

Das Aladdin-Projekt (LEDs ohne Stromversorgung)

Von Nothart Rohde / 2002 - 2009

Vorwort



Die anstehende gründliche Renovierung des Hauses, eine neue Gartenanlage mit Wintergarten, die ersten verfügbaren weißen Leuchtdioden im Watt-Bereich, ein Ziergarten-Freak und notorischer Bastler mit naturwissenschaftlichem Hintergrund. Was wird das in der Summe wohl geben ?

Stichwort Aladdin-Projekt, die Wunderlampe. Aber lesen Sie selbst.

-1-

Inhalt

Kapitel 1	Grundlagen	2
Kapitel 2	Die verschiedenen Generatoren	15
Kapitel 3	Beleuchtung für den Garten	23
Kapitel 4	Leuchtende Objekte auf einer Fläche	30
Kapitel 5	Leuchtende Objekte im Raum	40
Kapitel 6	Energieverteilung über lange Leitungen	48
Kapitel 7	Messtechnik und allgemeinere Zusammenhänge	51
Kapitel 8	Mikroprozessoren und Fernsteuerung	56

Kapitel 1 / Grundlagen

Seit Herr Nakamura in Japan vor einigen Jahren das Falsche geforscht hat und von seinen Vorgesetzten dafür auch heftig gerügt wurde, ist die Welt der Beleuchtung nicht mehr so, wie sie vorher war (Wochenzeitung "Die Zeit" vom 22.4.2004). Mit dem neuen Material Galliumnitrid (GaN) waren blaue Leuchtdioden (LED) mit erstaunlichem Wirkungsgrad möglich. Damit war zunächst die Farbpalette komplett und mit der Kombination aus einem zusätzlichen Farbstoff, der ein Teil des blauen Lichtes in Gelb verwandelt, die weiße LED endlich realisiert, Grundlage für eine allgemeine Nutzung in der Beleuchtungstechnik.

LEDs wandeln heute locker 20 % der eingesetzten elektrischen Energie in reines Licht um, meist in einem farblich eng begrenzten Bereich. Bei Glühlampen sind es nur 2 %. In Richtung des Lichtes ist dabei keine infrarote Wärmestrahlung festzustellen, auch wenn sich das Licht einer Leistungs-LED warm anfühlt. Das ist ausschließlich die Absorption des sichtbaren Lichtes, wie sich leicht beweisen lässt, wenn man ein Wärmeschutzglas dazwischenschiebt. Diese Gläser zum Schutz der Dias kann man aus jedem klassischen Projektor ausbauen.

Die restlichen 80 % der Energie treten allerdings in der Diode auf und müssen abgeführt werden. Leider ist das Halbleitermaterial, im Vergleich zu einer Glühlampe, lange nicht so temperaturfest und damit der gesamte Aufbau, etwa für die üblichen 60 W in einer Tischlampe, einfach zu groß, um dort gut hineinzupassen. Aber die Dinge sind im Fluss.

Man gewinnt den Eindruck, dass LEDs inzwischen nur das besser können, was die Glühlampen und die Leuchtstofflampen vorgeben. Es gibt aber auch Dinge im Bereich der Beleuchtung, die nur die LED kann, und davon handelt dieses Buch. Eine LED benötigen für den Betrieb, im Vergleich zu allen anderen Lichtquellen, keine Mindestleistung. Sie strahlt sozusagen die Lichtquanten gerne auch einzeln ab, wenn wenig Strom fließt.

Bei entsprechendem Wirkungsgrad gibt es damit Anwendungen, in denen die notwendige Energie vollkommen kontaktlos zur LED übertragen werden kann. In einem ersten Schritt vielleicht für eine korrosionsfreie Beleuchtung im Freien oder unter Wasser und in einem späteren Schritt vielleicht für beleuchtete Bauklötze oder für eine elektrische Weihnachtskerze, die weder Batterien noch Kabel benötigt. Für die ersten, prinzipiellen Experimente benötigt man wenig. Das sind neben dem Lötkolben und einigen Kleinteilen ein vorübergehend zweckentfremdeter, kleiner Audioverstärker (Mono genügt) und ein einfacher Signalgenerator, der Sinusfrequenzen im Bereich von einigen 10 kHz erzeugen kann. Wer ein solches Gerät, Grundausstattung eines Elektroniklabors, nicht hat, kann es anhand der folgenden Vorschläge leicht selbst bauen.

Bliebe die Frage, welche Arten von LEDs verwendet werden können. Das ist ein offensichtliches Problem. Üblicherweise gibt man in der Elektronik die Typenbezeichnung und den Hersteller an. Leider wechseln bei LEDs diese Daten fast monatlich, und das schon immer. Auch die Helligkeitsangaben sind wenig hilfreich, da der Öffnungswinkel des Lichtkegels mit eingeht und zudem die Händler häufig nicht in der Lage sind, die fotometrischen Messgrößen korrekt anzugeben oder sie auch nicht kennen, wenn sie Sonderposten in die Tüten füllen. Denn sehr hell oder superhell oder ultrahell sind vollkommen sinnfreie Bezeichnungen.

Zu empfehlen ist die Auswahl nach Art des Grundmaterials. Das ist bei Weiß, Blau und, ganz wichtig, bei Grün das Material GaN. Es sollen möglichst aktuelle Typen sein, auch wenn sie etwas teurer sind. Aktuelle Standardtypen liefern ein brauchbares Rot, das Bernsteinengelb ("amber") ist dagegen bei allen Herstellern im Wirkungsgrad merklich schlechter. Die Bauform spielt dabei weniger eine Rolle und hängt weitgehend von der geplanten Anwendung ab. Das Gehäuse sollte glasklar sein.

Nach einem vorsichtigen Probekauf folgt der Test. Dabei gilt die Forderung, dass beim Blick direkt auf die LED im abgedunkelten Raum deutlich Licht und Farbe erkennbar sein muss, wenn ein Strom von knapp $10\text{ }\mu\text{A}$ fließt. Dazu verbindet man die LED über einen Widerstand von $1\text{ M}\Omega$ mit einer 9 V Blockbatterie (**Bild 1.1**). Mit etwas geringerem Vorwiderstand kann man auch 2 LED in Reihe schalten und sie vergleichen, etwa zum Sortieren. Im Fall von Bernsteinengelb sollte man gnädiger sein und den Strom höher wählen, vielleicht das Doppelte durch einen halbierten Widerstandswert. Das gilt auch für weiße Leistungs-LEDs, bei denen die dicke Leuchtstoffschicht die Sicht verdunkelt. Will man den Strom genau ausrechnen, muss man den Spannungsabfall am untersuchten Bauteil abziehen, für Weiss, Blau und Grün etwa $2,5\text{ Volt}$, für Bernstein und Rot $1,5\text{ Volt}$. Diese Spannungen sind um ein knappes Volt geringer als die Nennspannung, da der Strom so niedrig ist. Bitte bei diesem Test die Drähte nicht mit den Fingern halten, der Hautwiderstand verfälscht garantiert die hochohmige Messung. Auch das billige Multimeter mit seinem Eingangswiderstand von $1\text{ M}\Omega$ ist hier zur Spannungsmessung nur bedingt geeignet.

Sieht man bei diesem Test nichts, sollte man die Polarität der Diode überprüfen. Bei bedrahteten Ausführungen ist der Anschluss des Pluspols meist länger, aber leider nicht immer. Ist dieser Punkt geklärt, hat man unpassende Ware gekauft oder ist schlecht beraten worden. Die LEDs sind dann sicher noch für andere Zwecke sehr gut geeignet, aber weniger für die Experimente mit drahtloser Energieübertragung.

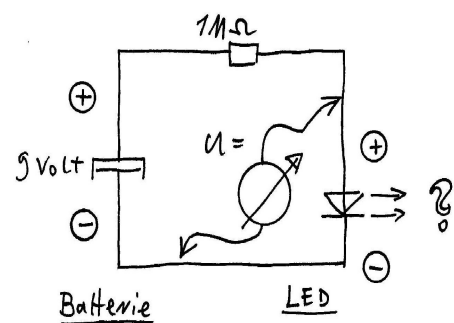


Bild 1.1

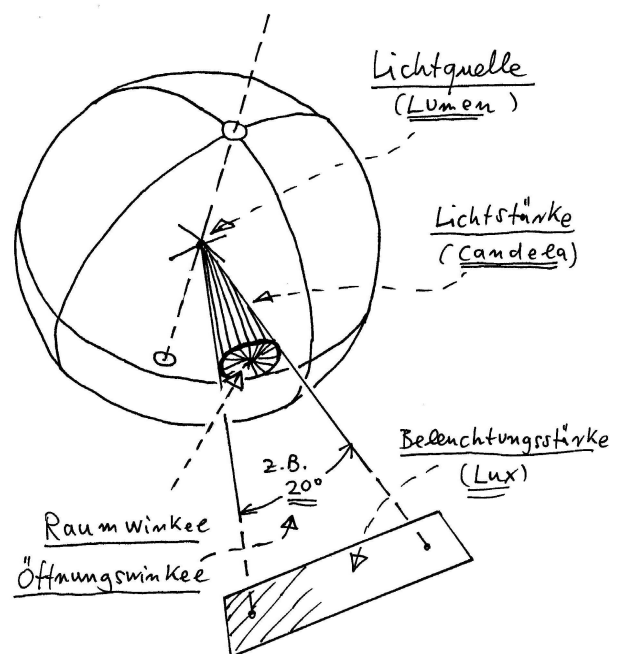
Zu beachten ist unbedingt, dass viele aktuelle LEDs (weiss, blau, grün) elektrostatisch extrem empfindlich sind und nur die wenigsten eine eingebaute Schutzdiode haben. In Sperrrichtung darf nicht viel mehr als 5 Volt anliegen. Der genannte Test sollte also eher mit 5 Volt bei 330 kOhm durchgeführt werden. Dann muss aber das Netzteil, der Lötcolben und der Experimentator gut geerdet sein. Die vorgeschlagene, lose 9-Volt-Batterie ist in diesem Punkt weniger kritisch. Bei den Lieferanten hat sich das Problem noch nicht herumgesprochen und bedrahtet LEDs werden hemmungslos in isolierende Tüten gefüllt. Das ist ähnlich wie bei der Einführung der ersten MOS-FETs (BS 170 / BS 250), die zu 50 Prozent defekt vom Großhändler kamen.

Will man Leuchtdioden nach Datenblatt oder Katalogangaben kaufen, ist eine gewisse Kenntnis der fotometrischen Größen hilfreich. Allgemein wird hier elektrisch / physikalisch eine Leistung gemessen, also Energie pro Zeit. Besonderheit ist dabei, dass nicht alle Farben gleich bewertet werden, sondern nach dem menschlichen Sehvermögen, das bei Grün am besten ist. Schon beim üblichen Blau ist die Sehfähigkeit gegenüber Grün auf unter 20 % abgesunken. Ähnliches gilt für Rot. Alle Messungen, etwa durch Absorption des Lichtes und Messung der damit erzeugten Erwärmung, müssen also entsprechende Farbfilter verwenden. Die wichtigste Komplikation bei diesen Messgrößen ist aber, dass klar zu trennen ist zwischen dem, was **a)** eine Lichtquelle insgesamt abstrahlt, was sie **b)** in eine gewisse Richtung abstrahlt und was **c)** dann nach einer gewissen Entfernung irgendwo auftrifft. Da braucht es geometrische Grundkenntnisse und die Dinge gehen leicht durcheinander, siehe folgendes **Bild 1.2**.

Eine Lichtquelle erzeugt Lichtleistung, die in Lumen gemessen wird. Aus der Ferne betrachtet verteilt sich dieses Licht möglicherweise in verschiedenen Richtungen unterschiedlich. Zur Beschreibung dieser Situation bezieht man den abgestrahlten Lumenwert auf den dazu gehörenden Raumwinkel und nennt diesen Quotienten Candela.

Der Raumwinkel ist allgemein definiert als ein Flächenverhältnis. Das ist hier die vom Strahl beleuchtete Fläche auf einer gedachten Kugel, bezogen auf die Gesamtfläche dieser Kugel. Der Raumwinkel ist demnach ein Zahlenwert, der zwischen 0 und 4π (= Vollkugel) liegen kann, das ergibt sich aus der bekannten Formel für die Kugeloberfläche: $F = 4 \times \pi \times r^2$.

Irgendwo trifft das Licht eine Fläche. Dort definiert man eine Beleuchtungsstärke, die in Lux gemessen wird. Der Luxwert nimmt mit der Entfernung ab, weil sich der Strahl immer mehr aufweitet.



In Zusammenfassung : Grundgröße ist der "**Lichtstrom**", gemessen in **Lumen (lm)**, physikalisch gesehen eine **Leistung** in der Größenordnung von **mWatt** und, wie erwähnt, **farblich gewichtet**. Referenz war ursprünglich eine unter normierten Bedingungen brennende Flamme. Diese Größe Lumen (lm) wird seit einiger Zeit für Leistungs-LEDs verwendet und beschreibt hier die insgesamt erzeugte Lichtleistung, was sehr gut einen Vergleich zulässt und auch vernünftig ist, da mit wenig Optik das Licht zunächst nach allen Seiten abgestrahlt wird.

Verteilt sich ein Lichtstrom von 1 Lumen gleichmäßig auf 1 m², ergibt sich dort eine "**Beleuchtungsstärke**" von 1 **Lux (Lx)**. Lux ist also ein Maß für einfallendes Licht und man errechnet leicht, dass der Luxwert mit dem Quadrat des Abstandes abnimmt. Man denke sich dazu eine Kugeloberfläche, auf die das erzeugte Licht verteilt wird. Da diese Fläche proportional zum Quadrat des Radius ist (siehe Schulbuch), ergibt sich mit doppeltem Radius die vierfache Fläche, auf die das Licht sich jetzt verteilt. Luxwerte zur Bewertung von punktförmigen Lichtquellen sind also Unfug, sofern nicht der Abstand genannt wird.

Bei Leuchtdioden mit Linse wird gerne als Maßangabe die "**Lichtstärke**" genannt, gemessen in **Candela (cd)**, oder auch **Millicandela (mcd)**. Hier wird es kompliziert, denn Candela bedeutet Lumen / Raumwinkel. Der gleiche Kristall liefert damit geringere Candela-Werte, wenn der Strahl breiter ist. Da es sich um den Raumwinkel handelt, gilt wie bei Lux ein quadratisches Gesetz. Hier entspricht ein doppelter Öffnungswinkel dem vierfachen Raumwinkel und einem Viertel des Candela-Wertes.

Erschwerend kommt hinzu, dass im Strahl das Licht nicht gleichmäßig verteilt ist. Bei so viel Unsicherheit ist es kaum möglich, die Effizienz der LEDs von unterschiedlichen Herstellern zu vergleichen, wenn die Winkelwerte anders sind. Formal lässt es sich rechnen, denn die Zuordnung Candela - Lumen ist eindeutig und nur vom Winkel abhängig, wenn die Lichtverteilung im Lichtkegel denn gleichmäßig wäre. Für die Abschätzung reicht eine Tabelle.

Tabelle zur Umrechnung von Candela nach Lumen :

Öffnungswinkel	mcd	lm
10°	1000	0,024
15°	1000	0,054
20°	1000	0,095
30°	1000	0,214
50°	1000	0,589
120°	1000	3,142
Halbkugel	1000	6,283
Vollkugel	1000	12,57

Man beachte den Kehrwert : Bei kleinem Öffnungswinkel hell zu sein ist keine Kunst und die damit verbundene, echte Lichtproduktion ist eher mäßig. Ein interessanter Kennwert wäre zum Beispiel 1700 mcd bei 50° und 20 mA Strom, entsprechend einer Lichtausbeute von 0,5 Lumen pro 10 mA.

Man findet auch Candela-Werte ohne Angabe des Winkels. Das ist genauso nichtssagend wie eine Luxangabe, bei der der Abstand zur Lichtquelle unterschlagen wurde. Eine mögliche Fehlerquelle ist auch die Art, wie der Öffnungswinkel angegeben wird. So wie in der Tabelle, quer über den Lichtstrahl, oder ausgehend von der Mittelachse, wie man es in Datenblättern findet . Ergibt einen Faktor 2 im Winkel, einen Faktor 4 im Raumwinkel und damit einen Faktor 4 im Candela-Wert. Zumindest aus "verkaufsoptischen" Gründen wird man die erste Art der Winkelmessung bevorzugen. Ob das für alle Hersteller gilt ?

Nach der Beschaffung von einigen passenden LEDs kann man sich Gedanken machen, wie eine LED ohne metallische Kontakte mit Strom versorgt werden könnte. Das geht natürlich per Funk. So wird berichtet, dass in der Nähe der ersten größeren Sender für Lang- und Mittelwelle die Besitzer von Gartengrundstücken die Drähte im Zaun mit einer Glühbirne verbunden haben, um ihr Gartenhäuschen zu beleuchten. Das wurde dann verboten. Heute gibt es Detektoren für Handys, die kaum mehr als ein Stück Draht, eine Diode und eine LED enthalten. Sie reagieren aber nicht auf ankommende Funksignale, sondern auf die Reaktion eines Handys, wenn es angesprochen wird und die Quittierung abschickt. Je nach Funknetz, also Betriebsfrequenz, und je nach Abstand zur nächsten Bodenstation werden dabei Leistungen im Bereich von 1 Watt abgestrahlt. Wir haben damit schon einmal eine Abschätzung : Mit bis zu 2 Watt Sendeleistung kann man auf geringe Entfernung eine LED zum Leuchten zu bringen.

Nun ist richtiger Funk ziemlich kompliziert und vorallem strengen Regeln unterworfen. Man darf nicht einfach senden, wie man möchte. Eine andere Möglichkeit der kontaktfreien Übertragung ist die induktive Kopplung, die in jedem Transformator zum Einsatz kommt. Je nach Bauart, besonders für Hochspannung, werden da merkliche Abstände "drahtlos" überbrückt. Stellt man sich aber einmal eine Gartenbeleuchtung vor, bei der jede LED einen Trafo benötigt, so ist der Trafo wohl keine gute Idee.

Wozu auch ? Ein Niederspannungstrafo an trockener Stelle für den Netzanschluss und eine Leitung, die einige Volt Wechselspannung durch den Garten führt, ist durchaus eine zeitgenössische Lösung. Wechselspannung unbedingt, weil dann keine elektrolytische Korrosion an den Drähten auftritt. Jede LED, die an die Leitung angelötet wird, erhält einen eigenen Brückengleichrichter und einen eigenen Vorwiderstand zur Strombegrenzung. Man kann das alles einseitig auf einer kleinen Epoxid-Platine auflöten, die nach Auflöten der Teile und Entfernung des Flussmittels (Spiritus, kleiner Pinsel, abtupfen, gut trocknen) 3 mal dünn mit Epoxid-Kleber überzogen wird, einschließlich LED. Jede Schicht getrennt bei etwa 70 °C härten. Zur Montage muss man ein einziges Mal mit dem LötKolben in den Garten. Wenn man

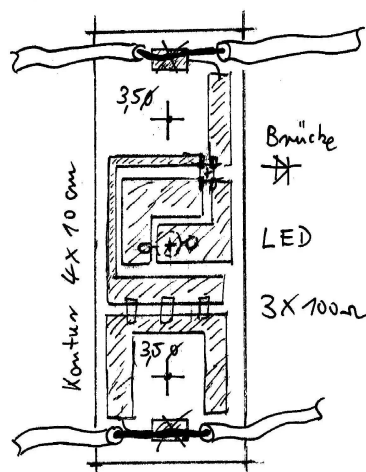
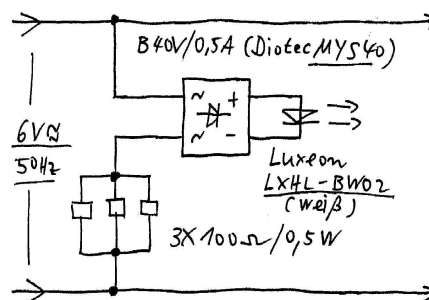
vorsorglich die beiden Kontaktflächen für das Kabel vor dem Kleberauftrag verzinnt hat, kann man durch den gehärteten Kleber "hindurchlöten". Eine derart aufgebaute Beleuchtungsanlage mit 10 Leistungs-LEDs läuft seit Jahren ohne Ausfälle, wobei die Lampen zwar nicht komplett im Wasser liegen, aber mitunter Regen ausgesetzt sind. **Bild 1.3** zeigt die Schaltung.

Bild 1.3

Schaltung für eine Lichterkette mit Leistungs-LEDs, die feuchtraum-geeignet ist.

Verwendbar als Hintergrundbeleuchtung im Garten oder als indirekte Beleuchtung an Hauswänden oder Treppenaufgängen. In der angegebenen Dimensionierung fließen etwa 100 mA, was der Lebensdauer zugutekommt.

Die Schaltung kann flach mit SMD-Teilen realisiert werden und ist nach Epoxidüberzug wetterfest, sofern das Wasser abtropfen und trocknen kann.

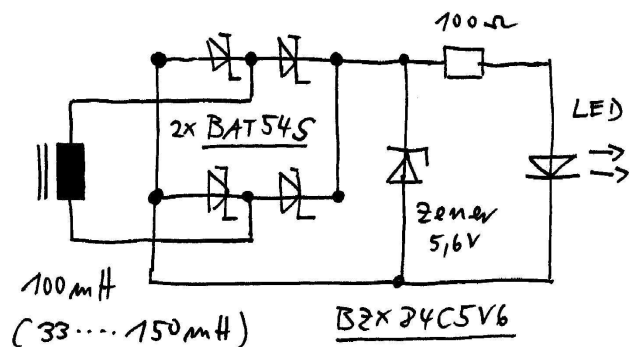


Bei einem Blick in Schaltnetzteile fällt auf, dass dort erstaunliche Leistung mit sehr kleinen Trafos umgesetzt wird. Sogar Ringkerne, bei denen die eine Wicklung offensichtlich nur aus einer einzigen Windung besteht, kann man finden. Es ist hier die hohe Frequenz, die so kleine Trafos ermöglicht. Nach einigen Experimenten hat sich herausgestellt, dass man für die Leistung von kleinen LEDs im Bereich von einigen Milliwatt Strukturen finden kann, die zwar physikalisch noch ein Trafo sind, vom Erscheinungsbild her aber nichts damit zu tun haben. Das ist etwa eine Stabdrossel (Bereich 100 mH) in deren Nähe (!) eine Leitung vorbeigeführt wird, in der ein Wechselstrom fließt (Größenordnung 1 A). Die Frequenz muss dabei einige 10 kHz betragen. Das wäre eine Konstruktion, die man komplett vergießen könnte, die absolut wasserdicht wäre und die ohne Werkzeug an jeder Stelle installiert werden kann : Niedervoltleitung lose verlegen, an passender Stelle eine Lampe befestigen, Kabel um die Lampe schlingen und fertig.

Für diese Zwecke muss die LED mit einem Brückengleichrichter versehen werden, möglichst aus Schottky-Dioden, die die kleinsten Verluste haben. Bedrahtete Typen sind meist unnötig leistungsfähig und haben dabei eine zu große Eigenkapazität, die hier stört. An dieser Stelle sind daher SMD-Teile zweckmäßig und man sollte sich mit ihnen anfreunden, denn geplant sind auch Lampen, die sehr, sehr klein sind. Für erste Versuche kann man die Diode BYS 21-45 oder gar die 1N4148 verwenden, für die man weder Pinzette noch Lupe benötigt. Für die Versuche ist es auch zweckmäßig, die LED mit einer Zenerdiode gegen Überstrom zu schützen. **Bild 1.4** zeigt die Schaltung. Viele Teile sind für diese Speziallampe also nicht nötig.

Bild 1.4

Eine einfache Schaltung, um LEDs induktiv an eine Leitung anzukoppeln. Zenerdiode und Widerstand dienen nur als Schutz beim Experimentieren. Zum Probieren kann man die beiden SMD-Dioden auch durch 4 Stück BYS21-45 oder sogar 4 Stück 1N4148 ersetzen.



Bleibe die Frage, wie man einen starken Wechselstrom bei ganz geringer Spannung erzeugt. Hier kommt der Audioverstärker ins Spiel. Bei einem Verstärker mit 10 Watt an 4 Ohm fließen bereits 1,58 A in der Lautsprecherleitung ($1,58 \times 1,58 \times 4 = 10$). Man schließt also an den Verstärker einen passenden Leistungswiderstand an und dreht ordentlich auf. Hat der Verstärker Reserven, kann dieser Lastwiderstand auch größer als der Nennwiderstand sein. Da er sofort heiß wird, sollte der Widerstand Leistung vertragen. Am besten ist eine Ausführung mit Flanschen, die man auf ein Blech schraubt. Falls nicht verfügbar, geht auch ein Drahtwiderstand mit einigen wenigen Watt Nennleistung, den man in Wasser versenkt. Das ist nicht die feine Art, aber da nur Wechselspannung ansteht, wird er die erste Versuchsserie überdauern. Vom Wirkungsgrad her ist die Anordnung aber absolut suboptimal. Daher wird später noch gezeigt, wie die Aufgabe auch mit ganz geringen Verlusten gelöst werden kann.

