

KOSMOS®

KOSMOS

Experimentierkasten

Anleitung

electronics

XN30000



Sicherheitshinweise für Kinder:

- Die mitgelieferten Drähte dürfen nicht in eine Steckdose eingeführt werden.
- Der Experimentierkasten darf nicht an weitere Energiequellen angeschlossen werden.
- Nicht wiederaufladbare Batterien dürfen nicht geladen werden.
- Ungleiche Batterietypen oder neue und gebrauchte Batterien dürfen nicht zusammen verwendet werden.
- Es dürfen nur die empfohlenen Batterien oder die eines gleichwertigen Typs verwendet werden.
- Die Batterie muss mit der richtigen Polarität (+/-) angeschlossen werden.
- Leere Batterien müssen aus dem Experimentierkasten entfernt werden.
- Die Anschlußklemmen dürfen nicht kurzgeschlossen werden
- Schutzeinrichtungen, wie z.B. Bauteile zur Strombegrenzung, dürfen nicht manipuliert werden.

Sicherheitshinweise für Eltern:

WARNUNG! Ausschließlich für Kinder von mindestens 8 Jahren geeignet.

ACHTUNG! Einzelteile dieses Experimentierkastens haben spitze oder scharfe Ecken und Kanten. Es besteht Verletzungsgefahr.

5. Auflage Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co., Stuttgart / 2003

Das Werk einschließlich all seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen, Netzen und Medien. Wir übernehmen keine Garantie dass alle Angaben in diesem Werk frei von Schutzrechten sind.

© 1992, 1997, 2003 Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co., Stuttgart

Technische Konzeption: Kosmos Entwicklungslabor unter Mitarbeit von Günther Ramm, Braunschweig

Illustrationen: Friedrich Werth, Horb

Fotos: Atelier Weisshaupt, Stuttgart

Printed in Germany / Imprimé en Allemagne

Ein Wort an die Eltern

Liebe Eltern!

Mit diesem Experimentierkasten wird Ihr Kind in die spannende Welt der Elektronik entführt. Mit dieser Anleitung und dem Material ausgerüstet, macht es sich auf ein Elektroniker der Zukunft zu werden ...

Aber zuvor kommt natürlich die Frage nach der Sicherheit. Das vorliegende Experimentierset basiert auf den Europäischen Sicherheitsnormen für elektrische und elektronische Experimentierkästen. Diese enthalten Auflagen für den Hersteller, sehen aber auch vor, dass die Eltern ihren Kindern bei ihren Experimenten mit Rat und Tat zur Seite stehen. **Das beigelegte Faltblatt enthält allgemeingültige Sicherheitshinweise für elektrische Experimentierkästen, die über die Anforderungen dieses Kastens hinausgehen. Bitte machen Sie daher Ihr Kind darauf aufmerksam, dass nicht alle Informationen dieses Beiblattes speziell auf den vorliegenden Elektronik-Experimentierkasten zutreffen.**

Sagen Sie Ihrem Kind ausdrücklich, dass es alle relevanten Anweisungen und Sicherheitshinweise lesen und nachschlagebereit halten soll. Machen Sie es auch darauf aufmerksam, dass es die Hinweise und Regeln beim Experimentieren unbedingt einhalten soll.

Zum Experimentieren werden zwei 9-Volt-Batterien (Typ 6F22 oder 6LR61) benötigt, die wegen ihrer begrenzten Lagerfähigkeit nicht im Kasten enthalten sind. Bitte achten Sie darauf, dass erschöpfte Batterien aus dem Kasten herausgenommen und den nationalen Umweltbestimmungen entsprechend entsorgt werden.

Achtung! Rundfunkempfangsgeräte, auch einfachster Bauart, dürfen nur bereitgehalten werden, wenn eine ordnungsgemäße Tonrundfunkgenehmigung vorliegt.

Wir wünschen Ihnen und Ihrem[r] jungen Elektroniker[in] viel Spaß und Gewinn beim Experimentieren.

Experimentieranleitung
für über 300 Versuche

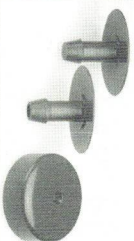
elektro nik XN 3000

Von Klaus Schlenzig

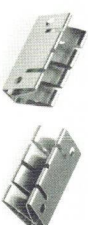
KOSMOS electronic Box 1

Technische Änderungen vorbehalten

Spritzbaum 1
2 Kappen,
Drehknopf für
Drehkondensator
004 012



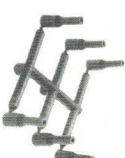
Beutel mit
Steckedern
33 Stück
(Multipack 6)
000 612



Batterieclip
(Multipack 6)
042 106



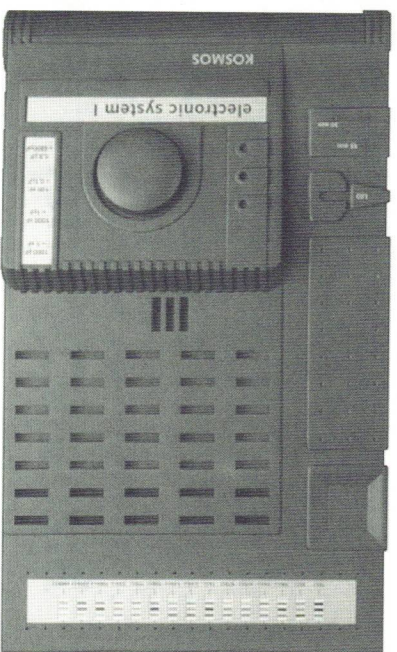
Satz
Kontakthülsen
6 Stück
004 002



3 Drahtstücke
im Bündel
(Multipack 6)
000 151



Pultoberteil 1
070 207



und

Unterteil
070 407

electronic Multipack 1 000 845

Bezeichnung	Teil	Aufbau-/Schaltzeichen
Widerstände 10 Stück verschiedene Werte		
Kondensatoren 6 8nF 2 Stück		
Elektrolyt- Kondensatoren 10µF 100µF		
Germaniumdiode		

Bezeichnung

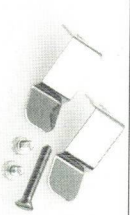
Teil

Aufbau-/Schaltzeichen

Ohrhörer
(Multipack 4)
042 056



Beutel 1
2 Taster,
3 Schrauben
(Multipack 6)
000 148



Leuchtdiode superrot
000 145

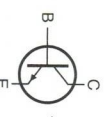
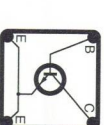


Leuchtdiode grün
002 198

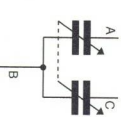
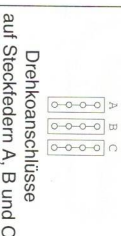


(Multipack 4)

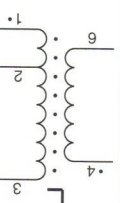
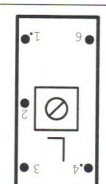
Transistormodul
npn
2 Stück
(Multipack 4)
043 006



Drehkondensator
(Multipack 4)
000 143



L-Modul
(Multipack 4)
000 144



10 kurze Drahtbrücken
000 282



10 lange Drahtbrücken
000 292

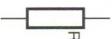
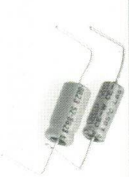


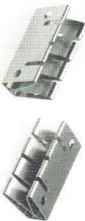
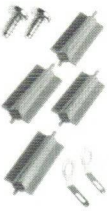
(Multipack 6)

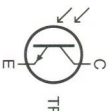
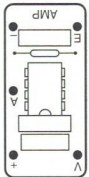
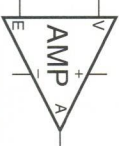
KOSMOS electronic Box 2

Technische Änderungen vorbehalten

Pultoberteil 2 070 307 und Unterteil 070 407	
--	---

Bezeichnung	Teil	Aufbau-/Schaltzeichen
Widerstände 5 Stück verschiedene Werte		 
Kondensator 100nF		 
Elektrolyt-Kondensatoren 1µF 10µF		 

Spritzbaum 2 Drehknopf für Poti, Scharnierbolzen 004 022		Beutel mit Steckfedern 33 Stück (Multipack 7) 000 612	
Beutel 2 2 Ösen, 4 Verbindungsschäfte, 2 Montageschrauben, (Multipack 7) 001 006		3 Drahtstücke im Bündel (Multipack 7) 000 151	

Bezeichnung	Teil	Aufbau-/Schaltzeichen
Lautsprecher (Multipack 5) 001 003		 Lautsprecheranschlüsse auf Steckern M und N 
Fototransistor (Multipack 5) 002 159		 
Verstärker-Modul (Multipack 5) 043 036		 
Potentiometer P1, 10kΩ (Multipack 5) 001 004		 Potianschlüsse auf Steckern D, E und F 
10 kurze Drahtbrücken 000 282 10 lange Drahtbrücken 000 292 (Multipack 7)		 

KOSMOS electronic Box 3

Technische Änderungen vorbehalten

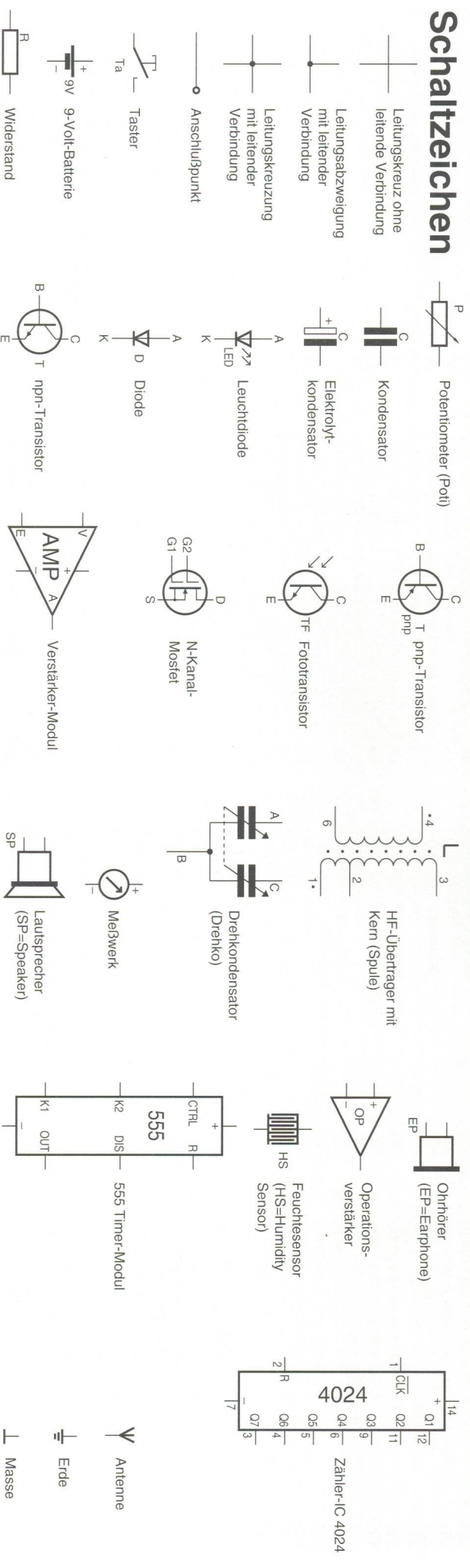
2 Beutel mit Steckdrehern je 33 Stück 000 612		Satz Kontaktthülisen 6 Stück 004 002	
Spritzbaum 3 2 Kappen, Drehknopf für Poti 004 032		Lichtwellenleiter (LWL) 000 676	
Batterieclip 042 106		IC-Stecker-Modul 001 015	
2x 3 Drahtstücke im Bündel 000 151		2x10 kurze Drahtbrücken 000 282 2x10 lange Drahtbrücken 000 292	

electronic Multipack 3 001 018

Bezeichnung	Teil	Aufbau-/Schaltzeichen
Widerstände 15 Stück verschiedene Werte		
Kondensator 100nF		
Elektrolyt-Kondensatoren 10µF 2 Stück 100µF 470µF		
Siliziumdiode 2 Stück		

Bezeichnung	Teil	Aufbau-/Schaltzeichen
Meßwerk 001 010		
Feuchtesensor 043 186		
Leuchtdiode gelb 001 013		
Infrarot-Sendediode 001 012		
Transistor-Modul pnp 043 066		
Vierfach-Operationsverstärker IC 324 001 016		
7stufiger Zähler IC 4024 001 017		
Mosfetmodul 042 956		
Timer-Modul mit IC 555 001 014		
Potentiometer P2, 100kΩ 001 011		

Schaltzeichen



Ersatzteile nur mit Bestellschein erhältlich!

Bestellschein mit beiliegender Karte anfordern!

Sie können sich den benötigten Bestellschein auch
direkt aus dem Internet unter

www.kosmos.de

herunterladen und dann ausgefüllt an den
KOSMOS-Ersatzteil-Service (Adresse siehe Rückseite)
schicken.

Auf der Kosmos-Homepage finden Sie auch
Informationen zu anderen Experimentierkästen
und zum weiteren Programm des Kosmos-
Verlages:

Spiele · Bücher · Kalender · CDs · Videos

Natur · Garten & Zimmerpflanzen · Heimtiere
Pferde & Reiten · Astronomie · Angeln & Jagd
Eisenbahn und Nutzfahrzeuge · Kinder & Jugend

