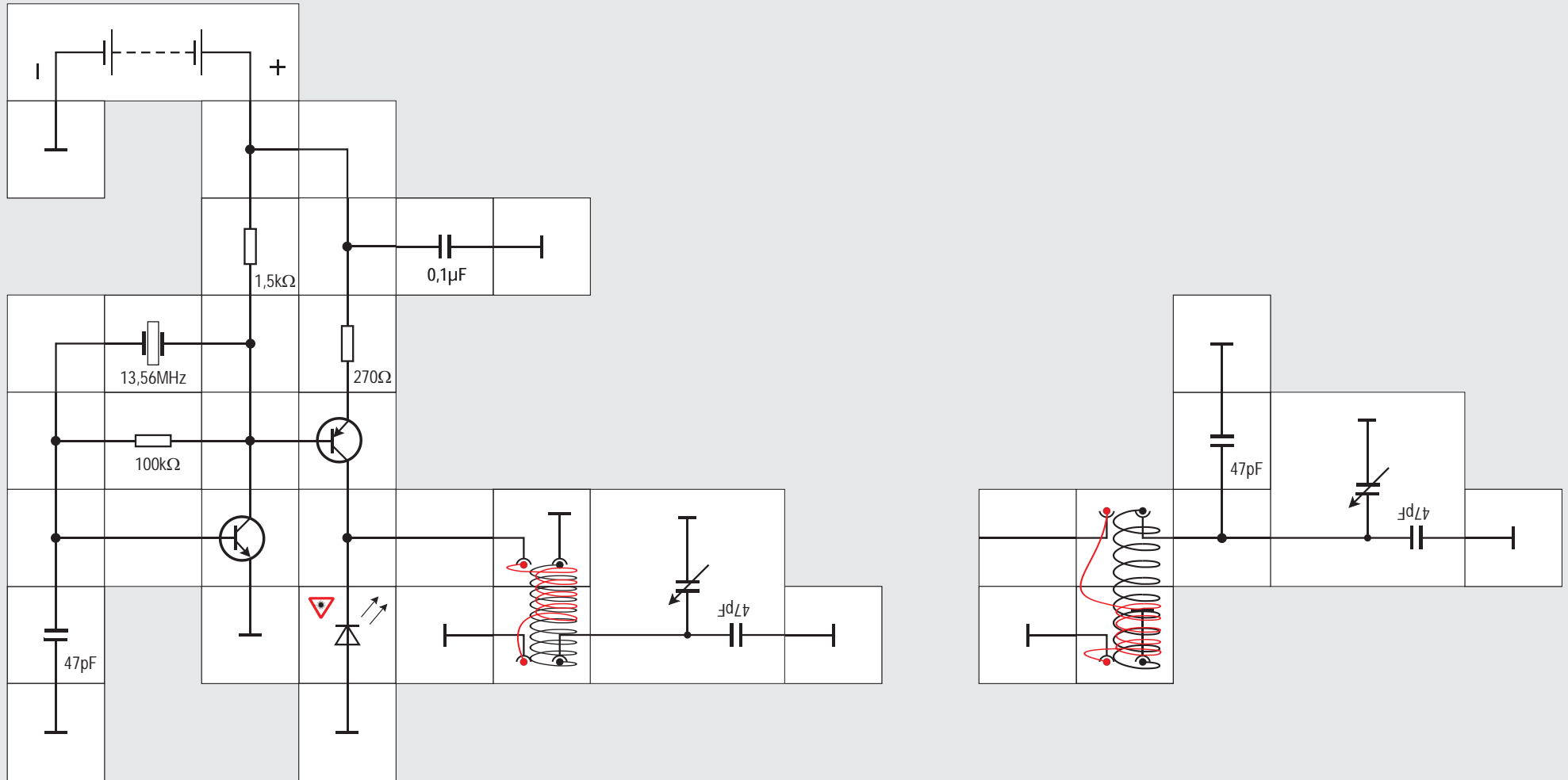
## Versuch 5

### Schwingkreis mit verkleinerter Induktivität

Ziehen wir die Spule auseinander, so sinkt ihre Induktivität und wir müssen, um den Schwingkreis auf Resonanz abzustimmen, die Kapazität vergrößern. Dazu wird es nötig sein, neben dem bereits vorhandenen 47pF Kondensator einen weiteren anzuschließen. Erst dann ist ein Abgleich mit dem Drehkondensator möglich und die Diode leuchtet wieder.

Für den nächsten Versuch muss unsere Schwingkreisspule mit einer Koppelspule (4 Windungen isolierter Draht) versehen werden. Die nebenstehende Abbildung zeigt die Details.

06





## Versuch 6

### HF – Endstufe

Für unsere weiteren Versuche benötigen wir mehr HF - Leistung als unser einstufiger Oszillator liefern kann. Eine zweite Stufe, mit einem pnp - Transistor aufgebaut, schafft hier Abhilfe. Der Transistor ist mit einem  $270 \Omega$  Emitterwiderstand als Gegenkopplung versehen und arbeitet als gesteuerte Stromquelle. Sein Ausgang hat darüber hinaus einen hohen Innenwiderstand, was unseren Ausgangskreis kaum zusätzlich bedämpft. Ein zusätzlicher  $0,1\mu\text{F}$  Kondensator stützt die Versorgungsspannung.

Zur Ankopplung an den Resonanzkreis wickeln wir uns - wieder mit der Mignonbatterie als Wickelkörper - eine Koppelspule mit vier Windungen; dieses Mal mit isoliertem Draht, denn es darf keine galvanische Verbindung zwischen den beiden Spulen entstehen. Für das Ineinanderschieben der Spulen ist es zweckmäßig, die Mignonbatterie in die Blankdrahtspule zu schieben und dann die vier Windungen der zweiten Spule zwischen die Windungen der ersten zu wickeln. Die Anschlussdrähte werden anschließend so gebogen, dass sie in den Steckbaustein passen. Erst nachdem alle vier Anschlüsse in

die entsprechenden Löcher der Steckbausteine gesteckt und ausgerichtet sind, entfernen wir die Mignonbatterie aus der Spule.

Es gibt wieder die beiden Aufbaumöglichkeiten für die Resonanzspule:

Die Windungen weiter auseinander mit geringer Induktivität; Vorteil ist hierbei, dass die Koppelspule einfacher zwischen den Windungen anzubringen ist mit dem Nachteil eines zusätzlichen  $47\text{pF}$  Kondensators oder

Windungen dichter zusammen mit höherer Induktivität und höherem Kopplungsgrad.

Die Koppelspule soll zunächst an der Masseseite der Schwingkreisspule, am so genannten »kalten Ende«, eingesteckt werden. Legen wir Versorgungsspannung an, wird die Leuchtdiode wahrscheinlich nicht leuchten; wir müssen mit dem Drehkondensator erst wieder auf Resonanz abstimmen. Dieses Mal werden wir ein scharfes Maximum der Helligkeit bei einer bestimmten Einstellung feststellen. Der Schwingkreis ist dann abgestimmt und die Schwingungsamplitude maximal. Da Schwingkreisspule und Koppelspule einen HF - Transformator bilden, können wir das Helligkeitsmaximum der Leuchtdiode auch an der Primärseite erkennen.

Im Resonanzfall sind die Beträge von induktivem und kapazitivem Widerstand gleich groß; es gilt:

$$|X_L| = |X_C| \\ 2\pi f_{\text{res}} L = 1/2\pi f_{\text{res}} C$$

Nach  $f_{\text{res}}$  aufgelöst ergibt sich die bekannte Beziehung:

$$f_{\text{res}} = 1/2\pi\sqrt{LC}$$

Für unsere Frequenz  $f_{\text{res}} = 13,56 \text{ MHz}$  sind mit

$$L = 0,9\mu\text{H} \text{ und } C = 150 \text{ pF}$$

$$|X_L| = |X_C| \approx 80 \Omega$$

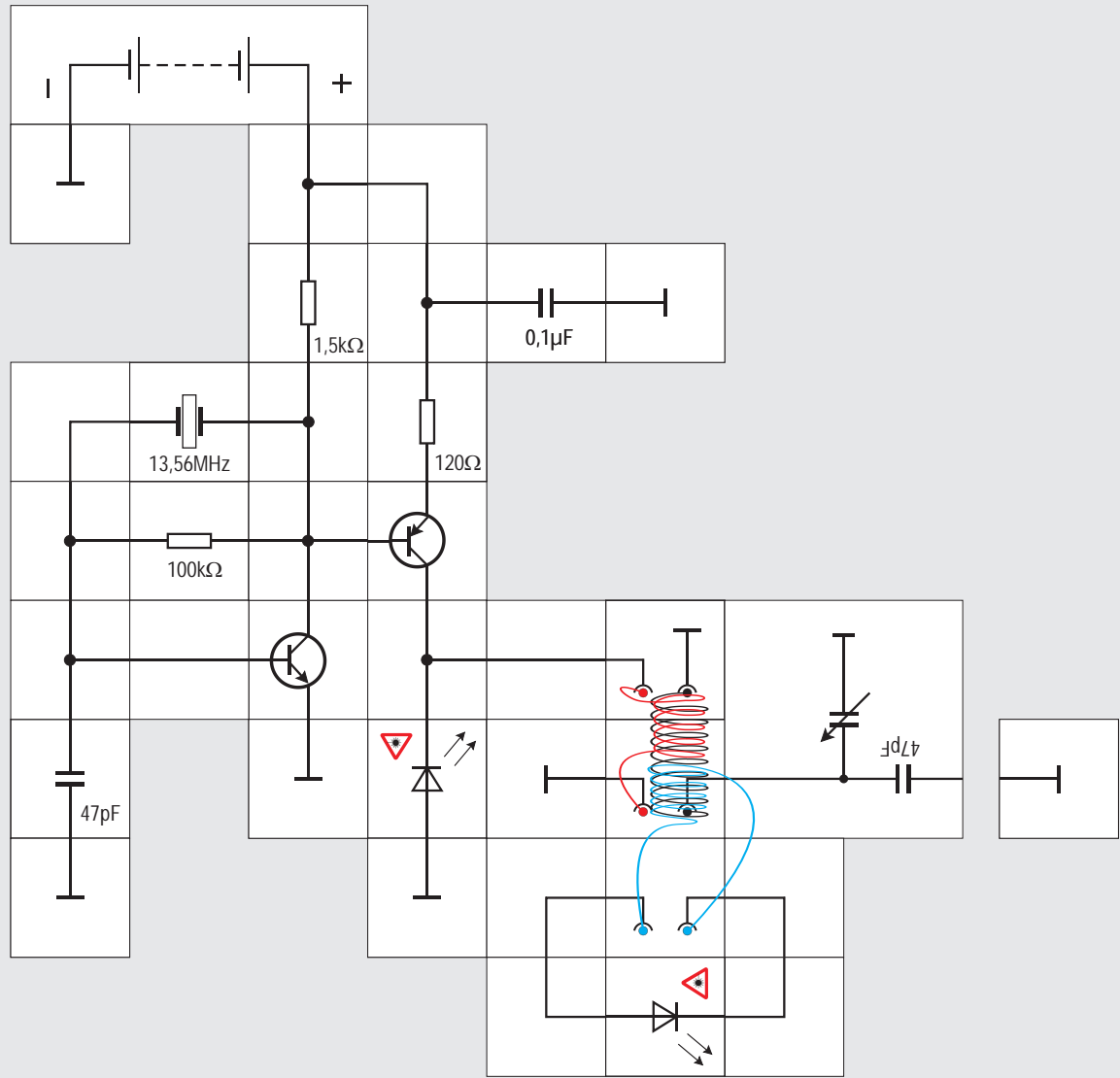
Wäre der Resonanzkreis nicht angeschlossen, könnten wir mit einer Güte von  $G = 50$  rechnen, d. h. der Resonanzwiderstand wäre  $50 \cdot 80 \Omega = 4 \text{ k}\Omega$ . Im vorliegenden Fall wird der Kreis hauptsächlich durch die LED an der Koppelspule bedämpft, wodurch wir nur noch eine Güte von circa 20 haben. Die Bandbreite unseres Schwingkreises lässt sich über die Güte ausrechnen, es ist:

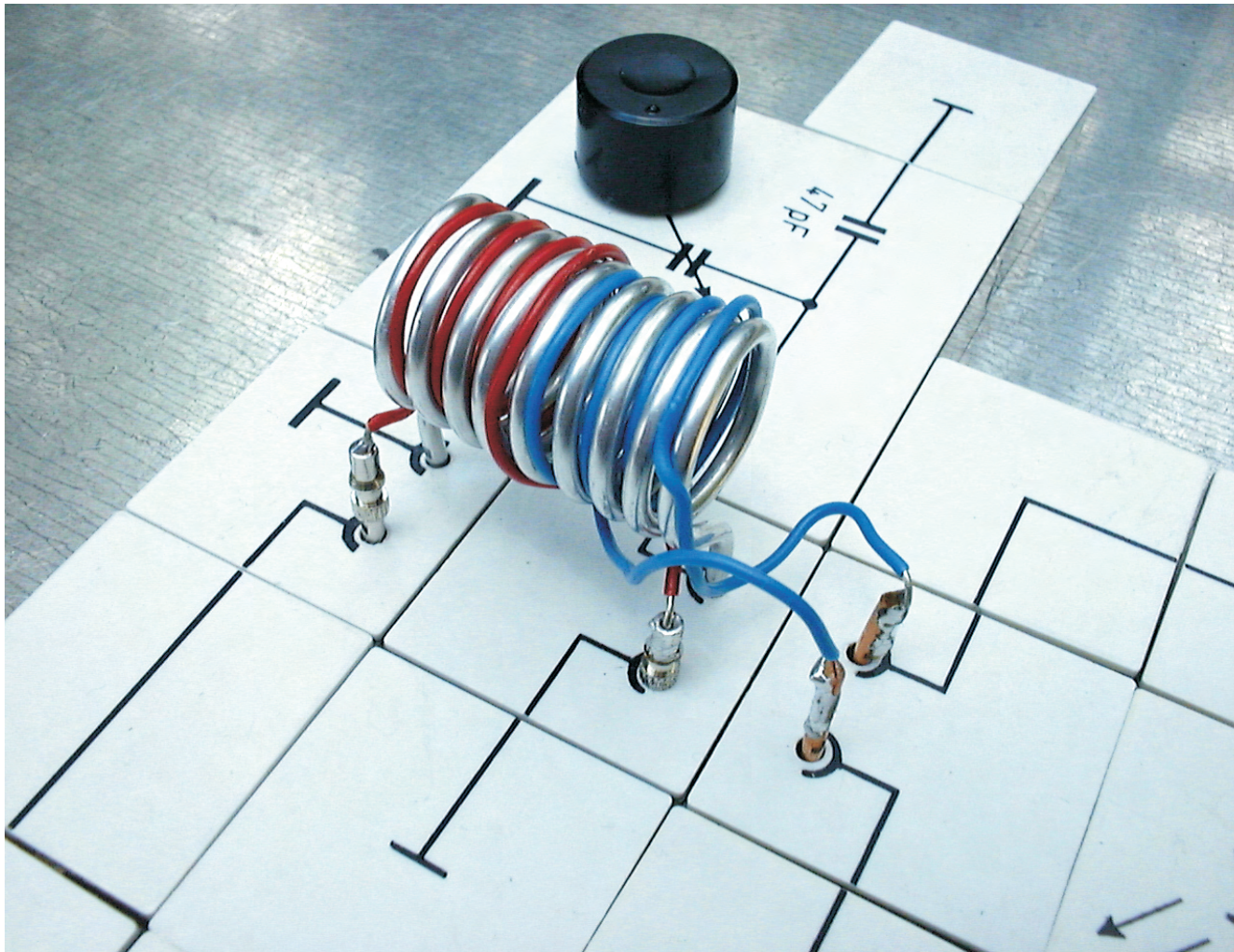
$$B = f_{\text{res}} / G$$

$$B = 13,56 \text{ MHz} / 20 = 0,7 \text{ MHz}$$

Zur Einstellung des Maximums an Helligkeit müssen wir die Resonanzfrequenz also auf 5% genau einstellen. Berühren wir mit der Hand die Spule des abgeglichenen Resonanzkreises, so wird der Kreis sowohl verstimmt als auch zusätzlich bedämpft und die LED leuchtet schwächer. Ähnliches passiert, wenn wir einen Schraubendreher aus Metall in die Spule halten.