Die zweckmäßigste Signalquelle für den Verstärker ist ein einfacher Funktionsgenerator. Man sollte mit Sinusform arbeiten, damit man unnötige Abstrahlung auf den angeschlossenen Leitungen vermeidet. Falls der Verstärker keine Pegelanzeige hat, stellt man zunächst mit einigen 100 Hz und angeschlossenen Lautsprecher einen lauten, aber unverzerrten Ton ein und baut dann alles um. Damit kann man sicher sein, dass man den Verstärker nicht übersteuert, was manche Typen bei hohen Frequenzen nicht gerne haben. Für die LED-Versuche ist eine Frequenz von etwa 30 kHz zweckmäßig, weil dann der Verstärker noch Leistung bringt und man andererseits keine Art von Störsender gebaut hat, der etwa die Funkuhr stört (bei etwa 75 kHz). Das komplette Arrangement ist in **Bild 1.5** dargestellt.

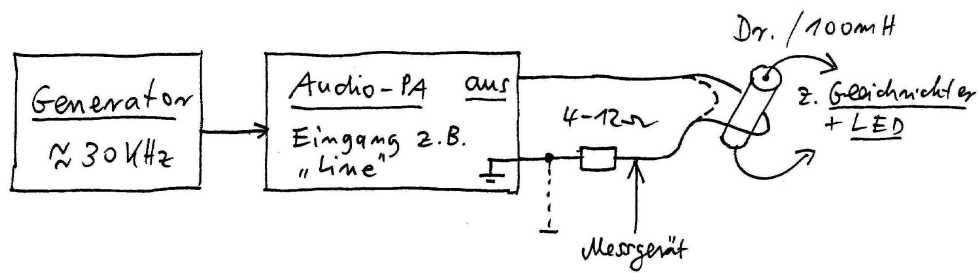


Bild 1.5 Grundsätzlicher Aufbau, um LEDs induktiv mit Energie zu versorgen. Der Audioverstärker braucht nicht sehr leistungsfähig zu sein, der gezeigte Widerstand muss die Leistung aber ohne Schaden aufnehmen können. Der Ort des Widerstandes ist frei wählbar und hier so gezeichnet, dass man massebezogen den Spannungsabfall messen kann.

Wer keinen Funktionsgenerator hat, kann die Schaltung nach **Bild 1.6** verwenden. Sie ist auf die hier notwendigen Anforderungen besonders zugeschnitten. Benötigt wird zunächst ein Signal, das in einem gewissen Frequenzbereich veränderlich ist, etwa von 10 bis 50 kHz. Eine veränderliche Sinusspannung ist nicht so leicht zu erzeugen, aber eine ähnlich verlaufende dreieckige Spannung sehr wohl. Dazu reicht ein einfacher Timer Typ 555 (bitte in C-MOS-Ausführung), wenn man mit einem Emitterfolger die Spannung am Kondensator auskoppelt. Ein Operationsverstärker wäre hier auch denkbar, aber nicht nötig und möglicherweise durch die Höhe der Frequenz überfordert. Das Signal wird zur Überprüfung von Schwingkreisen benötigt, wenn man wissen möchte, inwieweit die Resonanzfrequenz den gewünschten Wert hat. Wer einen Frequenzzähler besitzt, sollte ihn an den digitalen Ausgang des Timers anschließen, das ist für die Arbeit sehr praktisch.

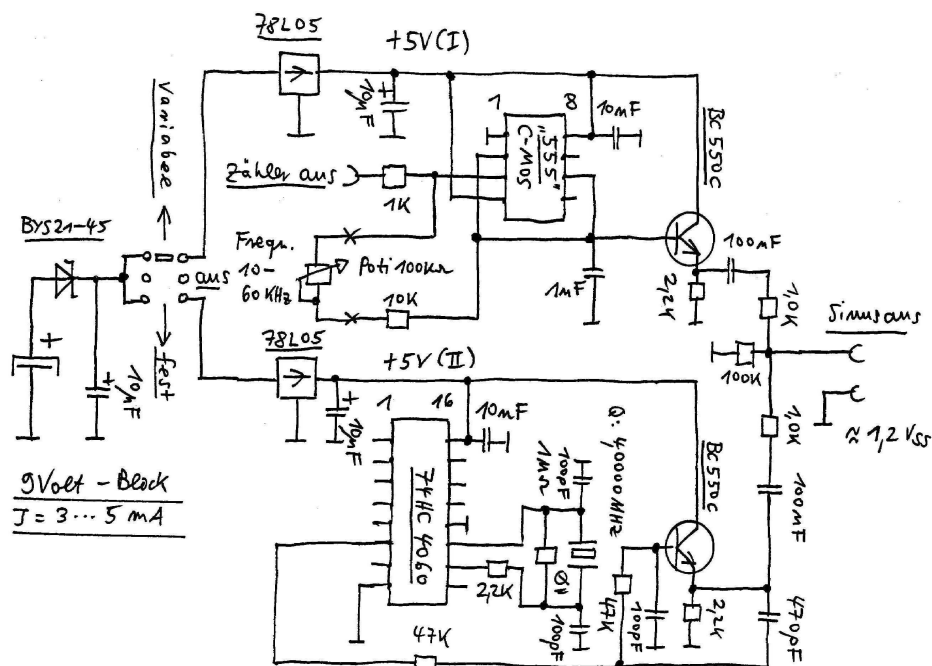


Bild 1.6 Schaltung eines einfachen Signalgenerators, der wahlweise eine variable oder festfrequente Spannung erzeugt.

Die eigentliche Betriebsfrequenz des geplanten Wechselstromgenerators muss fest und sehr genau sein. Anzustreben sind eine Toleranz von $\pm 1\%$, was nur mit einem Quarz, gegebenenfalls auch einem Keramikresonator erreicht werden kann. Der Wert der Frequenz sollte über dem Hörbereich liegen, aber auch nicht so hoch sein, dass man hier in irgendeiner Form einen Hochfrequenzsender projiziert. Formal, und historisch bedingt, sind allerdings auch 10 kHz schon Hochfrequenz und die normale Stereoanlage müsste eigentlich bei den Hochfrequenzgeräten eingeordnet werden.

Bei 32,768 kHz gibt es Uhrenquarze. Diese Frequenz führt mit glatter Binärteilung auf 1 Hz. Da diese Quarze aber sehr hochohmig sind, sind Oszillatoren damit nicht so leicht zu bauen. Besser ist es hier, einen einfachen Quarzoszillator und einen Frequenzteiler zu kombinieren. Diese Möglichkeit bietet der Schaltkreis 74HC4060, bei dem allerdings um mindestens Faktor 16 geteilt werden muss. Um auf 30 kHz zu kommen, müsste der Oszillator bei 480 kHz schwingen. Das passt ganz gut, denn für 500 kHz gibt es Keramikresonatoren, was dann auf 31,25 kHz führt.

Betrachtet man die Baugröße und die Verfügbarkeit von Quarzen, so sollte man als Ausgangsfrequenz lieber 4,0000 MHz wählen, auch wenn der Stromverbrauch des Teilers vielleicht etwas ansteigt. Das führt auf ein Teilverhältnis von 1:128, was in der Schaltung auch so realisiert ist. Die erzeugte Betriebsfrequenz ist also 31,25 kHz. Alternativ könnte man einen Quarz mit 4,19643 MHz einsetzen, was die schon genannte Betriebsfrequenz von 32,768 kHz ergibt. Nach reichlich Binärteilung hätte man auf der Seite der Lampen ohne zusätzlichen Aufwand einen 1-sec-Takt zur Verfügung, etwa für einen blinkenden Zeitgeber, der frei im Raume schwebt. Diese Entscheidung kann auch später erfolgen, aber die genannten Quarzfrequenzen unterscheiden sich um immerhin 5 % und sind damit außerhalb der geplanten Toleranz.

Aus der geteilte Quarzfrequenz wird abschließend eine Sinusspannung gewonnen. Dazu dient ein aktiver Tiefpass mit einem Emitterfolger und einer oberen Grenzfrequenz von 20 kHz. Insgesamt besteht der Schaltungsvorschlag aus 2 getrennten Oszillatoren, die man auch getrennt aufbauen könnte. Einer der Spannungsregler + Elko lässt sich einsparen, aber dann muss der Schalter komplizierter werden. So reicht ein einfacher Kippschalter mit Mittelstellung zum Ausschalten.

Ist alles soweit aufgebaut und anhand von Bild 1.5 arrangiert, sollte man das Probelämpchen zum Leuchten bringen können. Wer messtechnisch besser eingerichtet ist und ein Oszilloskop oder ein Multimeter hat, das auch 30 kHz Wechselfrequenz misst, kann den Spannungsabfall am Leistungswiderstand feststellen und damit auf den fließenden Strom schließen. Etwa bei der Frage, welche Stromstärke und welche Windungszahl um die Drossel herum notwendig sind, um eine gewünschte Helligkeit zu erreichen. Auch der Vergleich mit älteren LEDs aus der Bastelkiste dürfte interessant sein.

Denkt man einmal an die Aufgabe, aus einem großen Wasservorrat das eigene Eimerchen möglichst schnell zu füllen, so wird man den Hahn weit aufdrehen. Geht das nicht oder ist er schon offen, muss man den Druck erhöhen. Aber wie ? Mit diesem Modell kann man auch die Situation beschreiben, die vorliegt, wenn man eine LED ohne direkte Verbindung mit Energie versorgen möchte. Hier hat man im Generator einen fast unerschöpflichen Vorrat und in etwas Abstand steht die LED als kleines Eimerchen. Der Engpass besteht in der vorhandenen Schaltkapazität zwischen Vorrat und Abnehmer und gleichermaßen, auf der induktiven Seite, in dem Grad der magnetischen Verkopplung. Beide Größen sind nur vom gewählten, mechanischen Aufbau abhängig und damit nicht weiter zu beeinflussen. Also muss der Druck erhöht werden, um die Übertragung zu verbessern. Mehr "Druck" heißt mehr Spannung bei kapazitiver Kopplung und mehr Strom bei induktiver Kopplung, die hier bevorzugt zum Einsatz kommt.

Betrachtet man einen LC-Schwingkreis, bei dem die Energie periodisch zwischen dem Kondensator (als Ladung) und der Spule (als Strom) hin- und herpendelt, so stellt man fest, dass die Strom- und Spannungswerte sehr groß werden können, sofern wenig Dämpfung vorhanden ist. Dämpfung kann im Kondensator durch unpassendes Dielektrikum und in der Spule durch den Drahtwiderstand entstehen. Zwei Schwingkreise mit festem Abstand tauschen daher wesentlich mehr Energie aus, als das, was man anhand der Schaltkapazität oder der induktiven Kopplung vermuten würde. Typisch ist, dass der hohe Strom und die hohe Spannung nur im Schwingkreis auftreten, während der Strom, den ein Generator einspeist oder den der Verbraucher abnimmt, im üblichen Rahmen bleibt. Bestehende Schaltungskonzepte können daher weitgehend beibehalten werden und müssen zur Erhöhung des "Drucks" nur durch 2 Schwingkreise ergänzt werden.

Das Konzept hat aber auch Nachteile. Generatorfrequenz und Resonanzfrequenz der beiden Schwingkreise sollen möglichst gleich sein. Das ist um so wichtiger, je besser die Schwingkreise arbeiten, denn der Schaltungstrick geht nur auf einer einzigen, von den Bauteilwerten festgelegten Frequenz. Hier ist es nicht schwierig, den Generator quatzgenau arbeiten zu lassen, die Schwingkreise müssen aber häufig individuell abgeglichen werden. Eine Verbesserung der Übertragung ist auch dann festzustellen, wenn nur 1 Schwingkreis verwendet wird. Man kann sich daher stufenweise in das Thema einarbeiten.

Bild 1.7 zeigt das Prinzip einer LED-Lampe, die mit einem Schwingkreis betrieben wird. Die Schaltung ist erstaunlich einfach. Bemerkenswert ist das Fehlen eines Brückengleichrichters. Das hat mit den "Schwungrad"-Eigenschaften des Schwingkreises zu tun. Schaltet man die Energieversorgung aus, schwingt er noch gedämpft über mehrere Sinusperioden, um so länger, je besser er gebaut wurde. Er wirkt also bezüglich Last stark mittelwertbildend und es ist ziemlich bedeutungslos, zu welchem Zeitpunkt man periodisch Energie entzieht. Nutzt man zusätzlich die negativen Halbwellen, werden damit auch die positiven Halbwellen gedämpft und der Energieentzug bleibt insgesamt gleich. Da der Brückengleichrichter hier nichts bewirkt, aber

eigene Verluste erzeugt, kann man ihn ersatzlos streichen. Denkt man bereits an ein Layout, muss man in Serie zur LED eine Schottkydiode vorsehen, für den Fall, dass die LED eine Schutzdiode gegen Verpolung enthält, denn das wäre faktisch ein Kurzschluss.

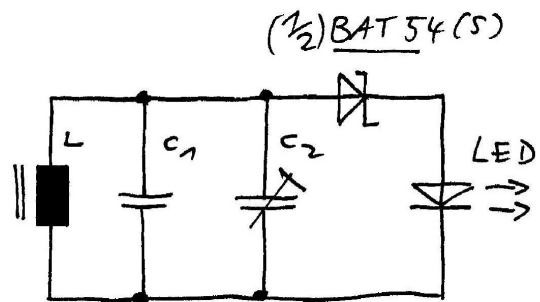
Bild 1.7

Eine einfache Schaltung, bei der die LED aus einem Resonanzkreis versorgt wird.

L : Möglichst großer Rollenkern mit 33 mH.

C1 : 680 pF Folie oder Keramik, Qualität NP0.

C2 : 33 ... 100 pF keramisch, je nach LED-Typ.



Lötflächen / Bohrungen für Kondensatoren sollten mehrfach vorhanden sein, weil die typischen Kapazitätswerte so groß sind, dass man nicht mit Trimmer abgleichen kann und Kondensatoren parallelschalten muss. Beachtet werden sollte auch, dass die LEDs, unabhängig von ihrem Wirkungsgrad, recht unterschiedliche Eigenkapazitäten haben können, die merklich die gewünschte Resonanzfrequenz beeinflussen. Spulen sollten innerhalb des vorgesehenen Bauvolumens möglichst groß sein. Bei Luftspulen ist eine große Fläche (Typ "Armreif") die beste Lösung, bei kleineren Bauformen mit Ferrit soll es eine langgestreckte Form sein, eine Stabdrossel oder notfalls eine Ausführung mit langem Trommelkern, nach Möglichkeit keine SMD-Ausführungen. Die notwendigen Induktivitätswerte sind recht hoch und man sollte sie bei kleiner Bauform fertig kaufen, denn selbst wickeln mit Drähten unter 100 µm geht schlecht und macht keinen Spass. Reihenschaltung von Stabdrosseln kann eine Verbesserung bringen, Parallelschaltung bringt wenig.

Für den Abgleich des Schwingkreises müssen die Kondensatoren individuell ausgesucht werden. Dazu kann man die notwendige Kapazität in Gedanken aufteilen und sich einen Satz von kleineren Kapazitäten zurechtlegen. Etwa nach einem Schema der Form Gesamtkapazität = "90% + 10% + 5% + 2%". Die variable Frequenzeinstellung des Generators ist hier praktisch, denn damit kann man feststellen, ob der Aufbau im Prinzip schon arbeitet. Ein Frequenzähler zeigt darüber hinaus an, welcher Abstand zur gewünschten Frequenz besteht. Der letzte Kondensator lässt sich dann aus dem noch vorhandenen Frequenzunterschied direkt berechnen. Dabei ist zu beachten, dass sich die Frequenz nur mit der Wurzel aus dem Kapazitätswert verändert, was für die feine Einstellung nicht schlecht ist.

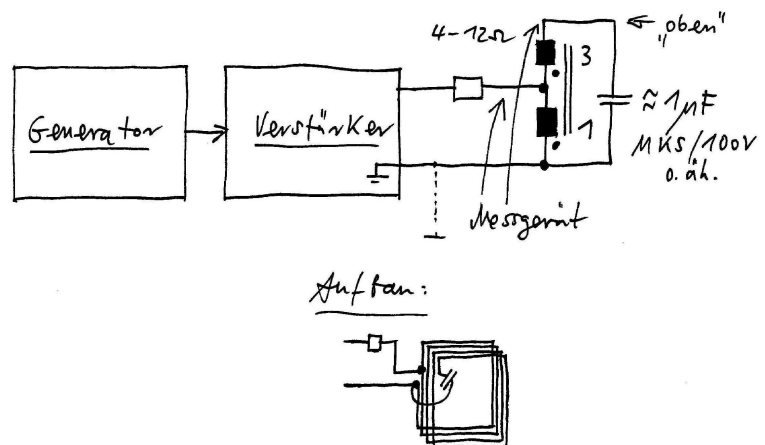
Mit den bisher gewonnenen Kenntnissen gelingt es, in der Nähe eines stromdurchflossenen Drahtes ein Lämpchen zum Leuchten zu bringen. Soll sich das Lämpchen auf einer Fläche bewegen können, etwa bei erleuchteten Schachfiguren, wird der Draht als Grundkonstruktion aber nicht reichen. Dann ist es naheliegend, den Draht über die Kanten des Schachbretts zu wickeln und damit eine flache Luftspule herzustellen. Reicht die Wirkung des Strom bei einer einzigen Windung nicht, kann man den Draht mehrfach wickeln. Das ist richtig gedacht, aber

die Natur spielt uns hier einen Streich. Die Wirkung der Spule auf die Helligkeit nimmt mit der Windungszahl zwar zu, aber der Strom fließt nicht mehr wunschgemäß. Das hat mit dem induktiven Widerstand (Wechselstromwiderstand) einer Spule zu tun, der leider mit dem Quadrat der Windungszahl steigt. Mit der gewählten Arbeitsfrequenz bei 30 kHz und räumlichen Ausdehnungen, die man im täglichen Sprachgebrauch als "Fläche" bezeichnen würde, kommt unser Verstärker mit seiner geringen Spannung am Ausgang sehr schnell an Grenzen und das Ergebnis ist nicht so, wie es sein könnte.

Auch hier kann ein Schwingkreis helfen. Das Problem des induktiven Widerstandes löst sich dabei von alleine, denn im Schwingkreis steigt die Spannung von selbst so weit an, dass alles wieder passt. Bleibt nur die Frage, wie der Verstärker anzuschließen ist. Da die Spannung (und damit auch der Strom) im Schwingkreis höher sein soll, als das, was der Verstärker liefern kann, ist der Anschluss "ganz oben" keine gute Idee. Weiter "unten" angeschlossen, kann der Schwingkreis das gewünschte "Eigenleben" entwickeln, aber der Verstärker ist möglicherweise nicht mehr in der Lage, die komplette Leistung, die er liefern könnte, an den Schwingkreis abzugeben. Entsprechendes Probieren führt immer wieder zu dem Ergebnis, dass die Anzapfung der Spule dann optimal gewählt ist, wenn die Windungsverhältnisse, von "oben" her betrachtet, zwischen 1:1 und 3:1 liegen. **Bild 1.8** zeigt eine geeignete Schaltung. Die Spule besteht aus wenigen Windungen und für Versuche sind isolierte Drähte oder auch Kabel, die man normalerweise für die Elektroinstallation verwendet, eine gute Wahl. Es sollen ja verlustarm Ströme von einigen Ampère fließen.

Bild 1.8

Prinzipieller Aufbau, wenn auf einer Fläche LEDs mit Energie versorgt werden sollen. Gezeigt ist die Dimensionierung für eine Rahmenspule mit 4 Windungen, gebildet aus 1,5 mm² Elektriker-Schaltdraht. Das Format ist 40 x 50 cm und entspricht einem mittelgroßen Bilderrahmen.



Auch der Kondensator (oder mehrere wegen des Abgleichs) muss sorgfältig gewählt werden. Man betreibt hier eine Technik, bei der auch Kondensatoren warm werden, und unnötige Verluste im Kondensator sind schlecht. Beste Ergebnisse liefern Folienkondensatoren, etwa mit Polypropylen-Folie, deren Nennspannung weit über der tatsächlich auftretenden Spannung liegt. Es müssen unbedingt bedrahtet Kondensatoren sein (hier kein SMD !) und ein Feilschen um den merklichen Preis oder die kleine Bauform bringt nur schlechte Ergebnisse.

Abgleich ist notwendig, zumal die Kondensatoren nur in einer grobstufigen E 6 - Reihe angeboten werden und dann auch noch $\pm 20\%$ Toleranz haben. Wenn man mit der Resonanz schon in der Nähe von 30 kHz liegt, kann auch durch leichtes Verbiegen der Spule oder eines einzelnen Drahtes den Abgleich schaffen. Das bietet sich hier an, weil die mechanischen Maße sehr groß sind. Abgleich und Hilfsmittel wurden schon beim ersten Schwingkreis beschrieben. Als Anzeige für das Strommaximum kann auch ein „Lämpchen“ nach Bild 1.4 dienen. Es darf aber keinesfalls eine eigene Resonanz haben, sonst wird alles doppeldeutig.

Interessant ist noch eine allgemeine Betrachtung zur Funktionsweise. Dass hohe Ströme im Schwingkreis überhaupt auftreten können, hat damit zu tun, dass Strom und Spannung um 90° in der Phase verschoben sind. Im Idealfall besteht ein Schwingkreis also nur aus Blindwiderständen (= verlustfreie Spule und verlustfreier Kondensator) und eine beliebig schwache Energiezufuhr von außen kann eine beliebig starke Energiemenge im Schwingkreis pendeln lassen. In der Praxis stimmt das nicht ganz, aber der Verstärker muss eigentlich nur die Verluste ausgleichen, die an verschiedenen Stellen entstehen. Die liegen direkt im Schwingkreis und auch in seiner Umgebung, etwa durch flächige oder ringförmige Metallteile, in denen Wirbelströme entstehen. Die Lämpchen für sich erzeugen dabei noch die wenigsten Verluste. Nur wenn sich zwei fast berühren, wird man möglicherweise feststellen, dass sie um die verfügbare Energie kämpfen und sich gegenseitig in der Helligkeit beeinflussen. Die genannte Phasenverschiebung von 90° tritt allerdings nur im Schwingkreis auf. Strom und Spannung in der Zuführungsleitung haben keine Phasenverschiebung, wenn alles richtig abgeglichen ist. Der Generator wird also im Idealfall mit einem ohmschen Widerstand belastet, der den Verlusten entspricht.

Im Tabellenbuch findet man eine einfache Formel, nach der man die Resonanzfrequenz aus den Werten von Kondensator und Spule berechnen kann. Setzt man die hier meist verwendete Frequenz von 31,5 kHz ein, erhält man als Ergebnis, dass das Produkt aus Kondensatorwert (in nF) und Spule (in mH) genau 25,9 beträgt. Das sollte man sich merken, wenn man LEDs in Resonanz aus einer Drossel speist. Hätte sie 100 mH, wäre der notwendige Kondensatorwert 0,259 nF oder etwa 260 pF. Für einen ersten Versuch zur Bestimmung der Resonanz könnte man also in diesem Beispiel mit 220 pF starten, da die LED auch einige 10 pF beitragen wird.

Kapitel 2 / Die verschiedene Generatoren

Die Forderung nach mechanischer Maßhaltigkeit, die man zur Nutzung von Resonanzeffekten braucht, ist recht lästig. Benötigt man wirklich flache Spulen, kann man diese als Platine auffassen und entsprechend drucken. Es stellt sich aber bald heraus, dass häufig die erreichbare Windungszahl nicht genügt und auch der Innenwiderstand einfach zu hoch ist. Das Füllen der gesamten Fläche mit der Windung ("Schneckenspule") bringt dabei wenig, da die inneren Bereiche der Fläche nur in geringem Maß zum Gesamtergebnis beitragen und dabei das erzeugte Magnetfeld, etwa im Vergleich zu einer Rahmenspule, deutlich ungleichmäßiger verteilt ist. Auch ein Stapel von mehreren dünnen, 2-seitig bedruckten Platinen, sozusagen das Multilayer des Kleinen Mannes, wurde schon getestet und hat nicht das gewünschte Ergebnis gebracht. Kupferlackdraht hat hier einfach die besseren Eigenschaften.

Was noch vernünftig realisierbar erscheint, ist eine Generatorspule im Format einer Europakarte mit wenigen, breiten Windungen, die beidseitig aufgebracht sind, um den Bahnwiderstand zu senken und damit den fließenden Strom zu erhöhen. Man kann sie mit einem einfachen Oszillator verbinden und hat dann einen kleinen, aber durchaus flächig wirkenden Generator für den Modellbau oder für allerlei Zaubertricks durch die Tischplatte hindurch.

Bild 2.1 zeigt die Schaltung. Sie besteht im Wesentlichen aus einem der schon beschriebenen Oszillatoren und einer sehr schlichten Brückenschaltung mit komplementären Feldeffekttransistoren. Es wird CMOS-Standardlogik verwendet, die hier keine besonderen Forderungen zu erfüllen hat. Die Doppeltransistoren enthalten in einem kleinen SO-8-Gehäuse sowohl einen p-Kanal FET, wie auch einen n-Kanal-FET. Kompakter geht es nicht. SMD-Format muss sein, weil derartige Bauteile, auch im Hinblick auf die geringe Steuerleistung, nur so erhältlich sind.

Der Betrieb aus 4 Stück Mignon-Batterien oder aus einem Steckernetzteil (6-12 V DC) ist gleichermaßen möglich. Es werden zwischen 0,5 und 3 Watt umgesetzt, die bei korrekter Arbeitsweise nur die Spule und die Kondensatoren erwärmen, der Rest bleibt kalt.