Inhaltsverzeichnis

Montageanleitung electronic XN 3000.....	7	Hilfe von außen.....	33	Jedem das Seine.....	60	Ein und aus mit Infrarot.....	109
Die Montage der Pulte.....	7	Insider-Info 9.....	33	MOS-Logik.....	61	22. Drähte für Licht.....	110
Der Drehko und die Pots.....	8	Der Transistor.....	33	Gleitende Übergänge.....	62	Der goldene Schnitt.....	110
Der Lautsprecher und das Meßwerk.....	8	Denkfließen.....	34	Ein Hauch von Feuchte.....	63	Kraft durch Licht.....	111
Die Stromversorgung.....	9	Enterterschaltung.....	35	Insider-Info 13.....	63	23. Zur Entspannung: Spielweise (1).....	113
Drabücken und Leitungen.....	10	Und wieder eine Schwelle.....	35	Mehr als eine Folie Draht.....	63	Nostalgie auf Schienen.....	113
LED-Halter.....	11	Verstärker oder Schalter?.....	36	Ein ideales Paar.....	64	Das Maß ist voll.....	114
Der LWL-Halter.....	12	Aus ja wird Nein.....	36	Verlustgeschäft.....	65	24. Operationsbasis OP.....	116
IC-Former und Ejector.....	13	Kollektorschaltung.....	36	Die Colpitts'sche Lösung.....	66	Vorbild Wasserwaage.....	116
Das erste Experiment.....	14	B · B – die Stromlawine.....	37	Kleine Radios – selbstgebaut.....	66	Komparator-Praxis: Integrator.....	118
Warnlinker mit Knack.....	14	Emittierfänger als „Zeitlicht“.....	38	Der entartete Schwingkreis.....	66	Integrierte Zeit.....	119
Es geht auch langsamer.....	15	Schwelle mit Gefühl.....	38	Eine gute Antenne ist der beste Verstärker.....	66	Krach-Integrator.....	121
Vom Knacken zum Piepen.....	15	Ausgleich durch Gleiche.....	38	Aktivantenne.....	67	Amplituden-Geometrie.....	121
Es geht noch höher.....	15	Zu zweit kein Problem.....	39	Insider-Info 14.....	68	Step by step – eine Treppe nach oben.....	122
Schnelle Ohren, langsame Augen.....	15	Transistoren schalten.....	39	Audion: Transistor spart Diode.....	69	Sinus – die sanften Übergänge.....	123
Schaltbild und Aufbaubild.....	15	Stabiles Zweidirektigkeit.....	39	Gute Reflexe.....	70	25. Verstärkung nach Maß.....	124
Die zwei Gesichter einer Schaltung.....	15	Flipflop als Single.....	39	Fast ein Sender.....	70	Die Feder an der Kugel.....	124
Kosmos der Elektronik.....	16	Einer für Zwei: dynamisches Flipflop.....	40	Empfänger mit Rückkopplung.....	71	Invertierender Eingang mit zwei Jobs.....	124
Insider-Info 1.....	16	Insider-Info 10.....	41	Was Bipolaren recht, ist Unipolaren billig.....	72	Die Praxis ruft.....	124
2. Über-sinnliche Elektrizität.....	18	Impuls geteilt durch Zwei.....	41	Der „gläserne“ AMP.....	74	Dem Lärm auf der Spur.....	126
3. Spannung und Strom.....	18	Dynamik anderer Art.....	41	27. AMP-Schaltungspraxis.....	75	Gewaltenteilung.....	124
Der lange Marsch der Elektronen.....	19	monostabiler Multivibrator.....	41	Tönen und Blinken.....	75	Die Praxis ruft.....	124
Insider-Info 2.....	20	Eigendynamik: astatibler Multivibrator.....	43	Integrierter Schmitt.....	76	26. Schaltzentrale OP.....	127
Insider-Info 3.....	20	Für Auge und Ohr.....	43	Monoflop und Flip-Flop – kein Flop mit AMPI.....	76	OP(A) Schmitt.....	127
Die Kraft, die Elektronen schiebt.....	21	Schwellen mit Sprung: Schmitt's Trigger.....	44	AMP von innen.....	77	Handbetriebener AMV.....	128
Insider-Info 4.....	21	Transistor als Verstärker.....	45	Strome im Spiegel.....	78	Befindlichkeits tests.....	129
Leistungsgesellschaft.....	21	Verstärker für Wechselspannung.....	45	28. Konstruktive Differenzen.....	79	Ein- und Keinschwingen.....	132
Widerstand als Katastrophenschutz.....	22	Geteilte Batteriespannung.....	45	Füllstandszeiger für Ladungen.....	80	Die Macht des Messens.....	132
Laßt hundert Blumen blühen!.....	22	Insider-Info 11.....	45	Sensible Partnerschaft.....	80	Strom-Linien.....	132
Farbe ins Bild.....	23	Opas Brummetest reaktiviert.....	45	Erfolge der Stärke.....	81	Maß-Stäbe.....	133
Reihen und Parallelen.....	23	Klopfzeichen.....	46	Brücken der Elektronik.....	82	Eigenbedarf unerwünscht.....	134
Spannung, Strom und Widerstand – das Gesetz von Ohm.....	24	Gleitende Übergänge.....	46	Der Ton, der aus der Kälte kommt.....	82	Retfender OP.....	134
Wege zu Ohm.....	24	Widerspruch.....	47	Brücke mit Beleuchtung.....	83	Verstärkung mit Kompromiß.....	135
Insider-Info 5.....	25	Spar-Effekt.....	48	29. Multitalent NE 555.....	85	OP-Ohmometer.....	137
Unlabarbarer Widerstand.....	26	Insider-Info 12.....	48	Die glorreichen Fünf.....	85	Thermometer für Umweltengel.....	138
Kondensator: Box für Elektronen.....	27	Komplementärschaltungen.....	48	Schwellenhopper: 555 als Trigger.....	85	Eine feine Sache.....	139
Strom in kleinen Dosen.....	27	(Thyristor-Struktur).....	48	Flip und Flop im 555.....	86	Hygrometer mit OP.....	141
Flächen auf Distanz.....	27	Elektronische Überstrom-Sicherung.....	49	Takt und Ton.....	87	28. On Chip: Teile und zähle!.....	144
Insider-Info 6.....	27	PUT-Metronom.....	49	Das große Heulen.....	92	Von analog zu digital.....	144
Sanfte Übergänge.....	28	Komplementär-Blinker.....	50	Zeit im Spiel: Monoflop mit 555.....	94	Zur Person.....	146
Insider-Info 7.....	28	Monostabil in komplementär.....	51	Sensor-Tips.....	96	Zeit-Delner.....	148
Flächen im Verbund.....	28	pnp-Darlington.....	53	Praktische Triggerreien mit dem 555.....	98	Digital-Sound.....	149
Zeit-Multiplikator.....	28	Transistorlogik.....	53	Alarm aus dem Timer.....	100	Verkehrsregler.....	150
Wechselnde Verhältnisse.....	29	AMP TBA 820.....	55	Nervenprobe.....	101	...der Werte wird gefangen!.....	151
Insider-Info 8.....	29	Verstärkt alles, was sich hören läßt.....	55	21. Opto-Elektronik – ein Einstieg.....	102	Feuerwerk der Töne.....	152
Leiten und Halbleiten.....	29	Wunschöne.....	56	Halbleiter unter sich.....	102	29. Spielweise (2).....	154
Gestörte Verhältnisse im Kristallgitter.....	30	Kurzer Ausflug ins hochfrequente Landle.....	57	Who is who?.....	102	Von Star-Pieps bis star wars.....	155
Nützliche Konsequenzen.....	30	Das Geheimnis des Detektors.....	57	Schmitt's Lichtlampe.....	104	Ton in der Schwebe.....	155
Geben und Nehmen – der pn-Übergang.....	31	Transistor der anderen Art: MOSFET.....	58	Leuchtendes Vibrato.....	105	Aus Eins mach Zwei.....	157
Die Elektronen-Einbahnstraße.....	31	Die Quelle hinterm Tore.....	58	555 im neuen Licht.....	106	OP-Logik.....	158
Bunte Vielfalt.....	32	Doppel sperrt besser.....	58	555 als Aktivposten.....	108	Ton-Farben.....	162
		Plus-Minus-Swing am Gate.....	59	AMP mit IR-Schranke.....	109	Schlüsselfinder nach Art des Hauses.....	163
						Alarm vom Feinsten.....	165
						30. Fehlersuche.....	166
						Sachwörter.....	167

Das KOSMOS electronic-Labor XN 3000

Das electronic-Labor XN 3000 besteht aus drei Materialsätzen, den sogenannten electronic Boxen 1 bis 3, und diesem 170 Seiten starken Anleitungsbuch mit über 300 Experimenten. Die Inhalte der einzelnen Boxen sind auf den Seiten 2, 3 und 4 detailliert mit Foto, Artikelnummer, Schaltzeichen und Aufbausymbol aufgelistet. Die meisten Teile sind in sogenannten Multipacks verpackt bzw. aufgesteckt, was ebenfalls aus den Materiallisten hervorgeht. Einige Teile, nämlich die Spritzbäume mit Knöpfen usw., sind im Inneren der Pulte zu finden.

Es ist ratsam das Experimentierbuch von Anfang an Schritt für Schritt durchzuarbeiten. Nur dann kennt man alle Teile des Labors genau und kann alle Experimente erfolgreich durchführen. Unbedingt zu beachten sind die Sicherheitshinweise auf der ersten Umschlaginnenseite.

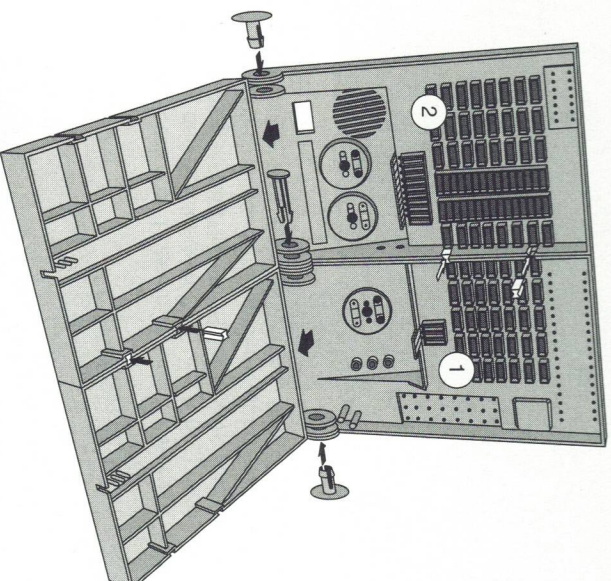
Wir wünschen allen Experimentatoren viel Erfolg und vernünftige Stunden mit dem KOSMOS electronic-Labor XN 3000!

Montageanleitung electronic XN 3000

Die Montage der Pulte

Wir beginnen mit dem Zusammenbau der beiden Pulte nach Montagebild 1. Dazu werden die Unterteile (070 407) mit zwei Verbindungsstiften aus Beutel 2 (001 006 in Multipack 7) zusammengesteckt und die Oberteile - Pult 1 (070 207), von hinten gesehen rechts, und Pult 2 (070 307) links - mit den Scharnieren in die Unterteile geschoben. Von links und rechts wird nun je eine Kappe von Spritzbaum 1 (004 012) durch die Scharniere des Unter- und Oberteils gesteckt. Die Verbindung des Mittelstücks erfolgt mit dem Scharnierbolzen von Spritzbaum 2 (004 022) der einfach von links oder rechts durch die Scharniere gesteckt wird. Nun werden noch die beiden Oberteile mit den restlichen zwei Verbindungsstiften zusammengesteckt und bilden so eine Einheit. Im geräumigen Bauch unseres Experimentierpults können wir nicht benötigte Teile sicher aufbewahren.

Die Lochraster auf Pult 1 links und hinten dienen als sicherer "Parkplatz" für Widerstände, Kondensatoren, Module etc., die im Moment nicht gebraucht werden.

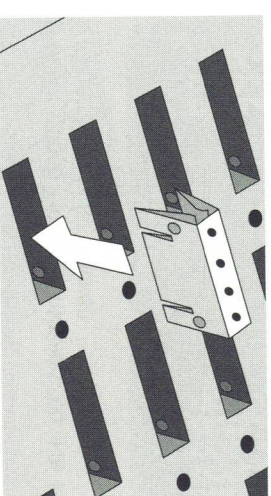


Montagebild 1. Zusammenbau des Experimentierpults.

Bei einigen Experimenten werden die beiden Pulte einzeln gebraucht (z.B. bei Fernsteuerversuchen mit der Infrarot-sendediode und dem Fototransistor). In diesen Fällen werden die Verbindungsstifte wieder aus den Unter- und Ober-teilen entfernt und der mittlere Scharnierbolzen herausgezogen. An seiner Stelle werden dann die beiden übrigen Kappen in jedes Pult eingesteckt. Man erhält so zwei getrennte voll funktionstfähige Experimentierpulte.

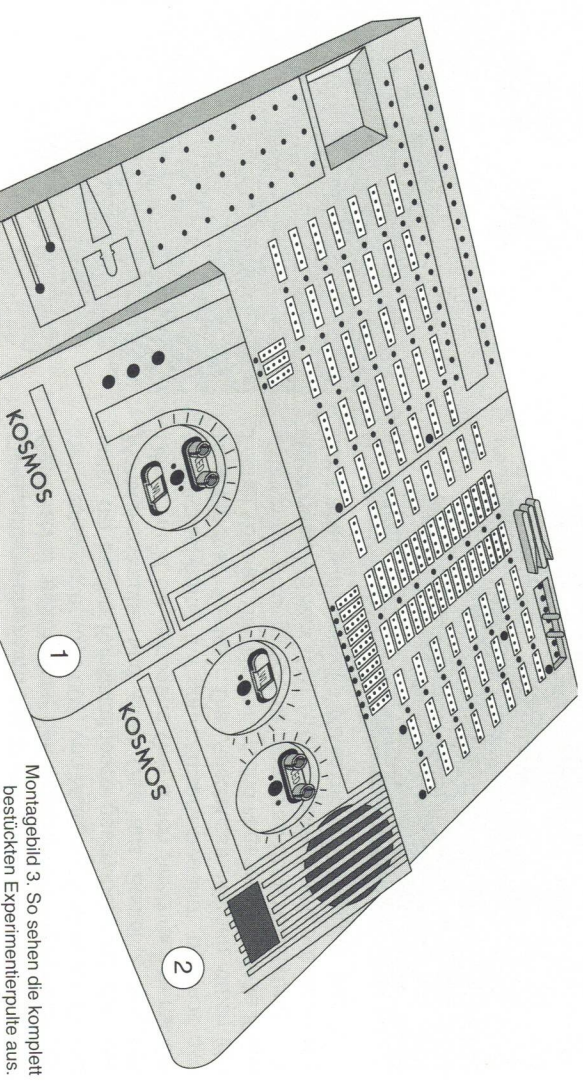
Die Steckfedern

Die Steckfedern (000 612) aus Multipack 6, 7 und Box 3 werden nach Montagebild 2 in die Pulte eingesteckt.



Montagebild 2. Die Steckfedern in die Aussparungen einstecken bis sie einrasten.

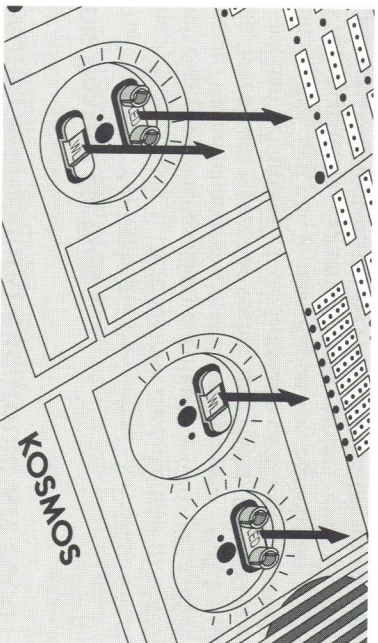
Sie dienen zum Einstecken der Bauteile, Module und Drahtbrücken, geben diesen sicheren Halt und stellen die elektrische Verbindung der einzelnen Teile untereinander her.



Montagebild 3. So sehen die komplett bestückten Experimentierpulte aus.

Der Drehkondensator und die Potentiometer

Bevor wir den Drehkondensator und die Potis montieren müssen wir die Halterungen "LWL" und "LED" aus Pult 1 und 2 entfernen und gut verwahren, da wir sie später für die optoelektronischen Versuche brauchen.



Montagebild 4. Die Kunststoffteile "LWL" und "LED" vorsichtig durch Verdrähtungen aus den Pulten lösen. Grate abschneiden.

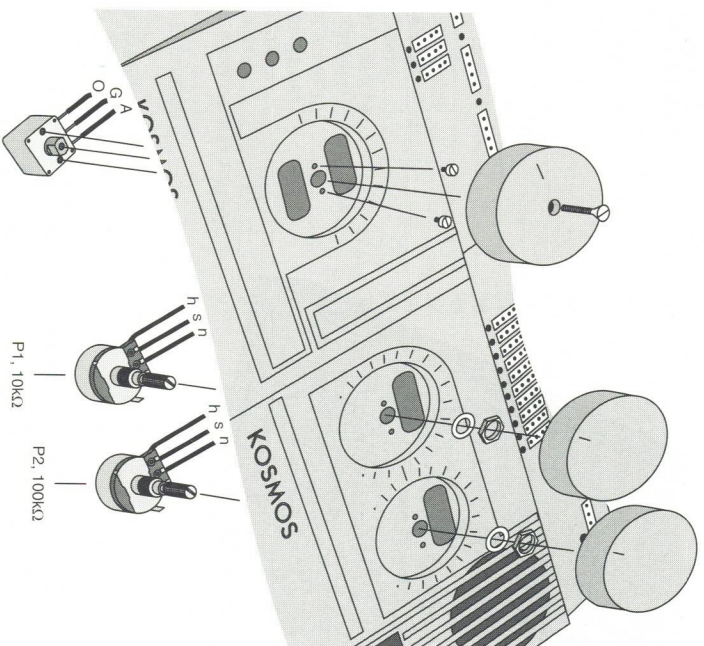
Nun bauen wir den Drehkondensator (000 143) von Multipack 4 ins Pult 1 und die Potentiometer (001 004 und 001 011) von Multipack 5 und electronic Box 3 ins Pult 2 ein. Dabei werden die Anschlüsse des Drehkondensators und der Potentiometer zu den Steckedern hin ausgerichtet wie es Montagebild 5 zeigt.