07



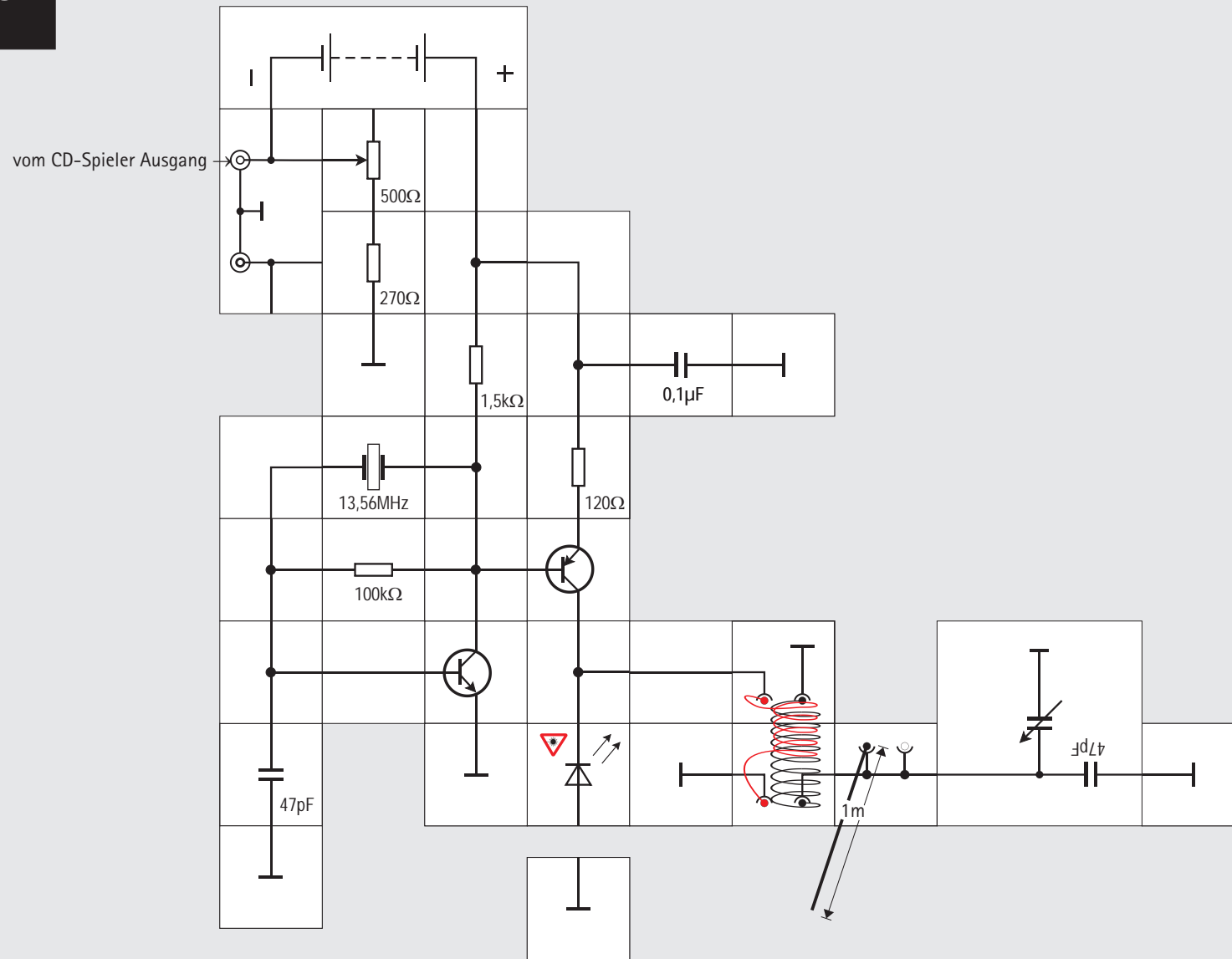


## Versuch 7

### Auskoppeln von HF - Leistung

Um zu zeigen, dass wir am »heißen Ende« des Schwingkreises, also an der Seite, die nicht an Masse angeschlossen ist, eine stark überhöhte Spannung erhalten, wollen wir eine zweite Koppelspule einsetzen. Wir entfernen also beide Spulen aus der Schaltung und wickeln mit der Mignonbatterie als Wickelkörper in bekannter Weise eine weitere Spule mit vier Windungen zwischen die Windungen unserer Schwingkreisspule (siehe Abb.). Nachdem alle sechs Enden der drei Spulen in die entsprechenden Steckbausteine gesteckt und die Bausteine ausgerichtet sind, schließen wir an die Auskoppelspule eine zweite LED an. Sie wird wahrscheinlich nicht leuchten, denn wir müssen wegen der Veränderungen des Aufbaus die Resonanz neu abgleichen. Ist das passiert, leuchten beide LEDs, wobei die Maxima sehr scharf sind. Wir können noch mehr Leistung auskoppeln, wenn wir die erste LED entfernen; eventuell muss der Kreis etwas nachgestimmt werden, denn die entfernte LED hatte auch eine kleine Kapazität, die den Abgleich beeinflusste. Eine noch größere Helligkeit erreichen wir, wenn wir den  $270\ \Omega$  Widerstand durch einen  $120\ \Omega$  ersetzen.

08





## Versuch 8

### Kurzwellen Sender

Wir wollen nun aus unserem HF - Generator einen kleinen Sender machen, der auf der Quarzfrequenz von 13,56 MHz im 21m Band sendet. Die Frequenz ist für Experimentierzwecke freigegeben, was allerdings nicht bedeutet, dass wir hier ein regelmäßiges Programm ausstrahlen dürfen. Das Betreiben eines eigenen Rundfunksenders ist nicht gestattet.

Die Experimente sollten also nur kurz durchgeführt und der Sender dann wieder außer Betrieb genommen werden.

Wir haben bereits in Versuch Nr. 02 den unmodulierten Träger mit einem Kurzwellenempfänger empfangen, aber nichts gehört, weil eben der Träger nicht moduliert war. Im KW Bereich erwartet unser Empfänger Amplitudenmodulation, die wir ganz einfach dadurch erreichen, dass wir eine passende Signalquelle in Reihe zur Versorgungsspannung anschließen. Als Quelle bietet sich der Ausgang eines CD - Spielers an, der über einen Serienwiderstand (Poti verwenden) von  $500 \Omega$  und den Cinchbuchsen - Adapter angeschlossen wird. Die Größe des Widerstandes kann variiert werden; ein Weglassen des Massebausteins ist auch möglich. Zur Vergrößerung der Sendeleistung verkleinern wir den  $270 \Omega$  Emitterwiderstand auf  $120 \Omega$ . Im Normalfall erfordert die wirksame Abstrahlung von HF - Energie eine ausreichend lange und abgestimmte Antenne; unsere Frequenz von 13,56 MHz hat eine Wellenlänge von

$$\lambda = c / f,$$

$$\lambda = (300 \cdot 10^9 \text{ m/s}) / (13,56 / \text{s})$$

$$\lambda = 22,12 \text{ m}$$

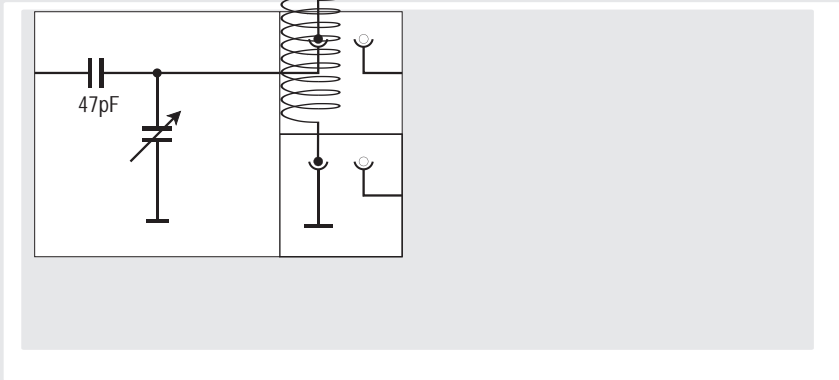
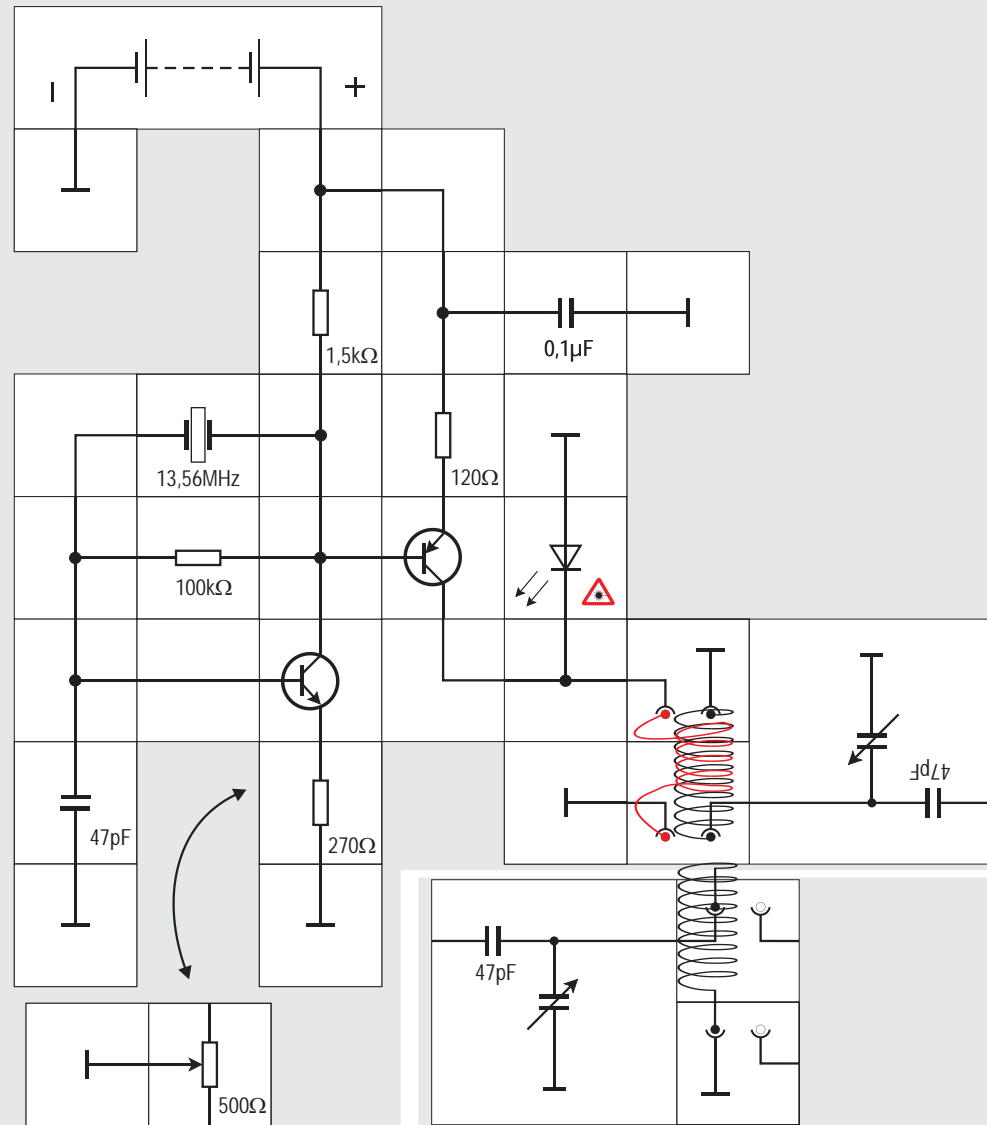
mit  $c = 300 \cdot 10^9 \text{ m/s}$  Lichtgeschwindigkeit