Der Baustein 4060 enthält einen Oszillator, der mit 500 kHz schwingt. Ob das wirklich stattfindet, wird überprüft. Dazu wird aus der Wechselspannung des Oszillators (Pin 9) eine Gleichspannung gewonnen. Ihre Polarität ist negativ, bezogen auf die positive Versorgungsspannung. Reicht diese Gleichspannung nicht, bleiben die Gatter des Bausteins 4093 abgeschaltet. Abschaltung der beiden p-Kanal-FETs erreicht man durch eine positive Spannung, in der Nähe der Versorgungsspannung. Damit wird verhindert, dass bei unklarer Versorgung die FETs einen Kurzschluss erzeugen. Das Schaltungsdetail ist auch geeignet, um eine externe LED anzuschließen, die Betriebsbereitschaft bei ausreichender Versorgung signalisiert.

Die auf 31,25 kHz geteilte Oszillatorfrequenz steuert wechselseitig die beiden oberen FETs. Die beiden unteren FETs sind überkreuz verschaltet und nehmen immer genau den Schaltzustand ein, den der obere FET auf der anderen Seite hat.

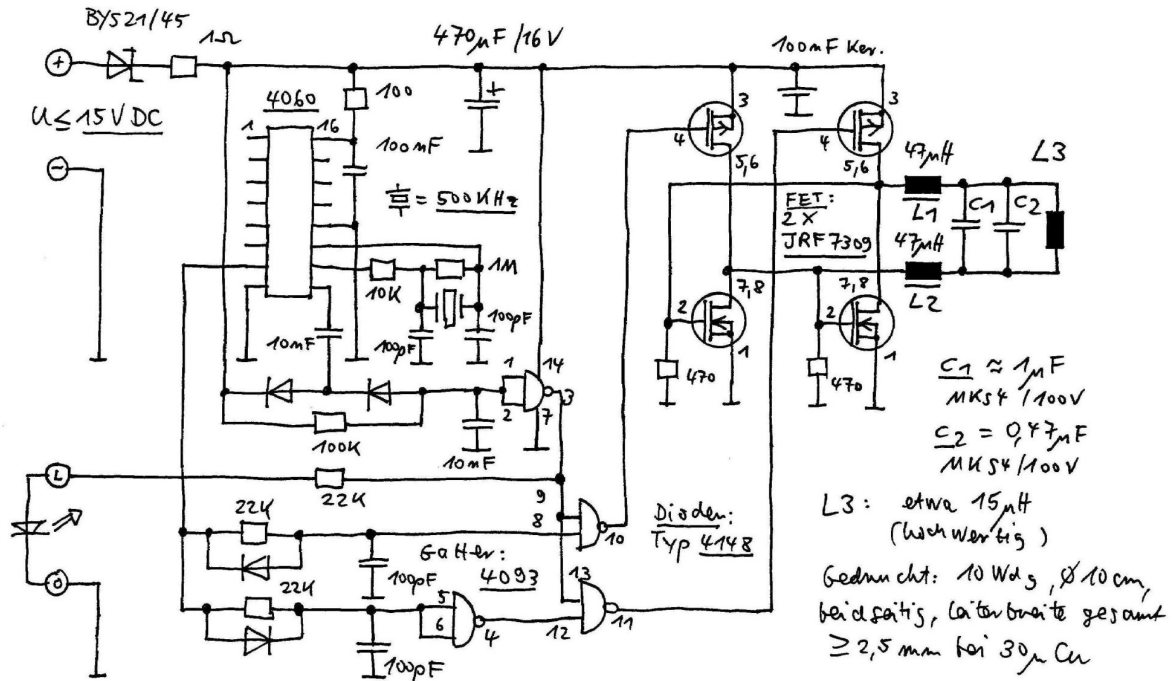


Bild 2.1 Ein einfacher Generator mit hohem Wirkungsgrad zum Betrieb aus Batterien oder einem Netzteil. Der induktive Geber ist als Schwingkreis ausgeführt und direkt auf der Platine untergebracht. Die Stromaufnahme liegt zwischen 5 V / 130 mA und 12 V / 260 mA.

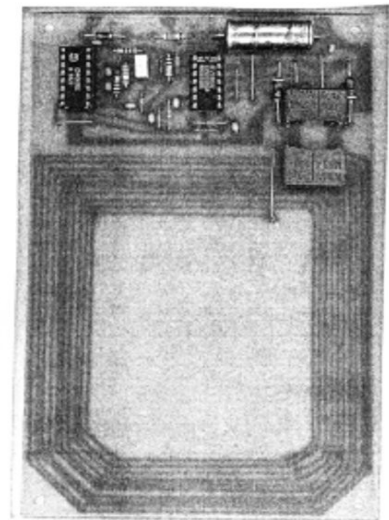
Wie bei allen Brückenschaltungen ist die wechselseitige Steuerung so, dass der eine Brückenweig erst eingeschaltet wird, wenn der andere schon einen Moment lang ausgeschaltet war. Das verhindert Stromfluss quer durch die Schalter. Dazu dienen RC-Glieder mit Diode, die gezielt das Einschalten um etwa 2 μsec verzögern. Pausen im Stromfluss erzeugen bei induktiver Last allerdings Überspannung. Dieses Problem wird in üblicher Weise dadurch gelöst, dass die parallelen Dioden, die in den FETs prinzipiell enthalten sind, die Überspannung kurzschließen. So gesehen unterscheidet sich die Schaltung nicht von den bekannten Brücken für Motoren oder andere Lasten.

Als Sonderfall besteht die Last aus dem Schwingkreis (C1, C2, L3). Die Kunst besteht hier darin, dem Schwingkreis Energie zuzuführen, ohne dass die Brückenschaltung mit ihrem Innenwiderstand von 0 Ohm den Schwingkreis kurzschließt. Ganz allgemein kann das mit einer Ankopplung über einen Kondensator oder eine Spule erreicht werden. In der Schaltung wurde eine Spule gewählt, die zusätzlich in 2 Hälften (L1, L2) geteilt ist. Eine Spule deshalb, da sie, im Vergleich zu einem Kondensator, auf Frequenzen oberhalb der Resonanzfrequenz

abschwächend wirkt. Dabei ist die Teilung der Spule wichtig, weil beide Brückenhälften hart geschaltet sind und entsprechende Störungen erzeugen, die sich sonst über die Schaltkapazität des Schwingkreises nach außen verbreiten würden. Auf die Anzapfung der Induktivität im Schwingkreis kann bei dieser Schaltungsart verzichtet werden.

Die Werte von L_1 / L_2 legen die Stromaufnahme der Schaltung fest. Der Strom steigt mit geringerer Induktivität, wobei die Qualität der Resonanz abnimmt. Für reinen Batteriebetrieb kann es sinnvoll sein, von den vorgeschlagenen Werten etwas abzuweichen, sei das für mehr Leistung oder für geringeren Stromverbrauch.

Das nebenstehende **Bild 2.2** zeigt die komplette Schaltung auf Platine.



Das Schaltungsprinzip lässt sich erweitern
Eine Verbesserung wäre zunächst die
präzisere Ansteuerung der Brücke, was
letztendlich nur zwei weitere Gatter benötigt.
Auch eine Einstellbarkeit der Helligkeit
wäre zweckmäßig. Hierzu könnte man die
Versorgung der Brücke verändern oder,
was geschickter erscheint, die Einschaltzeit
der Schalter variieren.

Bild 2.3 zeigt die entsprechende Schaltung. Sie beginnt, wie bisher, mit einem Baustein Typ 4060 und der Überwachung seiner Funktion, allerdings mit höherem Teilungsverhältnis, damit bei den Resonatoren und Quarzen eine bessere Auswahl besteht. Außerdem wird mit der doppelten Arbeitsfrequenz (62,5 kHz) eine periodische Sägezahnspannung erzeugt, die bei Null beginnt und die einen einstellbaren Endwert erreicht.

Die FETs bleiben ausgeschaltet, solange der Wert dieser Sägezahnspannung unter der Schaltschwelle der Gatter liegt. Man erzeugt damit eine Pulslängen-Modulation und der Schwingkreis wird nicht mit einem Rechtecksignal angestoßen, sondern mit einem Signal, das positive und negative Einschaltzeiten mit längeren Pausen verbindet. Sein Energiegehalt auf der Betriebsfrequenz ist damit variabel und der Strom im Schwingkreis lässt sich über die Pulslänge kontinuierlich verändern. Die Einstellung des Potenziometers ist dabei unabhängig von der Höhe der Versorgungsspannung, da Schaltschwelle und Steigung des Sägezahns im selben Maß von der Versorgung abhängen.

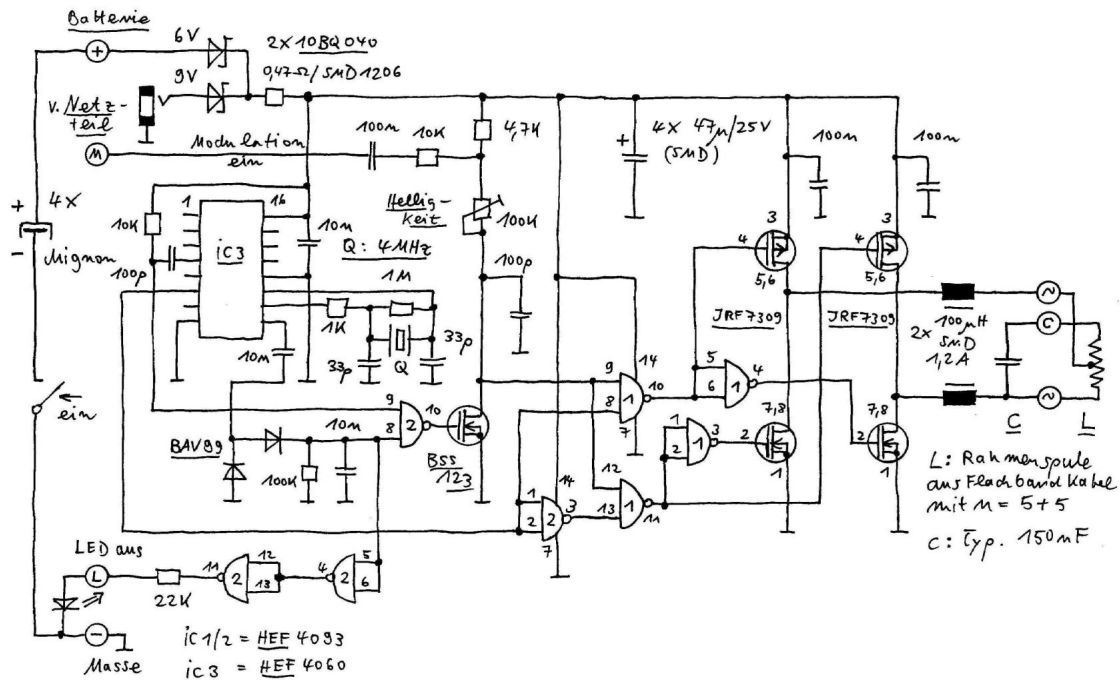
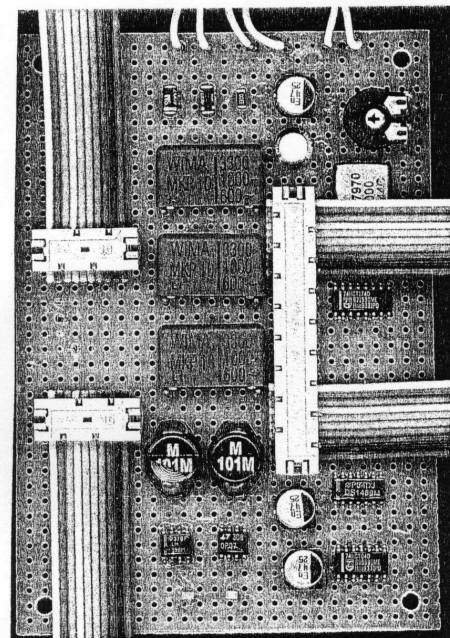


Bild 2.3 Eine Erweiterung der Schaltung nach Bild 2.1. Die Helligkeit ist einstellbar und es können größere Spulen aus Flachbandkabel angeschlossen werden.

Beim Bau von Generatorschaltungen kann man Arbeit sparen, wenn man Flachbandkabel verwendet und die Verschaltung auf die Platine verlegt. Das ist in einer vorgegebenen Rahmenkonstruktion schneller verlegt als irgendwelche anderen Drahtgebilde. Zusammen mit den genannten Erweiterungen und streng in SMD-Aufbau ergibt sich so ein recht kleines, kompaktes Gerät, das sich leicht an vielen Stellen unterbringen lässt, siehe nebenstehendes **Bild 2.4**.



Die bisher vorgestellten Generatoren sind, wenn man so will, allesamt Schaltregler mit ihren typischen Eigenschaften. Das sind hoher Wirkungsgrad und hohes Störaufkommen durch Frequenzanteile, die man nicht benötigt, die durch das schnelle Schalten aber zwangsläufig entstehen. Dazu kommt noch die Art der internen Ansteuerung mit Standard-Logik. Die

erzielbare Ausgangsspannung kann daher ohne interne Pegelwandler kaum 15 Volt übersteigen. Will man mehr, werden die an sich einfachen Schaltungen schnell kompliziert. Hoher Wirkungsgrad ist schön, hohes Störaufkommen wird dadurch gemildert, dass die Schaltungen zwingend die Energie an einen definierten Schwingkreis abgeben, der im Nebeneffekt auch als Filter für die erzeugten Störungen wirkt.

Für eine allgemeine Anwendung, ohne Blick auf Resonanzen und vielleicht auch für etwas höhere Spannungen, kann man sich noch einmal dem Linearverstärker zuwenden, wie er für die Grundversuche schon vorgeschlagen wurde. Hier wird direkt eine sinusförmige Spannung erzeugt. Die typischen Verluste entstehen dadurch, dass meist zuviel Spannung bereitgestellt wird, obwohl es nur auf den fließenden Strom ankommt.

Üblicherweise erzeugt ein Audioverstärker am Ausgang einen festen Spannungspegel, der weitgehend unabhängig von der Last ist. Betreibt man induktiv angekoppelte Verbraucher, so stellt man fest, dass der fließende Strom merklich von der Kabelführung abhängt, weil bei hohen Frequenzen der induktive Widerstand der Leitung ansteigt und damit der tatsächlich fließende Strom abgeschwächt wird. An einer Leiterschleife quer durch die ganze Wohnung fällt möglicherweise so viel Spannung ab, dass für den gedachten Lautsprecher kaum noch etwas übrig bleibt. Das lässt sich im Nachhinein ausrechnen, widerspricht aber dem technischen Gefühl und ist damit recht überraschend.

Eine erste Verbesserung wäre daher, den fließenden Strom, auf den es ankommt, zu messen und den Audioverstärker automatisch nur soweit auszusteuern, bis der gewünschte Strom fließt. Der Spannungswert ergibt sich dann als Nebeneffekt. Das spart auch den externen Lastwiderstand. Benötigt wird also eine "Stromquelle", eine Schaltung, die einen vorgegebenen Strom fließen lässt, unabhängig von der Art der Last. Die Literatur nennt Beispiele, wie das realisiert werden kann. So kompliziert muss es aber nicht sein, denn die Lastsituation verändert sich nur langsam und recht selten, jedenfalls in Bezug auf die Arbeitsfrequenz. Daher genügt es, den mittleren Wert des Stromes in aller Ruhe zu messen und in Abhängigkeit davon mit einer Regelschleife die Amplitude entsprechend einzustellen.

Bei Blick auf die schon bereitgestellten Schaltungsblöcke fehlt wohl eine elektronische Verstärkungseinstellung, genaugenommen eine Schaltung, die 2 Spannungen multipliziert. Es ist seit jeher unklar, warum solche Schaltungen selten, teuer, aufwändig oder ungenau sind und sich kein preisgünstiger Standard durchsetzen konnte. Zum Glück kann man die Aufgabe hier auf die Veränderung einer Rechteckspannung zurückführen, denn es ist gleichwertig, ob eine Rechteckspannung erst gefiltert und dann abgeschwächt wird oder ob man die umgekehrte Reihenfolge wählt. Eine variable Rechteckspannung entsteht letztendlich in jedem Logikgatter mit variabler Versorgung oder durch die Kombination von Transistor + Kollektorwiderstand.

Es gibt eine Vielzahl von integrierten Audioverstärkern, die wie ein Operationsverstärker zu beschalten sind und die sich auch, mit Einschränkung, so betreiben lassen. Das vereinfacht die Entwicklung ganz erheblich. Eine gewisse Sorgfalt beim Aufbau ist allerdings nötig. Die besteht in der sauberen Abblockung und den möglichst kurze Leitungen rund um den Baustein, besonders in Richtung Masse. Denn durch den hohen Strom und den geringen Innenwiderstand haben diese Teile häufig lästige Zusatzeigenschaften, die man eher bei HF-Bausteinen, etwa Video-Verstärkern, erwarten würde. Wer ein eigenes Layout plant, sollte sich die Applikationen des Herstellers ansehen und die Teile zur Kenntnis nehmen, die zusätzlich empfohlen werden. Vielleicht braucht man sie auch nicht.

Bild 2.5 zeigt eine Schaltung nach diesen Prinzipien. Hier wird in bekannter Weise eine Rechteckspannung mit 31,25 kHz erzeugt. Danach folgt die Einstellung der Amplitude mit 3 Analogschaltern (74HC4066), wobei einer der Schalter als Inverter arbeitet. Erzeugt wird ein Rechteck mit einem Spitzenwert zwischen Null und der Spannung, die der Verstärker OP4 liefert.

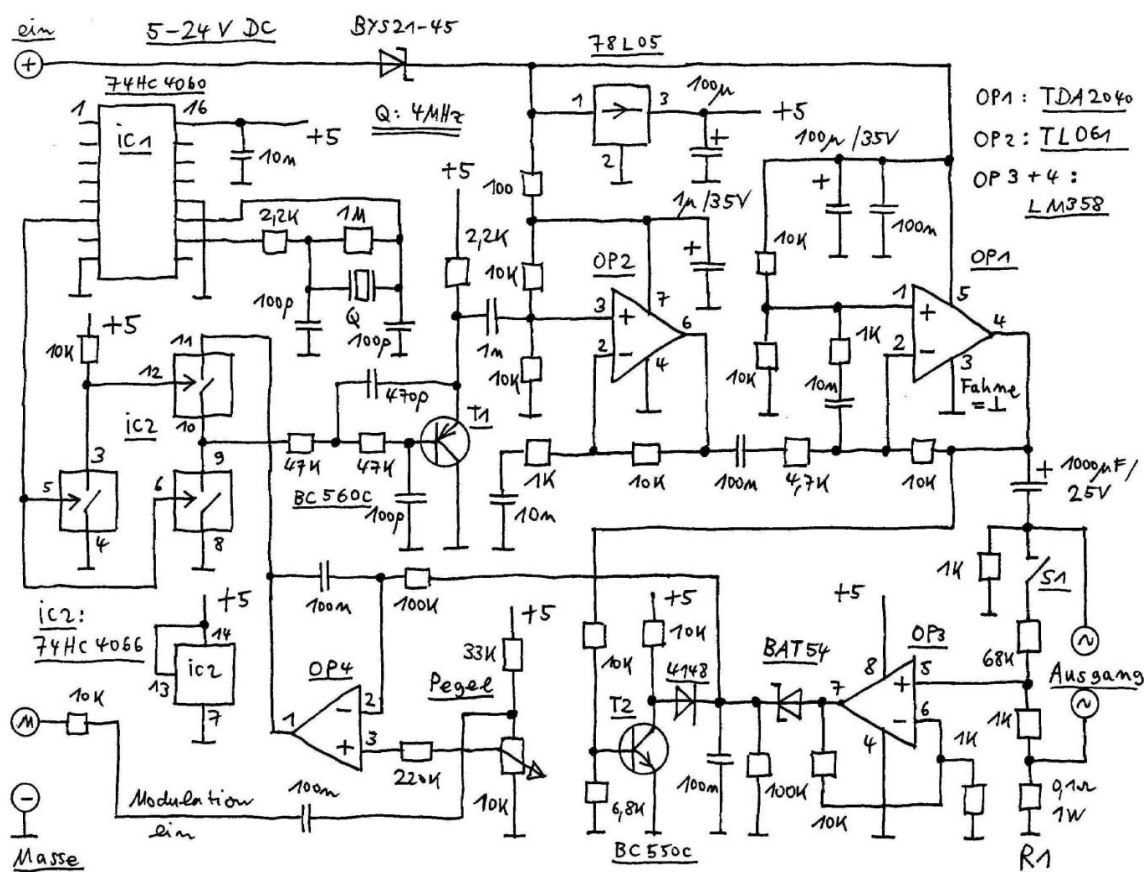


Bild 2.5 Ein Generator mit Linearverstärker und automatischer Stromregelung. Bei entsprechender Kühlung sind auch höhere Ausgangsleistungen möglich.

Die Spannung wird mit einem aktiven Filter gefiltert, entsprechend der Dimensionierung nach Bild 1.6, jedoch mit PNP-Transistor als Emitterfolger. Der ist notwendig, weil bei kleinen Signalen der DC-Anteil zu gering ist, um einen NPN-Transistor korrekt zu betreiben. Die Alternative wäre natürlich eine AC-Kopplung mit zusätzlichen Bauteilen für die DC-Versorgung. Nach dem Verstärker OP2 folgt der eigentliche Audio-Baustein OP1. Er ist als invertierender Verstärker beschaltet, mit einem mittleren DC-Pegel, der genau der halben Versorgungsspannung entspricht. Es folgt ein Elko zur Kopplung und dann der Ausgang.

Die Verstärker OP1 + OP2 haben durch die Beschaltung eine Spannungsverstärkung von insgesamt gut 20 ($11 \times 2,1$). Diesen Wert könnte OP1 auch alleine liefern. Es zeigt sich aber, dass bei der gewählten Betriebsart (viel Strom, wenig Spannung) doch merkliche Verzerrungen auftreten. Weniger Verstärkung und damit mehr linearisierende Gegenkopplung ist bei OP1 also zweckmäßig. Wie zu befürchten, hat auch der gewählte Typ des OP1 (TDA2040) die Eigenschaft, bei einigen MHz "ein wenig" zu schwingen. Das beste Gegenmittel, das man auch für andere Fälle empfehlen kann, ist ein RC-Glied zwischen den beiden Eingängen des Verstärkers, auch wenn das eher nicht in den Applikationen zu finden ist. Es dürfte genau genommen auch keine Wirkung haben, weil bei einem idealen Operationsverstärker zwischen diesen Punkten keine Spannung auftritt. Den realen Verstärkern hilft es aber offensichtlich sehr, wenn an dieser Stelle ein dämpfender Widerstand eingebaut ist.

Vom Ausgang fließt der Wechselstrom zurück, jedoch nicht direkt nach Masse, sondern über den Messwiderstand R1, an dem ein gewisser Spannungsabfall auftritt. Dieser wird mit OP3 verstärkt. Anschließend werden die positiven Spitzenwerte gleichgerichtet, um ein Maß für die Stärke des Stromes zu gewinnen. Die entstehende Gleichspannung (als Istwert) wird durch OP4 mit einer vom Stärkeregler gelieferten Gleichspannung (als Sollwert) verglichen und dann die Sinusamplitude so eingestellt, dass alles zusammenpasst. Damit ist der Regelkreis geschlossen und der fließende Wechselstrom entspricht der Vorgabe am Potenziometer, unabhängig vom Wert des äußeren Lastwiderstandes.

Ohne Last steigt die Wechselspannung am Ausgang soweit an, bis der Verstärker OP1 begrenzt und eine mehr oder weniger ausgeprägte Rechteckspannung entsteht. Damit die Sinusform des Signals auch in diesem Fall erhalten bleibt, wird mit dem Transistor T2 geprüft, ob sich das Signal der negativen Aussteuerung nähert. Durch die hohe Symmetrie des Verstärkers schließt das eine Bewertung der positiven Aussteuerung mit ein. Im normalen Betrieb ist der Transistor T2 dabei leitend. Sperrt er momentan, bedeutet das Übersteuerung. Diese Information wird dem Regelkreis mitgeteilt und die Aussteuerung des Verstärkers entsprechend verringert.

Die Messung des fließenden Wechselstromes ist recht einfach gehalten. Um kleine Ströme zu erfassen, müsste der Gleichrichter rund um OP3 mehr Verstärkung haben oder überhaupt als Präzisionsschaltung ausgeführt werden. Für normale Beleuchtungszwecke mit einer

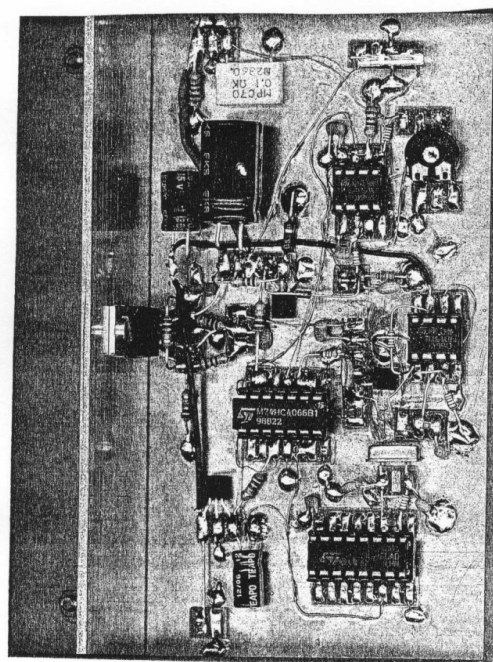
Stromschleife stört das alles nicht. Bei Betrieb an Resonanzkreisen kann es aber sein, dass vergleichsweise wenig Strom bei merklicher Spannung benötigt wird und dass dann die Helligkeitsregelung nicht richtig arbeitet. Für diesen Fall kann man leicht auf eine Spannungsregelung umstellen, die mit dem Schalter S1 aktiviert wird. Der Regelkreis wird dann mit Information über die Ausgangsspannung versorgt und die Helligkeit lässt sich besser dosieren.