Der Drehko wird mit den zwei kleinen Zylinderkopfschrauben aus Beutel 1 (000 148) von Multipack 6 im Pult 1 befestigt. Die Drehkoachse wird ganz nach links gedreht, der Knopf von Spritzbaum 1 mit dem Loch in der Mitte, mit nach links zeigendem Markierungsstrich aufgesetzt und mit der langen Senkkopfschraube aus Beutel 1 angeschraubt.

Das 10-Kiloohm-Potentiometer P1 (001 004), befestigen wir mit der aufgedrehten Sechskantmutter im Pult 2 links. Dann wird die Potiachse nach links bis zum Anschlag gedreht und der Knopf von Spritzbaum 2 (004 022) aufgesteckt, so daß der Markierungsstrich des Knopfes und der Markierungspunkt auf der Skala im Pult übereinander stehen. P2 wird entsprechend montiert.

Die Anschlüsse des Drehkos O, G und A (lesbar auf der Rückseite) werden durch die Löcher vor den Steckedern A, B und C von Pult 1 gezogen und in die Steckedern eingesteckt. Die innerhalb des Pults verlaufenden Kabel werden in die Schlitze des kammmähnlichen Steges gedrückt und damit fixiert.

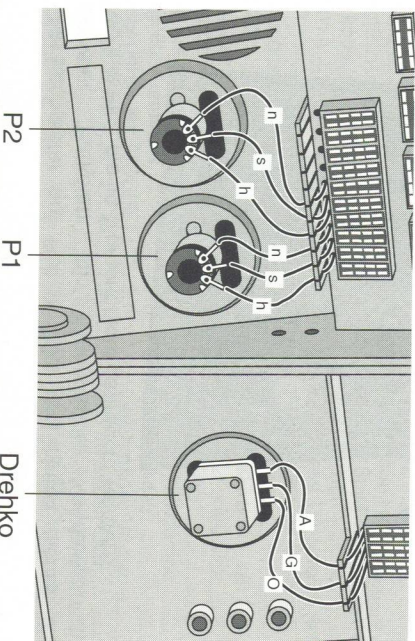
Montagebild 6. Fertig eingebaut: Potis und Drehko.



Drehkondensator (Drehko)

Montagebild 5. Einbau des Drehkos und der Potis.

Die Anschlüsse der Potis (h, s und n) werden durch die Löcher vor den Steckedern D, E und F (P1), bzw. G, H und I (P2) gezogen und in die Steckedern eingesteckt. Die innerhalb des Pults verlaufenden Kabel werden ebenfalls in die Schlitze des kammmähnlichen Steges gedrückt und sind damit fixiert.



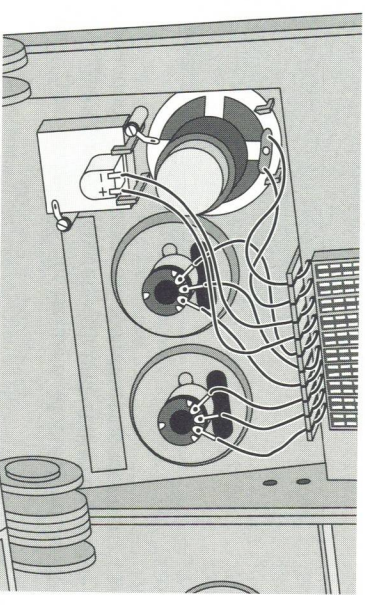
P2

P1

Drehko

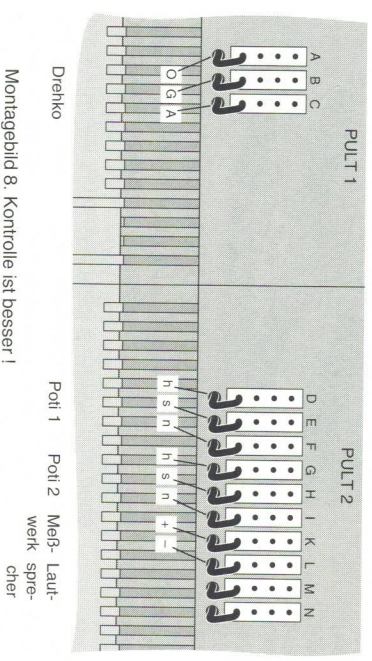
Der Lautsprecher und das Meßwerk

Ganz rechts außen, unter den Schlitzen von Pult 2 wird nun der Lautsprecher (001 003) von Multipack 5 montiert. Er wird unter die beiden Kunststoffnasen geschoben und mit einer Montageschraube und einer Öse aus Beutel 2 befestigt. Dabei drückt die gebogene Öse durch Anschrauben mit der Montageschraube auf den Lautsprecher und hält den Lautsprecher so fest. Die Anschlüsse werden durch die Löcher vor den Steckedern M und N gezogen und die Kabel dabei zur Fixierung in die kammartigen Schlitze gedrückt. Auch das Meßwerk (001 010) von Box 3 wird auf diese einfache aber wirkungsvolle Weise montiert (Montagebild 7).



Montagebild 7. Das Meßwerk und der Lautsprecher werden eingebaut.

Nun wird noch einmal kontrolliert, ob alle Leitungen in der richtigen Steckeder stecken.



Drehko

Pult 1

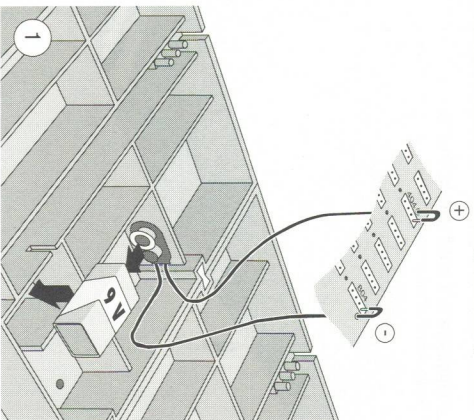
Pult 2

Meß- Laut- spre- cher

Montagebild 8. Kontrolle ist besser!

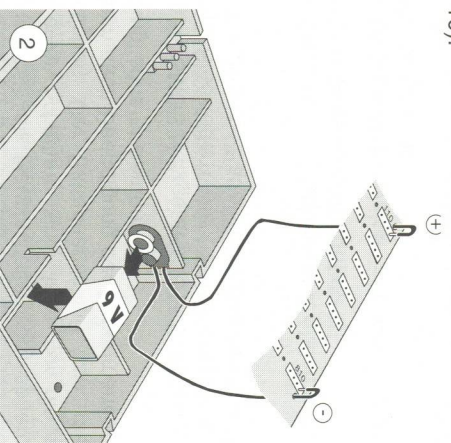
Die Stromversorgung

Jetzt wird es Zeit für den Batterieanschluß zu sorgen. Dazu wird einfach der Batterieclip (042 106) von Multipack 6 in das dafür vorgesehene Fach (Pult 1) gelegt und seine Anschlüsse durch die Löcher bei Steckfeder 404 (roter Plusanschluß) und 804 (schwarzer oder blauer Minusanschluß) gezogen und dann in diese Steckfedern eingesteckt (Montagebild 9).



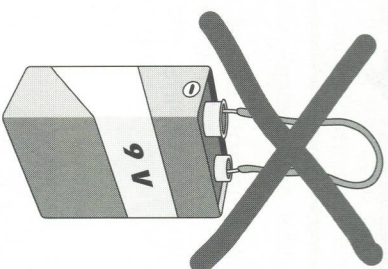
Montagebild 9. Unbedingt auf richtige Polung achten: Plus (rot) 404, Minus (schwarz oder blau) 804.

In gleicher Weise wird der zweite Batterieclip aus Box 3 (Pult 2) montiert, wobei hier der Plusanschluß in Steckfeder 110 und der Minusanschluß auf Steckfeder 810 gesteckt wird (Montagebild 10).



Montagebild 10. Auch hier unbedingt auf richtige Polung achten: Plus (rot) 110, Minus (schwarz oder blau) 810.

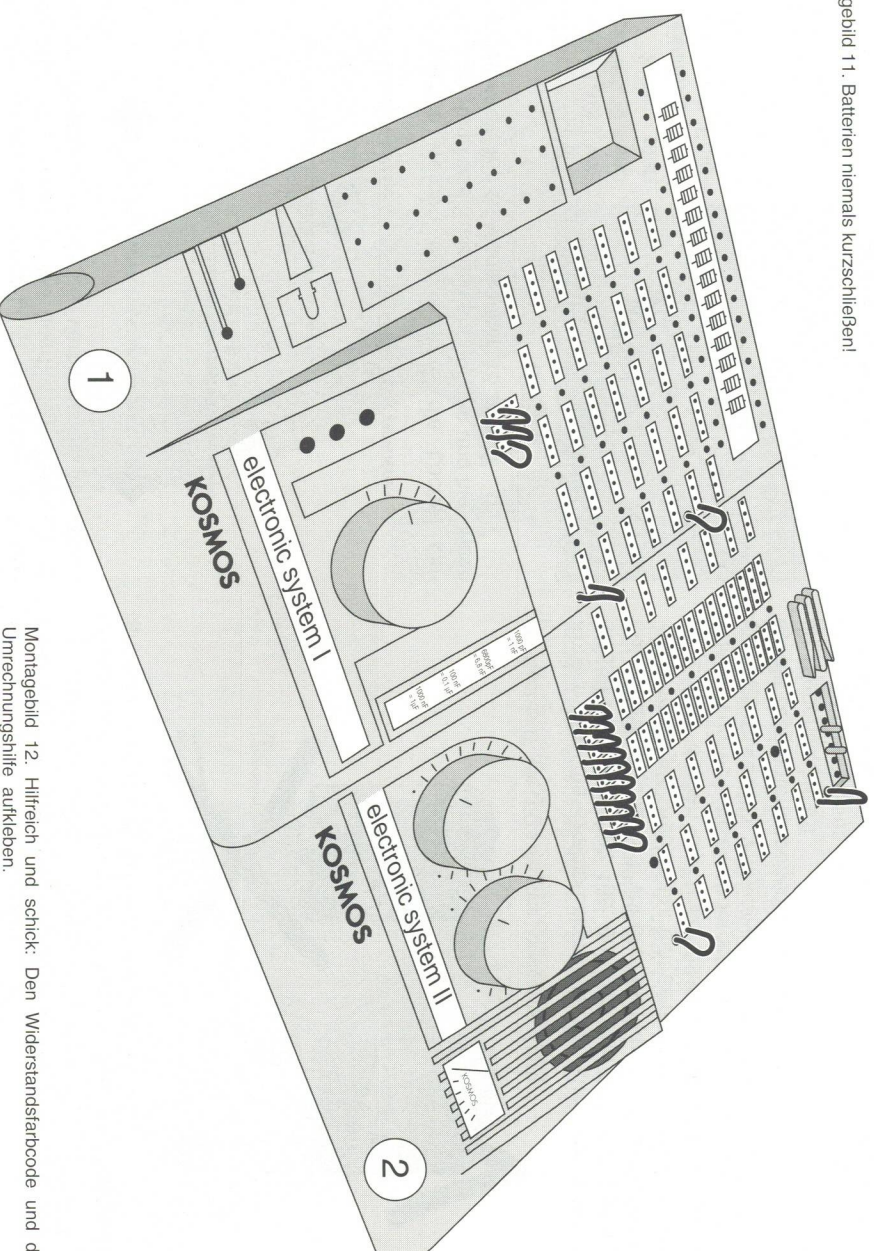
Beim Umgang mit Batterien bitte keine gefährlichen Experimente! Das Kurzschließen von Batterien kann zu deren Explosion führen!



Montagebild 11. Batterien niemals kurzschließen!

In den meisten Versuchen, besonders bis zum Einsatz des Operationsverstärkers 324 (001 016) von Box 3, arbeiten wir nur mit dem Batterieanschluß in Pult 2.

Wir schneiden nun mit einer Papierschere aus dem farbigen Einhefter (im Anleitungsbuch) den Widerstandsstreifen, die Bezeichnungen "electronic system I" und "electronic system II" sowie die Umrechnungstabelle für Kondensatoren aus und kleben diese mit etwas Alleskleber in die dafür vorgesehenen Stellen auf Pult 1 bzw. Pult 2 (Montagebild 12).



Montagebild 12. Hilfreich und schick: Den Widerstandsfarbcodes und die Umrechnungshilfe aufkleben.

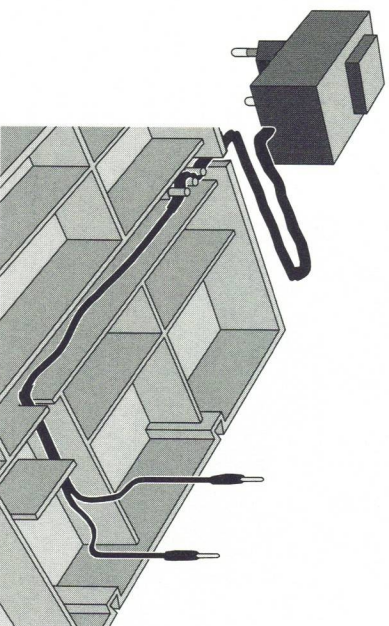
In fast allen Schaltungen ist eine Drahtbrücke mit der Bezeichnung "S" bzw. bei Verwendung von beiden Batterieanschlüssen "S1" und "S2" als Hauptschalter vorgesehen. Zum Ausschalten einer Schaltung sind dann nur diese Brücken herauszuziehen. Der Batterieanschluß bzw. die Batterie müssen dann nach Beendigung der Experimentiersitzung nicht unbedingt entfernt werden.

Bei Betrieb mit dem KOSMOS Netzgerät X (617 813) benutzen wir die gleichen Steckdornen wie bei Batteriebetrieb. Dazu müssen jedoch vorher die Batterieclips aus den Pulten entfernt werden.

Vorsicht: Niemals Batterien und Netzgerät X gleichzeitig anschließen !!! Es besteht Explosionsgefahr !!!

Bitte immer die Sicherheitshinweise auf der ersten Umschlaginnenseite beachten!

Die Anschlüsse der Netzgeräte werden durch die Ausparungen an der Rückseite der Pulte gelegt und so um die drei Zapfen geschlungen daß eine gewisse Zugentlastung gewährleistet ist. Die Anschlüsse des KOSMOS Netzgerätes X werden durch die gleichen Löcher im Pult gezogen wie zuvor die der Batterieclips und in die gleichen Steckdornen gesteckt (Montagebild 13).