Ein Halbwellendipol müsste also circa 11 m lang sein. Wenn wir also am »heißen Ende« des Schwingkreises einen kurzen Antennenstab von 1 m Länge anschließen, wird nur ein kleiner Teil der HF - Leistung abgestrahlt und wir werden keinen anderen Empfänger stören. Reichweiten bis 25 m sind aber trotzdem möglich, wie wir mit unserem Kurzwellenempfänger leicht nachweisen können.

Nachdem wir die Versorgungsspannung angelegt und mit dem Drehkondensator den Schwingkreis auf maximale Helligkeit der LED abgestimmt haben, wird die LED entfernt, was die Leistung noch etwas erhöht. Im KW Empfänger werden wir unser »Programm« deutlich empfangen. Durch einen zusätzlichen Erdanschluss und einer Verlängerung unseres Antennenstabs auf 2 m (Schwingkreis mit LED neu abstimmen) sollten Reichweiten bis 50 m erzielt werden.

Bei einem Sender unterscheidet man zwischen Nahfeld und Fernfeld, wobei letzteres jenseits einer Wellenlänge der verwendeten Frequenz anfängt. Wir hatten die Wellenlänge mit rund 22 m errechnet; unser Sender ist dort noch gut zu empfangen. Er erzeugt also echte elektromagnetische Wellen, die unser Empfänger mit seiner Antenne auffängt, verstärkt und demoduliert, so dass wir das vom CD - Spieler abgegebene Nutzsignal hören können.

09







## Versuch 9

### Magnetisch gekoppelte Resonanzkreise

Nach der Untersuchung des Fernfeldes betrachten wir in weiteren Experimenten das Nahfeld unseres Senders. Zur Erhöhung seiner Ausgangsleistung ersetzen wir den  $270 \Omega$  Emitterwiderstand durch einen  $120 \Omega$  und verwenden ersteren in der Emitterleitung des npn - Transistors. Durch diese zusätzliche Gegenkopplung wird der Arbeitsbereich des Oszillator - Transistors noch günstiger und die Leuchtdiode leuchtet bei abgestimmten Schwingkreis sehr stark. Statt des  $270 \Omega$  Widerstands kann auch ein  $500 \Omega$  Potentiometer zur optimalen Arbeitspunkteinstellung eingesetzt werden.



**Achtung! Nicht direkt in den Strahl schauen, es besteht die Gefahr von Netzhautschädigungen.**

Auf einer kleinen Zusatzplatte bauen wir mit der zweiten Schwingkreisspule und dem weiteren Drehkondensator sowie den Steckbausteinen einen zweiten Schwingkreis auf. Diese Spule hat »verschwenkte« Anschlüsse, damit sie über den Steckbaustein hinaus ragt und sehr nahe an die erste Spule geschoben werden kann (siehe auch Abbildung Seite 29). Damit die Zusatzplatte keine galva-

nische Verbindung mit unserer Aufbauplatte bekommt, wird sie durch Unterlegen einer ausreichend großen Pappe isoliert.

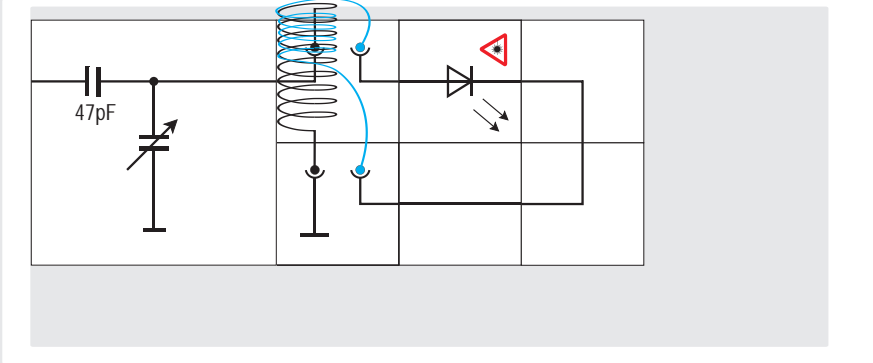
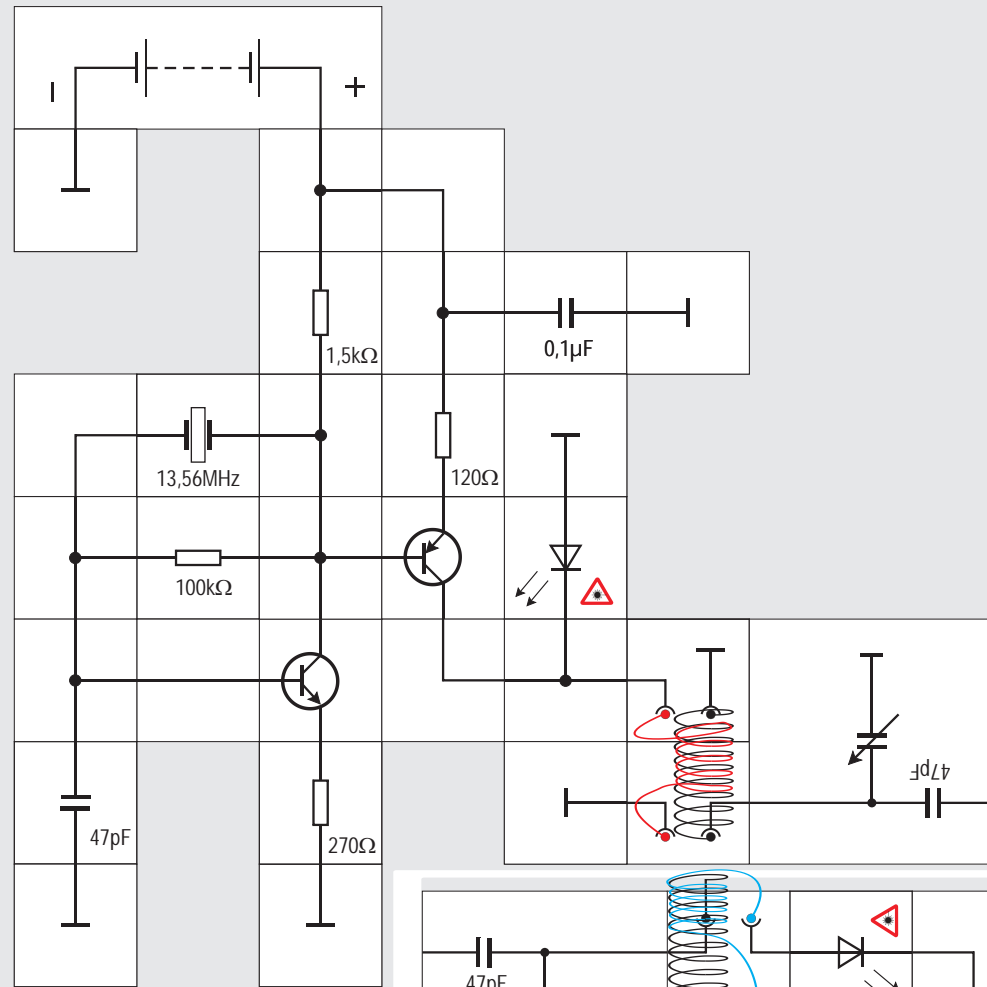
Wir stimmen zunächst den ersten Schwingkreis ab, ohne dass der zweite in der Nähe steht.; die LED muss maximale Helligkeit haben. Schieben wir anschließend die Zusatzplatte mit dem zweiten Schwingkreis so an den ersten, dass die Spulen in einer Achse liegen und drehen vorsichtig am zweiten Drehkondensator, so werden wir bemerken, dass es eine Einstellung gibt, bei die LED minimal leuchtet, wenn nicht ganz ausgeht. Der zweite Kreis ist jetzt ebenfalls in Resonanz mit unserer Arbeitsfrequenz von 13,56 MHz. Durch die Art der Anordnung sind die beiden Schwingkreise schwach gekoppelt, der Kopplungsgrad hängt stark vom Abstand ab und kann leicht durch Bewegungen der Zusatzplatte verändert werden. Die Kopplung kommt hauptsächlich durch das magnetische Feld zustande: Das im ersten Kreis erzeugte magnetische Wechselfeld wirkt sich im zweiten Kreis aus und erzeugt dort ebenfalls Schwingungen. Sind beide Kreise aufeinander abgestimmt, wird dem Sendekreis maximal Energie entzogen, was zum Erlöschen der LED führt. Die Energie wird im angekoppelten Kreis fast vollständig in Wärme umgesetzt.