Der verwendete Audiobaustein arbeitet bereits ab 5 Volt und man kann ihn hier auch so betreiben. Mit höherer Versorgungsspannung und einem kleineren Widerstandswert von R1 ist im Prinzip noch etwas mehr Strom möglich, aber irgendwo setzt dann auch die interne Strombegrenzung des Bausteins ein, was keine gute Kurvenform ergibt. Im Rahmen der Schaltung dient die höhere Spannung vielmehr dazu, äußerer induktive Widerstände zu überwinden. Legt man die maximale Versorgung auf 24 Volt fest, hat man einen Wert, der ohne weitere Überlegung auch mit den übrigen Bauteilen verträglich ist. **Bild 2.6** zeigt einen Probeaufbau.

Etwas Kühlkörper muss wohl sein. Seine Größe hängt allerdings sehr von der Versorgungsspannung und dem erzeugten Strom ab. Möglicherweise ist er nicht so groß, wie man es für einen Audioverstärker bei 24 Volt an 4 Ohm erwarten würde. Für Experimente sollte man zunächst Reserven vorsehen. Ist dann eine passende Betriebsart gefunden, multipliziert man die Versorgungsspannung mit dem vom Netzteil gelieferten Strom und hat dann die Leistung, die man als Wärme abführen muss. Vom Verbraucher her zu argumentieren, ist weniger empfehlenswert, denn die Blindlasten machen die Abschätzung der Wärmeleistung schwierig.

Bild 2.6

Blick auf eine Testschaltung nach Bild 2.5.
Ausführung in "Minimount-Technik" mit
aufgeklebten Lötinseln.



Kapitel 3 / Beleuchtung für den Garten

Kontaktfreie Energieübertragung hat im Feuchten oder gar unter Wasser erhebliche Vorteile. Das gilt nicht nur für den korrosionsfreien Betrieb, sondern auch für die Montage, weil ein Leuchtmittel an jeder beliebigen Stelle ohne Abisolierung angebracht werden kann.

Ganz allgemein wird eine Induktionsschleife verlegt, ein in sich geschlossenes Drahtgebilde, dessen beide Enden am Generator angeschlossen sind. Wie schon erwähnt, ist eine "Schleife" aber nicht die richtige Struktur, da sie zuviel induktiven Widerstand hat und unnötig viel Spannung angelegt werden muss, damit ausreichend Strom fließt. Bestens bewährt hat sich einfache Netz-Zwillingsleitung oder auch Lautsprecherleitung, die am Ende zusammengelötet wird. Hin- und Rückstrom fließen dann weitgehend am gleichen Ort und die Induktivität ist gering. Soll irgendwo ein Leuchtmittel angebracht werden, trennt man mit einem scharfen Messer die beiden Leitungen und hat dann einige Zentimeter einzelne, isolierte Litzen zur Verfügung.

Der Querschnitt der Leitung sollte mindestens $0,75 \text{ mm}^2$ betragen und die leichte Trennbarkeit ist wichtig. An die Isolation wird keine Anforderung gestellt und es muss auch kein Silikon sein. Das beste Langzeitexperiment stellt Bauschutt dar, den man mitunter im Garten ausgräbt. Sind Leitungsstücke darunter, so wird man feststellen, dass ganz normale PVC-Isolation ziemlich lange hält. Aber auch eine Zwillingsleitung hat eine messbare Eigeninduktivität, beispielsweise $0,7 \mu\text{H} / \text{m}$. Bei höheren Strömen und längeren Leitungen entstehen dadurch merkliche Spannungsabfälle, die der Generator ausgleichen muss. In **Kapitel 6** wird darauf noch näher eingegangen. Als Richtwert kann man sich an dieser Stelle merken, dass eine Verdrahtung von 10 bis 20 Metern möglich ist, ohne dass besondere Überlegungen zur Erhöhung der Betriebsspannung notwendig werden.

Für Lampen kleiner Leistung, die zur Markierung im Boden eingelassen sind oder die allgemein Lichtakzente setzen (Glühwurm), genügt es, den magnetisch empfindlichen Bereich einfach zwischen die aufgeschlitzte Leitung zu schieben. Soll es heller sein, kann man auch die eine der Litzen mehrfach um die Lampe schlingen. Oder auch beide, wenn die gegenläufige Wicklungsrichtung beachtet wird. Die beiden Spulen sollen sich ja unterstützen und nicht in der Wirkung aufheben.

Für mehr Energie, etwa für einen kleinen Scheinwerfer mit Leistungs-LED, ist es dagegen sinnvoll, einen magnetischen Koppler zu verwenden, also eine Art Transformator mit der Primärwindungszahl $n = 1$ und einer noch festzulegenden Sekundärwindung. Technisch ist das etwas aufwändiger und man muss auch etwas Erfahrung haben, weil Materialprobleme auftreten können und die nötigen Bauteile zwar gängig sind, aber nicht unbedingt von jedem Elektronikhändler bereitgehalten werden. Die Sache bietet auch Raum für eigene Experimente

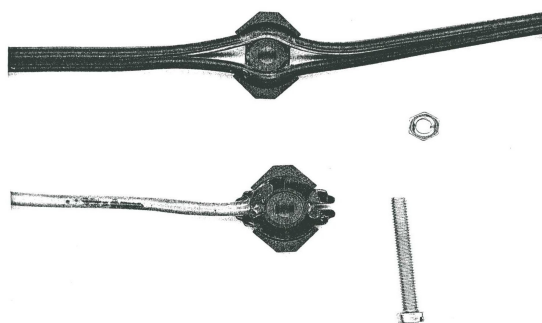
und dafür ist es zweckmäßig, die Grundlagen zu verstehen und auch die Tücken der Angelegenheit zu kennen.

Ein bekanntes, magnetisches Bauteil ist der "Schalenkern". Ähnlich geformt, für höhere Leistung aber gängiger, ist der sogenannte "RM-Kern". Die kleineren Formate haben ein Mittelloch, das eigentlich zum magnetischen Abgleich bestimmt ist, in das aber praktischerweise eine zentrale Schraube passt, die die Kernhälften zusammenhält und mit der man den Kern dann irgendwo befestigen kann. Die normalerweise dafür vorgesehenen Klammern rosten vielleicht und sind nur zur Befestigung auf Platinen gedacht. Die spezielle Form des RM-Kernes erlaubt es außerdem, in die eine Kernhälfte die aufgeschnittene Zwillingslitze direkt einzulegen, sofern ihre Isolation nicht unnötig dick ist. Die Sekundärwindung liegt dann in der anderen Kernhälfte. Als Spulenkörper verwendet man einen handelsüblichen 2-Kammer-Kern, bei dem man die eine Hälfte abgesägt hat. **Bild 3.1** zeigt den prinzipiellen Aufbau.

Bei dieser an sich recht einfachen Konstruktion sind gewisse Dinge zu beachten. Zunächst ist der Ferrit absolut wasserfest, aber sehr spröde. Die zentrale Schraube darf also nicht stark angezogen werden, zumal die Mitte möglicherweise nicht formschlüssig ist und dort ein Abstand vorhanden ist, der "Luftspalt". Kunststoffschrauben sind daher zweckmäßig. Leider nehmen sie mit der Zeit Wasser auf und werden dabei merklich länger. Es muss daher nach einigen Monaten nochmals nachgezogen werden, sonst sinkt die Helligkeit.

Bild 3.1

Magnetischer Koppler mit RM-Kern. Die beiden Hälften werden mit üblichen Klammern oder einer zentralen Schraube aus Polyamid zusammengehalten.



Ein weiterer bemerkenswerter Punkt ist die Wasseraufnahme von Epoxidkleber, den man sinnvollerweise zur Isolation der Sekundärspule verwendet. Die Verklebung von Ferritteilen mit Epoxid ist seit jeher Stand der Ingenieurskunst. Daher liegt es nahe, die Sekundärspule nicht nur zu isolieren, sondern auch mit reichlich Kleber an der einen Kernhälfte zu befestigen. Tut man dies und legt man den Kern ins Wasser, was eigentlich erlaubt ist, so sprengt der Kleber mit großer Sicherheit nach maximal 1 Jahr den Ferrit. Das geht bis zum Totalausfall. Zur Befestigung der mit Epoxid isolierten Spule muss der Kleber daher sparsam verwendet oder durch etwas Silikon ersetzt werden.

Es gibt ein großes Angebot an anderen Ferritteilen, die ebenfalls für einen Koppler geeignet sind. Als Transformator gesehen hat er nur die besondere Eigenschaft, dass er erst vor Ort

zusammengesetzt wird. Dazu gehört aus praktischen Gründen auch, dass die Primärwindung kaum mehr als einmal um den Kern läuft. Diese Konstruktion kann man immer so auslegen, dass der Generator merklich belastet wird und ein Spannungsabfall am Koppler im Voltbereich entsteht.

Der Vorschlag mit kleinen RM-Kernen geht hingegen in die Richtung, dass sich an beliebiger Stelle kleine Lampen platzieren lassen, ohne dass eine Gesamtkalkulation des Energieaufwandes notwendig ist. Die magnetischen Eigenschaften der Kerne werden dabei durch den " A_L -Wert" beschrieben. Das ist ihre Induktivität für 1 Windung. Der Koppler erzeugt also bei festliegender Frequenz ohne weitere Belastung einen definierten Spannungsabfall. Die meisten Probeaufbauten wurden mit Kernen Format RM6 / RM8 bei A_L -Werten von 2,2 / 2,5 μH gemacht. Das ist bei diesen Bauformen die maximal mögliche Induktivität ohne Luftspalt, sofern man Wert auf ein Mittelloch legt. Der induktive Spannungsabfall entspricht rechnerisch etwa 3 Meter Zwillingslitze, ist im Betrieb aber geringer, weil die Last der LED den Spannungsabfall auf der Primärseite senkt.

Praktische Tests zeigen, dass der A_L -Wert nicht sehr kritisch ist, denn auch ein A_L -Wert von 0,315 μH liefert vergleichbare Ergebnisse. Als Richtwert für die sekundäre Windungszahl kann man $n = 100$ ansetzen. Höhere Windungszahl ergibt mehr Licht bei geringer Generatorleistung und wenig Lichtzunahme bei höherer Leistung. Geringere Windungszahl ergibt dagegen wenig Licht bei geringer Leistung und viel Licht bei höherer Leistung. Mit einer Schaltung vergleichbar Bild 1.4, aber ohne Zenerdiode und Vorwiderstand, kommt man mit $n = 100$ auf bis zu 20 mA, kann also eine kleinere LED voll aussteuern.

Für Leistungs-LED, Bereich 100 mA, sollte der A_L -Wert mindestens 5 μH betragen, und die sekundären Windungszahlen bei etwa $n = 30$ liegen. Drahtstärke so, dass die Spule nicht überquillt. Mit Kupferlackdraht, Bereich 0,25 CuL, dürfte man gut hinkommen.

Der Bau von Beleuchtungskörpern hat auch mit mechanischen Aufgaben zu tun. Nur mit Säge und Feile ist da manches, aber nicht alles zu erreichen. Zur Einstimmung daher ein Überblick über die Materialien, die Hilfsmittel und die kleinen Tricks bei der Herstellung.

Bei vielen Stimmungslichtern hat man eine recht einfache Konstruktion. Sie besteht aus einem Röhrchen mit einer LED am einen Ende. Am anderen Ende ist intern der magnetische Aufnehmer, eine Drossel, eingebaut. Dieses Ende steckt dann möglicherweise im Boden. Innen ist die Elektrik vergossen, damit keine Feuchtigkeit eindringt.

PVC-Rohre mit 8 ... 12 mm Außendurchmesser sind am zweckmäßigsten. Der Innendurchmesser sollte so sein, dass die Drossel noch gut hineinpasst und noch etwas Platz für den Verguss und die entweichende Luft vorhanden ist. Zu großer Durchmesser bedeutet

andererseits, dass man die LED irgendwie zentrieren muss, bei gleichzeitiger Dichtigkeit an dieser Stelle.

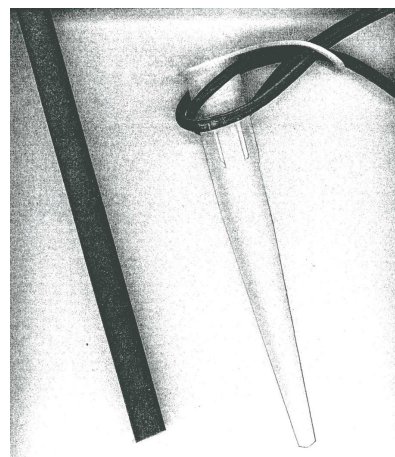
In den Farben Weiß, Schwarz und Hellgrau findet man das entsprechende Halbzeug meist im Baumarkt. Unauffälliges Dunkelgrau und, wenn es zum speziellen Projekt passt, möglicherweise auch Rot hält der Kunststoff-Fachhandel bereit. PVC ist haltbar, preisgünstig und verbindet sich sehr gut mit Klebern und Vergussmassen auf Epoxidbasis. Das übliche Polyester für die Löcher im Auto ist weniger zu empfehlen, da seine Haftfähigkeit nicht ausreichend ist und das Material merklich schrumpft. Ein härtender Epoxidverguss wird vorübergehend sehr dünnflüssig und benetzt dabei stark. Man muss daher in einem ersten Klebevorgang alles gut abdichten und beim Verguss stets damit rechnen, dass trotzdem etwas ausläuft.

Vor dem Verkleben oder Vergießen sollte man alle Stellen, die verunreinigt werden könnten, mit Malerkrepp abdecken. Paketband oder Klarsichtfilme sind eher kritisch zu sehen, denn sie bestehen häufig auch aus PVC und die Abdeckung ist dann kaum noch zu entfernen.

Abschlüsse für die Rohre findet man bei den Kappen von Drehknöpfen, die meist getrennt von den Drehköpfen verkauft werden. Möglicherweise kann man auch die Farbe so wählen, dass man ohne Strom weiß, welche Farbe oder Eigenschaft das Lämpchen hat. Bohrt man in die Kappe ein Loch, kann man damit die LED zentrieren. Als milchiger Streukörper für die LED eignen sich Hutmuttern aus Polyamid, Format M5 und M6. Man kann sie gegebenenfalls vorsichtig ausbohren. Soll ein Lämpchen in den Boden gesteckt werden, benötigt man dafür einen geeigneten Halter, an dem man auch das Kabel befestigt. Einfach und fast kostenlos geht das mit den bekannten Düsen für Silikon - und Acryldichtmassen. Man hat da eine recht scharfe Spitze bei gleichzeitigem Wasserabfluss und die genannten Röhrchen passen gut hinein, siehe **Bild 3.2** .

Bild 3.2

Lampenhalter zum Eingraben, gefertigt aus einer der genormten Düsen für Dichtmittel in 310 ml-Kartuschen. Die eine Leiterschleife muss um 180 ° gedreht werden, sonst hebt sich die Wirkung der beiden Spulen auf.



Der typische Schaltungsaufwand für Lampen dieser Art ist nicht mehr als eine Drossel, ein Brückengleichrichter mit 4 kleinen Schottkydioden und dazu die LED. Für Probeaufbauten kann man auch 4 Stück 1N4148 verwenden. Ob man bei einigen wenigen Lampen dazu eine eigene Platine braucht, ist eher fraglich. Sinnvoll wäre eine längliche Platine mit 2 Kupferstreifen, an

deren Enden die Drossel und die LED maßhaltig angelötet werden. Eine derartige Montagehilfe lässt sich aus fertigen Lochraster-Platinen mit Kupferstreifen gewinnen.

Für Lampen, die in Gehwegplatten oder Steinen eingelassen sind und die begehbar sein sollen, findet man keine passende, durchsichtige Abdeckung als Halbfertigprodukt. Klarsichtröhrchen, die im Haushalt mitunter auftauchen, sind dünn und aus Polystyrol. Das bricht und splittert. Wer hier tätig werden möchte, benötigt eine Drehbank oder muss einen Bekannten damit belagern. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um den Klarsichtkörper, der im Gehweg zu sehen ist und der aus Acrylglas oder lieber aus Polycarbonat gefertigt werden sollte. Bei eingeschränkter Qualität lässt sich die notwendige Vertiefung auch mit einem neuen (!) Kegelsenker und Spiritus als Schmiermittel herstellen. Die übrigen Teile sind dann wieder Rohre, die nur glatt abgesägt werden müssen, mit ruhiger Hand, oder besser mit einer Kreissäge. Insgesamt besteht die Konstruktion aus einem rohrförmigen Halter, der vor dem Verlegen in die Gehwegplatte eingeklebt und mit einer Kabelschlinge versehen wird. Nach Verlegen und gegebenenfalls Abrütteln wird die Lampe in den Halter eingesetzt. Der störende Sand lässt sich mit Staubsauger oder Gartenschlauch zuvor aus der Höhlung entfernen.

Bild 3.3 zeigt die Lampe. Ihre Darstellung ist über Kopf, in der Form, wie sie vergossen wird. Die Lampe besteht aus einem Abschnitt Acryl-Rundstab mit einem Einstich, in den ein PVC-Rundrohr eingeklebt wurde. Mittig ist zusätzlich eine kleine Bohrung angebracht, die die LED beim Verguss zentriert. Man soll erst etwas Vergussmasse einfüllen, dann mit einem Stäbchen die Luftblasen entfernen, dann die LED + Elektrik einsetzen und dann vollgießen.

Bild 3.3

Lampe zum Einbau in Gehwege, bestehend aus Acryl / Polycarbonat-Drehteil, Durchmesser 18 - 20 mm.

Eingeklebt wird ein PVC-Rohr, Außendurchmesser 12 mm, in dem die Elektrik vergossen wird. Sonstige Maße individuell und auch entsprechend der Plattenstärke.

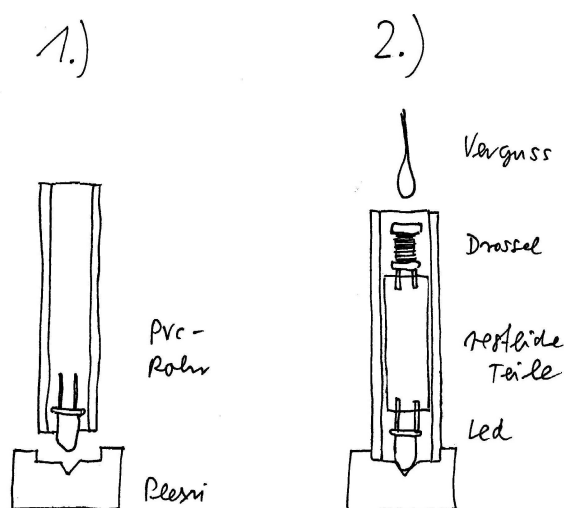
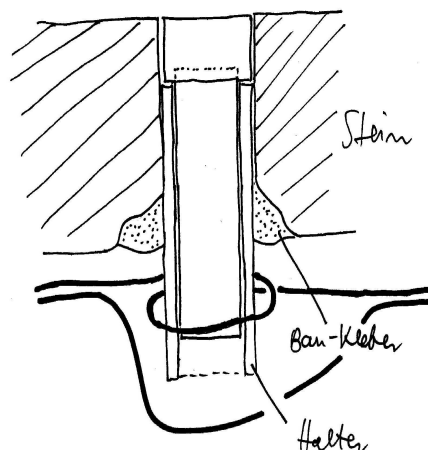


Bild 3.4 zeigt die gebohrte Steinplatte mit eingeklebtem Halter. Im Prinzip ist das ein Rohr aus PVC oder auch Phenol-Hartpapier, das die Lampe aufnimmt und das als mechanischer Stopp für das Acrylglasteil wirkt. Je nach Plattenstärke und Länge der eigenen Elektrik muss man zunächst eine genaue Bemaßung vornehmen, damit die Lampe mit der Platte bündig ist und die Drossel genau dort liegt, wo sich die Leiterschleife befinden wird.

Zum Einkleben des Rohres in Stein sollte kein Acryl oder Silikon verwendet werden. Zweckmäßig ist der spezielle Baukleber, den die Teichbauer und Dachdecker verwenden und der unter dem Namen MS-Polymer oder silan-terminiertes Polymer im Handel ist. Das Material ist ebenso pastös, härtet aber auch im Feuchten und hat eine hohe Haftfestigkeit.

Bild 3.4

So ist der Halter in der Platte eingeklebt. Sein Außendurchmesser entspricht dem Durchmesser des Drehteils nach Bild 3.3. Die Leiterschleife wird beim Verlegen der Platte provisorisch fixiert. Eine Abdeckung mit Entwässerungsloch am unteren Ende des Halters ist zweckmäßig, aber nicht zwingend.



Vor dem Verlegen ist prinzipiell zu testen, wie oft die Leiterschleife um den Halter geführt werden muss, um die gewünschte Helligkeit zu erreichen. Man kann danach zum Verlegen der Platten das Kabel mit Plastikbindern, Bindegarn oder sogar, wenn es nicht regnet, mit Klebstreifen fixieren. Beim Verlegen oder gar Rütteln wandert das Kabel dann direkt unter die Platte. Das ist die Tiefe, wo sich auch die Drossel der Lampe nach dem Einsetzen befinden sollte. Wer ganz besonders vorsichtig ist, stellt sich zu Prüfzwecken ein Lämpchen in einem langen, sehr dünnen Rohr her und kann damit direkt nach Verlegung der Platte kontrollieren, ob das Magnetfeld wie gewünscht vorhanden ist, oder ob das Kabel doch nicht liegt, wie es liegen sollte und man nachbessern muss.

Der Deutlichkeit halber sei darauf hingewiesen, dass alle diese Rohre nicht aus Metall sein dürfen, denn sie würden einen Dauerkurzschluss hervorrufen. Abhilfe schafft nur ein Schlitz in Längsrichtung. Das ist unpraktikabel für die Lampen, aber möglicherweise eine besonders stabile Variante für einen Halter, der in Steine eingeklebt wird.

Der Gipfel der handwerklichen Herausforderung sind Lampen, die permanent im Wasser liegen, sei das im Teich oder im Aquarium. Hier ist üblicherweise eine Menge Mechanik mit Dichtungen und Scheiben und Schrauben notwendig. Damit es klein und einfach bleibt, könnte man von einer Bauart ausgehen, wie sie in Bild 1.3 vorgeschlagen wurde. Das ist eine einseitig mit SMD-Teilen bestückte Platine, die mit durchsichtigem Epoxidharz überzogen wird und die eigentlich gar keinen Aufwand darstellt. Als Bauteile werden lediglich ein magnetischer Koppler entsprechend Bild 3.1 benötigt, dazu ein einfacher Brückengleichrichter und die LED.

Es wurde schon berichtet, dass das Epoxidharz die Tendenz hat, den Ferrit zu sprengen. Parallel dazu zeigt sich aber auch, dass das Harz nicht nur quillt, sondern soviel Wasser aufnimmt, dass die Elektrik darunter zu korrodieren beginnt, bis die Bahnen unterbrochen sind oder sich die permanente Elektrolyse bis in die LED vorgearbeitet hat und dort für nachlassende Helligkeit sorgt. Vorallem SMD-LEDs sind werkseitig nicht immer so versiegelt, dass sie permanenter Feuchtigkeit standhalten können. Reißt der Ferrit nicht, ist die Lampe nach 1 Jahr aus diesem Grund defekt.

Auch dieser Fehler wurde mehrfach und regelmäßig beobachtet und konnte erst dadurch behoben werden, dass mit reichlich Kleber eine dünne Acrylglasplatte mit Stärke 1 mm direkt vor die ganze Platine geklebt wurde. Eine dünne Polystyrolplatte, die Trennwand aus einem Bauteile-Magazin, hätte es möglicherweise auch getan. Epoxid verklebt weder Acrylglas noch Polystyrol sehr gut, man darf diese Scheibe also mechanisch nicht stark belasten. Industriell gefertigte Kunststoffplatten, und dazu gehört auch die verwendete Platine aus Epoxid, sind offensichtlich homogener und dichter als selbstgemachte Kleberschichten, auch wenn sie mehrfach aufgetragen und warm gehärtet wurden.

So hartnäckig, wie diese Probleme sind, braucht man wohl nicht weiter prüfen, wieviele Tage ein Platine unter Wasser aushält, die lediglich mit irgendwelchen Sprühlacken "geschützt" wurde. Nicht umsonst garantieren die Hersteller von Bauteilen die Daten nur bis zu einer Luftfeuchte von 95 % und machen einen großen Bogen um das Thema Betauung oder gar Eintauchen in Wasser.