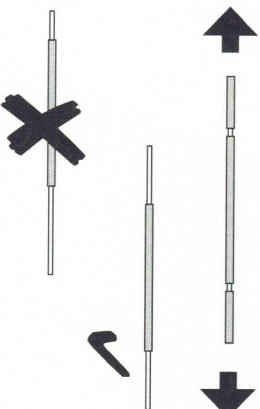


Montagebild 13. Umwelbewußt experimentieren: KOSMOS Netzgerät X statt Batterien!

Drahtbrücken und Leitungen

Die langen (000 292) und kurzen (000 282) Drahtstücke in den Beuteln aus Multipack 6, 7 und Box 3 werden zu Drahtbrücken gebogen. Dazu benutzen wir die Biegevorrichtung in Pult 1. Für die langen Drahtbrücken ist das 30mm-Loch,

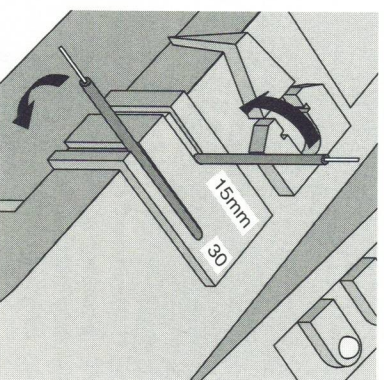
und für die kurzen das 15mm-Loch zuständig. Von den Drahtstücken wird zunächst die überflüssige Isolation an den Enden abgezogen und das verbleibende Mittelstück zentriert.



Montagebild 14. Isolationsreste abziehen und Mittelstück zentrieren.

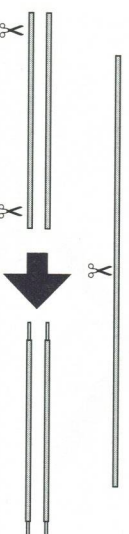
Die Drahtstücke werden senkrecht in die Löcher eingesteckt, zum Rand des Pults hin abgebogen und hier nach unten abgewinkelt, wie es Montagebild 15 zeigt.

Aus den langen Draht-



Montagebild 15. Einfach herzustellen: Drahtbrücken.

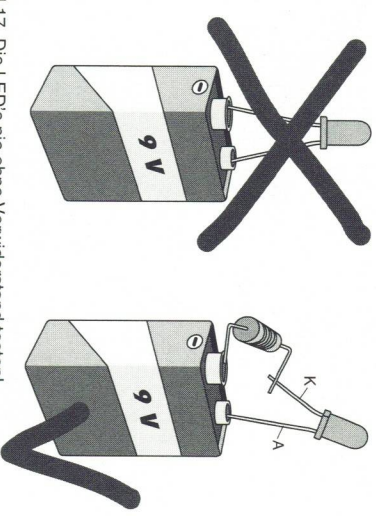
stücken (042 106) von Multipack 6, 7 und Box 3 kann man Anschlußleitungen für LEDs und den Fototransistor herstellen. Bei allen Versuchen bei denen die seitliche Montage in den Pulten nötig ist (Lichtschranken etc.) werden die Leitungen gebraucht. Dazu werden 5 Drahtstücke in der Mitte mit einer kräftigen Papierschere oder mit einem richtigen Seitenschneider zerschnitten und auf jeder Seite ca. 15mm lang abisoliert. Eine so vorbereitete zweigeteilte Leitung reicht für eine LED bzw. den Fototransistor aus. Im nächsten Abschnitt kommen sie zum Einsatz.



Montagebild 16. Die Anschlüsse für LED's und Fototransistor.

Fototransistor und Leuchtdioden

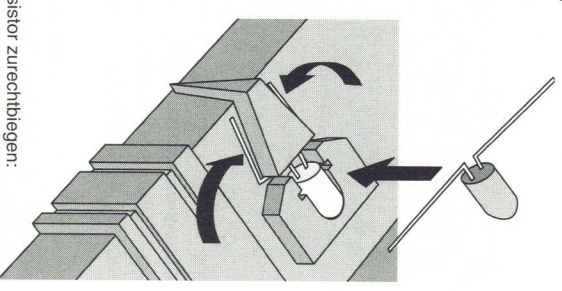
Leuchtdioden sind sehr empfindliche Bauteile und dürfen nie überlastet werden. Daher schließen wir die Leuchtdioden niemals direkt an eine Batterie oder das Netzgerät an, sondern nur über einen Vorwiderstand!



Montagebild 17. Die LED's nie ohne Vorwiderstand testen!

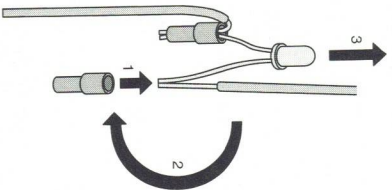
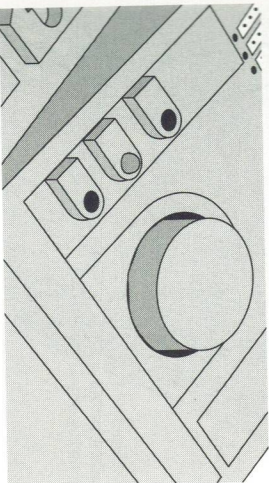
Ähnlich wie die Drahtbrücken werden auch die Leuchtdioden (000 145, 002 198, 001 013 und 001 012) und der Fototransistor (002 159) vor dem Einsatz für unsere Zwecke zurechtgebogen. Auch dafür gibt es auf Pult 1 eine Biegehilfe. Zuerst werden die Anschlüsse der Bauteile in einem Winkel von 90° auseinandergebogen. Dann werden sie in die LED-Biegehilfe eingelegt und die Anschlüsse wieder soweit zusammengebogen wie es die Biegehilfe zuläßt.

Nach dem Loslassen der Anschlüsse stellt sich automatisch der richtige Abstand von 15mm ein.



Montagebild 18. LED und Fototransistor zurechtbiegen: Mit der Biegehilfe ein Kinderspiel.

Mit den Kontakthülsen (004 002) können wir die LEDs und den Fototransistor mit Leitungen versehen. Wir entfernen zunächst die Kontakthülsen von dem Spritzbaum. Dann wird je ein Anschluß des Bauteils zusammen mit dem abisolierten Ende einer langen Leitung in eine Kontakthülse gesteckt und diese dann nach unten scharf abgebogen. Danach kann bei Bedarf das Bauteil in eines der drei Löcher in Pult 1 gesteckt werden (Montagebild 19).



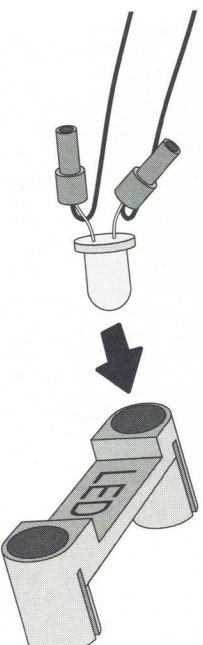
Montagebild 19.
Optoelektronische Bauteile mit Leitungen zum Einbau in Pult 1.

Die Leitungen werden dann anstelle des Bauteils in die entsprechenden Steckfedern des Aufbaus gesteckt. Sie werden dazu von unten durch die entsprechenden Löcher neben den Steckfedern gezogen und eingesteckt, genauso, wie wir das schon von den Poits, dem Drehko usw. her kennen.

LED-Halter

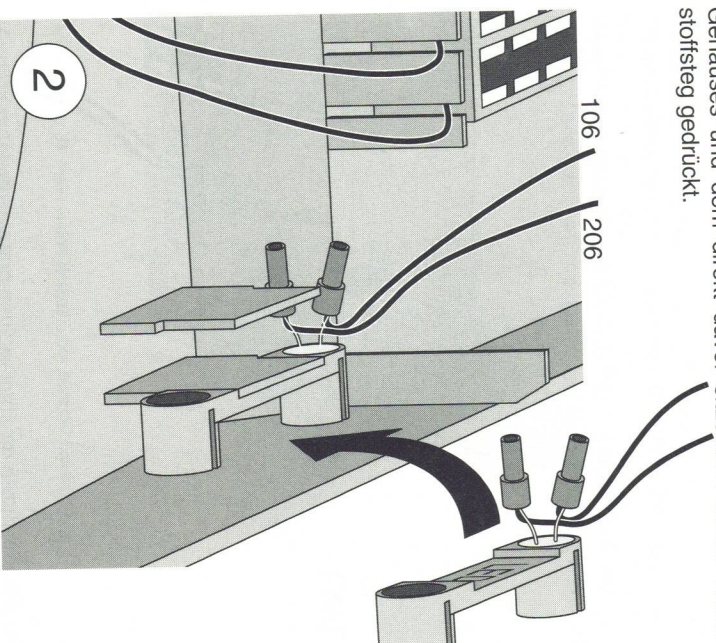
Bei allen Versuchen, die eine seitliche Montage der optoelektronischen Bauteile erforderlich machen (Lichtschranken usw.), benutzen wir zu deren Befestigung die LED-Halter. Wir nehmen einen LED-Halter, den wir aus Pult 1 oder 2 zu Anfang der Pultmontage entfernt haben, und

den mit Leitungen versehenen Fototransistor TF zur Hand und stecken ihn von der nicht geschlitzten Seite her in das Loch. Die Leuchtdioden haben Abweichungen im Außendurchmesser, deshalb ist das Loch gerade so groß, daß auch die größten Leuchtdioden noch eingesteckt werden können. Leuchtdioden mit kleineren Abmessungen müssen eventuell mit einem Papierstreifen festgeklemmt werden (Montagebild 20).



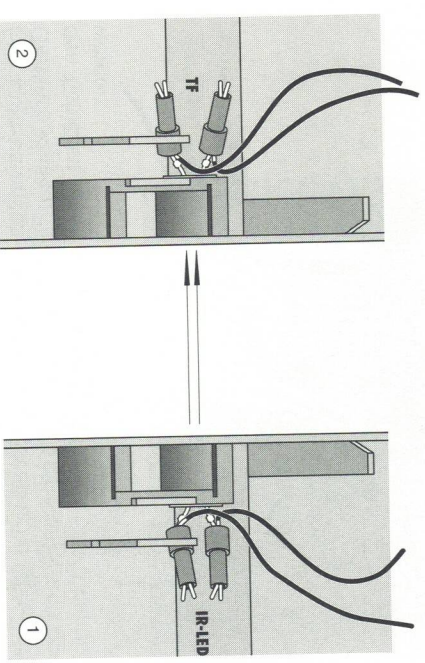
Montagebild 20. LED-Halter wird mit Fototransistor bestückt.

Der LED-Halter samt Fototransistor wird innen im Pult 2 in die Aussparung zwischen den seitlichen Löchern des Gehäuses und dem direkt davor sitzenden ersten Kunststoffsteg gedrückt.



Montagebild 21. Montage des Fototransistors.

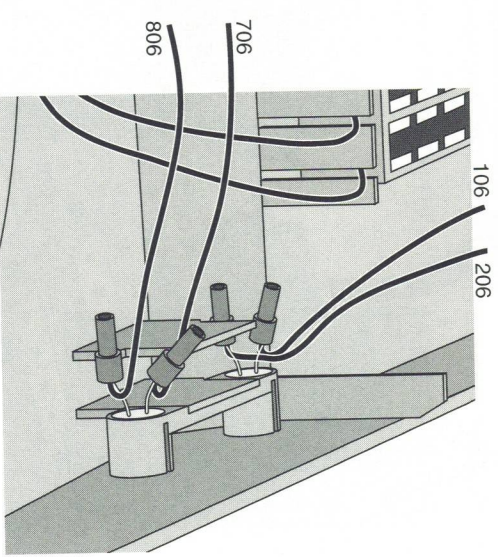
In gleicher Weise wird die Infrarot-Sendediode (IR-LED) im Pult 1 montiert (Montagebild 22).



Montagebild 22. Montage der Infrarot-Sendediode (IR-LED).

Bei allen Versuchen mit Lichtschranken-Charakter, also mit getrenntem Sender und Empfänger, wird diese Montageart angewendet.

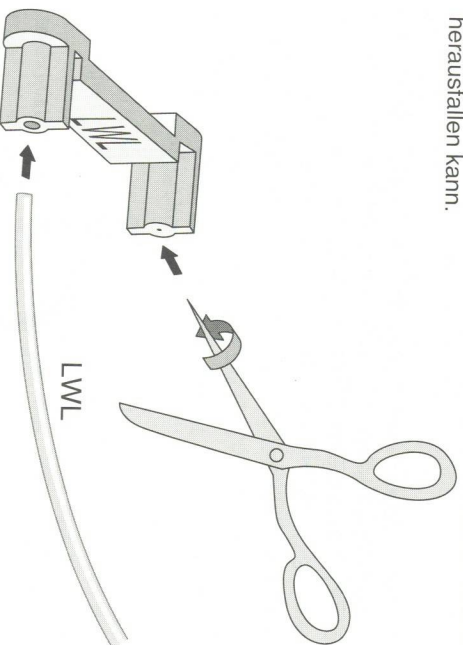
Für den Versuch Reflexlichtschranke werden beide Bauteile im Pult 2 montiert und zwar nebeneinander im gleichen LED-Halter. Das Montagebild 23 zeigt diese Anordnung. Die Nummern an den Anschlüssen beziehen sich auf die entsprechenden Steckfedern und können auch dem Aufbaubild zu diesem Versuch entnommen werden.



Montagebild 23. TF und IR-LED nebeneinander montiert.

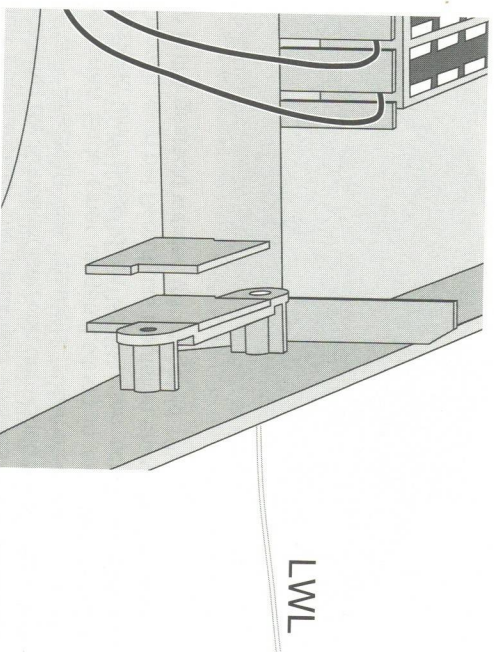
Der LWL-Halter

Der Lichtwellenleiter -kurz LWL- (000 676) wird zusammen mit dem LWL-Halter verwendet. Zuerst müssen wir die kleinen Löcher des LWL-Halters mit einem spitzen Gegenstand (Vorsicht! Verletzungsgefahr!) ein wenig aufweiten, sodaß der LWL zwar hineinpaßt, aber nicht von selbst wieder herausfallen kann.



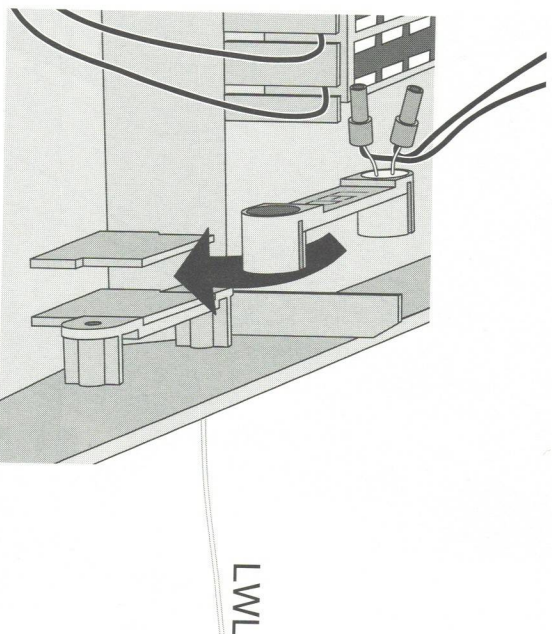
Montagebild 24. Der LWL-Halter wird angepaßt.