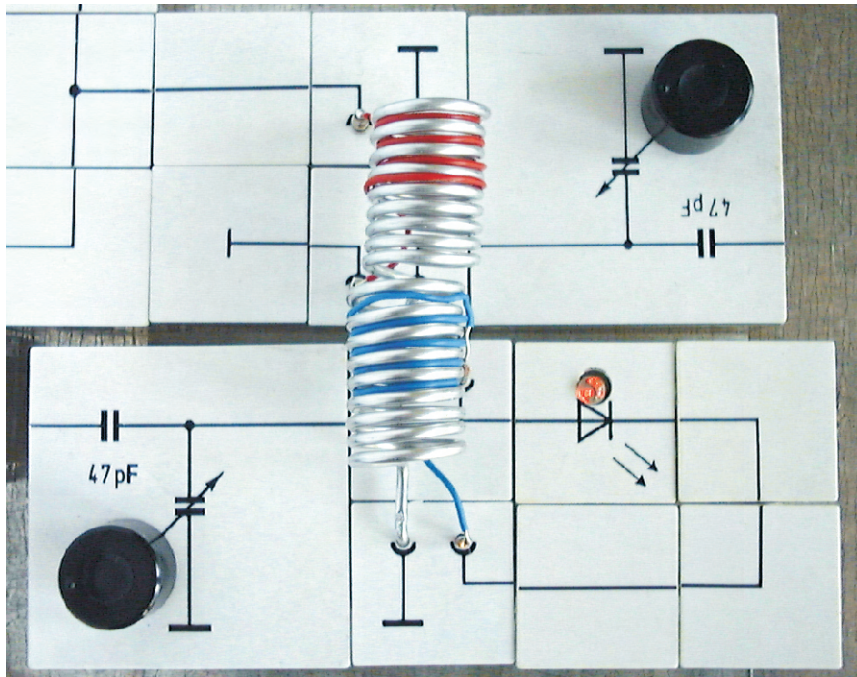
Funkamateuren ist diese Prinzip vom DIPMETER be-

kannt, das dazu dient, Resonanzfrequenzen zu messen: Ein abstimmbarer Oszillator wird dabei lose mit dem Messobjekt gekoppelt und zeigt im Resonanzfall einen maximalen Abfall (engl. dip) der Schwingkreisspannung im Sendekreis. Resonanzfrequenzen können so schnell gefunden oder eingestellt werden.

Das gleiche Prinzip wird auch bei der Eisenbahn unter dem Namen INDUSI zur Zugsicherung verwendet: Auf der Lokomotive befindet sich der 2 kHz Sender und neben den Signalen liegen die entsprechenden Schwingkreise als Gegenstücke am Gleis. Entsprechend der niedrigeren Frequenz sind die Schwingkreise mit den ungefähren Abmessungen 1m x 20cm x 30cm erheblich größer als die Spulen in unserem Versuchsaufbau. Zeigt das Signal »Rot«, ist der Schwingkreis (Gleismagnet genannt) aktiv und entzieht bei irrtümlicher Überfahrt einer Lokomotive dem Sendekreis auf der Lok Energie. Dies wird bemerkt und löst eine Zwangsbremse aus. Bei »Grün« zeigendem Signal ist der streckenseitige Schwingkreis kurzgeschlossen und es passiert nichts bei der Vorbeifahrt. Wir können das durch Kurzschließen der Schwingkreisspule auf der Zusatzplatte simulieren und werden bemerken, dass die LED dann wieder hell aufleuchtet.

10





## Versuch 10

### Nachweis der Energieübertragung

Dass tatsächlich die Energie in den angekoppelten Schwingkreis übertragen wird, lässt sich leicht zeigen, wenn wir diesen auch mit einer Koppelspule (4

Windungen) versehen, an die wir die zweite LED anschließen. Ist der Kreis in Resonanz, wird die LED ein Helligkeitsmaximum zeigen, die LED des Sendekreises dagegen ein Minimum. Bei passendem Koppelabstand der beiden Schwingkreise ist die Sendeleuchte erloschen und die Empfangs-LED hat maximale Helligkeit.

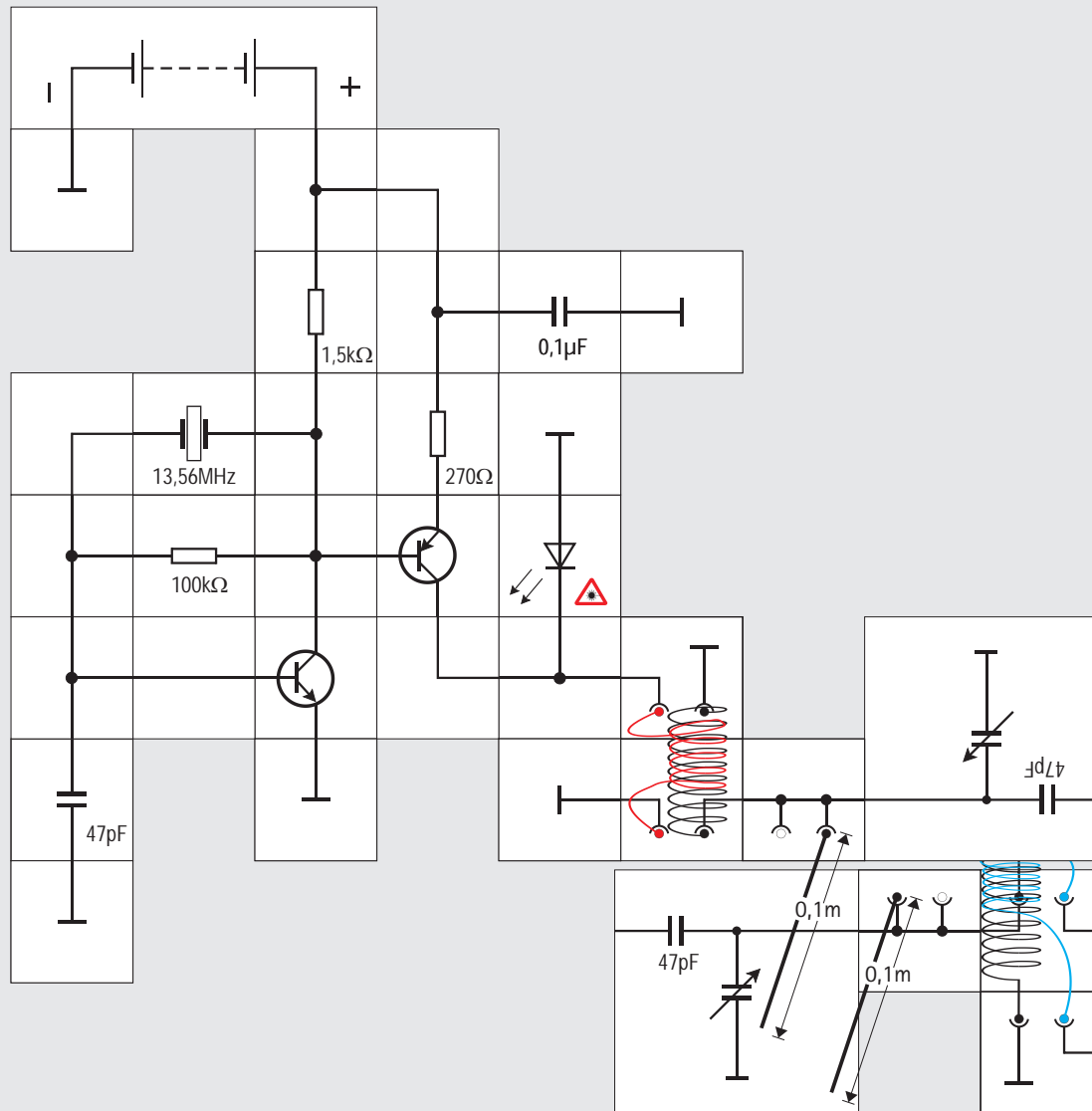


Spule mit verschwenkten Anschlüssen (zu Versuch 9)

Dieses Prinzip hatte bereits Nikola Tesla erkannt, der Schwingkreise gleicher Resonanzfrequenz schwach koppelte und damit eine Energieübertragung bewerkstelligte. In spektakulären Versuchen erzeugte er im Sendekreis extrem hohe Resonanzspannungen und konnte dann große Energiemengen über relativ weite Distanzen übertragen. Nicht ganz so spektakulär geht es bei den heutigen weitverbreiteten Anwendungen zu, die sich dieses Prinzips ebenfalls bedienen. In Weiterentwicklung der bereits erwähnten INDUSI gibt es Übertragungseinrichtungen am Gleis ohne kostspielige Energieversorgung, die bei der Vorbeifahrt einer Lokomotive auf diese Weise von einem auf ihr befindlichen Sender erst Energie erhalten; sie wird dazu verwendet, eine Schaltung zu aktivieren, die Augenblicke später Informationen zum Lokgerät zurück sendet.