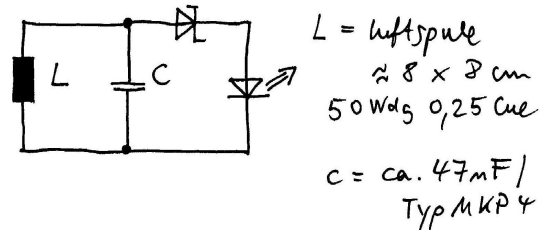
Kapitel 4 / Leuchtende Objekte auf einer Fläche

Ein Bierfilz der besonderen Art

Eine stimmungsvolle Anwendung der neuen Technik ist die Beleuchtung von Trinkgläsern. Dazu kann man das Serviertablett, den Tisch oder den Tresen mit Generatoren nach Bild 2.1 oder 2.3 ausrüsten. Weniger empfohlen kann man, die Gläser mit unauffälliger, spülmaschinenfester Elektrik auszustatten. Beste Lösung ist wohl eine Art Bierfilz oder Untersetzer, auf den das Glas gestellt wird. Diese Struktur ist auch breit genug für eine effiziente Empfangsspule. Die Schaltung ist eigentlich schon bekannt und wird in **Bild 4.1** nochmals gezeigt.

Bild 4.1

Schaltbild des Bierfilzes. Die LED sollte ein Leistungstyp sein, mindestens 50 mA. Die zusätzliche Diode ist notwendig, falls die LED eine niederohmige Schutzschaltung enthält.



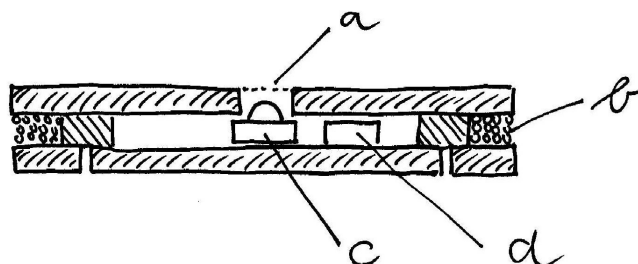
Bei näherer Betrachtung ist die Herstellung aber nicht so einfach und führt auf viele mechanische Details. Besonders die ganz flache Ausführung ist eine besondere Angelegenheit, da bedrahtete LEDs mit größerer Leistung eigentlich zu lang sind und vom Biegen der Anschlüsse direkt am Gehäuse abgeraten wird. Flache SMD-LEDs benötigen dagegen einen zusätzlichen Schutz, eine Art Fenster, denn der Bierfilz sollte zumindest von oben her absolut getränkefest und möglichst abwaschbar sein. Dazu kommt, dass es für die Spule weit und breit keinen geeigneten Spulenkörper gibt und eine gedruckte Spule, wie schon erwähnt, schlechte Ergebnisse liefert.

Der geplante Bierfilz besteht daher aus mehreren Schichten und sein Prinzip ist in **Bild 4.2** dargestellt. Die Breite der Wicklung und die Höhe von LED und Kondensator legen eine Mindesthöhe fest, dazu kommt die Stärke der oberen und unteren Abdeckung, die schon aus Gründen der Stabilität einige Millimeter betragen wird. Möglicherweise sind noch mehr Schichten notwendig, denn man wird ja erst die Spule wickeln, dann den Kondensator passend aussuchen, dann alles testen und dann zusammenkleben. Das bedeutet für eine runde Konstruktion nach Bild 4.2, dass die untere Fläche aus einem inneren Kreis für die LED und einem äußeren Ring für die Spule gebildet werden muss, was mechanisch ziemlich aufwändig ist. Bei den folgenden Bauvorschlägen, die nur mit Fertigteilen oder Zuschnitten aus dem Baumarkt realisiert werden sollen, muss man daher gewisse Kompromisse eingehen. Falls eine Säulenbohrmaschine, eine Platinensäge und eine Fräseinrichtung vorhanden sein sollte : Um

so besser. Die angestrebten Außenmaße im Bereich von 10 bis 15 cm passen jedenfalls gut auf eine kleine Säge, werden aber ebenso im Baumarkt zugeschnitten. Bei manchen Platten aus Acrylglas, Hartpapier und unbeschichtetem Platinenmaterial werden auch fertige Zuschnitte im Format 10 x 10 cm angeboten.

Bild 4.2

Typische Konstruktion des Bierfilzes im Querschnitt. Die Details sind Fenster (a), Spule (b), LED (c) und Kondensator (d).



Vor der konkreten Projektierung müssen einige allgemeine Fragen geklärt werden. Sie betreffen das verfügbare Plattenmaterial, die Verklebbarkeit und die Art des Fensters. Wünscht man glatte Oberflächen, spielt auch die Frage eine Rolle, ob das Material kratzfest ist, sich nachbearbeiten lässt oder mit Schutzfolie geliefert wird.

Als Lieferant für Plattenmaterial kommt der Baumarkt, der Elektronikhandel, der Bastler-Bedarf und der Kunststoff-Fachhandel in Frage. Alle haben ein gewisse Spezialisierung. Man muss also nachfragen und das verwendete Material auch von der Beschaffbarkeit abhängig machen. Zur Diskussion stehen in alphabetischer Reihenfolge : Acrylglasplatten, Hartpapier, Korkboden, komplette Korkuntersetzer, diverses Platinenmaterial, Polystyrolplatten, PVC (auch geschäumt, Marke Gutttagliss), PVC-Fußboden und Sperrholz.

Ein Fenster für eine stärkere LED ist nicht so einfach zu realisieren. Eine wirklich glatte Oberseite erhält man mit einer durchgehenden, durchsichtigen Abdeckung aus Acryl oder Polystyrol oder möglicherweise klarem PVC, die von innen her, bis auf ein Loch in der Mitte, lichtundurchlässig abgedeckt oder lackiert ist. Bis das gut aussieht und die Klebung hält, dürften einige Versuche notwendig sein. Einfacher ist der Einbau eines durchsichtigen Teils in eine undurchsichtige Fläche, sei sie aus Kunststoff oder aus Kork.

Möglich sind Abschnitte von Acrylglasstäben, spezielle Lichtleiter für LEDs und sogar die Gießstränge von Modellteilen aus Polystyrol. Allen ist gemeinsam, dass sie zu lang sind, also sauber gesägt, geschliffen und poliert werden müssen. Das ist viel Aufwand. Für einige Euro gibt es wetterfeste Halter für LEDs, die eine Glasabdeckung oder Linse mit O-Ring enthalten. Man kann nur dieses Glasteil verwenden und mit Epoxidkleber einkleben.

Eine weniger naheliegende, aber preiswerte Lösung ist die Verwendung von durchsichtigen Klebefüßen / Puffern, die es auch in flacher Ausführung gibt. Mit einigen Millimetern passt die Stärke gut zum Plattenmaterial. Sie bestehen aus einem weichen PU (Polyurethan) und lassen

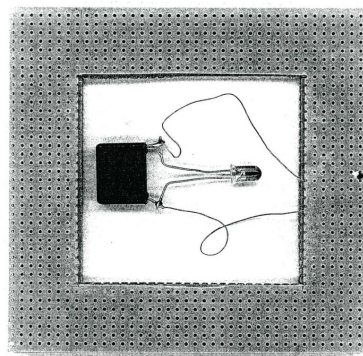
sich mit Sekundenkleber verkleben. Zur Verarbeitung löst man sie von der Trägerfolie und entfernt umgehend den Kleber (Nitroverdünnung / Waschbenzin). Danach deckt man die beiden Seiten zum Schutz mit runden Papier-Klebeetiketten ab, damit der Dampf des Sekundenklebers nicht die Sicht trübt.

Prinzipielle Alternative ist, die SMD-LED mit Drähten zu versehen und von innen her in die Abdeckung einzukleben. Danach wird das Loch von oben her mit einem klaren 2-Komponenten-Kunststoff, bevorzugt Epoxidharz, möglichst glatt und bündig gefüllt. Auch das hat seine Tücken. Man muss Luftblasen vermeiden, alles gut abdecken und rund um die LED darf die Verklebung nicht lecken. Zu beachten ist auch, dass die Wirkung der Linse verlorengeht. Das gilt auch für eine bündig eingeklebten, bedrahteten LED. Der neue optische Eindruck muss daher in Vorversuchen getestet werden. Kurz, mit wenig Werkzeug sind diese Fenster eine Herausforderung. Da erkennt man plötzlich, dass auch Glimmerscheiben durchsichtig sind oder sieht neidisch auf die alten EPROMs und ist versucht, den Meisel und den Hammer zu holen.

Für flache, quadratische Spulenkörper sind verklebte Lochrasterplatten gut geeignet. Man kann die gewünschten Konturen mit recht einfachem Werkzeug herstellen. **Bild 4.3** zeigt ein Beispiel. Die minimale Dicke der Konstruktion beträgt 4,5 mm und die minimale Wickelbreite 1,5 mm. Das Wickeln geht wohl nur von Hand, ist bei Windungszahlen von typisch einigen 10 Windungen aber auch nicht sehr aufwändig.

Bild 4.3

Ein Stapel von insgesamt 3 verklebten Lochrasterplatten als Spulenkörper für eine Luftspule. Da die Wickelbreite innen nur 1,5 mm beträgt, sind die vier Ecken zum besseren Bewickeln innen mit einer Dreikantfeile verbreitert.



Ein vergleichbarer, runder Spulenkörper ist wohl nur mit einer Fräseinrichtung herzustellen. Nach Durchsicht runder Gebrauchsgegenstände fällt der Blick auf die CD. Sie hat mit 12 cm das passende Format, ist als Rohling nicht teurer als die Lochrasterplatte und es gibt sie auch mit 8 cm. Damit ist der Spulenkörper schnell definiert : außen jeweils eine Zwölfer-Scheibe, innen mindestens 1 Achter-Scheibe. Das Datenformat spielt diesmal keine Rolle, aber das Speichermedium enthält eine Metallschicht. Wenn diese so dünn ist, dass die Tischlampe etwas durchscheint, ist nicht mit Verlusten durch Wirbelströme zu rechnen. Die Scheiben werden üblicherweise aus Polycarbonat hergestellt, ein ziemlich zäher Kunststoff, der bis 130 Grad formstabil ist. Bei Plattenmaterial aus Polycarbonat sind Schneiden, Stanzen und Schaben die besten Bearbeitungsmethoden. Auch den Klebstoff kann man etwas darauf

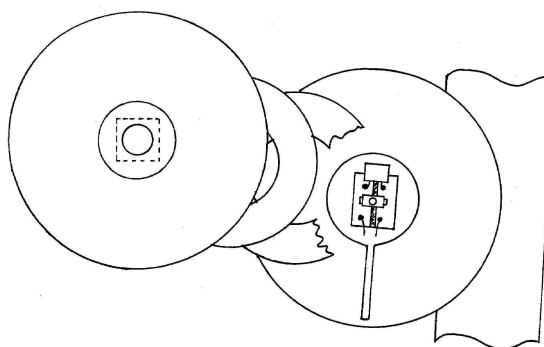
abstellen (Sekundenkleber, Epoxidharz). Muss die Scheibe für die Verklebung plan sein, lassen sich ringförmige Überstände am besten mit einem scharfen Stemmeisen entfernen. Die Überraschung war groß, dass bei manchen Typen nach einer Wärmebehandlung von nur 50 ° während der Verklebung die Metallisierung so lose sitzt, dass sie mit einem Klebstreifen komplett abgezogen werden kann. Da hält eine Klebung überhaupt nicht und die Fetzen sind dabei so leitfähig, dass sie nicht in die Schaltung gelangen dürfen. Scheiben, die bedruckt oder bedruckbar sind, haben eine stabilere Schutzschicht. Bei Unklarheit lohnt ein kurzes Einlegen in die Mikrowelle, maximal 10 sec, am besten in der Schutzhülle. Was danach mit Paketband zu entfernen ist, sollte entfernt werden. Der Rest lässt sich dann wunschgemäß weiterverarbeiten.

Etwas Überlegung vor der Montage ist nötig. Das zentrale Loch bietet zwar Platz für die LED, aber kaum für den Kondensator. Man muss daher zusätzlichen Platz schaffen und beispielsweise mit dem Schälbohrer oder Fräser den inneren Bereich aufweiten. Weiterhin muss der Lackdraht geführt werden. Schlitzte sind am besten, sollten aber von innen her gesägt werden, damit die Stabilität der Scheiben erhalten bleibt.

Bild 4.4 zeigt einen Untersetzer, der komplett aus 4 CDs gefertigt ist. Bei der obersten zeigt die optisch aktive Seite nach außen. Der beste Eindruck wird erreicht, wenn man schwarze CDs, also rotdurchlässige, verwendet, wie man sie von Videospiele kennt. Der umlaufende Ring bleibt stehen und dient zur Zentrierung von kleinen Gläsern. Das Mittelloch wird von innen her mit einem Klarsichtmaterial zugeklebt. Wegen guter Verklebbarkeit mit Epoxidharz empfiehlt sich durchsichtige, etwas stärkere PVC-Folie. Sie erscheint leicht bläulich-violett. Kleinstmengen findet man häufig als Verpackungsmaterial für Dinge, die offen präsentiert werden. Das können Büroartikel, Werkzeug oder Wäsche sein. Mitunter ist auch "PVC" oder eine 03 im "Recycling-Dreieck" eingeprägt. Vor dem Verkleben deckt man sinnvollerweise die Folienseiten mit Klebeetiketten ab, nach außen mit einem runden.

Bild 4.4

Ein Stapel von insgesamt 4 CDs als Spulenkörper mit einer unteren Abdeckung aus PVC-Folie in schematischer Darstellung. Das Mittelloch der obersten CD ist von innen her mit PVC-Folie zugeklebt und dient als Fenster. Bewickelt wurde mit 50 Windungen 0,25 Cul, die optimale Kapazität ergab sich zu 33 nF.



Die anderen 3 CDs werden innen aufgeweitet und die letzte mit einem Schlitz für den Kupferlackdraht versehen. Dann wird der Stapel verklebt. Für die Spule reicht eine einzige Achter-Scheibe, weitere sind nur Abstandshalter. Ihre Zahl hängt davon ab, wie hoch die LED und die verfügbaren Kondensatoren sein werden. Ist der Kleber hart, wird die Spule gewickelt, typischerweise mit Lackdraht etwa 0,25 Cu und 50 Windungen. Der zu erwartende Kondensatorwert liegt bei 33 nF. Über seine Optimierung wurde schon gesprochen. Enthält die LED keine Schutzdiode oder ist bei Verpolung zwar leitfähig, aber hochomig, braucht man als Montagefläche keine echte Platine, lediglich 2 Lötflächen, etwa aus Platinenmaterial mit einer längslaufenden Trennung, wie auch im Bild angedeutet. Mit 0,5 mm Platinenmaterial, einer flachen Leistungs-LED und bedrahteten, aber unvergossenen MKT-Kondensatoren schafft man eine wirklich flache Leuchteinrichtung mit 2,5 mm Aufbauhöhe. Diese wird nach dem Test von hinten her eingesetzt und mechanisch fixiert. Dazu eignet sich Acryldichtmasse, die zwar gut trocknen muss, aber auch gut hält. Mit Silikon sollte man erst gar nicht anfangen, denn seine Spuren verhindern alles weitere Kleben.

Unter der Voraussetzung, dass die eingesetzte Leuchteinrichtung mit der letzten Scheibe plan liegt und alles trocken ist, folgt eine Versiegelung der Unterseite. Auch diesmal mit Epoxidkleber und PVC, aber mit einer dünnen Folie. Die lässt sich leicht aus Paketbändern gewinnen, aber nicht aus allen (etwa aus Marke Tesa 4124). Man kann in mühseliger Kleinarbeit mit Benzin den Kleber zu entfernen, besser ist aber, ihn zu deaktivieren, indem man das Paketband auf ein Stück Schreibmaschinenpapier klebt. Man hat dann bis zu 5 cm breite Streifen aus PVC-Folie, um mit reichlich Kleber die Öffnungen der Unterseite abzudecken. Fixierung beispielsweise mit Malerkrepp.

Abschließend kann die umlaufende Höhlung zwischen Scheiben mit schwarzem Acryldichtstoff geschlossen werden, dazu kommt eine Abdeckung der Unterseite mit Bastler-Filz. Befestigung mit Teppichkleber oder sonstigen Kontaktklebern, wobei das sichtbare Papier nicht weiter stören dürfte. **Bild 4.5** zeigt das Ergebnis der Mühen. Es lohnt sich.

Beleuchtetes Spielzeug

Eine schöne Anwendung ist die Beleuchtung von Modellen, sofern sie wenig großflächige Metallteile enthalten. Am Beispiel eines Automodells können die beiden wichtigsten elektrischen Aufgaben besprochen werden. Das sind der gleichzeitige Betrieb von unterschiedlichen LEDs und die gute Nutzung des vorhandenen Bauvolumens für den magnetischen Aufnehmer. Es soll daher ein Modell mit 2 weißen Frontlichtern und 2 roten Hecklichtern ausgerüstet werden.

Gleichzeitiger Betrieb von unterschiedlichen LEDs ist nicht möglich, da sie sich gegenseitig belasten und die LED mit dem geringeren Spannungsabfall gewinnt. Für ausgleichende

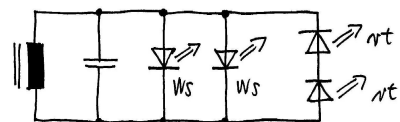


Bild 4.5 Der Bierfilz nach Bild 4.4 im Betrieb. Die Erregerspule befindet sich unsichtbar unter der Tischplatte.

Vorwiderstände ist meistens nicht genügend Energie vorhanden. Es zeigt sich aber, dass bei der Versorgung aus einer Induktivität oder einem Schwingkreis auch die LED mit der höheren Spannung zum Leuchten kommt, wenn man sie aus der entgegengesetzten Halbwelle speist. Eine der Eigenschaften dieser Schaltungen besteht ja darin, dass sich die Spannung an die Last anpasst. Man sortiert die LEDs daher so, dass 2 Gruppen entstehen, die zumindest ähnliche Spannungsabfälle haben. Das wären im vorliegenden Fall 2 weiße LEDs parallel und 2 rote LEDs in Serie. **Bild 4.6** zeigt die Schaltung.

Bild 4.6

Schaltungstrick zum gleichzeitigen Betrieb von unterschiedlichen LEDs.

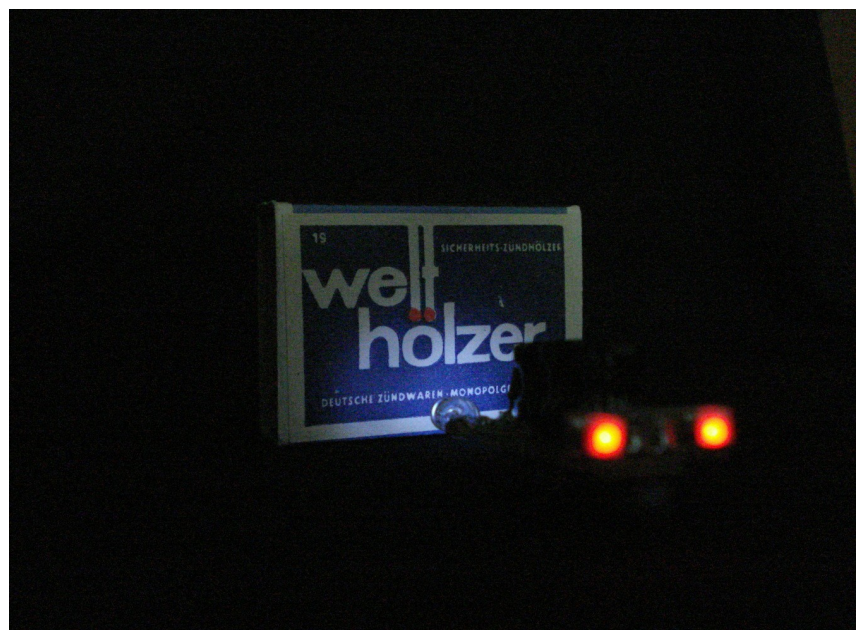
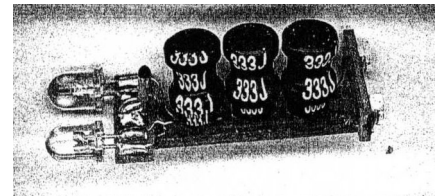


Kleine Spulen im cm-Format müssen einen Ferritkern haben, sonst bringen sie wenig. Wichtig ist eine längliche Bauform, bevorzugt ein bedrahteter Stab- oder Rollenkern. Solche Teile haben Standardformate. Steht mehr Volumen zur Verfügung, kann und sollte man mehrere Kerne zusammenschalten, das erhöht die Leistung. Dabei zeigt sich, dass eigentlich nur die Reihenschaltung geeignet ist, die Parallelschaltung dagegen nicht. Man könnte das genauer untersuchen. Möglicherweise entsteht eine Art Kurzschlusseffekt, den man von Transformatoren kennt, wenn man Wicklungen parallelschaltet, die nicht exakt gleiche Windungszahl haben.

Bei Zusammenschaltung ist die Polarität wichtig und Verpolung ist bei freier Verdrahtung eine wesentliche Fehlerquelle. Das ist besonders bei Rollenkernen unübersichtlich, weil es nicht nur um Polung, sondern zusätzlich um die identische Wicklungsrichtung in den einzelnen Spulen geht. Man muss daher empfehlen, der Reihe nach die 2. bis zur letzten Spule versuchsweise umzupolen und zu prüfen, ob es heller oder dunkler wird. Bei hoher Generatorleistung geht das auch ohne Kondensator im Resonanzkreis. Den sollte man ganz zum Schluss einbauen, da die räumliche Anordnung der Einzelspulen die Gesamtinduktivität beeinflusst. **Bild 4.7** zeigt den Aufbau für ein kleines Auto-Modell.

Bild 4.7

Beleuchtung für ein Auto-Modell mit der Schaltung nach Bild 4.6. Es sind 3 Spulen zu 33 μH in Reihe geschaltet (Typ Fastron 09P). Für den Kondensator ergab sich, je nach Abstand der Spulen, ein Wert zwischen 160 und 220 pF. Die Helligkeit steigt mit mehr Spulenabstand etwas an.



Viele Drosseln sind mit einem Schrumpfschlauch geschützt, für den dünnen Draht, mitunter aber auch zur Fixierung der Anschlussdrähte. Nicht bei allen Fabrikaten sind sie in den Ferritkern eingeklebt. Will man aus Platzgründen den Schrumpfschlauch entfernen, muss man an einem Muster vorab prüfen, ob es überhaupt geht. Wenn es gelingt, werden die Teile deutlich kleiner.

Magnetboard einmal anders

Vor einer besonderen technischen Herausforderung steht man, wenn man beleuchtete Objekte mit einem Haftmagneten ausstattet, etwa für Spielfiguren. Es sind hier 2 Effekte, die das Leben schwer machen. Da ist zunächst die Sättigung des Ferrits auf der Empfangsseite, womit die Drossel ihre Wirkung verliert. Dazu sind gute Magnete teuer und man wird sie daher nicht mit einem zweiten Magnet halten, sondern eher mit einem Gegenpol aus Eisen. Im einfachsten Fall ist das ein Blech wie bei einem normalen Magnetboard. Da Blech aber leitfähig ist, ergeben sich Wirbelstromverluste, die das Feld des Generators weitgehend zusammenbrechen lassen.

Das erste Problem lässt sich dadurch umgehen, dass man nur Luftspulen verwendet. Diese müssen aber für die Wirksamkeit eine gewisse Fläche haben. Wird Ferrit in der Spule benötigt, muss ein Abstand zum Haftmagnet eingehalten werden, den man möglichst vorab ausprobiert. Bei einem Trommelkern kann man davon ausgehen, dass der erlaubte Abstand zum Magnet etwa der Länge des Kerns entspricht. Dabei ist die Ausrichtung der Spule durch das Generatorfeld festgelegt, der Haftmagnet kann aber möglicherweise gedreht werden. Auch der Aufbau des Magneten spielt eine Rolle. So gibt es bei scheibenförmigen Magneten, die meist einem kurzen Stabmagneten entsprechen, auch Varianten, die eher einen Hufeisenmagneten nachbilden. Ihre Rückseite ist dann magnetisch nahezu neutral. Ob Magnete elektrisch leitfähig sind, spielt dabei eine untergeordnete Rolle.

Die Lösung des zweiten Problems ist etwas aufwändiger. Dünnes Eisenblech ist billig und liefert sehr gute Haftung. Will man die Leitfähigkeit unterbinden, muss man es in etwa 1 cm - breite Streifen schneiden, die sich nicht berühren. Da führt kein Weg daran vorbei. Auch ein Gitter ist keine Lösung, es sei denn, es wurde isolierter Eisendraht verflochten. Ist die Fläche größer und soll alles plan liegen, ist die Herstellung nicht so einfach. Wer Kontakte zum Transformatorenbau hat, kann sich die "I" von kleineren EI-Kernen beschaffen und diese flächig montieren. Ein planes Eisenblech in ähnlichem Format liefern Heftstreifen mit Metall-Deckleiste aus dem Bürohandel. Bei günstigem Einkauf kostet es damit nur einige Euro, um eine Fläche im Format DIN A 4 entsprechend magnetisch auszurüsten. Der Abstand zwischen Magnet und Blechen darf nicht sehr groß sein, sonst sinkt die Haftfestigkeit. Man klebt die Blechstreifen daher hinter eine möglichst dünne, harte Kunststofffläche, etwa aus Melamin-Hartpapier (Resopal) vom Schreiner.

Bei punktueller Befestigung für ein Brettspiel gibt es keine Probleme. Als Gegenstück zum Magnet kann man hier Eisennägel mit breitem Kopf (Dachdeckerstifte) oder normale Reißnägeln verwenden, die man bei farblich passendem Plastiküberzug nicht einmal abdecken muss.