Nach der Abstimmung des Halters auf den LWL wird er zwischen den ersten Kunststoffsteg und die Wand von Pult 2 gesteckt. Dann kann von außen der LWL in den Halter eingeschoben werden. Er darf innen nicht überstehen.



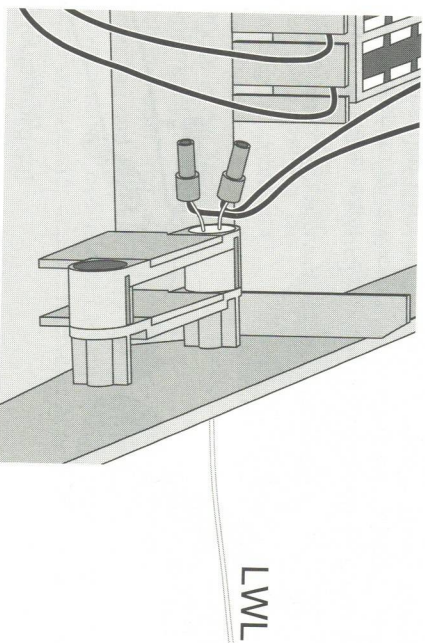
Montagebild 25. LWL wird eingeschoben.

Nun wird der LED-Halter mit dem Fototransistor oder der IR-LED zwischen den ersten und den zweiten Kunststoffsteg gesteckt.



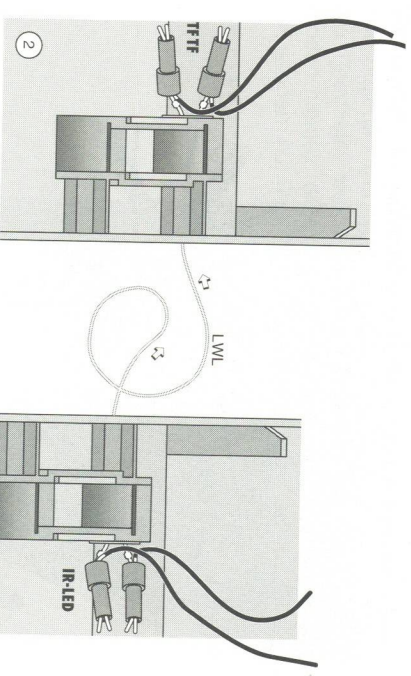
Montagebild 26. LED-Halter mit Bauteil zwischen beide Stege stecken.

In Montagebild 27 sieht man den Endzustand. Die optische Ankopplung ist geschafft.



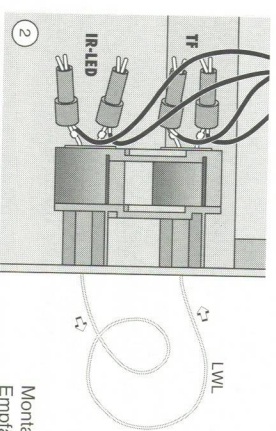
Montagebild 27. So werden beide Halter hintereinandergeschaltet.

Montagebild 28 zeigt uns den typischen Anwendungsfall für diese Montageart: links im Pult 2 sitzt als Empfänger der Fototransistor TF, rechts im Pult 1 als Sender die IR-LED. Dazwischen als optischer Übertragungsweg, auch um die Ecke, der LWL.



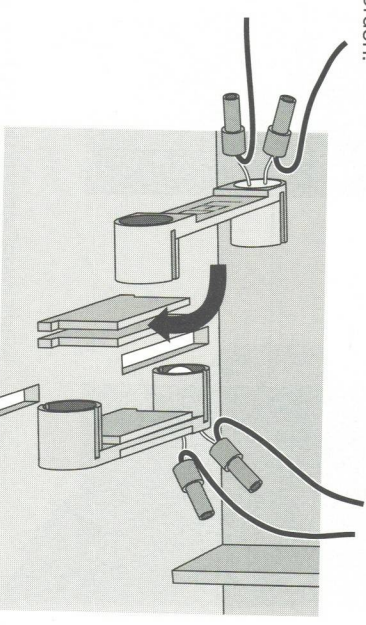
Montagebild 28. Optische Nachrichtentechnik mit LWL.

Selbstverständlich können auch bei LWL-Versuchen Sender und Empfänger in einem Pult sitzen.



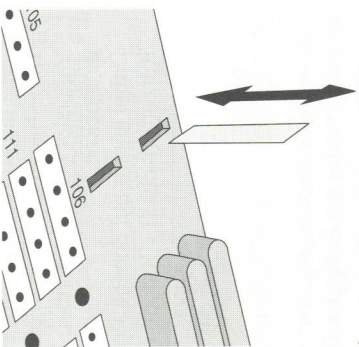
Montagebild 29. Sender und Empfänger unter einem Dach.

Für Lichtschranken- und Übertragungsversuche in einem Gehäuse können die beiden Kunststoffstege unter den beiden Schlitzen hinter der Steckleider 106 von Pult 2 benutzt werden.



Montagebild 30. Im Pult stört Fremdlicht nicht so stark.

Durch die beiden Schlitzze ist es möglich diese Minilichtschanke zu unterbrechen, ohne das Pult zu öffnen. Man schiebt hierzu einfach einen Papierstreifen in den Schlitz.

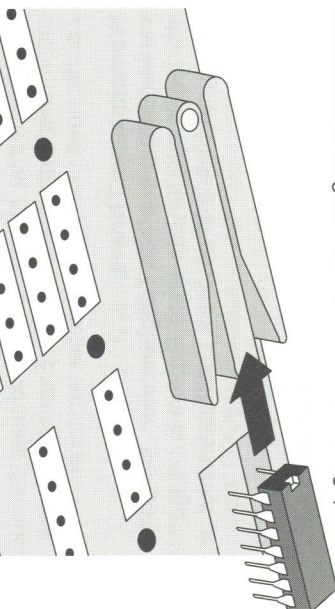


Montagebild 31.
Unterbrechung
von außen möglich.

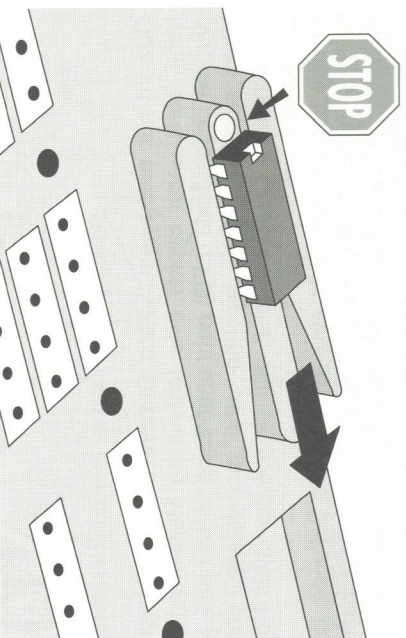
IC-Former und Ejector

Unser Experimentierkasten enthält zwei ICs, einen Vierfach-Operationsverstärker 324 (001 016) und einen Zählerbaustein 4024 (001 017), die nacheinander in den Schaltungen auf dem IC-Sockelmodul (001 015) eingesetzt werden. Um den Ein- und Ausbau zu vereinfachen, gibt es auf Pult 2 rechts oben zwei sehr nützliche Vorrichtungen, den Former und den Ejector.

Bevor wir mit den integrierten Schaltkreisen, kurz ICs, zu arbeiten beginnen, müssen wir diese vorbereiten. Gewöhnlich stehen die Anschlüsse eines ICs bei Anlieferung nicht senkrecht nach unten, sondern sind leicht nach außen gebogen. Dadurch ist es schwierig, sie ordentlich und ohne die Anschlüsse zu verbiegen in das IC-Sockelmodul zu stecken. Wir setzen dazu den IC auf den IC-Former und schieben ihn langsam bis zu dem Markierungspunkt STOP

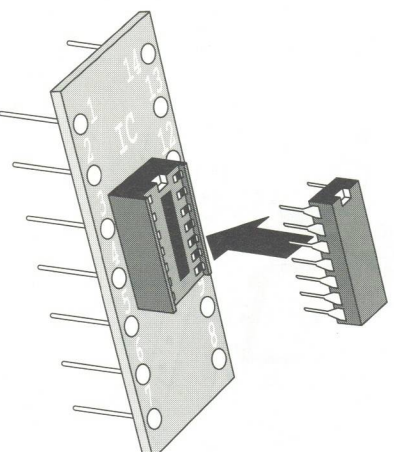


Montagebild 32. Die Anschlüsse der ICs sind Problemzonen.



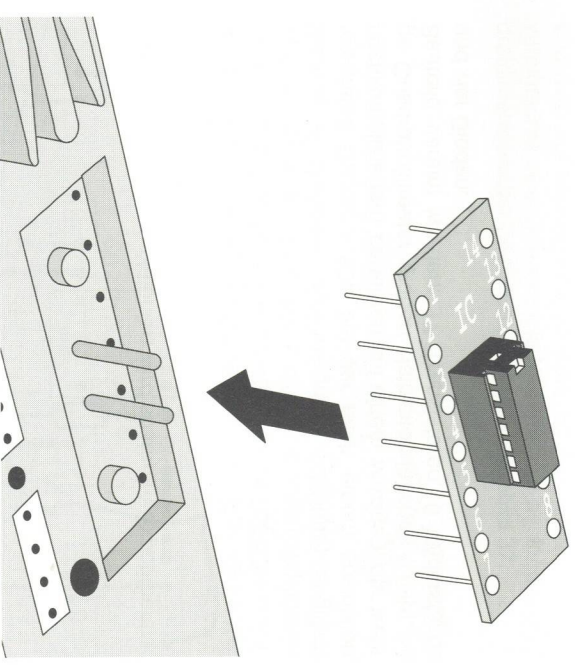
Montagebild 33. STOP. Bis hierher und nicht weiter!

Nun wieder vorsichtig herausziehen und dann in das Sockelmodul einstecken. Dabei achten wir unbedingt darauf daß die Kerbe in der einen Schmalseite des ICs beim Einstecken mit der Kerbe im Sockel des Moduls übereinstimmt. **Andernfalls ist der IC verpöit und kann zerstört werden!**



Montagebild 34. Rein in den Sockel, aber bitte nichtgerum!

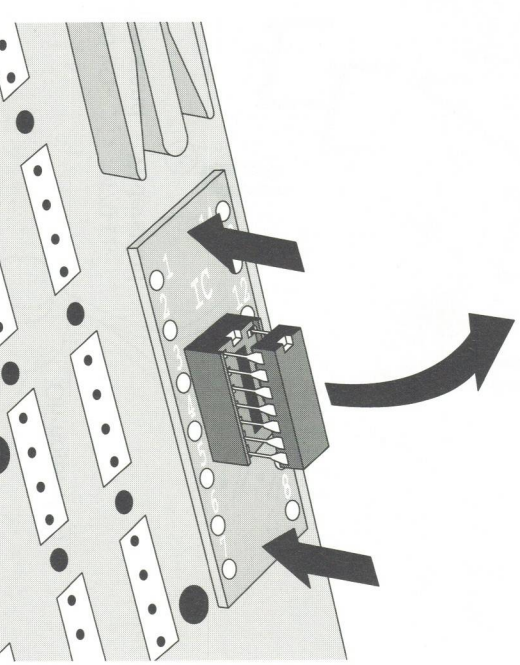
Auch das Wechseln eines IC ist problematisch. Hierfür sind die beiden Zapfen des Ejector auf Pult 2 vorgesehen.



Montagebild 35.

Auch fürs Auswechseln gibt es eine Vorrichtung, den Ejector.

Das Sockel-Modul wird mit den Löchern auf der Unterseite der Platine über die Zapfen gesetzt und dann die Platine mit leichtem gleichmäßigem Druck auf die freien Flächen des Sockel-Moduls nach unten gedrückt. Dabei wird der IC von den beiden Zapfen aus der Fassung gedrückt (engl. eject).



Montagebild 36. Dank Ejector verlässt unser IC unbeschädigt den Sockel.

Das erste Experiment

Bevor es richtig losgeht, hier ein kleines Schnuppereperiment. Hier lernen wir die im Experimentierteil folgenden Zeichnungen und Begriffe besser verstehen.

Warnblinker mit Knack,

verwandelbar in einen Tongenerator.

Wir legen uns für das erste Experiment folgende Bauteile bereit, am besten in unserem Lochraster links und oben im Pult 1:

Von Multipack 1

470- Ω -Widerstand, Farbcode: gelb-violett-braun.
15-k Ω -Widerstand, Farbcode: braun-grün-orange.
100-k Ω -Widerstand, Farbcode: braun-schwarz-gelb.
Elektrolytkondensator 100 μ F.
Außerdem zum Umbau in den Tongenerator
33-k Ω -Widerstand, Farbcode: orange-orange-orange.
und von Multipack 2 Kondensator 100 nF bzw. 0,1 μ F (siehe Umrechnungshilfe auf Pult 1).

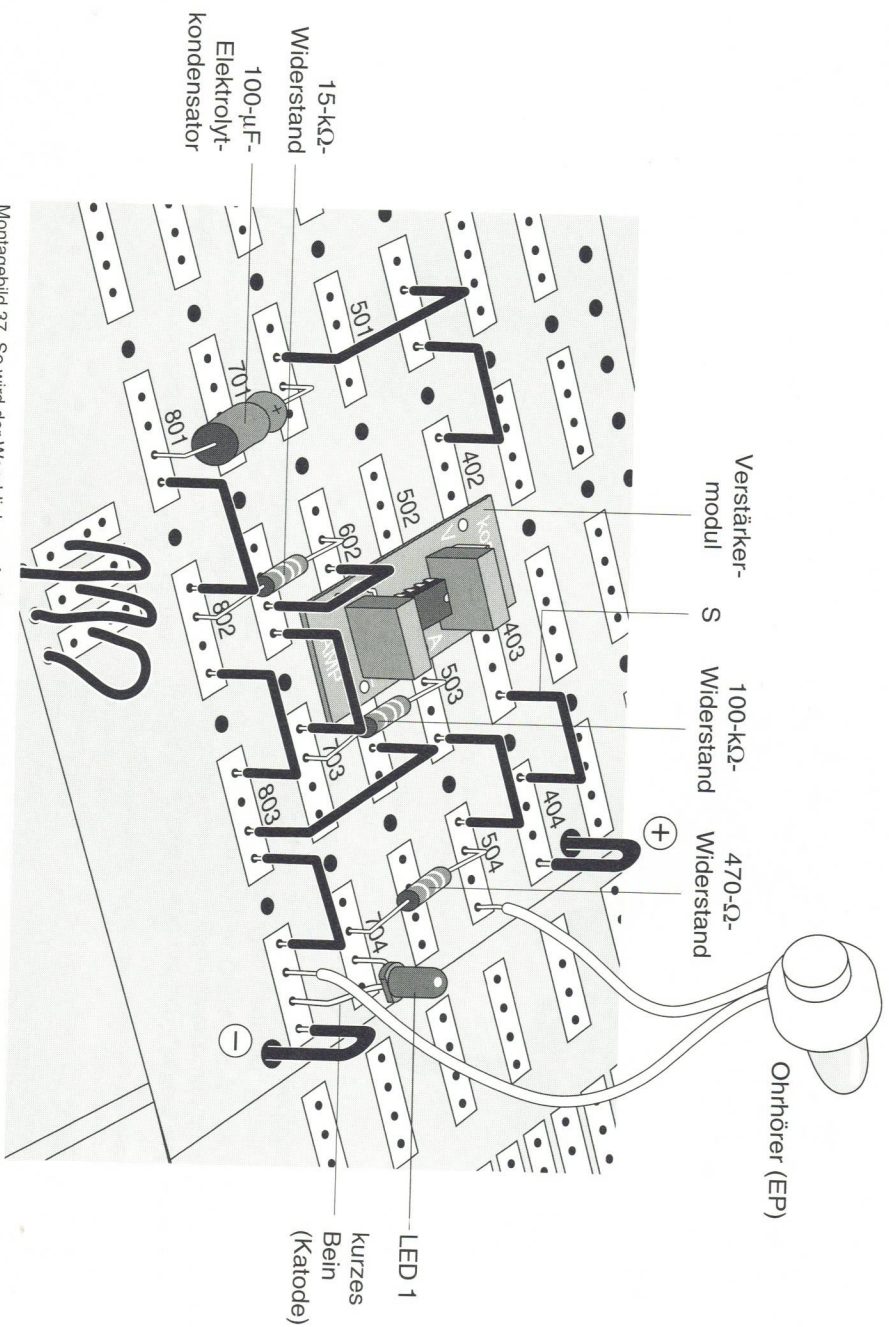
Von Multipack 5 benötigen wir das Verstärker-Modul (AMP, 043036). Von Multipack 4 nehmen wir die rote Leuchtdiode (LED, 000 145) und den Ohrhörer (EP, 042 056). Außerdem noch Drahtbrücken: acht kurze und zwei lange.