Auch die im Handel weit verbreiteten RFID - Systeme (Radio Frequency Identification) arbeiten nach diesem Prinzip: Eine Sendespule erzeugt ein elektromagnetisches Feld mit 13,56 MHz und überträgt damit Energie zum Empfänger (Transponder genannt), der sich an der Ware befindet. Ein Chip im Transponder kann mit dieser Energie Informationen zum Sender zurück senden, der durch den vorangegangenen Energieentzug bemerkt hat, dass er auf Empfang gehen muss.

11





## Versuch 11

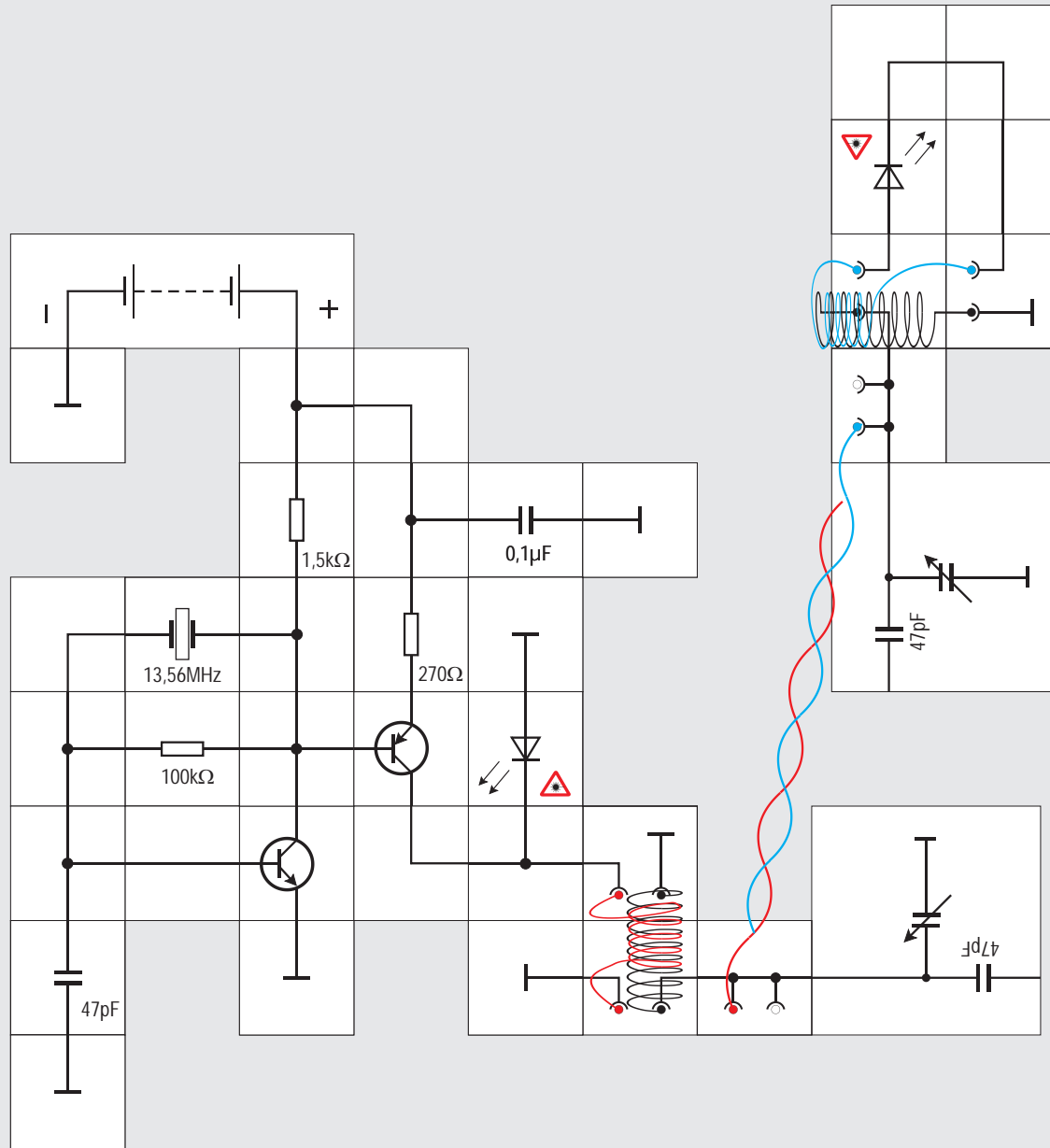
### Elektrisch gekoppelte Resonanzkreise

Neben der Kopplung über das magnetische (Nah-) Feld können wir die beiden Schwingkreise auch über das elektrische Feld koppeln: Wir sorgen dafür, dass die beiden Spulen nicht mehr in einer Achse liegen und einen größeren Abstand als 6 cm voneinander haben; dann ist die magnetische Kopplung vernachlässigbar klein. Auch soll jetzt der zweite Kreis nicht mehr isoliert gegenüber der Aufbauplatte sein, sondern sich ebenfalls auf ihr befinden; beide Kreise haben also eine gemeinsame Masse. Zu-

sätzlich erhalten beide etwa 10 cm lange »Antennen«, die wir mit Hilfe von zwei Messbausteinen jeweils am »heißen« Ende der Schwingkreise anschließen.

In gewohnter Weise wird der erste Kreis auf maximale Helligkeit der LED mit dem Drehkondensator abgestimmt. Den zweiten Kreis stimmen wir zunächst ohne die LED auf Resonanz ab, indem wir den Drehkondensator vorsichtig verändern. Stehen beide Antennen relativ nah (2 - 3 cm) beieinander, können wir den bereits bekannten Resonanzdip beobachten. Es wird also wieder Energie vom Sender zum Empfängskreis übertragen und die Vermutung liegt nahe, dass diese Übertragung über die 10 cm langen Sende- und Empfangsantennen stattfindet. Das kann bei weiterem Nachdenken nun aber nicht sein, denn für eine einigermaßen wirkungsvolle Abstrahlung sind die »Antennen« bei unserer Frequenz eigentlich nur kurze Stummel. Wir hatten bereits bei einem früheren Experiment ausgerechnet, dass  $\lambda/2$  gleich 11 m ist. Tatsächlich bilden beide Drähte lediglich einen Kondensator kleiner Kapazität, dessen elektrisches Feld die Kopplung bewirkt. Obwohl wir einen Resonanzdip beobachten konnten, reicht die dem Sendekreis entzogene Energie nicht aus, die LED zum Leuchten zu bringen, wenn wir sie anschließend wieder in die Schaltung setzen.