Auch die berühmten Eisenfeilspäne und Eisenpulver lassen sich mit Kunststoff binden und ergeben eine nichtleitende Fläche mit magnetischen Eigenschaften. Die Beschaffung dürfte aber schwierig sein. Ähnlich liegt das bei Ferritkacheln, die für verschieden Zwecke angeboten werden. Wer einen Gipser gut kennt, sollte ihn auf Wandputz mit Ferritfüllung ansprechen. Auch das gibt es, etwa für großflächige Magnetboards im Innenausbau. Für das Hobby wird ein Mustergebinde in jedem Fall reichen.

Die praktische Realisierung von beleuchteten Magnetsteinen für ein alternatives Magnetboard erfordert einen gewissen mechanischen Aufwand. Man kann froh sein, wenn man als Fertigteil ein preisgünstiges Gehäuse und einen passenden Spulenkörper für eine Luftspule findet. Sollen mehrere davon hergestellt werden, ist auch eine Platine zweckmäßig, obwohl einmal mehr die simple Schaltung auch frei gelötet werden könnte. **Bild 4.8** zeigt die notwendigen Komponenten. Die gezeigte Ausführung ist etwas aufwändiger und enthält, so man will, einen Blinkgeber für die LED. Der Kondensator für den Resonanzkreis ist aus rein mechanischen Gründen auf zwei Bauteile verteilt, die als Befestigung für den Spulenkörper dienen. Die Befestigung des Magneten hängt von seiner Bauform ab, wobei die aktive Fläche des Magneten und die Außenkontur des Gehäuses auf gleicher Ebene liegen sollten.

Bild 4.8

Das Material für einen leuchtenden Magnetstein. Als Gehäuse dient ein Modulgehäuse OKW A8025159 mit 25x25x15 mm, in der Darstellung bereits mit Bohrung und sichtbarer LED im SMD-Gehäuse. Daneben die Platine in doppelter Ansicht mit dem Spulenkörper EPCOS B65940BT1, der von zwei Kondensatoren zentriert wird. Ein kleiner Neodym-Rundmagnet wird in einen Halter aus PVC-Flachmaterial eingeklebt, der die rückseitige Abdeckung darstellt.

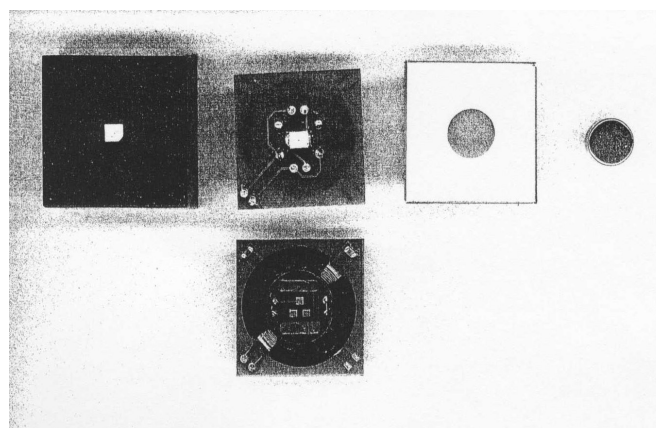


Bild 4.9 zeigt die Schaltung. Die Grundsaltung kann mit einer zweiten Platine erweitert werden. Der Baustein 74HC4060 teilt dann die Oszillatorfrequenz und schaltet direkt die LED. Im Bild ist der maximal mögliche Teilerfaktor realisiert, womit die LED im 0,5 sec-Takt blinkt. Mehr Untersetzung könnte mit einem nachgeschalteten 74HC4040 erreicht werden.

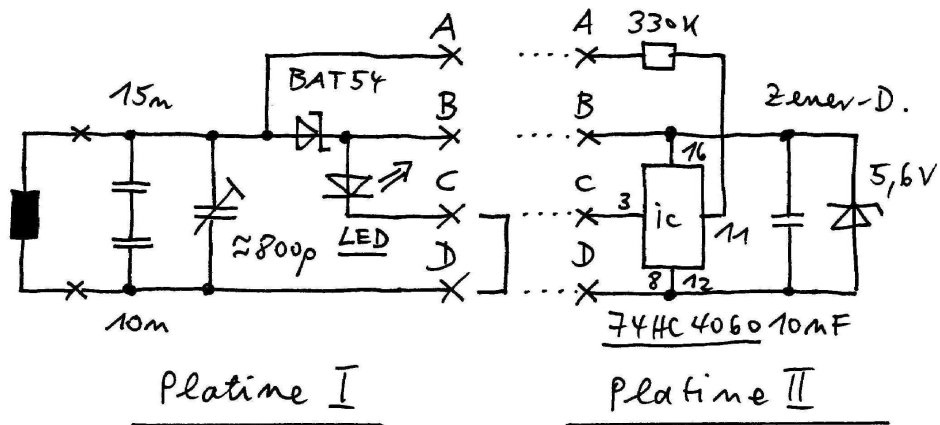


Bild 4.9 Schaltung des Magnetsteins entsprechend Bild 4.8. In der Grundsaltung ist die Brücke CD gelötet. Mit der zweiten Platine blinkt die LED. Der nominelle Kondensatorwert ist 6,8 nF, aufgeteilt auf 6 nF Festwert + etwa 800 pF zum Abgleich. Platz dafür ist an den Ecken der Platine. Die Spule besteht aus 500 Windungen Lackdraht 0,15 Cul.

Kapitel 5 / Leuchtende Objekte im Raum

Die Erzeugung von räumlichen Feldern

Bei flächigen Rahmenspulen stellt man fest, dass auch in gewissem Abstand eine magnetische Wirkung vorhanden ist, die aber schnell abnimmt. Als Erfahrungswert kann man in Gedanken aus der Breite der Spule und dem nutzbaren Abstand ein gleichseitiges Dreieck oder auch Pyramide bilden, die diesen Bereich beschreibt. Vor oder über einer Spule mit einer Fläche von 1 x 1 Meter reicht das nutzbare Volumen bis zu 85 cm in den Raum. Für Experimente im Innenbereich bieten sich Fensterumrahmungen (drahtlose Weihnachts-Deko) oder Türrahmen (beleuchtetes Schlüsselloch) an. Auch ein Mobile mit Glühwürmchen wäre in der Nähe dieser Spulen zu betreiben. Natürlich kann man versuchsweise auch ein ganzes Zimmer oder die Wohnung verkabeln, aber man wird dann erhebliche Leistung benötigen und auch die erzeugten Felder werden dann den privaten Raum verlassen. Das wird hier nicht weiter verfolgt.

Als Leitung kommt Elektrikerschalt Draht infrage, den man bei der Aufputz-Variante in einem dünnen Kabelkanal verlegt. Für eine Tischplatte ist auch Mantelleitung oder dicke Schlauchleitung verwendbar. Muss es flacher sein, hilft Stegleitung oder im Extremfall Kupferband. **Bild 5.1** wirft einen Blick in das Entwicklungslabor. Man sieht, dass die Probeaufbauten robust und stromorientiert sind.

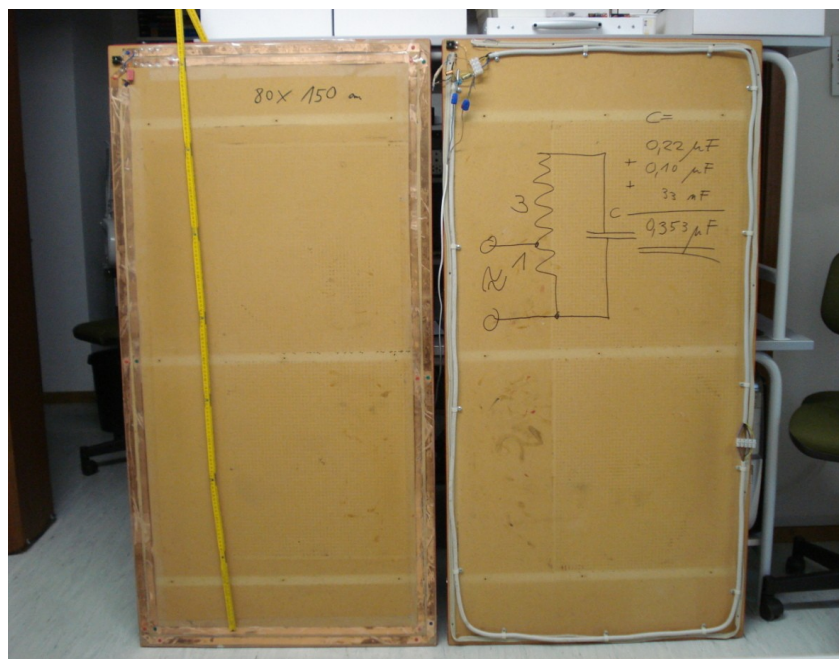
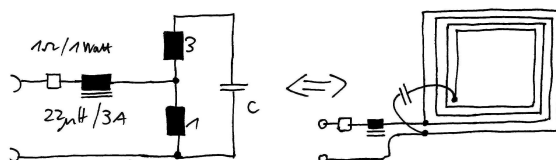


Bild 5.1 Ein Blick in das Entwicklungslabor. Mit zwei alten Tischplatten werden Windungszahlen optimiert und die Kopplung von Resonatoren untersucht.

Für die Experimente sollte man Generatoren mit linearer Endstufe verwenden, den kleinen Audioverstärker oder den Generator nach Bild 2.5. Auch ein Widerstand und eine Induktivität in der Zuleitung sind zu empfehlen und tragen zur elektrischen Stabilität bei. Grund ist, dass die großen Resonatoren eine merkliche Rückwirkung auf den Generator haben. Bei Ausführungen mit geschalteter FET-Endstufe summieren sich die vielen Induktivitäten und Kapazitäten bei schlechtem Abgleich möglicherweise zu einem kompletten Kurzschluss der Endstufe, ohne dass man die Gefahr sofort erkennt. Das sollte vermieden werden.

Die optimalen Windungszahlen sind bei diesen Formaten recht gering und liegen zwischen 2 und 4. Mehr Windung liefert erfahrungsgemäß höhere Dämpfung. Die passenden Kondensatoren müssen, wie schon gesagt, hochwertig sein, mit Werten im Bereich von 0,22 bis 2,2 μF . **Bild 5.2** zeigt Beispiele. Bei der Anzapfung der Spule hat man aus geometrischen Gründen nur wenig Möglichkeiten. Die gezeigte Schaltung belastet den Generator mit etwa 25 Ohm, was recht hochohmig ist. Optimal wäre die Anzapfung bei einer halben Windung, was hier nicht geht. Schon die rechnerisch günstigere Lösung mit 4 + 1 Windung bei etwas kleinerem Kondensatorwert ist praktisch schlechter, weil die Dämpfung steigt. **Bild 5.3** zeigt eine Alternative, bei der der Kondensator geteilt ist. Sie lässt sich mit einer üblichen Audiostufe besser aussteuern. Allerdings ist die Optimierung aufwändiger, weil sowohl die Summe der Kapazitäten im Hinblick auf die Resonanz, wie auch ihr Verhältnis in Bezug auf die Dämpfung festgelegt werden muss.

Bild 5.2

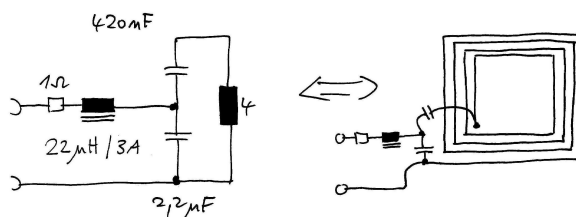


Beispiele von größeren Resonatoren. Die Windungszahl ist jeweils 4.

Beispiel 1 : Spule um ein **Fenster**, Format 140 x 150 cm, Schaltdraht 1,5 mm² in Kabelkanal. Kondensatorwert 0,22 μF + 68 nF.

Beispiel 2 : **Tischplatte** 80 x 150 cm, Drehstrom-Mantelleitung, 1 Ader unbenutzt. Kondensatorwert 0,33 μF + 22 nF.

Bild 5.3



Resonator nach Bild 5.2. mit kapazitivem Abgriff. Der Anschluss kann bei dieser Schaltungsweise niederohmiger eingestellt werden.

Ein gleichmäßiges Magnetfeld herrscht in jeder "langen" Spule, unabhängig davon, wie man sie technisch realisiert. Bei Wechselspannung leidet man allerdings darunter, dass der induktive Widerstand mit dem Quadrat der Windungszahl zunimmt. Lang passt also nicht so recht.

Eine Näherung daran stellen die Helmholtz-Spulen dar. Das sind zwei (runde) Spulen, die in gleicher Richtung vom Strom durchflossen werden und einen Abstand haben, der ihrem Durchmesser entspricht. Zwischen ihnen ist das Feld sehr gleichmäßig, in Stärke und Richtung. Man kann das Prinzip ohne Einschränkung auch auf Resonanzkreise übertragen, etwa auf Varianten nach Bild 5.2. Elektrisch werden die beiden Spulen parallel geschaltet, man führt also vom Generator eine Zwillingsleitung zu einer Spule und eine zweite zur anderen. Auf die Polarität ist zu achten, sonst bricht das Feld genau zwischen den Spulen zusammen. Den Effekt merkt man aber schnell. Der vergleichsweise hohe Lastwiderstand der einzelnen Spule ist hier von Vorteil.

Es spricht nichts dagegen, das Prinzip auf noch mehr Resonanzkreise auszudehnen, die elektrisch alle parallelgeschaltet werden. Die lange Spule wird also durch eine Reihe von Einzelspulen angenähert, die einen merklichen Abstand haben. Eine derartige Struktur könnte man sich auch für eine Ausstellungs-Vitrine vorstellen. Ein gleichmäßiges horizontales Feld erhält man hier mit jeweils einer Spule hinter der Tür und einer in der Rückwand. Für ein vertikales Feld wird eine Spule im Boden und auf der Oberseite benötigt, bei großer vertikaler Ausdehnung dazu noch eine dritte auf halber Höhe, vielleicht versteckt in einem Einlegeboden.

Bei der Beschäftigung mit großen Resonatoren, die man antennenartig im Raum bewegen kann, stößt man auf einige Überraschungen, obwohl sie eigentlich naheliegend sind. In Bild 5.1 sind 2 baugleiche Resonatoren zu sehen. Wird nur der eine mit Energie versorgt, sammelt der zweite rein passiv die "verstreuten Feldlinien" wieder ein. Eine LED mit Spule leuchtet daher an beiden Platten fast gleich hell, obwohl nur die eine direkt mit Energie versorgt wird. Übertragen auf das schon beschriebene Magnetboard bedeutet das, dass man noch weitere direkt danebenhängen kann, die lediglich einen Schwingkreis auf der Resonanzfrequenz enthalten. Es gibt weitere Anwendungen für das "Einsammeln" von Feldlinien. Hat man als Beispiel eine induktiv versorgte LED, die so weit von der Generatorspule entfernt ist, dass sie nicht mehr leuchtet, so kann man mit einem größeren, rein passiv arbeitenden Resonator in ihrer Nähe das Feld so konzentrieren, dass die LED wieder leuchtet. Das ist konstruktiv interessant, weil man den passiven Resonator in der Nähe des kleinen Lämpchens gut verstecken kann (Tapete, Tischplatte). Man hat damit faktisch die Spule der LED um ein Mehrfaches vergrößert, ohne dass es auffällt.

Passive Resonatoren sind eine große Spule mit Kondensator, sonst nichts. Ein abgeschalteter Generator mit Schwingkreis ist unbrauchbar, da die stromlose Elektronik den Schwingkreis dämpft. Bleibt die Frage, wie man einen passiven Resonator abgleichen kann. Am einfachsten ist wohl, mit einem Oszilloskop hochohmig die Spannung an den beiden Bauteilen zu messen

und aus einem Funktionsgenerator mit einer kleinen Drahtschleife etwas Energie einzukoppeln. Auch die hochohmige Einspeisung über einen Widerstand (ab 1 k Ω) ist möglich.

Lampen in 3 D

Räumlich wirkende Felder können dazu dienen, Kabel und Batterien einzusparen. Mit der von den Herstellern versprochenen (!) langen Lebensdauer der LEDs lassen sich so absolut wartungsfreie Installationen realisieren. Für die überaus praktische Beleuchtung von Türklinken oder Schlüssellöchern kann die Konstruktion des "Bierfilzes" sinngemäß verwendet werden. Für eine Holztüre ist das dann eher eine Schreinerarbeit. Eine Glastüre wäre eine Herausforderung. Man könnte auch genau in der Mitte der Glasfläche eine LED positionieren, damit nachts niemand gegen die Tür rennt. Ähnlich wie bei der Weihnachts-Deko im Fenster besteht hier die handwerkliche Kunst darin, die notwendige Spule möglichst groß, aber gleichzeitig unauffällig zu gestalten. **Bild 5.4** zeigt eine Lösung für die Präsentation von Produkten in einer Vitrine oder auf einem Tisch. Hier besteht fast die ganze sichtbare Struktur aus einer freitragende Spule zum Empfang. Sie wurde mit Hilfe eines geschlitzten Plastikrohrs gewickelt und dann verklebt und lackiert. Der Kondensator ist klein und sitzt hinter der blauen SMD-LED.

Bild 5.4

Die Markierung von besonderen Produkten.

Luftspule mit 6 cm Durchmesser.
100 Wdg. 0,3 μ F + 470 pF.

Dimensionierung auf kurze Reichweite und hohe Helligkeit. Mehr Reichweite erhält man mit höherer Windungszahl.

Schaltung nach Bild 1.7.



Wirklich gute Lichteffekte ergeben sich besonders dann, wenn nach grobem Augenschein weder Kabel noch Batterien der Energielieferant sein können. Solche Anwendungen sind eher dem künstlerischen Bereich oder auch dem Spielzeug zuzuordnen. Für die Frage nach der hier erreichbaren Helligkeit sind einige prinzipielle Dinge zu betrachten. Zunächst hat das Auge eine logarithmische Kennlinie über etliche Zehnerpotenzen. Ein wenig Mehr an Helligkeit bedeutet daher eine multiplikative Zunahme der Lampenleistung. Dass die vorgestellten Projekte überhaupt realisierbar sind, ist darauf zurückzuführen, dass in den letzten Jahren der Wirkungsgrad der LEDs um viele Zehnerpotenzen zugenommen hat. Bei derzeit etwa 20 % Wirkungsgrad würde die gedachte Verbesserung auf 100 % die Helligkeit aber nicht mehr wesentlich erhöhen. In diesem Punkt ist die theoretische Grenze fast erreicht.

Mehr Helligkeit bedeutet daher prinzipiell Abdunklung oder mehr Generatorleistung, die aufgrund der Eigenschaften des Auges überproportional bereitgestellt werden muss. Auch hier gibt es Grenzen, denn man möchte keine Hochspannung auf den Resonatoren oder Kondensatoren mit Wasserkühlung. Irgendwann gewinnen dann auch die Nebeneffekte, die in **Kapitel 7** besprochen werden, vermehrt an Bedeutung. Selektion von aktuellen LEDs bedeutet in diesem Zusammenhang nicht die Selektion nach Wirkungsgrad, sondern nach innerer Dämpfung oder nach fertigungsbedingten Leckströmen, damit sich an einem Schwingkreis auch bei kleinster Energiezufuhr die minimale Spannung von einigen Volt aufbauen kann, die zum Leuchten notwendig ist.

Auf die Spitze treiben kann man es mit Glühwürmchen, die an der Wand sitzen oder als Mobile im Raum schweben. **Bild 5.5** zeigt ein Exemplar. Am natürlichsten sieht es aus, wenn die LED die Farbe Blaugrün / Cyan / Türkis hat. Das ist eine Wellenlänge um 488 Nanometer (488 nm). Selektion mit 2/3 Ausschuss war hier notwendig. Die gesamte Installation besteht aus einer Spule rund um ein Zimmerfenster entsprechend Bild 5.2 mit einem Mobile im Innenbereich und einigen Glühwürmchen, die außen an der Hauswand im Efeu sitzen.

Bild 5.5

Ein Glühkäfer. Ohne Kunststoffverguss könnte er noch schlanker sein.

Spule 33 mH, Typ Fastron 09P,
Keramik SMD-Kondensator 680 p
Selektierte LEDs 488 nm,
wahlweise 3 oder 5 m
Linse leicht trübe. Schaltung
nach Bild 1.7.



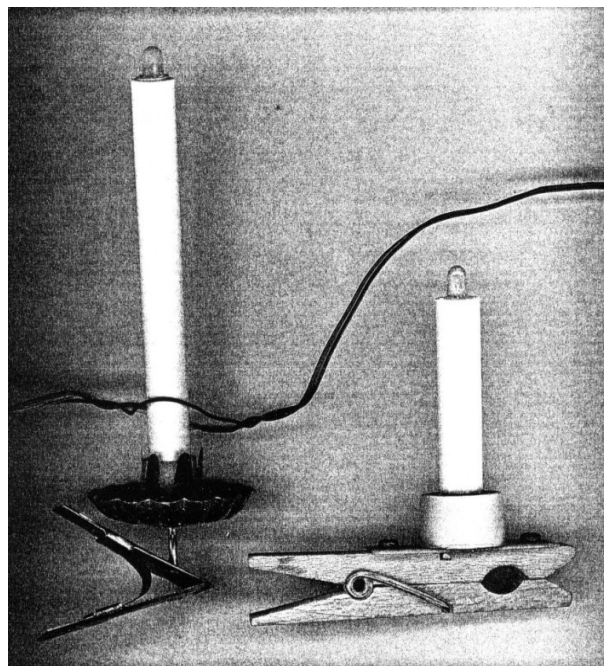
Ein weiteres Thema, das die Konstrukteure weltweit umtreibt, ist die Weiterentwicklung der Weihnachtskerze. Neben Lichterketten mit LEDs gibt es inzwischen auch "Kerzen", die auf Funkkommando reagieren, mit der Batterie in einer angehängten Weihnachtskugel. Auch die Kerze als solche hat merkliches Volumen und wäre für eine Batterie geeignet.

Für eine eigene Konstruktion muss man zunächst eine passende LED suchen, im einfachsten Fall einen 5 mm-Typ, dessen Oberfläche man zur Streuung etwas aufraut. Neben dem unnatürlich wirkenden Kaltweiß gibt es inzwischen auch verschiedene Warm- oder Goldtöne, die beim Wirkungsgrad nicht schlechter sind.

Lästig ist bei Lichterketten die feste Verbindung zwischen Licht und Kabel. Das lässt sich schon einmal verbessern. Ein Grundversuch zeigt, dass eine wild durch den Baum geschlängelte Litze noch so wenig Induktivität hat, dass die vorgestellten Generatoren ausreichend Strom durch diese Leitungsschleife treiben können. Man benötigt also Kerzen, die am unteren Ende eine Drossel enthalten und am oberen Ende die LED. Liegt die Drossel nicht ganz am unteren Ende, sind auch Halter aus Metall möglich, ohne dass ein induktiver Kurzschluss entsteht. Ein Muster ist in **Bild 5.6** zu sehen. Im Prinzip sind alle Grundschaltungen möglich, nach Bild 1.4 oder nach Bild 1.7. Die Dimensionierung des Musters kann man der Tabelle entnehmen. Die Verlegung ist ganz einfach. Man platziert die Kerzen, wo man möchte und wickelt dann der Reihe nach um den Fuß eine schwarze Litze, am besten eine hochflexible. Bei wirklich großen Bäumen und Problemen mit der Eigeninduktivität der Leitung kann man natürlich auch schwarze Zwillingslitze (0,5 mm²) verwenden und die Kerzen an passender Stelle dazwischenklemmen. So elegant ist das aber nicht mehr.

Bild 5.6

Beispiele für Weihnachtskerzen.
Links die Einfachversion mit
Kabelspeisung, rechts eine
drahtlose Variante.
Die aufwändige Spule ist bei
ihr geschickt kaschiert.



Die Form einer Kerze entspricht in idealer Weise einer Ferritantenne. Sie war in der Mittelwellenzeit sehr gängig und Ferritstäbe waren leicht zu beschaffen. Heute sind diese Teile nur noch für Funkuhren üblich. Man hat also Chancen, zumindest Stäbe mit einer Länge von 5 cm zu erhalten, unbewickelt oder auch vorbereitet für 77,5 kHz. Im zweiten Fall kann man versuchen, den Schwingkreis mit zusätzlichem Kondensator tiefer zu stimmen. Meist ist der vorhandene Kondensator aber an der Spule festgeklebt und alles wird dann noch dicker und eigentlich ist die Windungszahl zu gering. Man sollte also von unbewickelten Stäben ausgehen.

Wie bei allen diesen Lampen gilt die Regel, dass wenig Wicklung hohe Helligkeit bei geringer Reichweite und viel Wicklung geringe Helligkeit bei großer Reichweite bedeutet. Bei Ferritstäben hat man also mehrere Möglichkeiten, die ebenfalls in der Tabelle aufgeführt sind. Für die helle Variante kann man den Stab einlagig frei Hand bewickeln. Das geht ganz gut, wenn man immer "10-windungs-weise" den Draht locker aufwickelt und dann die Windungen zusammenschiebt. Abschließend wird die Wicklung mit Sekundenkleber fixiert. Einspannen in die Handbohrmaschine ist weniger zu empfehlen.