Wir bestücken nun das Experimentierpult 1 nach Montagebild 37. Dabei hat sich generell folgende Vorgehensweise bewährt:

- 1.) Zuerst die Module aufstecken
(hier das Verstärkermodul).
 - 2.) Dann die eher niedrigen Bauteile wie Widerstände, Kondensatoren und Dioden.
 - 3.) Jetzt die kurzen Drahtbrücken, anschließend die langen.
 - 4.) Dann folgen die Leuchtdioden (LED) und/oder der Fototransistor (TF). Bei Einbau in Pult 1 deren Anschlüsse einstecken.
- Dabei immer auf richtige Polung achten:
Kurzer Anschluß = Katode (K).
Beim Fototransistor kurzer Anschluß = Kollektor (C)
5.) Soweit erforderlich nun die langen Drahtstücke einstecken.

- 6.) Zum Schluß die Schalterbrücken "S" bzw. "S1" und "S2".
- Wenn etwas nicht funktioniert bitte die Ratschläge im Kapitel Fehlersuche am Ende des Buches beachten.

Die Bedienungs- und Anzeigeelemente (Pots, Meßwerk, Lautsprecher und Drehko) behalten während des ganzen Experimentierens ihren Steckeder-Stamplatz bei.



Montagebild 37. So wird der Warnblinker aufgebaut.

Obwohl nur aus einem halben Dutzend Bauteilen bestehend, stellt unser Blinker eine technische Meisterleistung dar: die Leuchtdiode (LED) geht unablässig an und aus, sie blinkt stunden-, tage-, wochen- und monatelang, ohne menschliches Zutun und ohne, daß ein mechanischer Kontakt bewegt wird.

Unsere Leuchtdiode blinkt etwa zweimal pro Sekunde, das heißt, sie wird 172.800 mal am Tag ein- und ausgeschaltet. Würde man versuchen, eine derartige Blinkleistung mit einem herkömmlichen Lichtschalter zu erzielen - wir nehmen eine Lebensdauer von 1 Million Schaltvorgängen an - dann würde dieser nicht einmal eine Woche lang durchhalten.

Das Herz des Warnblinkers ist das Verstärker-Modul. Warum für eine Blinkschaltung ein Verstärker benutzt wird

und wie die Sache funktioniert wird später im Experimentierteil des Buches erklärt.

An dieser Stelle sei nur soviel verraten: der eigentliche Verstärker ist das kleine schwarze Kästchen auf dem Modul. In seinem Innern enthält er keine einzeln zusammengelötenen Bauteile, er ist vielmehr eine integrierte Schaltung (Englisch: Integrated Circuit = IC), bei der nach einem speziellen, hochkomplizierten Verfahren auf einem winzigen, nur wenige Quadratmillimeter großen Halbleiterplättchen (Chip) die Bauteile vereint werden: 17 Transistoren, 6 Widerstände und vier Dioden.

Es geht auch langsamer

Mit wenigen Handgriffen machen wir den Blinker langsamer: Wir tauschen den 100-k Ω -Widerstand R2, gegen den 33-k Ω -Widerstand aus. Wenn wir uns zusätzlich das Knackgeräusch im Ohrhörer (EP) anhören, haben wir einen richtigen Autoblinker simuliert!

Vom Knacken zum Piepen

Jetzt wollen wir einmal den 100- μ F-Elektrolytkondensator C1, gegen einen 100-nF-Kondensator austauschen. Wir stellen fest: Im Ohrhörer ist ein Piepen zu hören. Aus unserem Warblinker ist ein Tongenerator geworden!

Es geht noch höher

Wir ersetzen den 33-k Ω -Widerstand wieder durch den 100-k Ω -Widerstand und erhalten so einen noch höheren Piepton.

Schnelle Ohren, langsame Augen

In beiden Experimenten konnten wir den schnellen Wechsel von "Ein" nach "Aus", einige tausend Mal pro Sekunde, an der Leuchtdiode nicht mehr bemerken. Lediglich die Intensität des Leuchtens hat scheinbar abgenommen. Ab etwa 20 Ein-Aus Folgen pro Sekunde, kann unser Auge nicht mehr folgen, ganz im Gegensatz zu unseren Ohren, die da erst richtig mit der Wahrnehmung beginnen.

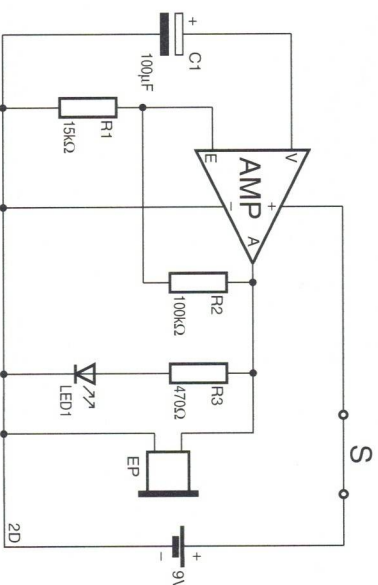
Schaltbild und Aufbaubild:

Die zwei Gesichter einer Schaltung

In unserem Experimentierbuch bringen wir zu jeder Schaltung zwei verschiedene Abbildungen, und zwar das Schaltbild und das Aufbaubild. Das Aufbaubild soll uns den Aufbau erleichtern, indem es uns zeigt, wie die Teile auf dem Steckfeld der Pulte angeordnet sind und wie die Leitungen liegen sollen.

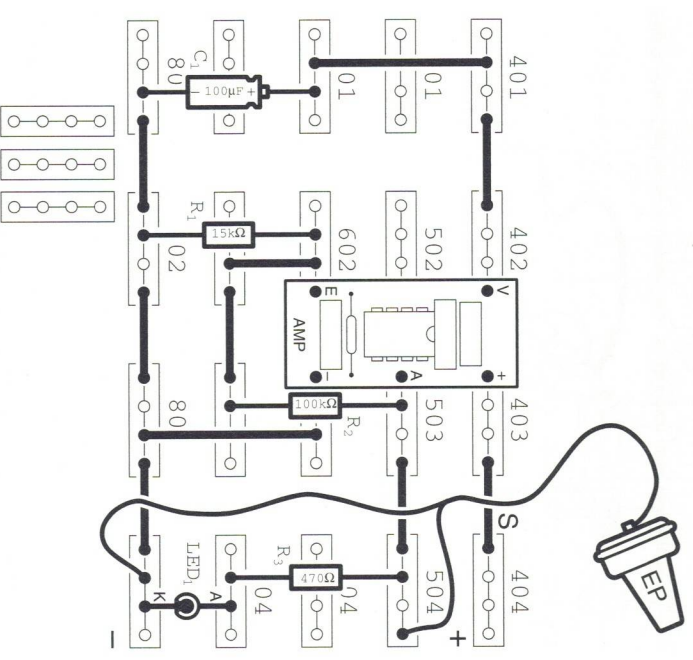
Das Schaltbild dagegen zeigt in vereinfachter Weise mittels Schaltzeichen für jedes Bauteil, welche Teile zusammenschaltet sind und nimmt dabei keine Rücksicht auf deren tatsächliches Aussehen und ihre räumliche Lage. Es dient der Erleichterung der Funktionserklärung einer Schaltung und ist Ausgangspunkt jeder Schaltungs Idee. Schaltbilder werden gelegentlich in der Fachliteratur auch Stromaufpläne genannt. Montagebild 38 zeigt das Schaltbild zu unserem elektronisch gesteuerten Blinklicht.

Das Verstärkermodule ist der Einfachheit halber nur durch ein Dreieck dargestellt, obwohl sich auf dem Platinchen noch einige Kondensatoren und ein Widerstand befinden, die für die Funktion des Verstärkers erforderlich sind. Wir betrachten das komplette Modul als Verstärkereinheit, und da Verstärker in der Elektronik stets durch Dreiecke symbolisiert werden, wollen wir es auch so halten. In der Aufstellung auf Seite 5 haben wir alle in diesem Buch vorkommenden Symbole für Bauteile, sogenannte Schaltzeichen, aufgeführt.



Montagebild 38. Schaltbild des Warblinkers.

Wie man auf Montagebild 39 sieht, ist das Aufbaubild eine vereinfachte zweidimensionale Variante der ausführenderen dreidimensionalen Zeichnung nach Montagebild 37.



Montagebild 39. Aufbau zur Schaltung "Warblinker" nach Montagebild 38.

Es enthält nur die zum korrekten Aufbau unbedingt notwendigen Angaben, nämlich die nummerierten Steckfedern sowie Bauteile, Drahtbrücken und Leitungen.

Kosmos der Elektronik

Elektronik ist eine Welt für sich. Ihre kleinsten Bestandteile sind die elektrischen und elektronischen *Bauelemente*. Heute sind viele von ihnen zu größeren Einheiten zusammengefaßt – zu *integrierten Schaltungen* auf winzigen Scheiben aus Silizium, sogenannten Chips.

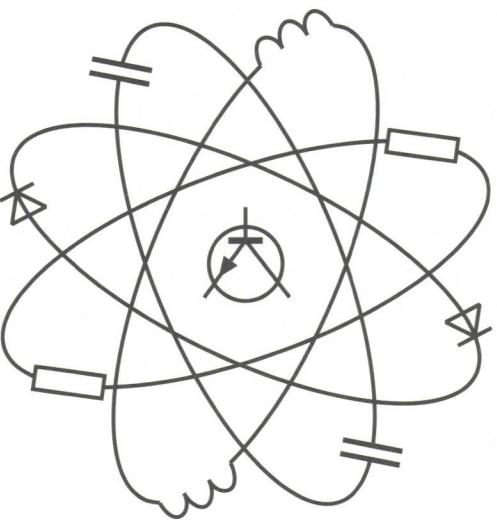


Bild 1. Im KOSMOS der ELEKTRONIK dreht sich alles um Halbleiter...

Das Wissen über die Bauteile und deren Funktionen ist das A und O, wenn Verständnis dafür gesucht wird, wie es zu den vielfältigen Wirkungen kommt, mit denen moderne Elektronik unser Leben erleichtert, bereichert und lebenswert macht – vom Taschenrechner, Radio oder Herzschrittmacher in unserer nächsten Umgebung bis zum Fernseh- und Fernmeldesatelliten im All.

Keinem wird es einfallen, aus dem 4. Stock auf die Straße zu springen, wenn er draußen etwas vorhat. Und genauso stufen- und schrittweise, wie wir eine Treppe benutzen, wollen wir uns in die Elektronik einarbeiten und ihr Stück für Stück ihre Geheimnisse entlocken. Und zum Schluß erstaunt feststellen, daß alles mit rechten Dingen zugeht, auch dann, wenn wir – wie im nächsten Kapitel – bei Schummerlicht eine „elektronische Geister-Beschwörung“ vornehmen.

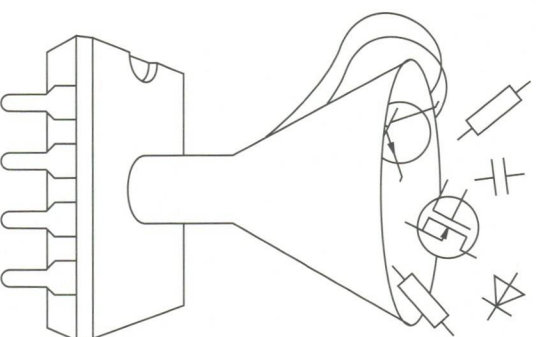


Bild 2. Nürnberger Trichter der Mikroelektronik

1. Elektronische Geister-Beschwörung

Bald schreiben wir das 21. Jahrhundert. Viele kleine und große Rätsel dieser Welt sind gelöst. Da fällt es schwer, noch an Geister zu glauben. Aber genau die wollen wir in einem ersten Experiment augenzwinkernd bemühen.

1 Das „Geister-Experiment“ wird nach dem im Bild 4 gezeigten Schaltbild aufgebaut. Der zugehörige Aufbauplan ist in Bild 5 wiedergegeben. In Steckfeder 606 wird ein langes Drahtstück senkrecht wie eine Antenne eingesteckt. Aber bitte Vorsicht: **Oberes Ende nach unten biegen, damit die Spitze nicht ins Auge stechen kann!**

An einem Tag mit nicht allzu feuchter Luft bilden wir nun mit Daumen und Zeigefinger ein O um die „Antenne“, ohne sie zu berühren, und scharren ein paar Mal kräftig mit unseren Schuhen, die Gummi- oder Ledersohlen haben sollten, auf dem Teppich. Sofort wird ein geisterhaftes Geräusch (ein Piep- oder Knarrton) ertönen.

2

Nicht jeder hat die passenden Schuhe mit Gummi- oder Ledersohlen. Da kann man sich mit einem Kunststofflineal behelfen, das man ein paar Mal kräftig an einem Wollstoff reibt und dann in die Nähe der Antenne bringt. Die Geister werden sich melden.

Insider-Info 1

Bild 4 ist ein typisches *Schaltbild* der Elektronik. Man sagt auch *Stromlaufplan* oder einfach *Schaltung*. Eine solche Darstellung zeigt, wie die einzelnen Teile, die *Bauelemente*, elektrisch miteinander verknüpft werden. Sie sind nur als *Schaltzeichen* symbolisch dargestellt (siehe unsere Aufstellung auf Seite 5). Im Gegensatz zum *Aufbauplan* (Bild 5). Dort sind die Teile so gezeichnet, wie sie aussehen. Da wissen auch Anfänger gleich, was gemeint ist. Meist spielt sich in der Schaltung alles zwischen der Betriebsspannung U_b und der Masse ab. Das ist eine „Sammelleitung“, die zum Minuspol der Batterie führt. Auf sie bezieht man die Spannungsangaben. Ihre Bezeichnung erinnert an die soliden Metallchassis alter Radios oder auch an Metallrahmen und Motorblock von Autos.