12



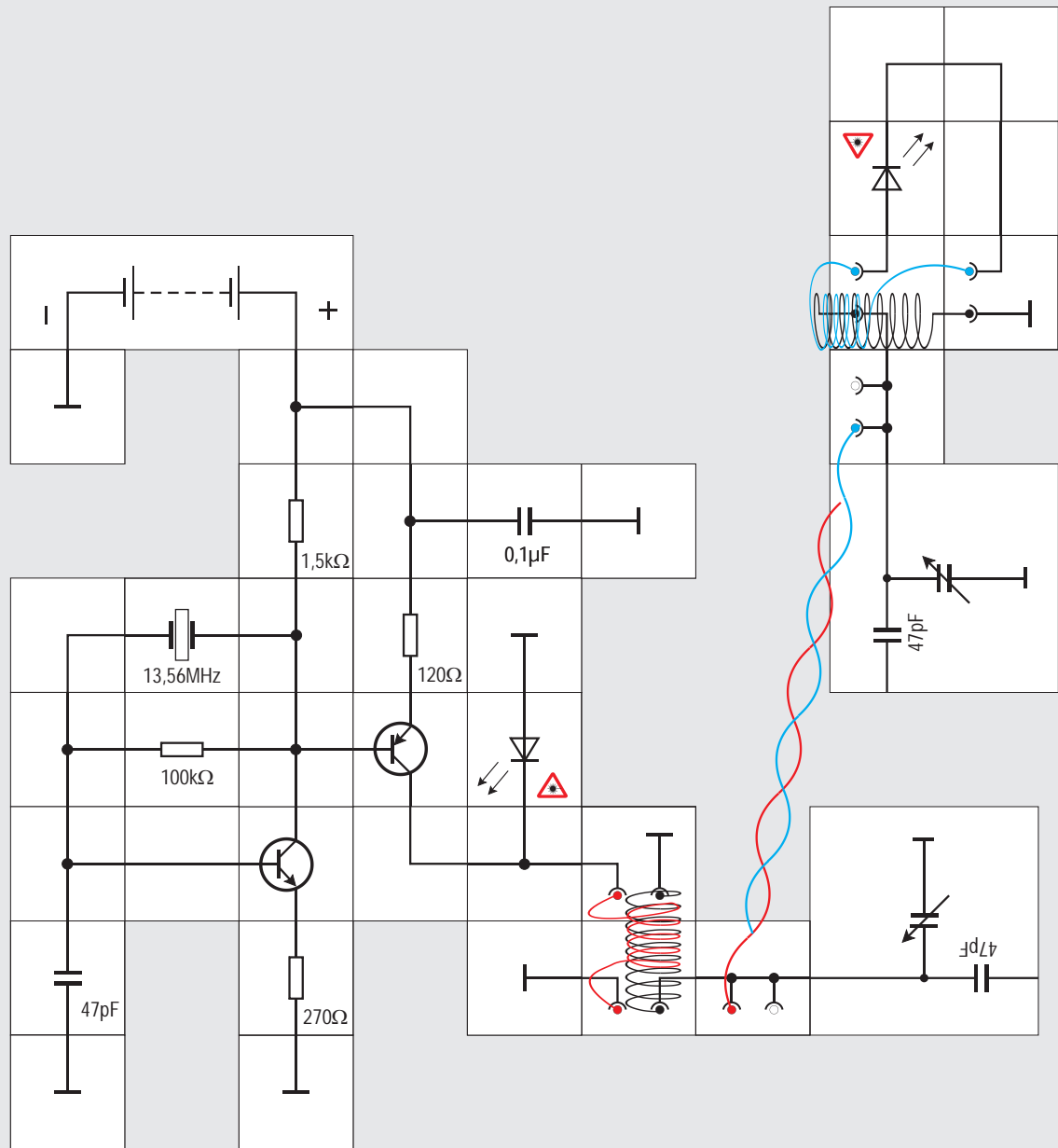


## Versuch 12

### Kapazitive Kopplung

Unsere Vermutung, dass es sich im letzten Versuch um eine kapazitive Kopplung handelt, können wir erhärten, wenn wir statt der »Antennen« zwei isolierte Drähte, die auf einer Länge von 10 cm miteinander verdrillt sind, in die Messbausteine stecken. Der Resonanzdip ist dann auch noch besser als im letzten Versuch ausgeprägt. Schließen wir versuchsweise die LED im Empfangskreis wieder an, wird sie wahrscheinlich nicht leuchten. Die übertragene Energie ist noch zu klein.

13





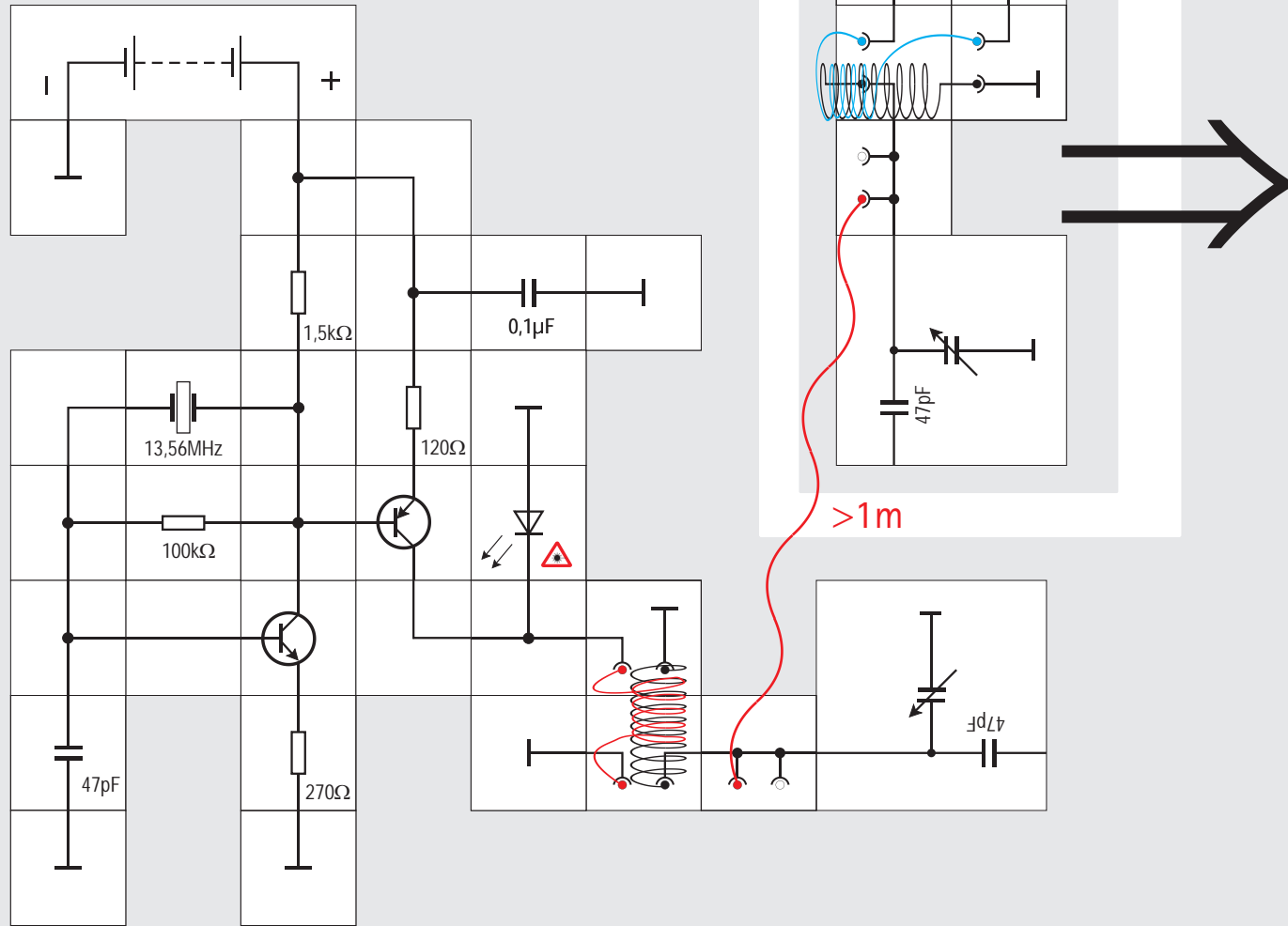


## Versuch 13

### Kapazitive Kopplung bei erhöhter Sendeleistung

Damit wir die LED im Empfangskreis wieder zum Leuchten bringen, wenn die Kreise in Resonanz sind, erhöhen wir die Sendeleistung durch die bereits bekannten Änderungen am Sender: Emitterwiderstand von  $270\ \Omega$  auf  $120\ \Omega$  verkleinern und eine Gegenkopplung bei der Oszillatorstufe einbauen. Ist der Empfängerkreis auf Resonanz abgestimmt, wird die LED leuchten, während gleichzeitig die Sender-LED das durch den Dip verursachte Helligkeitsminimum zeigt.