Für wirklich große Reichweite wird wesentlich mehr Wicklung benötigt, etwa für den Fall, dass man den Baum zwischen 2 Helmholtzspulen stellen möchte (eine am Boden, eine an der Zimmerdecke) und alles gut "ausgeleuchtet" sein soll. Bei Beschäftigung mit dem Thema bekommt die Reichweite als solche ja auch eine sportliche Komponente. Da die verfügbaren Ferritstäbe leider ein geringes μ haben, sind für die wünschenswerten 100 mH leicht 1000 Windungen nötig. Man muss also einen separaten Spulenkörper, etwa für Schalenkerne, entsprechend bewickeln, dann mit dem Ferritstab verkleben und dann alles abgleichen. Ein Muster zeigt Bild 5.6. Es ist, bei geringer Helligkeit, die Lampe mit der weit und breit größten Reichweite. Besser wird es nur noch mit längeren Ferritstäben aus alten Röhrenradios.

Einen Kompromiss mit mittlerer Reichweite ist eine Fertigdrossel auf Rollkern, die mit einem Ferritstab verlängert wird. Sie muss fest und mit möglichst geringem Luftspalt mit dem Stab verklebt werden. Falls Schrumpfschlauch stört, muss er an der Stirnseite der Drossel entfernt werden. Die Induktivität der Spule steigt dabei nur um etwa 30 %, die Bündelung des Feldes wird aber merklich stärker. Abgleich erfolgt nach dem Verkleben der beiden Magnetteile. Man kann die Spule am oberen Ende der Kerze montieren und hat dann gleich Befestigungspunkte für die LED und die Kapazität.

Tabelle zur Dimensionierung von Kerzen mit Schaltung nach Bild 1.7.

> **Kerze nach Bild 5.6 für Kabelspeisung :**

33 mH (Fastron 09P), 680pF (Keramik NP0).

> **Kerze mit bewickeltem Ferritstab :**

Wicklung 1-lagig, etwa 150 Wdg. 0,22 Cul, 30 ... 40 nF (Folie).

> **Kerze mit Ferritsstab + Drossel :**

47 mH (Fastron 11P), 150 + 220 pF (Keramik NP0).

> **Kerze "drahtlos" nach Bild 5.6 :**

1700 Wdg. 0,1 Cul auf Spulenkörper RM8, etwa 220 pF (Keramik NP0).

Kapitel 6 / Energieverteilung über lange Leitungen

Netz-Zwillingsleitung, wie sie in Kapitel 3 vorgeschlagen wird, ist vergleichsweise induktionsarm. Man misst bei Leitungen mit $2 \times 0,75 \text{ mm}^2$ vielleicht $0,7 \mu\text{H} / \text{m}$, wenn sie am Ende kurzgeschlossen sind. Bei größeren Wechselströmen entsteht damit ein messbarer Spannungsabfall, der den angekoppelten Verbrauchern nicht zugutekommt und bei langen Leitungen durchaus stören kann. Auch diese Induktivität lässt sich kapazitiv kompensieren. Man schaltet dazu einen Kondensator in Reihe, der auf der Betriebsfrequenz mit der Leitung einen Serienresonanzkreis bildet. Anhand der allgemeinen Formeln oder mit einem Messaufbau nach Bild 6.1. benötigt man im Beispiel $3,7 \mu\text{F}$ für 10 m Leitung. Da man bei der Länge der Leitung variabel ist, kann man die Länge auf glatte Kapazitätswerte beziehen. Umgerechnet werden dann 8,9 m Leitung mit genau $3,3 \mu\text{F}$ kompensiert.

Man darf von der Methode keine Wunder erwarten, aber eine Senkung des Spannungsabfalls auf 50 oder sogar 30 % ist möglich. Das bedeutet, dass die Leitungen entsprechend länger sein dürfen, ohne dass man den Generator aufrüsten muss. Auch für andere Leitungsarten mit höherer Induktivität ist die Vorgehensweise hilfreich. Ihre Induktivität muss nur definiert und konstant sein, dann lässt sie sich auch kompensieren. Die verwendeten Kondensatoren sollen verlustarm und belastbar sein. Neben einschlägigen Typen (WIMA MKP10 o. äh.) sind Folienkondensatoren aus dem Lautsprecherbau geeignet und dazu möglicherweise preisgünstig. Sie sind auch eng toleriert. Ob bipolare Tonfrequenz-Elkos geeignet sind, müsste man ausprobieren. Im Außenbereich ist ja mit Frost zu rechnen und das passt schlecht zu wässrigen Elektrolyten.

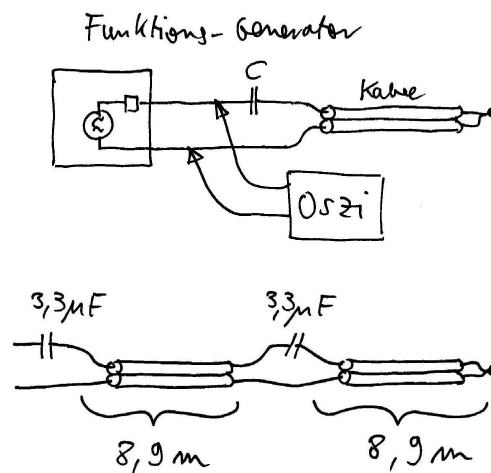
Mit der Länge der Leitung steigt ihre Induktivität und die notwendige Kapazität nimmt ab. Den Kondensator wird man üblicherweise direkt am Generator anbringen und im Wert auf die Länge der verlegten Leitung abstimmen. Da es sich um einen Schwingkreis handelt, tritt hinter dem Kondensator eine entsprechend hohe Spannung auf. Für manche Zwecke kann es aber von Vorteil sein, ganz anders zu denken. Man ordnet dann einer definierten Kabellänge einen bestimmten Kondensator zu und schaltet bei längeren Entfernungen immer diese "Baugruppen" in Reihe (**Bild 6.1**). Elektrisch ist das bis auf die Wirkung der Kabelkapazität identisch, denn bei einer Reihenschaltung von Bauteilen spielt die Reihenfolge keine Rolle. Man kann damit eine bestehende Verkabelung erweitern, ohne am Bestand viel ändern zu müssen. Die Kabelstücke lassen sich natürlich auch anders aufteilen, etwa in der Form $2,2 \mu\text{F} + 13,4 \text{ m}$ oder $4,7 \mu\text{F} + 6,2 \text{ m}$.

Eine weitere Überlegung betrifft Abzweigungen in der Versorgungsleitung. Bei komplexerer Verdrahtung möchte man vielleicht einen Verbraucher versorgen, der etwas abseits von der Versorgungsleitung liegt. Oder der Bedarf entsteht erst, nachdem alles verlegt ist. Eine passende Schaltung zeigt **Bild 6.2**. Hier liegt eine Drossel im Hauptstrom und ein Teil des

Stromes macht einen dosierten Umweg über eine "Stichleitung". Diese ist nach Möglichkeit kapazitiv kompensiert. Die Einkopplung von Verbrauchern entsprechend Kapitel 3 ist dabei an allen Stellen möglich. Die Drossel kann auch fehlen und der Gesamtstrom läuft dann induktionsarm in einer sternförmigen Leitungsstruktur.

Bild 6.1

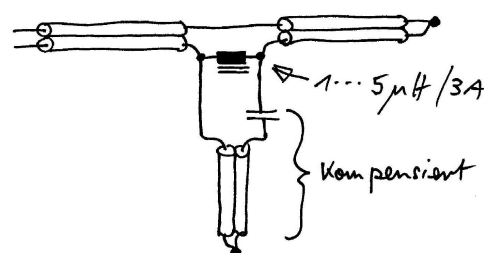
Die kapazitive Kompensation der Kabel-Induktivität. Zu jeder Kabellänge gehört ein fester Kapazitätswert, der vom Kabeltyp abhängt, hier beschrieben mit $0,7 \mu\text{H} / \text{m}$. Betriebsfrequenz ist $31,5 \text{ kHz}$.



Verteilung der Gesamtkapazität auf feste Kabellängen.

Bild 6.2

Der Anschluss eines seitlichen Zweiges an der Versorgungsleitung. Die zusätzliche Leitung ist kapazitiv kompensiert. Die Induktivität legt den Grad der Auskopplung fest und kann auch fehlen.



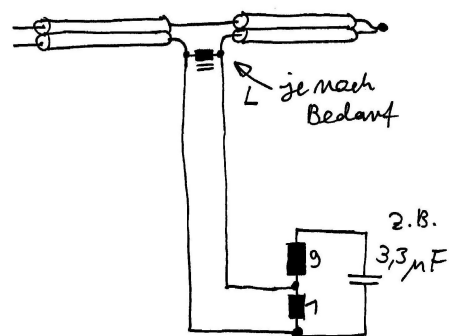
Übliche Verbraucher werden induktiv angekoppelt, durch einen Schlitz zwischen den Drähten oder durch ein Ferritteil als Transformator. Mitunter ist es aber wünschenswert, einen größeren Resonator aus einer allgemeinen Versorgungsleitung zu speisen, sei das eine Struktur wie das Magnetboard oder eine Installation mit künstlichen "Blumen" wie in **Bild 6.3**. Dort befindet sich im Boden der Vase ein blumentopf-großer Resonator, in den die magnetischen Aufnehmer der Exponate eingestellt werden müssen. Für diese Zwecke ist es am besten, den Strom der Versorgungsleitung mehr oder weniger über den Schwingkreis zu führen, also das Schaltungskonzept nach Bild 6.2 zu verwenden. **Bild 6.4** zeigt exemplarisch die Schaltung für die gezeigte "Blumenvase". Da nur Wechselspannung anliegt, kann die Anordnung mit wenig Schutzlack auch frei bewettert im Garten stehen oder eingegraben werden. Aus eigener Anschauung stammt die Beobachtung, dass derartige Lämpchen im Vorgarten ein ungeahntes Eigenleben entwickeln, das sich mit Magnetismus kaum erklären lässt. Manchmal liegen Lämpchen irgendwo im Gebüsch, manchmal stecken sie an falscher Stelle im Boden und leuchten dann nicht. Verschwunden ist noch nichts. Das lässt sich wohl am besten mit Neugier, Schreck und Flucht erklären.



Bild 6.3 Eine Installation. Blumenvase mit induktiv versorgten Blumen.

Bild 6.4

Schaltbild nach Bild 6.3 mit Anschluss an eine allgemeine Versorgungsleitung. Resonator mit 10 Wdg. Schaltdraht 1,5 mm² auf PVC-Rohr mit 7 cm Durchmesser.



Kapitel 7 / Messtechnik und allgemeinere Zusammenhänge

Die drahtlose Energieübertragung ist ein recht aktuelles Thema, wobei hier so mancher Vorschlag reines Gedankenspiel bleiben muss, weil die Realisierung aus prinzipiellen Gründen scheitert. Das ist ein wenig wie in früheren Zeiten, als mit schöner Regelmäßigkeit Vorschläge für ein "Perpetuum mobile" veröffentlicht wurden, letztendlich für die Energiegewinnung aus dem Nichts. Solche Apparaturen sind im Deutschen Museum in München zu bestaunen. Auch wenn sie groß und übersichtlich sind, ist es mitunter nicht so einfach, den gedanklichen Fehler in der mechanischen Konstruktion zu erkennen. Dieses Problem wird noch wesentlich verzwickter, wenn es um elektrische Dinge oder um physikalische Grundlagen geht, die man nur mit Formeln beschreiben kann. Jedenfalls würde sich Herr Tesla sehr über das wundern, was heute alles mit seiner Forschungsarbeit in Verbindung gebracht wird. Sogar der Begriff "Energie" muss bei vielen Texten oder in Äußerungen sehr kritisch hinterfragt werden.

Wie schon beschrieben, lässt sich die elektrische Energieübertragung verbessern, wenn man Resonanzkreise verwendet. Ob die Kopplung dann kapazitiv oder induktiv erfolgt, hat mit der konstruktiven Aufgabe zu tun. Für die Beleuchtung hat sich dabei die induktive Kopplung als günstiger erwiesen, denn das Magnetfeld lässt sich gut bündeln und wird von den meisten Materialien nicht beeinflusst. Begonnen wurde allerdings mit kapazitiver Kopplung, die zum vergleichbaren Ergebnis recht große "Kondensatorplatten" oder wesentlich höhere Frequenzen benötigt. Der größte Nachteil ist aber die Empfindlichkeit auf Feuchte oder Wasser. Wasser hat eine sehr hohe Dielektrizitätskonstante von 81 und mit diesem Faktor ändern sich alle offenen Kondensatorkonstruktionen in Abhängigkeit vom Wassergehalt. Da lässt sich nichts mehr vernünftig dimensionieren oder gar eine Resonanz abgleichen.

Interessant ist der Vergleich mit normaler Funktechnik. Die gewählte Frequenz von etwa 30 kHz entspricht einer Wellenlänge von 10 km, das ergibt sich aus dem Wert der Lichtgeschwindigkeit in Luft. Bei den praktisch genutzten Abständen kann man also nicht von elektrischen Wellen oder von Funkübertragung sprechen. Man bewegt sich hier vielmehr wie eine Ameise im Inneren von kapazitiven oder induktiven Bauelementen. Und alles passiert gleichzeitig, ohne Laufzeiteffekte, die man üblicherweise in der HF-Messtechnik berücksichtigen muss.

Will man effizient Energie übertragen, hat man somit zwei extreme Möglichkeiten. Das wäre zunächst die klassische Funktechnik mit Frequenzen, die so hoch sind, dass sich die Wellen wie Licht bündeln lassen, also 1 GHz oder mehr. Oder man arbeitet ohne Welleneffekte und wählt die Bauteile so groß, dass ihre Abmessungen mit der zu überbrückenden Entfernung vergleichbar sind. Hier ergibt sich auch eine gewisse Querverbindung zu den Arbeiten von Tesla. Denn auf alten Darstellungen seiner Aufbauten fallen besonders die Formate auf, wohl so groß wie Häuser. Naheliegender, dass das große, offene Schwingkreise mit vergleichsweise

niedriger Resonanzfrequenz waren und somit das zweite Verfahren realisierten. Das hat aber nichts mit dem bekannteren Tesla-Transformator zu tun, bei dem aus einer Kondensator-Entladung ein HF-Puls erzeugt wird, mit spektakulären Spannungswerten und geringem praktischen Nutzen.

Eigentlich zu recht hat es sich eingebürgert, bei fortschrittlichen Projekten auch nach störenden Nebeneffekten und nach Vorschriften zu fragen. Gesundes Augenmaß ist aber in jedem Fall zweckmäßig. Leicht gesagt, wenn die Leute mit Begeisterung drahtlos telefonieren und dabei Funkmaste in Sichtweite ablehnen. Oder wenn die gleichgerichteten Handy-Impulse in der Audioanlage ein permanentes Knacken oder Brummen erzeugen, obwohl das nach dem Gesetz zur Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) gar nicht sein kann oder darf. Das Thema soll daher so behandelt werden, dass vor allem die passende Messtechnik vorgestellt wird. Die Bewertung kann dann von Fall zu Fall erfolgen.

Netzspannung kommt in den beschriebenen Projekten nicht vor. Allerdings können in den Resonanzkreisen Spannungen von einigen $10 V_{\text{eff}}$ auftreten. Das ist ja ihr Zweck. Daher sollte auf passende Isolation und auf Berührungsschutz geachtet werden.

Die Betriebsfrequenz um 30 kHz liegt am untersten Ende der "Langwellen". Offizielle HF-Messtechnik beginnt erst ab 150 kHz und misst da auch nur die Signale, die sich verbotenerweise auf Leitungen ausbreiten. Vom elektrischen Störaufkommen her sind die Projekte ebenso "Hochfrequenzgeräte" (oder auch nicht) wie die laut aufgedrehte Stereoanlage oder der billige, aber immerhin zugelassene elektronische Transformator für die Halogen-Deckenleuchte. Darüber hinaus sind alle Projekte so ausgelegt, dass mögliche Oberwellen, also Vielfache der Arbeitsfrequenz, zusätzlich gedämpft werden. Merkliche Energieübertragung in technische Geräte wird auch nur dann stattfinden, wenn diese auf der Arbeitsfrequenz eine Resonanz haben, was bei 30 kHz eher unwahrscheinlich ist.

Bleibe die biologische Beeinflussung durch Magnetfelder. Hier fehlen ganz besonders die verlässlichen Daten (aber nicht die Behauptungen darüber) und die erzeugten Feldstärken sind auch keinesfalls so groß, dass sich dabei die Uhren verbiegen oder die Knochen besser heilen würden. Die gewählte Arbeitsfrequenz hat zudem eine besonders große Eindringtiefe in Wasser und gleichbedeutend, das ist wichtig, wenig Absorption, also Wechselwirkung, mit Gewebe. Nicht umsonst kommunizieren getauchte U-Boote über Längswellen.

Die Erde hat etwa 15 A/m ein recht starkes Magnetfeld, sozusagen die natürliche Umgebung, in der wir alle leben. Es ist allerdings ein Gleichfeld und wir drehen uns nicht mit 30 kHz im Kreis, als neutraler Wert erscheint es zur Orientierung aber in jedem Fall geeignet.

Die Messung eines magnetischen Wechselfeldes ist dabei recht einfach. Der Messaufnehmer besteht aus einem der vorhandenen Lämpchen, das einen Fotowiderstand beleuchtet, der

ansonsten lichtdicht abgedeckt ist. Der Widerstandwert wird mit einem Ohmmeter gemessen. Im ersten Schritt befindet sich der Aufnehmer im untersuchten Magnetfeld, wobei sich ein bestimmter Ohmwert einstellt. Mit einer Referenzspule und einem Signalgenerator wird danach der Aufnehmer so versorgt, dass sich dabei derselbe Ohmwert ergibt. Aus diesem Vergleich lässt sich die Stärke des Feldes berechnen.

Ein Magnetfeld kann man prinzipiell mit 2 Methoden beschreiben. Da ist zunächst seine definierte Erzeugung über einen fließenden Strom. Dieses "**H-Feld**" wird in **A/m** (Ampère / Meter) gemessen. Das Feld entsteht im Inneren einer langen Spule, die gleichmäßig aus Draht gewickelt ist und durch die ein Strom fließt. Wären es pro Meter 100 Windungen, müsste der Strom genau 10 mA sein, damit ein Wert von 1 A/m erreicht wird.

Die anderer Beschreibung erfolgt über die Wirkung des Magnetfeldes auf einen Draht, in dem eine Spannung entsteht, solange das Feld sich ändert. Dieses so definierte "**B-Feld**" wird in Tesla ("**T**") gemessen und ist proportional zum H-Feld. Sofern es sich um Luftspulen handelt, gilt die bekannte Formel :

$$B = \mu_0 \times H, \quad \text{mit der Induktionskonstanten } \mu_0 = 1,26 \times 10^{-6} \quad [(T \times m) / A]$$

Man kann das auch viel, viel ausführlicher schreiben, aber mehr ist für das Verständnis der folgenden Dinge nicht notwendig.

Der Messaufnehmer

Der Messaufnehmer enthält im einfachsten Fall eine offene Ferritspule mit einer daran angeschlossenen, möglichst effizienten LED. Je höher die Induktivität ist, desto weniger fällt die Mindestspannung der LED ins Gewicht. 100 mH wäre ein ausreichender Wert, bei größeren Bauformen reicht auch 47 mH. Wird besonders hohe Empfindlichkeit gefordert, ist die Schaltung nach Bild 1.7 sinnvoller. Geeignet sind die Farben Rot, Grün oder auch Weiß. Die LED beleuchtet einen Fotowiderstand, Typ LDR 03. Auch kleinere Fotowiderstände sind denkbar, besonders wenn sie in ein kleines Kunststoffröhrchen passen und dort Stirn an Stirn mit der LED eingeklebt werden können. So ist die nötige Lichtdichtigkeit am schnellsten erreicht. Auch schwarzer Schrumpfschlauch ist hilfreich.

Die Referenzspule

Die Länge einer Spule definiert sich über das Verhältnis von bewickelter Länge zum Durchmesser. Je größer dieser Wert ist, desto gleichmäßiger ist das Feld im Inneren der Spule verteilt und desto mehr nähert es sich dem errechneten, theoretischen Wert. Unter praktischen Gesichtspunkten muss der Durchmesser so groß sein, dass man von Hand den Meßaufnehmer hineinhalten kann. Ein metallfreier Griff ist natürlich auch denkbar. Für die Länge braucht es

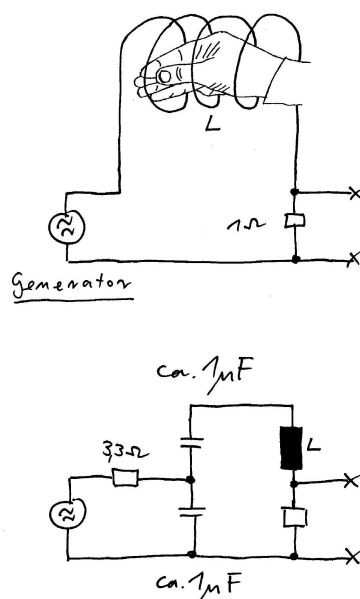
aber keinen ganzen Meter. Ein guter Kompromiss wäre, den anderthalbfachen Durchmesser als Länge anzusetzen. Als Spulenkörper, den man einlagig mit Elektriker-Schalt Draht bewickelt, kommen also Stücke von Plastikrohren für Abwasser oder Blumentöpfe infrage. Der Papierkorb wäre schon unnötig groß. Zur Bestimmung des Magnetfeldes im Inneren der Spule setzt man die bewickelte Länge zu der Länge von 1 m ins Verhältnis und multipliziert diesen Wert mit dem Strom und der tatsächlich vorhandenen Windungszahl. 20 cm Rohr, gleichmäßig bewickelt mit 30 Windungen, ergäben damit bei 100 mA ein Magnetfeld von $5 \times 30 \times 0,1 = 15 \text{ A / m}$ oder $18,9 \mu\text{T}$. Zum Vergleich : Die Feldstärken in einem Transformator liegen bei 1 Tesla.

Bild 7.1 zeigt eine entsprechende Schaltung mit dem Generator nach Bild 2.5 . Es kann auch ein handelsüblicher Funktionsgenerator verwendet werden. Der zusätzliche Widerstand dient zum Messen des fließenden Stromes, bevorzugt mit einem Oszilloskop. Man sollte bei der Windungszahl aber nicht zu großzügig sein, denn die Feldstärke nimmt dabei zwar zu, der induktive Widerstand steigt aber leider im Quadrat. Mit viel Spannung bei vergleichsweise wenig Strom ist zu rechnen und der verwendete Generator sollte mit maximale Versorgung betrieben werden. Die Referenzspule zu einem Schwingkreis auszubauen, wäre eine Möglichkeit zur Leistungssteigerung, bedeutet aber mehr Aufwand und mehr Fehlermöglichkeit. Falls der Messaufnehmer selbst keinen Resonanzkreis enthält, ist ein Funktionsgenerator für diese Anwendung am besten geeignet. Man braucht dann den notwendigen Kondensator für das Referenz-Magnetfeld nur grob zu dimensionieren, weil allein der Betrieb in Resonanz die Verbesserung bringt. Ob die Messung bei 20 oder 40 kHz durchgeführt wird, spielt keine Rolle.

Eine Spule mit Anzapfung ist für die Gleichmäßigkeit des Feldes eher ungünstig. Daher wird der Kondensator geteilt. Zusätzlich ist ein kleiner ohmscher Widerstand in Reihe geschaltet, damit der Endverstärker stabil arbeitet. Die große kapazitive Last führt sonst leicht zum wilden Schwingen auf höheren Frequenzen.

Bild 7.1

Prinzipielle Beschaltung einer Spule zur Erzeugung einer definierten Magnetfeldstärke. Typische Wickeldaten sind 30 Windungen auf einer Länge von 15 cm. Bei Betrieb in Resonanz sind zusätzlich 2 Kondensatoren und ein Dämpfungswiderstand notwendig.



Beispiel einer Messung

Es soll die Feldstärke des Generators nach Bild 2.1 / 2.2 bei 9 Volt Versorgung gemessen werden, direkt in der Mitte der Spule. Als Messaufnehmer dient eine 100 mH - Drossel (Typ Fastron 11P), eine aktuell LED (5 mm, grün, 30° Öffnung) und ein Fotowiderstand Typ LDR 03. Bei der Messung stellt sich ein Wert von 750 Ω ein.

Als Referenzspule wird ein Stück HTM-Rohr (110 mm) über 15 cm mit 30 Windungen Schaltendraht (1,5 mm²) gleichmäßig bewickelt. Nach Anschluss an den Generator entsprechend Bild 2.5 stellt sich heraus, dass das Feld im Inneren dieser Spule nicht stark genug ist. Daher die Ergänzung zum Schwingkreis. Um damit 750 Ω zu erreichen, müssen am externen Messwiderstand (= 1 Ω) 2,5 V_{ss} abfallen. Diese Messung erfolgt der Einfachheit halber gegenüber Gerätemasse und berücksichtigt nicht den internen Widerstand von 0,1 Ω . Der Strom als Effektivwert ist demnach

$$J = 2,5 / (2 \times \Pi) = 0,4 \text{ A} \quad .$$

Damit ergibt sich eine Feldstärke von $H = (100 / 15) \times 30 \times 0,4 = 80 \text{ A/m} = 101 \text{ } \mu\text{T}$. Der Wert nimmt mit größerem Abstand schnell ab, nach 2 cm, der Stärke einer Tischplatte, beträgt er nur noch die Hälfte. Bei anderen Projekten mit großen, offenen Spulen misst man ähnliche Werte. Die Feldstärken liegen also etwas über dem Erdmagnetfeld, aber deutlichst unter dem, was man mit technischen Magneten, etwa einem Hufeisenmagneten oder einem Haftmagneten oder dem berüchtigten Magnetarmband, in Verbindung bringt.