3

Es können jetzt die verrücktesten Dinge ausprobiert werden: Die Hand oder das Lineal können der Antenne genähert oder von ihr entfernt werden, man kann mit einer Handbewegung die Geister zum Schweigen bringen oder sie wieder entfesseln. Es darf gespielt werden...

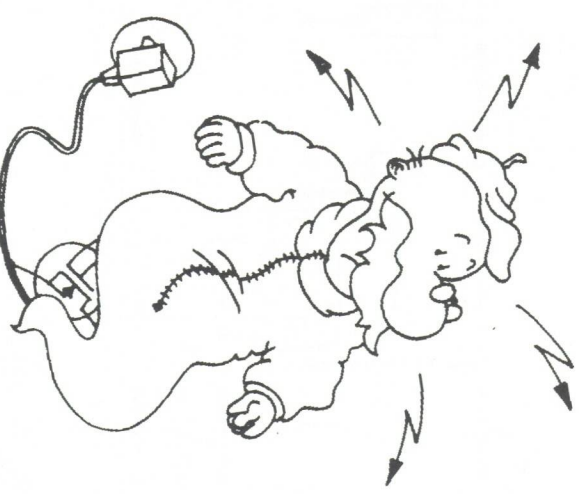


Bild 3. Wes Geistes Kind dieser Geist ist, läßt sich nicht verbergen!

4

Wer nicht hören will, macht die Geister sichtbar. Dazu bauen wir – wieder mit Antenne versehen – den Versuch nach Bild 7 auf.

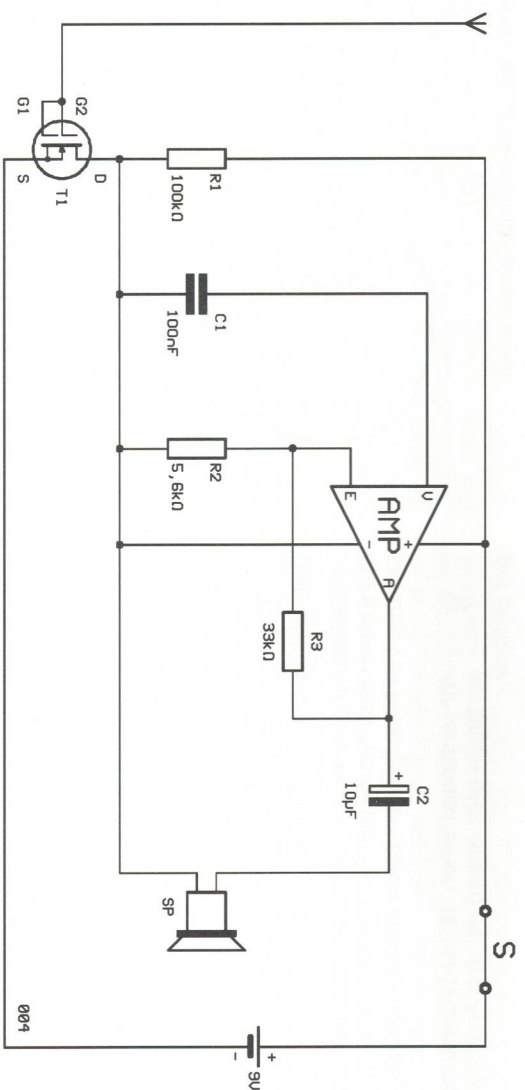


Bild 4. Spiritus electronicus: der Geist, der Felder hörbar macht.

Spätestens beim Experiment mit dem Lineal ist manchem ein Licht aufgegangen. Sollte der Geist vielleicht *Statische Elektrizität* heißen?

5 Zur Kontrolle öffnen wir einen Wasserhahn, aber nur so wenig, daß ein schwacher Strahl herausfließt. Wieder reiben wir ein Lineal an einem Wollstoff und halten es nun dicht an den Wasserstrahl (Bild 9). Der Geist, der auch unsere Elektronik beeinflusste, lenkt den Wasserstrahl – allen Gesetzen der Schwerkraft spottend – zur Seite hin ab.



Bild 6. Wer hurtig reibend sich bemüht, bekommt 'ne Menge Spannung!

Durch das Reiben sind aus dem Wollstoff Elektronen herausgekratzt worden, die dann massenhaft auf der Oberfläche des Lineals saßen, bereit, einen Sprung durch die Luft auf andere Gegenstände zu wagen oder aber durch ihre bloße Gegenwart elektrisch Einfluß zu nehmen. Der Fachmann sagt, daß bei einer Ansammlung von Ladungsträgern (das sind z. B. Elektronen) *elektrische Feldkräfte* wirken. Und genau davon konnten wir uns in den Experimenten überzeugen.

6 Daß Elektronen in der Tat springen können, sollen uns weitere Beobachtungen zeigen. Jeder hat si-

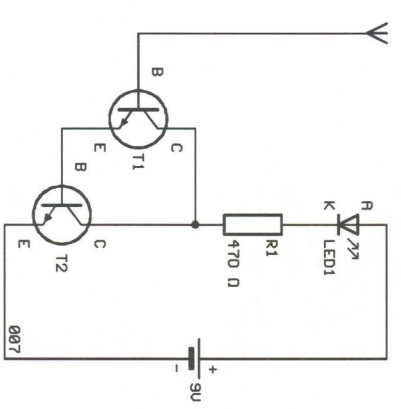


Bild 7. Geistesblitze: Lichtsignale aus dem Jenseits.

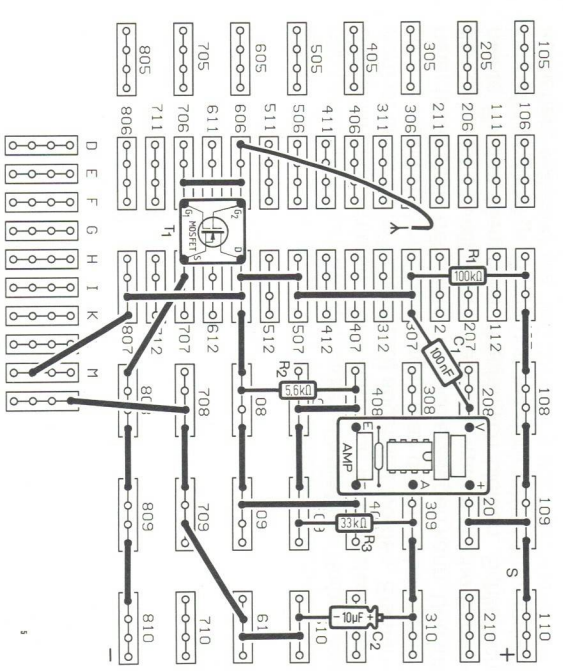


Bild 5. Aufbau zu Bild 4.

cherlich schon einmal erlebt, daß es beim Kämmen mit einem Kunststoffkamm knistert, er hat vielleicht in der Dunkelheit so-

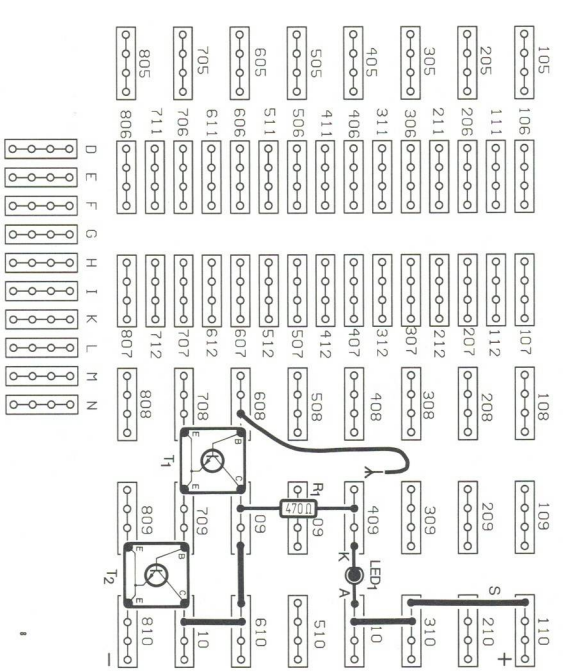


Bild 8. Aufbau zu Bild 7.



Bild 9. Wunscheirule: Elektronen ziehen Wasser an.

gar schon Funken dabei sprühen sehen. Ausgesprochen unangenehm kann es werden, wenn man in mit Kunststoffteppichen ausgelegten Zimmern die Türklinke oder einen anderen metallenen Gegenstand berührt: Da springt ein Funke über, und man bekommt einen elektrischen Schlag, daß es nur so knallt.

2. Über-sinnliche Elektrizität

Die soeben erlebten Wirkungen der Elektrizität sind natürlich nichts Übersinnliches. Oder doch – insofern nämlich, als unsere normalen fünf Sinne nicht darauf eingerichtet sind, Elektrizität bzw. elektrischen Strom unmittelbar wahrzunehmen. Schließlich war der Mensch einst dafür konstruiert, sein Leben ohne Technik im Paradies zu verbringen. Doch das ging schief, wie man weiß.

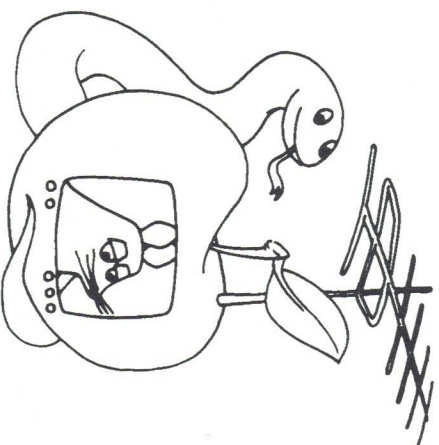


Bild 11. Wenn die Sinne schwinden...

Elektrischer Strom ist eine gerichtete Bewegung von *elektrischen Ladungsträgern*. Die kleinsten davon sind die *Elektronen*. Dazu bald mehr.

Bei unseren ersten Experimenten haben wir Elektronen-Ansammlungen und dadurch sogenannte elektrische Felder erzeugt. Wenn sich im elektrischen Feld unsere Haare spürbar sträuben, so käme wohl niemand auf die alberne Idee, Haare deswegen als Sinnesorgane für Elektrizität zu bezeichnen; vielmehr ist es die anziehende bzw. abstößende Wirkung, die wir wahrnehmen. Andere Wirkungen können wir ausprobieren.

7 Wir nehmen unsere 9-Volt-Batterie und halten kurz unsere Zunge an die beiden Anschlüsse. Es kribbelt, und es schmeckt sauer.

Ist Elektrizität also sauer? Nein, der saure Geschmack entsteht durch die Wirkung der *Elektrolyse*, der chemischen Zersetzung von Flüssigkeiten durch den elektrischen Strom.

8 Wir verbinden einen 150-Ω-Widerstand (Farbcode: braun-grün-braun) mit den Anschlußklemmen der Batterie.



Bild 12. Es ist nicht alles Geist, was qualmt!

Vorsicht! Nach kurzer Zeit wird der Widerstand heiß; sofort wieder abklemmen!

Eine weitere Wirkung des elektrischen Stromes haben wir also in der Erwärmung eines Bauteiles kennengelernt. Die kleine „Spirale“ (*Wendel*) in Glühlampen z. B. wird so heiß (2000 bis 3000 °C), daß sie hell aufglüht und Licht abgibt.

9 Wir halten die Anschlußstifte des Ohrhörers kurz an die beiden Batterieklemmen. Es knackt deutlich beim Berühren und dann noch einmal beim Wegnehmen.

Elektrischer Strom erzeugt also auch Geräusche. Man kann sich bei jedem Gewitter davon überzeugen. Das liefert uns übrigens gleich drei Möglichkeiten der Wahrnehmung von Elektrizität: Beim Blitz entstehen gleißende Helligkeit, eine unbeschreiblich große Hitze und ein ohrenbetäubender Krach.

3. Spannung und Strom

Bekanntlich waren bereits die alten Griechen fasziniert von den geheimnisvollen Kraftwirkungen, die sie beim Reiben von Bernstein beobachteten. Von ihrem Wort für Bernstein (*elektron*) ist unser Begriff *Elektrizität* abgeleitet worden. Erstaunlich ist, welche hohen Spannungen man durch Reiben geeigneter Isolierstoffe mit einem Wolltuch erzeugen kann. Und für den Laien ist es völlig unverständlich, warum solche Experimente für den Menschen ungefährlich bleiben. Schließlich kann die ungünstige Berührung mit dem 220-V-Netz tödlich ausgehen, während die 100.000 V (!) auf dem Kunststoff-

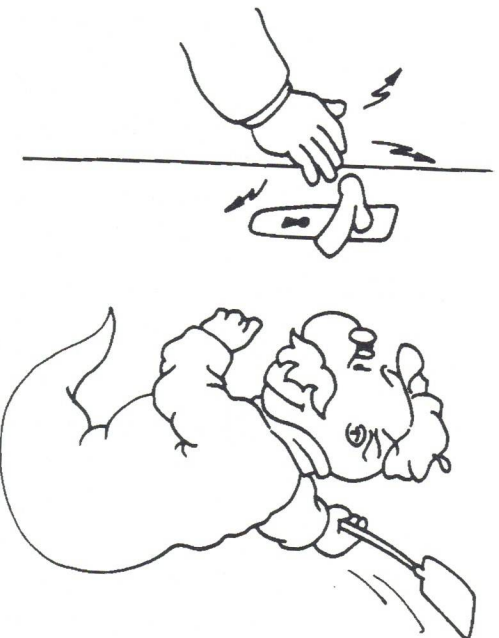


Bild 10. Der Geist quillt nur, was wir selbst geladen haben.

kamm höchstens kurzzeitig das Haar sträuben. Entscheidend, wie meist im Leben, ist jedoch, was „dahinter“ steht. Auf dem kleinen Kamm kann zwar eine hohe Spannung entstehen, sich aber nicht viel Energie sammeln, auch wenn es noch so blitzt. Nach dem Blitz ist kaum noch Spannung vorhanden – sie ist „zusammengebrochen“. Hinter der 220-V-Steckdose steht jedoch ein ganzes Kraftwerk. Es hält die Spannung „knochenhart“, liefert so viel Strom dazu, wie die Sicherungen aushalten, leitet dadurch im Körper gefährliche Elektrolyseprozesse ein und verursacht Herzflimmern oder gar Herzstillstand.

Die Gefährlichkeit der Elektrizität – aber auch ihre Fähigkeit, nützliche Dinge für uns zu verrichten – hängt mindestens von zwei Eigenschaften ab: der elektrischen Spannung **und** dem elektrischen Strom. Um diese beiden Größen soll es in den nächsten beiden Abschnitten gehen.

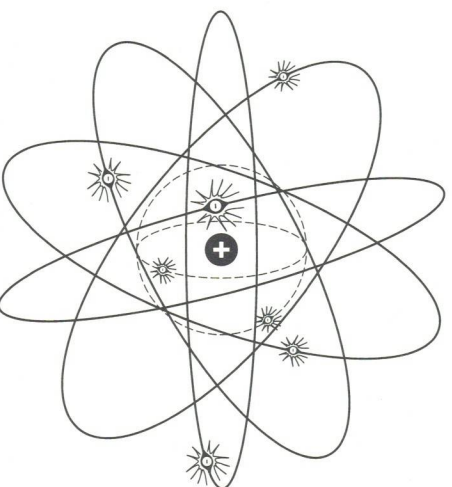


Bild 13. Einfaches Atommodell: Stickstoffatom mit fünf Elektronen auf der Außenschale.