14





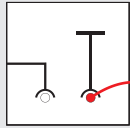
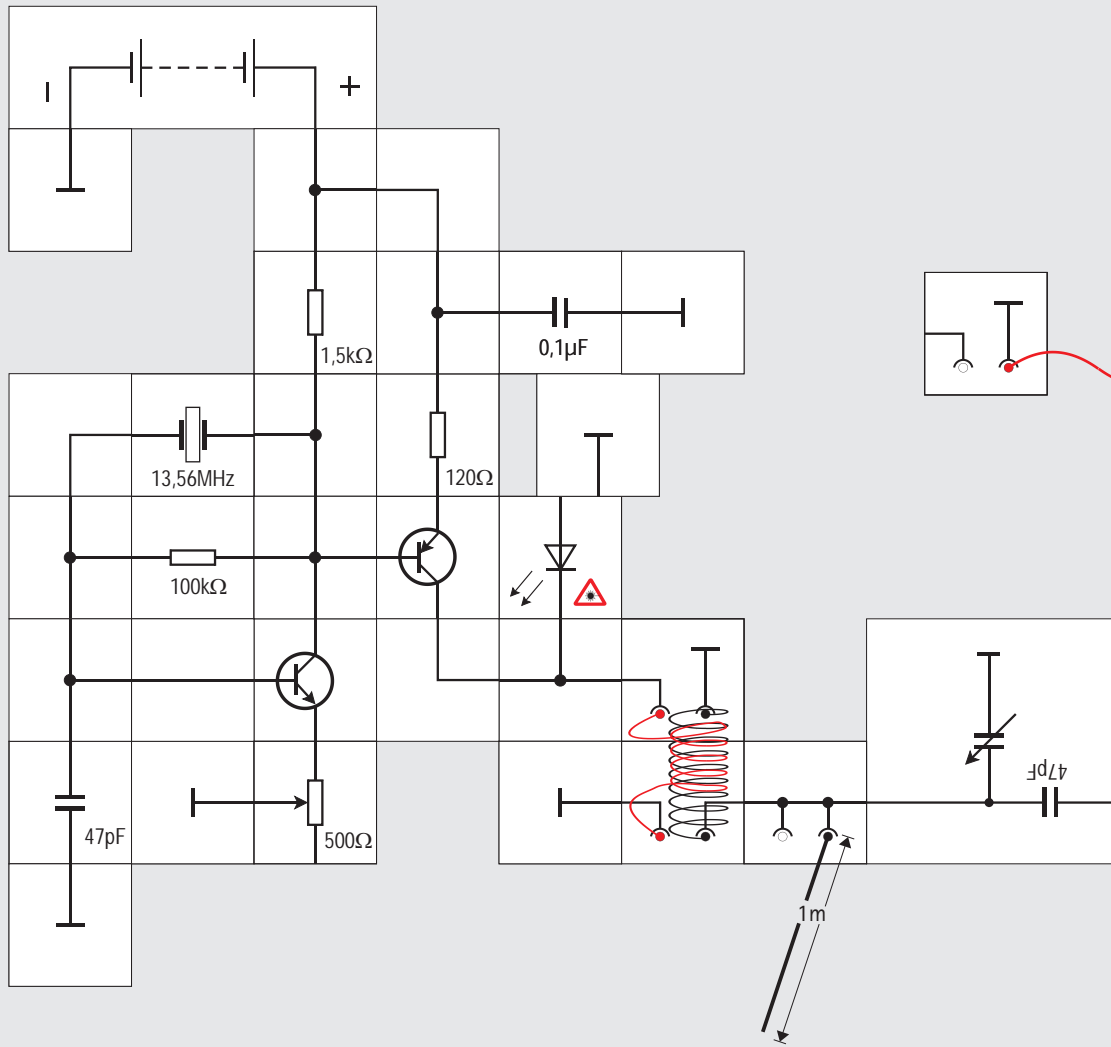
## Versuch 14

### Eindraht – Energieübertragung

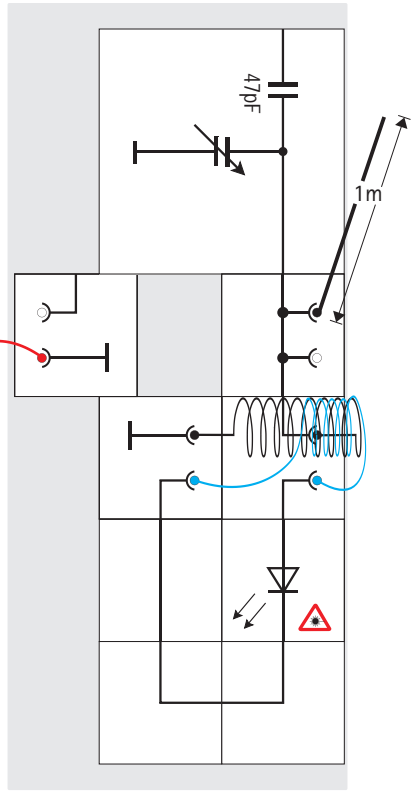
Wir bauen jetzt den Empfänger wieder auf der Zusatzplatte auf und isolieren sie gegenüber unserer großen Aufbauplatte mit einem Stück Pappe. Verbinden wir dann Sende- und Empfangskreis über die Buchsen der Messbausteine mit einem Draht statt mit den verdrehten Drähten, so können wir bei abgestimmten Resonanzkreisen die LED im Empfänger zum hellen Leuchten bringen, während die Sende-LED ein Helligkeitsminimum zeigt. Die Energieübertragung findet scheinbar nur mit einem Draht ohne Rückleitung statt.

Tatsächlich haben beide Schaltungsteile, Sender wie Empfänger, gegenüber der Erde eine gewisse Kapazität von einigen Picofarad, über die bei abgestimmten Kreisen die Rückführung stattfindet. Da die Kapazität gegenüber Erde entscheidend ist, können wir bei verlängertem Verbindungsdraht auf 1 m und mehr die Zusatzplatte von unserer Aufbauplatte nehmen und in einiger Entfernung neben sie auf den Tisch oder Fußboden stellen. Die Effektivität der Energieübertragung wird sich durch diese Maßnahme kaum ändern.

15



>1m



## Versuch 15

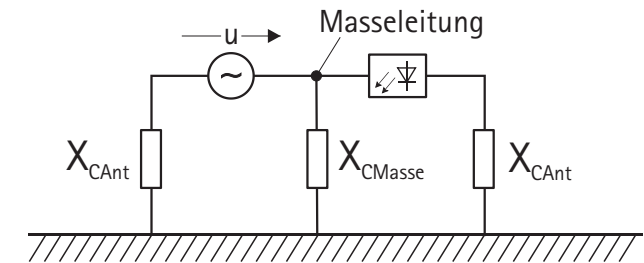
### Energieübertragung über Masseleitung

Zum Abschluss unserer Experimente wollen wir Energie über die Masseleitung übertragen. Es ist eine Abwandlung des vorherigen Versuchs, indem wir die kalten Enden der beiden Schwingkreise galvanisch miteinander verbinden und den Kreis kapazitiv über 1m lange Antennenstäbe an den heißen Enden schließen. Der Kopplungsgrad ist trotz der langen Stäbe geringer als mit der Verbindungsleitung zwischen den heißen Enden der Schwingkreise wie im vorherigen Experiment. Wir müssen also mit möglichst großer Sendeleistung arbeiten, wozu gehört, dass wir mit dem  $500\ \Omega$  Potentiometer den optimalen Arbeitspunkt des Oszillators einstellen und danach auch die LED im Sender entfernen, damit viel Energie zur Verfügung steht. Wenn möglich, kann auch mit der doppelten Versorgungsspannung gearbeitet werden. Natürlich müssen beide Kreise genau auf Resonanz abgestimmt sein.

Wir legen zunächst die auf der Zusatzplatte aufgebaute Empfängerschaltung direkt auf die Aufbauplatte, können sie dann aber auch daneben legen und über ein 1m langes Kabel (Masseleitung) verbinden. Die Empfangs-LED wird kaum einen Unterschied in der Helligkeit zeigen.

Die Versuchsanordnung entspricht derjenigen des Experiments 11, nur dass jetzt längere Antennen verwendet wurden. Wegen des großen Abstands zwischen den Antennenstäben ist die Kapazität allerdings ohnehin sehr klein und die Energie wird auch gar nicht über diese Kapazität übertragen, sondern über die jeweiligen Kapazitäten der Stäbe  $C_{Ant}$  gegen Erde: Die nicht geerdete Masseleitung hat gegenüber Erde eine Spannung und die Kapazität  $C_{Masse}$ . Die Antenne koppelt über ihre Kapazität gegenüber Erde Energie in den Kreis. Die Stäbe haben schätzungsweise jeweils  $5\ \text{pF} = C_{Ant}$ , der Schaltungsaufbau mit Masseleitung circa  $20\ \text{pF} = C_{Masse}$  Koppelkapazität gegen Erde. Leider wirkt die größere Kapazität einer Energieübertragung entgegen, weil sich ein kapazitiver Spannungsteiler bildet, der nur den kleineren Teil der Sender - Schwingkreisspannung an die Masseleitung legt.

Wir können die Verhältnisse durch Anbringen von Alufolien (ca.  $15 \times 15\ \text{cm}^2$ ) an den Antennenstäben verbessern; die Antennenkapazitäten  $C_{Ant}$  gegen Erde werden dadurch erhöht. Eine weitere Kapazitätserhöhung ist möglich, wenn wir jeweils eine Hand flach in die Nähe einer Folie bringen. Die LED wird dann heller leuchten. Dagegen wird sie dunkler, wenn wir die Aufbauplatte berühren und erlischt



ganz bei Erdung der Aufbauplatte. Es muss also unbedingt eine Signalspannung gegenüber der Erde auf der Masseleitung vorhanden sein, sonst funktioniert die Energieübertragung nicht. Das vereinfachte Ersatzschaltbild der Anordnung mit  $X_C = 1/2\pi fC$  zeigt, wo das Problem liegt: Wir können den relativ kleinen Scheinwiderstand  $X_{CMasse}$  kaum beeinflussen, sondern nur versuchen,  $X_{CAnt}$  kleiner zu machen, indem wir  $C_{Ant}$  vergrößern. Eine weitere, allerdings ein wenig schwierig durchzuführende Steigerung ist noch möglich, wenn die Koppelpulen etwas aus den Schwingkreisen gezogen werden. Durch diese knifflige Maßnahme ist die Kopplung schwächer, wodurch Kreisgüte, damit die Höhe der HF - Spannung und weiter auch die Effizienz der Energieübertragung steigen. Die optimale Kopplung muss durch vorsichtiges Hantieren ermittelt werden.

# Notizen