Kapitel 8 / Mikroprozessoren und Fernsteuerung

Bei den vorgestellten, einfachen Generatoren kann mit einem Mikroprozessor die Zahl der Bauteile verringert werden. Auch kann man fragen, ob sich die Lampen fernsteuern lassen, zum gezielten Einschalten oder für einen Farbwechsel. Das bedeutet eine Menge Organisation und wohl den prinzipiellen Einsatz eines Prozessors.

Entsprechende Versuche wurden mit den bekannten Bausteinen von Atmel gemacht, auf der Seite der Lampen besonders mit den 8-beinigen Varianten, und die Ergebnisse waren recht erfreulich. Allerdings gehen durch die Vielzahl der Möglichkeiten leicht die Ideen für eine knapp gehaltene Bauanleitung verloren. Fernsteuerung der Lampen ist das Eine, gute Konzepte für die Bedienung und die Kommandostruktur das Andere. Das wird schnell komplex und unübersichtlich, ohne dass dabei viel über das Grundthema Beleuchtung gesagt wäre.

Es sollen daher, als Anregung und unabhängig vom Prozessortyp, vorallem die weniger offensichtlichen Dinge besprochen werden, die für den Erfolg wichtig sind. Die notwendigen, einfachen Programme kann jeder selbst schreiben, der darin etwas Kenntnis oder gar Routine hat.

Die Vereinfachung der vorliegenden Schaltungen

Eine deutliche Verringerung der Bauteilezahl ergibt sich besonders in der Schaltung nach Bild 2.1 durch einen Prozessor. Es sind ja lediglich 2 digitale Signale zu erzeugen, mit bestimmten Forderungen bei der Frequenz und der zeitlichen Überlappung. Wenn der Prozessor mindestens 4 Ausgänge generieren kann, sollten aus Gründen der Stabilität auch alle 4 FETs getrennt angesteuert werden, entsprechend der Schaltung nach Bild 2.3. Zur niederohmigen Ansteuerung der FETs, besonders der p-Kanal-Typen, kann es zusätzlich sinnvoll sein, mehrere Ausgänge parallel zu schalten. Nicht belegte Ausgänge sollten also entsprechend genutzt werden.

Prinzipielle Tests dazu wurden mit einem AT90S1200 bei einem Takt von 1 MHz gemacht. Dabei wurden für die beiden n-Kanal-FETs jeweils 2 I/O-Leitungen verwendet, für die beiden p-Kanal-FETs jeweils 3. Der Programmieraufwand hielt sich in Grenzen, wie man dem **Programmbeispiel** entnehmen kann. Ein derartiges Programm enthält eigentlich nur kurze Schleifen, mit denen wechselseitig "L" und "H" nach außen geschaltet wird. Die vorgeschriebene Totzeit, die Strom quer durch die FETs verhindert, erhält man im einfachsten Fall durch die richtige Reihenfolge der Ausgabebefehle. Mit zusätzlichen Schleifen kann man die Totzeit gezielt verlängern und hat damit die Möglichkeit, die mittlere Generatorleistung einstellbar zu machen.

Es gibt für einen solchen Aufbau aber auch Einschränkungen. Da ist zunächst die vergleichsweise geringe Spannungsfestigkeit der Prozessoren, die die FETs direkt steuern. Mehr als 6 Volt Versorgung ist also nicht zulässig. Plant man Pegelwandler ein, zumindest für die p-Kanal-FETs, dazu einen Spannungsregler für den Prozessor, so sind kaum noch Teile eingespart.

Äußerste Sorgfalt ist dem Startvorgang zu widmen. Es darf unter keinen Umständen vorkommen, dass die FETs falsch geschaltet oder vorübergehend am Gate hochohmig werden. Für den zweiten Punkt sind möglicherweise externe Widerstände hilfreich, nach Plus oder nach Masse, je nach Prozessortyp oder Polarität des FETs. Sicherheit ist gegeben, wenn der Prozessor bereits arbeitet, während die Versorgungsspannung noch unter der Schaltschwelle der FETs liegt, vielleicht bei 2 Volt. Muss man dem Prozessor zum Start Zeit lassen, kann man die Versorgung der FETs mit einem großen Kondensator abblocken und in Richtung Spannungsquelle einen kleinen Widerstand einbauen.

Die Fernsteuerung der Lampen

Es ist typisch für alle vorgestellten Projekte, dass man viele Lampen ganz einfach versorgen kann, alle aus einer einzigen Leitung, wenn überhaupt. Gezieltes, individuelles Schalten ist damit aber gerade nicht möglich, auch wenn es zweckmäßig wäre.

Nicht nur im Digitalen Bereich gibt es schon lange Beispiele für solche Aufgaben, etwa die Fernsteuerung der Nachtspeicherheizung. Hier werden der Netzspannung zusätzliche Signale hinzugefügt, die sich in der Frequenz stark von 50 Hz unterscheiden. Notwendig sind dafür entsprechende Geräte (Koppler), die die Signale auf die Netzleitung übertragen und auch wieder vom Netz trennen. Dazu kommt die eigentliche Decodierung beim Verbraucher.

Auch bei den LEDs dient eine Wechselspannung zur Versorgung, allerdings mit höherer Frequenz. Zusätzlich kann diese Wechselspannung über Resonanzkreise laufen. Überlagerung von zusätzlichen Frequenzen ist demnach aufwändig. Die technische Frage lautet also, wie man ein 30 kHz-Sinussignal auf einfache Weise so modifizieren kann, dass die Information nicht verloren geht, auch wenn das Signal über einen Schwingkreis (= Bandpass) oder einen Tiefpass zur Unterdrückung von Oberwellen läuft.

Klassisch ist dafür die Amplitudenmodulation (AM) und die Frequenzmodulation (FM). Bei FM ist zu beachten, dass die Frequenzänderung nicht zu groß werden darf, weil sonst die Resonanzkreise die Signalamplitude beeinflussen und damit möglicherweise die Energieversorgung der Lampen beeinträchtigen. Das gilt bei AM ganz allgemein. Wenn man freie Wahl hat, sollte man FM verwenden, besonders wenn mit schwankenden Signalpegeln im System zu rechnen ist. Allerdings ist die Erzeugung von FM auf der Senderseite komplizierter,

sofern man keinen Prozessor einsetzt. Denn für Standardlogik gilt leider, dass die Veränderung der Quarz- oder Resonatorfrequenz mit einer Kapazitätsdiode nicht den gewünschten Frequenzhub erzeugt. Und bei einem LC- oder gar RC-Oszillator muss man abgleichen und die Mittenfrequenz überwachen.

Schaltungen, die eine Pegeleinstellung haben, lassen sich leicht für AM ergänzen. In der Schaltung nach Bild 2.3 muss man lediglich dem DC-Pegel am Potenziometer eine kleine, zusätzliche Wechselfspannung überlagern, die man AC-gekoppelt zuführt. Der Schaltungszusatz ist bereits eingezeichnet. Die Modulationsfrequenz kann einige kHz betragen. In der Schaltung nach Bild 2.5 ist der zusätzliche Aufwand ähnlich gering. Allerdings läuft das Signal über die komplette Schaltung und wird durch den Regelkreis unzulässig geglättet. Mit der gewählten, nichtinvertierenden Beschaltung am Verstärker OP4 lässt sich dieser Einfluss der Regelung umgehen. Allerdings wirkt damit die Modulation nicht mehr proportional zur Ausgangsspannung, sondern entspricht einem festen Spannungswert. Es ist daher ein zusätzliches Potenziometer zur Einstellung des Modulationspegels notwendig, in Abhängigkeit von der Spannung am Ausgang.

Um digitale Information zu übertragen, wird die Modulation periodisch ein- und ausgeschaltet und den beiden Situationen der Wert "0" und "1" zugeordnet. Das absolute Minimum für die notwendige Schaltung besteht aus einem RC-Glied und einem invertierenden Schmitt-Trigger-Gatter. Allerdings wird das erzeugte Signal in AC-Kopplung übertragen und nach Ausschalten dieses Oszillators bleibt ein DC-Pegel übrig, der erhebliche niederfrequente Schwankungen und damit Modulationseffekte erzeugt. Korrekterweise müsste der Oszillator nach dem Abschalten den mittleren DC-Pegel liefern. Benötigt wird also eine 3-Zustands-Logik und die wird kompliziert. Es gibt allerdings einen Trick, der darin besteht, den Oszillator nicht abzuschalten, sondern alternativ eine möglichst hohe Frequenz zu erzeugen, die nachfolgend mit einem RC-Tiefpass gefiltert wird, der den gewünschten Mittelwert bildet. **Bild 8.1** zeigt eine derartige Schaltung. In der angegebenen Dimensionierung liefert sie etwa $\pm 20\%$ Modulationshub, d.h. Amplitudenveränderung, was für die geplanten Zwecke ausreicht.

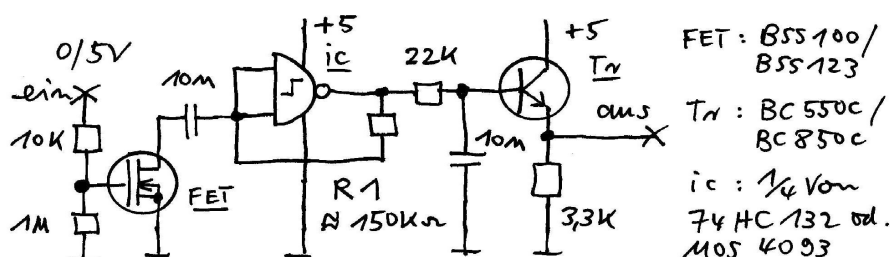


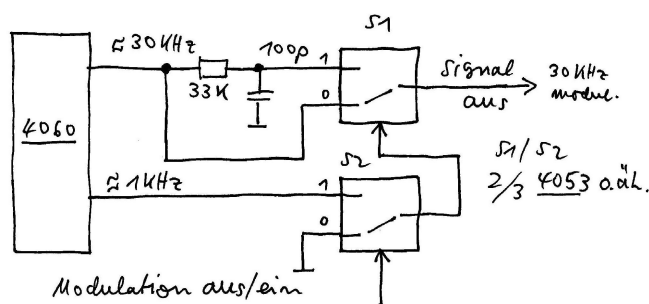
Bild 8.1 Geschalteter Oszillator zu Erzeugung einer 1 kHz-AM-Modulation für die Schaltungen nach Bild 2.3 und Bild 2.5. Der Widerstand R1 muss experimentell festgelegt werden, da die Hysterese des Gatters je nach Logikfamilie und Hersteller unterschiedlich ist. Im ausgeschalteten Zustand liegt die Frequenz über 100 kHz.

Was sinnvoll und möglich ist, wird nicht zuletzt durch den Aufwand auf der Empfangsseite bestimmt. Bei Frequenzmodulation sind die 30 kHz nur noch bedingt als Systemtakt zu gebrauchen und bei Amplitudenmodulation hat man Bedenken, die mühsam gewonnene Betriebsenergie mit Absicht deutlich schwanken zu lassen. Dazu kommt, dass beim Umschalten von LEDs die interne Versorgung sich erheblich verändern wird, was von der eingehenden AM sicher getrennt werden muss, etwa durch eine Totzeit für den Empfang. Sofern man die Lampen nicht unter Programmkontrolle blinken lassen will, sondern nur eine gelegentliche Konfiguration des Beleuchtungssystem vorgesehen ist, ist die Datenrate aber nicht sehr hoch.

Als Ersatz für eine FM-Modulation ist die damit verwandte Phasenmodulation ein wenig übersichtlicher zu programmieren. Hier werden die Wellenzüge periodisch vor der Ausgabe um einige μsec verzögert. Die mittlere Frequenz bleibt dabei konstant und es tritt auch kein DC-Anteil auf. Verändert werden muss also periodisch nur der Ausgabezeitpunkt, etwa durch Bereithalten von NOP-Befehlen vor der Ausgabe. AM-Modulation ist ähnlich einfach zu programmieren. Hier werden beide Halbwellen gleichzeitig periodisch in der Länge verändert, ein Verfahren, das in Schaltung nach Bild 2.3 mit diskreten Teilen realisiert ist. Zur Erläuterung der Phasenmodulation ist der kleine Schaltungszusatz nach **Bild 8.2** geeignet, mit dem alle diskret aufgebauten Generatoren ausgerüstet werden können. Wird als Oszillator der Baustein Typ 4060 verwendet, liefert dieser auch geeignete Modulationsfrequenzen. Die periodisch zugeschaltete Zeitverzögerung wird hier durch ein einfaches RC-Glied realisiert.

Bild 8.2

Ein Schaltungszusatz zur Phasenmodulation. Zentrales Bauteil ist das RC-Glied, das die erzeugte Wechselspannung periodisch etwas verzögert.

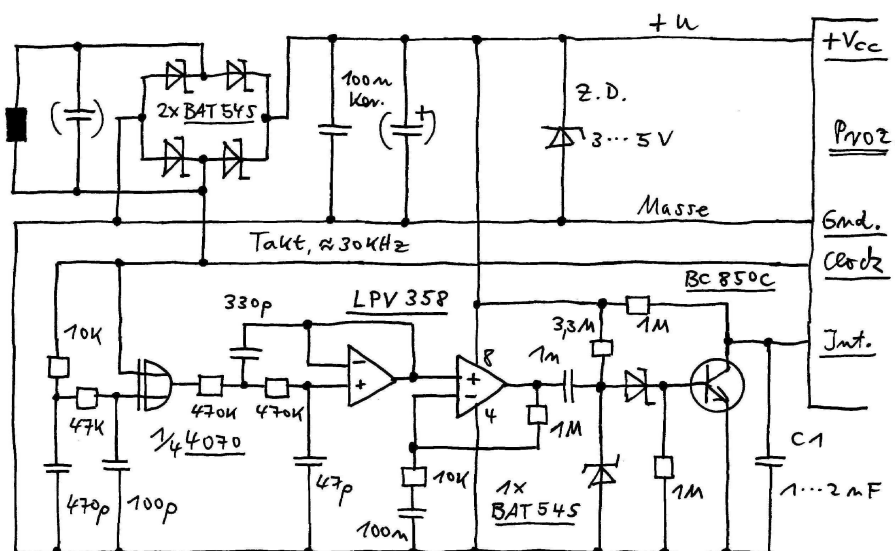


Zur Demodulation von FM gibt es viele Verfahren. Gemeinsam ist, dass die Abweichungen der momentanen Frequenz von einer festen Frequenz oder einem festen Zeitintervall gemessen wird. Bei einem schon digital vorliegenden Signal kann man das Signal mit einem RC-Glied verzögern und dann mit sich selbst vergleichen oder multiplizieren, was durch ein Exor-Gatter bewirkt wird. Im Prinzip sind fast alle Gattertypen, hin bis zum Anlogschalter und D-Flipflop, für diesen Zweck möglich, das Exor liefert aber das deutlich beste Ergebnis. Zusätzlich entsteht am Ausgang bei diesem Gattertyp genau die halbe Betriebsspannung, sofern das RC-Glied 90° Phasenverschiebung bewirkt. Die weitere Verarbeitung ist damit recht einfach und benötigt keine zusätzliche AC-Kopplung.

Bild 8.3 zeigt eine erprobte Schaltung zur Versorgung des Prozessors mit angeschlossenen LEDs und zur Decodierung der Zusatzinformation, die mit einer Frequenz im Bereich von 1 kHz übertragen wird. Neben der Gleichrichtung zur allgemeinen Versorgung wird die Wechselspannung verzögert und mit sich selbst multipliziert. Danach folgt ein Tiefpass mit einer Grenzfrequenz von 3 kHz, dann ein Wechselspannungsverstärker Faktor 100 mit einer unteren Grenzfrequenz von 150 Hz und eine Gleichrichterschaltung. Üblich ist, die gleichgerichtete Spannung zu sieben und dann auf eine Schaltstufe, etwa einen Transistor, zu führen. Das ergibt allerdings erhebliche Zeitverzögerung. Es wird daher der Transistor im Takt der Wechselspannung geschaltet und mit dem Kondensator C1 ein Sägezahn erzeugt, der die Schaltschwelle am Prozesseingang nicht erreichen darf. Erst wenn der Takt aussetzt, wird die Schwelle überschritten. Das ist die Funktion eines nachtriggerbaren Monoflops, dessen Kippzeit etwas länger ist, als es der zu detektierenden Frequenz (1 kHz) entspricht.

Bild 8.3

Schaltung zur induktiven Versorgung des Prozessors und zur Decodierung von Zusatzinformation, die mit einer Hilfsfrequenz im Bereich von 1 kHz übertragen wird.



Die Schaltung ist auch für AM geeignet, was ein eher experimentelles Ergebnis war. Es ist wohl die Last des Ladekondensators, die demodulierbare Verschiebungen in den Schaltflanken erzeugt. Die notwendige Modulationsstärke ist bei AM etwa $\pm 20\%$ und bei Phasenmodulation und FM $\pm 5\%$, also nicht größer als die Auszeiten, die für die korrekte Steuerung der FETs im Generator notwendig sind.

Der im Filter verwendete Operationsverstärker darf fast keinen Strom verbrauchen, kaum Spannung benötigen und muss hoch aussteuerbar sein. Es ist also nicht jede Ausführung geeignet und Experimente sind möglicherweise sinnvoll. Der genannte Typ LPV358 ist eine Variante des gängigen LM358, erfüllt alle Forderung und kostet fast nichts. Auf die Bezeichnung ist aber ganz genau zu achten, weder der LM358 noch der LMV358 wären geeignet. Beim Test verschiedener Logikgatter zeigte sich zudem, dass nur CMOS-Standardlogik Typ 4070 (4030) wenig Strom braucht. Wird aus Gründen des Bauvolumens ein Einzelgatter benötigt, sollte man an TC4S30F aus der Serie TC4S von Toshiba denken. Bei

SMD-Varianten der Serie 74HC86 werden etliche 10 μA mehr fließen, was je nach Anwendung, ziemlich viel Strom sein kann.

Die verwendete Signalübertragung ist letztendlich ein Morsen mit einem "Pilotton". Man kann damit zunächst den Prozessor zurücksetzen oder Lampen, die mit einem Zusatz versehen sind, gezielt schalten. Für die Übertragung kompletter Bitfolgen orientiert man sich am besten am RS232-Protokoll. Auf Seite der Lampen kann man möglicherweise eine RS232-Funktion des Prozessors direkt nutzen, etwa mit 110 bd, auf der Generatorseite ist das aber nicht so einfach, weil die Signalabfolge nach Schnittstellennorm nur virtuell bei der FM-Erzeugung auftritt. In manchen Applikationsberichten findet man Vorschläge, wie man Schnittstellen per Software erzeugen kann. Das dürfte genau die richtige Lektüre sein, um hier weiterzukommen.

Fragen zur internen Stromversorgung

Der gewählte Prozessor sollte im Betrieb nicht mehr als 50 μA benötigen und daher am unteren Ende der zulässigen Versorgungsspannung betrieben werden. Wenn es sich machen lässt, kann man den vorhandene 30 kHz-Takt verwenden, das spart Teile und Strom.

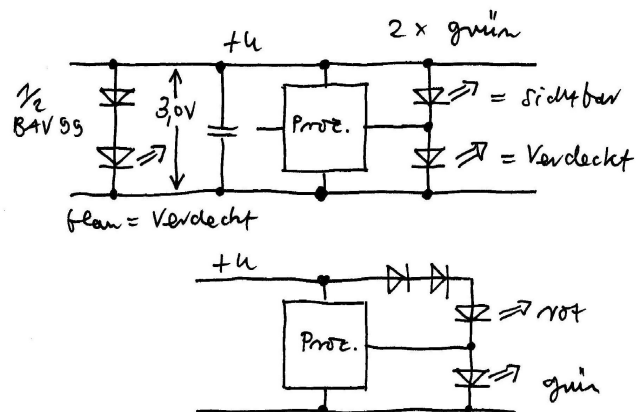
Etwas gewöhnungsbedürftig ist das allgemeine Verhalten der Stromversorgung. Die benutzte induktive Kopplung hat meist die Eigenschaft einer "Stromquelle". Es wird also eine recht hohe Spannung über einen großen Widerstand an den Verbraucher angelegt, das ist der Widerstand des induktiven Weges. Eine typische Situation wäre eine Leerlaufspannung von 15 Volt und ein Kurzschlussstrom von 3 mA. Das ergibt einen Innenwiderstand von 5 $\text{k}\Omega$ und eine LED mit 3 Volt würde ohne weiteren Widerstand mit 2,4 mA arbeiten ($= 12 \text{ V} / 5 \text{ k}\Omega$). Ein Prozessor wäre hier aber gefährdet und die Spannung muss geregelt werden. Wie bei vielen "Stromquellen" ist nicht der übliche Spannungsregler, sondern eine parallele Zenerdiode die bessere Lösung, ein sogenannter Shuntregler. Die Zenerdiode könnte auch durch eine abgedeckte LED oder eine integrierte Spannungsreferenz (3,3 V, SMD-Format SOT 23) ersetzt werden.

Wenn wenig Energiereserven vorhanden sind, sollte man bei mehreren LEDs auf Vorwiderstände verzichten. Schaltet man aber unterschiedliche LEDs parallel, gewinnt die mit dem geringsten Spannungsabfall und senkt auch die Versorgung auf dieses Niveau. Wäre es Rot, würde der Prozessor vermutlich nicht mehr arbeiten. Speziell Rot muss daher in Serie mit einer weiteren, verdeckten roten LED oder mit 2 Dioden Typ 1N4148 betrieben werden.

Beim Ein- und Ausschalten von LEDs ist es zweckmäßig, im Gegentakt eine zweite, versteckte LED zu schalten, damit die Versorgungsspannung konstant bleibt. Bei starker Schwankung muss man ja mit Rückwirkung auf den Prozessor und auf die Schaltung zur Decodierung rechnen. **Bild 8.4** zeigt entsprechende, teilesparende Schaltungen, einmal zum Einschalten einer grünen LED, einmal zum Wechsel zwischen Rot und Grün.

Farbmischung ist schön, aber schwierig zu realisieren, da man kaum milchiges Material findet, das gut mischt, aber das Licht wenig dämpft. Für sauberes Weiß sollte man daher nach Möglichkeit eine eigene LED vorsehen. **Bild 8.5** zeigt Ausschnitte aus einem Versuchsaufbau für Farbmischung. Hier werden in schneller Folge die LEDs der Reihe nach eingeschaltet, mit einer Pause dazwischen. Die Balance der Schaltzeiten ergibt im Auge den farblichen Gesamteindruck. Nur so ist es möglich, für alle LEDs den vollen Strom zu nutzen, sonst würden sie sich gegenseitig kurzschließen.

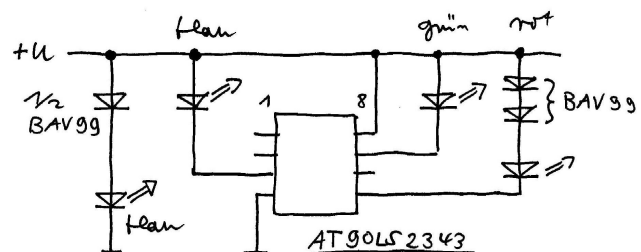
Bild 8.4



Schaltungstricks zum teilesparenden Umschalten von LEDs.

Bild 8.5

Beschaltung eines Prozessors für die Farbmischung von LEDs. Die LEDs werden in schneller Folge der Reihe nach eingeschaltet und belasten sich so nicht gegenseitig.



Programmbeispiel (Ansteuerung der FET-Brückenschaltung)

```
;Testgenerator für LED. Leitungen : n-Kanal 2, p-Kanal 3
;Takt 1 MHz, Ergibt Frequenz 31,25 kHz
;Totzeit 1 µsec = 1 Programmschritt ("aus" vor "ein")
.DEVICE AT90S1200
.def K1=r16
.def K2=r17
.def S=r18
.def C=r19
Start:      rjmp Beginn      ;Start Programm
            nop
            nop
            nop
Beginn:     ldi  C,0
            out  $3F,C        ;Interrupt generell verbieten
            out  $21,C        ;Hund abstellen
            out  $3B,C        ;Digital-Interrupt abstellen
            ldi  C,255
            out  $11,C        ;Port D als Ausgang
            out  $17,C        ;Port B als Ausgang
            ldi  K1,3         ;1. Halbperiode
            ldi  K2,28        ;2. Halbperiode
            out  $18,K2       ;Treiber A aus
            out  $12,K2       ;Treiber B aus
M1:         rcall Pause
            out  $18,K2       ;Treiber A aus
            out  $12,K1       ;Treiber B ein
            rjmp M2
M2:         rcall Pause
            out  $12,K2       ;Treiber B aus
            out  $18,K1       ;Treiber A ein
            rjmp M1
Pause:     ldi  S,1           ;Verzögerung für die Halbperioden
M3:        dec  S             ;Zahl der Schritte für 31,25 kHz
            cpi  S,0          ;sind experimentell bestimmt
            breq M4
            rjmp M3
M4:        ret
```