Doch vorher noch kurz zur Verständigung: Gewitter sind die Ausnahme. „Normalerweise“ wird unser Strom in geordneten Bahnen geführt: In Leitungen, meist in Drähten oder Folienstreifen aus Kupfer. Als Metall ist Kupfer ein guter *Leiter*. Metalle bestehen aus Kristallgittern. Die Atome liegen schön geordnet neben, über- und untereinander. Um ihre Kerne kreisen die Elektronen auf verschiedenen Bahnen (Bild 13). Die äußeren nehmen es mit der „Treue“ zu ihrem Atomkern nicht so genau und wandern zum unmittelbaren oder auch zu einem weiter entfernten Atom-Nachbarn. Es findet also innerhalb von Leitern eine Elektronen-Bewegung statt. Und eine gerichtete Bewegung von Elektronen nennt man *elektrischen Strom*. Treibende Kraft dafür ist die *elektrische Spannung*. Nicht viel nützt die treibende Kraft allerdings, wenn alle Elektronen „treu“, d.h. in ihrem Atomverband fest verankert und

dadurch unbeweglich sind. Stoffe mit solchen Eigenschaften nennt man *Isolatoren* oder Nichtleiter. Unser Kunststofffließband gehört zu ihnen. Durch Reibung gelingt es zwar, Elektronen an seine Oberfläche zu befördern, sie können sich in dem Nichtleitermaterial jedoch nicht bewegen („abfließen“). Wird das Elektronengedängel an der Oberfläche des Lineals allzugroß, dann gibt es eine Entladung durch die Luft: Elektronen als Sprungkünstler.

Neben Leitern und Nichtleitern gibt es noch die sogenannten *Halbleiter*. Das sind Materialien, die erst dadurch leitende Eigenschaften erhalten, daß man ihnen eine wohldefinierte Anzahl von Atomen eines anderen Stoffes „beimischt“. Dieses „Beimischen“ heißt in der Fachsprache *Dotieren* und geschieht in einem ziemlich komplizierten Prozeß unter Hitzeeinwirkung. Doch davon später mehr.

Der lange Marsch der Elektronen

Elektronen fließen nie „irgendwohin“. Man hat es daher schwer mit Vergleichen, etwa mit Wasser. Das paßt höchstens bei geschlossenen Kreisläufen (Kühlwasser mit Pumpe z. B.). Wir sprechen mit gutem Grund vom *Stromkreis*. Strom fließt darin nur, wenn er geschlossen ist.

10

Wir bauen den Stromkreis nach Bild 14 auf und beobachten die Leuchtdiode. Solange Ta1 offen ist, bleibt sie dunkel. Durch Druck auf Ta1 wird der Kreis geschlossen. Nun leuchtet die Diode.

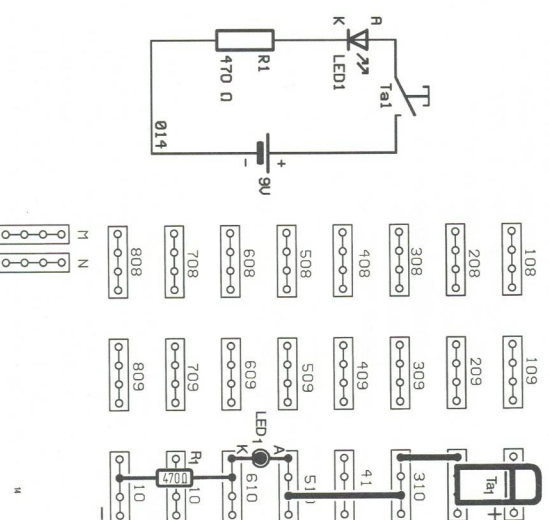


Bild 14. Strom-Starter: Erst ein Druck auf die Taste schließt den Kreis.

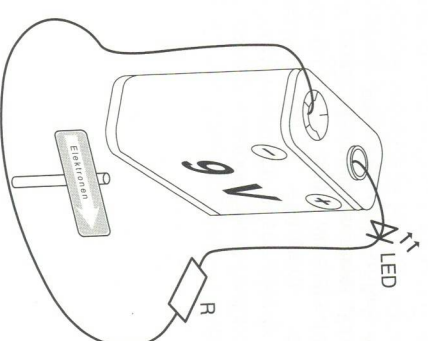


Bild 15. Chaos im (Strom-)Kreisverkehr: Dioden als Geisterfahrer.

Wenn man einen Stromkreis aus Spannungsquelle und „Verbraucher“ schließt, „drückt“ die Spannung auf die Elektronen. Diese geben dem Druck nach und bewegen sich. Mit ihrer *Polarung* bestimmt die Batterie die Richtung der Bewegung. Da Elektronen negative Ladungsträger sind, wandern sie von Minus nach Plus. Auch, wenn man früher Plus als Überschuß definierte. Die Diodenfeile zeugen von diesem Irrtum. Wir umschreiben ihn schamhaft mit dem Begriff *technische*

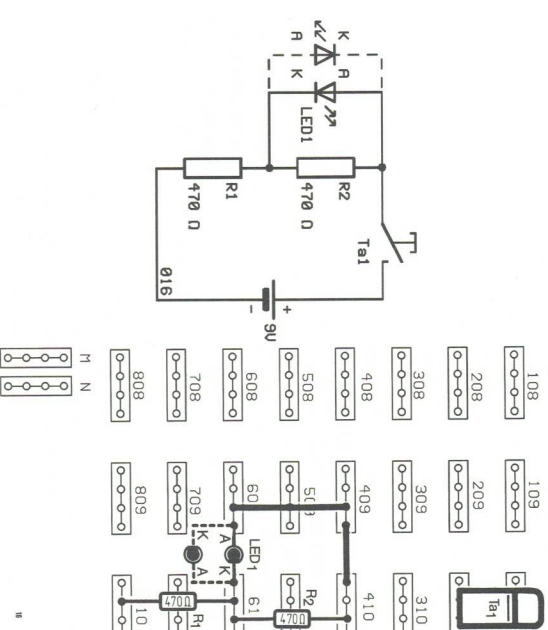


Bild 16. So leuchtet LED1. Aber umgedreht?

Stromrichtung. Die Elektronen fließen genau andersrum – in der *physikalischen Stromrichtung*.

- 11** Wir erweitern unseren Stromkreis nach Bild 14 mit einem zweiten Widerstand (Bild 16). Die Leuchtdiode ist jetzt weniger hell. Nun schließen wir sie umgekehrt an. Jetzt bleibt sie ganz dunkel.

Für Dioden ist also die Stromrichtung von Bedeutung.

- 12** Wir stecken die Leuchtdiode wieder so, daß sie leuchtet. Nun drehen wir den unteren Widerstand $R1$ um. Die Schaltung verhält sich wie vorher.

Widerständen ist es also egal, wie der Strom durch sie hindurch fließt.

- 13** Nun machen wir einen kleinen Ausflug ins Treppenhaus und drücken auf den Lichttaster. Das Licht geht überall sofort an. Sind die Elektronen so schnell?

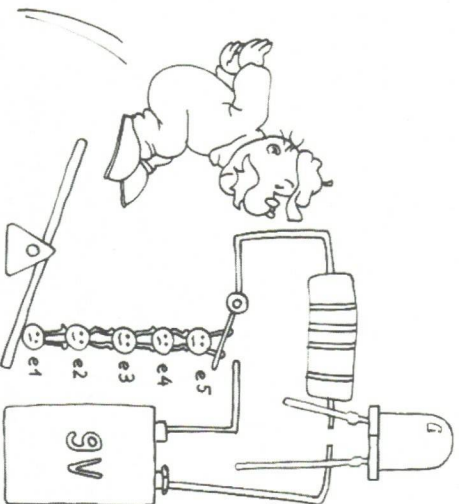


Bild 17. Der letzte klopft das Licht an!

Insider-Info 2

Wie träge sich Elektronen in einem Kupferleiter bewegen, zeigt folgendes Beispiel: Durch einen Kupferdraht von 0,5 mm Durchmesser und 60,4 mm Länge fließe ein Strom von 1 A, das sind $6,25 \cdot 10^{18}$ Elektronen pro Sekunde. In dem Kupferdraht mit den gewählten Abmessungen stehen etwa 10^{21} freie Elektronen für den Stromfluß zur Verfügung. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Elektronen im Leiter fortbewegen (die *Driftgeschwindigkeit*), erhält man, wenn man die Stromstärke (ausgedrückt in Elektronen pro Sekunde) mit der Leiterlänge multipliziert und durch die

Anzahl der freien Elektronen teilt. Wer Lust hat, kann's ausrechnen, hier ist das Ergebnis für Rechentaule: 0,378 mm pro Sekunde. Zur Veranschaulichung dieser extrem niedrigen Geschwindigkeit: Ein Elektron, das aus einer Batterie durch ein 10 m langes Kabel zu einer Glühlampe startet, benötigt 26,455 Sekunden, das sind knapp 7½ Stunden oder fast ein normaler Arbeitstag, um nach der Durchwanderung des Kabels endlich seinen Beitrag zum Leuchten in der Glühlampe zu bringen.

Die elektromagnetischen Wellen bei Rundfunk und Fernsehen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus: 300.000 km in der Sekunde. Sind unsere Elektronen im Stromkreis auch so schnell?

Das einzelne Elektron hat das nicht nötig. Drückt die Spannung, gibt es den Druck an seine Nachbarn weiter. Nur die, die zufällig gerade in den Glühwendeln der Lampen stecken, müssen jetzt „ran“. Und das praktisch im gleichen Augenblick, in dem wir den Stromkreis im Treppenhaus geschlossen haben. Wer hinten auf eine Tube Zahnpasta drückt, erhält vorn auch bisweilen unerwartet schnell Wirkung – das ist die Masse, die dicht hinter dem Verschuß auf den Druck am Ende der Tube reagiert. Je größer die Öffnung, um so mehr Masse tritt aus. Je größer der Querschnitt eines Leiters, um so mehr Elektronen können sich gleichzeitig gemächlich nebeneinander bewegen, dem Druck der Spannung nachgebend. Wird's irgendwo enger, muß man eben das Tempo steigern, denn der Strom im Stromkreis ist überall gleichgroß. Halber Querschnitt an einer Stelle heißt dann doppelte Driftgeschwindigkeit.

Insider-Info 3

Techniker rechnen selten mit freien Elektronen. Länge und Durchmesser von Leitern aber kann man leicht bestimmen. Dabei gilt: Je größer der Querschnitt und je kürzer das Leiterstück, um so geringer ist sein Widerstand, um so besser leitet es.

Allerdings leiten die einzelnen Metalle unterschiedlich gut. Projektiert man eine Überlandleitung aus Kosten- oder Gewichtsgründen mit Aluminium statt mit Kupfer, muß man dafür einen fast 1,7mal so großen Querschnitt wie für Kupfer wählen. Jedem Material ist ein sogenannter *spezifischer Widerstand* zugeordnet. Man gibt ihn meist für 20 °C an, da er eine temperaturabhängige Größe ist. Für Kupfer liegt dieser Widerstand, symbolisiert durch den griechischen Buchstaben ρ , bei $0,0175 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$. Mit dem Zahlenwert 0,0163 ist Silber nur wenig besser, aber teurer. Aluminium hat 0,0294, und Eisen bringt es auf $0,13 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$. Multipliziert man ρ mit dem Quotienten

aus Länge in (m) und Querschnitt (in mm^2), kann man für jedes Drahtstück den Widerstand bestimmen.

Beispiel: Der Schalt Draht im Experimentierkasten hat 0,5 mm Durchmesser. Daß er damit den Widerständen keine Konkurrenz macht, zeigt diese Rechnung: Bei 10 cm Länge ergibt sich der winzige Widerstandswert von $R_{Cu} = 0,0175 \cdot 0,1/0,25^2 \cdot \pi = 0,008,92 \Omega = 8,92 \text{ m}\Omega$.

Das gleiche Problem haben die Läufer beim Massensportfest, die in geschlossener Formation am Ziel ankommen sollen. Irgendwo auf dem Weg ist aber eine enge Brücke. Da heißt es rennen, wenn man dahinter wieder zum Vordermann aufschließen soll. Die Stromstärke bleibt gleich, aber die Brücke wird stärker belastet als die übrige Straße. Glühnen wie die Wendel in der Lampe wird sie aber wohl nicht.

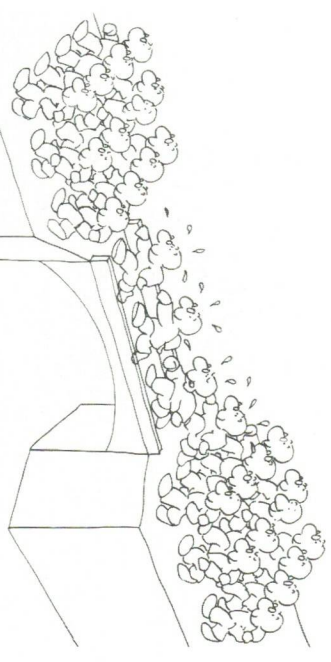


Bild 18. Gleiche Stromstärke überall. Reihereien an der Engstelle, aber die Karawane zieht (geschlossen) weiter.

Man kann die Anzahl der Läufer pro Sekunde mit der Stoppuhr und durch Zählen messen – irgendwo an der Strecke. Für die elektrische Stromstärke wurde die Maßeinheit *Ampere* (A) definiert. Als Formelzeichen verwendet man den Buchstaben I . Damit in einem Leiter ein Strom von 1 A fließen kann, müssen sich in jeder Sekunde durch jede Stelle dieses Leiters 6,25 Trillionen Elektronen bewegen. Die Masse macht's.

Mit 16 A sind viele Haushalte abgesichert. Damit kommt man am 220-V-Netz ganz gut zurecht. Armbanduhren mit Flüssigkristallanzeige sind wesentlich bescheidener. Nur etwa ein Hunderttausendstel eines Amperes braucht ihre 1,5-V-Knopfzelle zu liefern, damit wir stets „in der Zeit“ bleiben. Als „10 μA “ (zehn Mikroampere) liest sich diese Angabe allerdings bequemer. Physikalische Größen durch Vorsätze im Tausendsprung handlicher zu machen, ist seit langem üblich. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht.

richtet, wenn die Leistung eine gewisse Zeit über wirkt. Und ebendiese Arbeit nimmt uns die Elektroenergie ab. Unermüdlich, solange wir wollen (und bezahlen können). Darum sind Gewitter als Energiespender ungeeignet: Viel Spannung zwar und bei der Entladung im Blitz auch hoher Strom, aber nur für eine winzige Zeitspanne.

4. Widerstand als Katastrophenschutz

Nach so viel grauer Theorie werden wir wieder praktisch. Experimente sind angesagt. Unsere „Versuchskaninchen“ sind die kleinen farbigen Würstchen, die man Widerstände nennt. Sie werden in Schaltbildern und Formeln mit dem Symbol R bezeichnet. Ihre Maßeinheit ist das *Ohm* (Symbol: Ω). Einen Widerstand mit dem Wert von $150\ \Omega$ hatten wir zu Heizzwecken schon bei Experiment 8 eingesetzt. Das war bereits eine Demonstration von Leistung: Elektrische Leistung wurde (durch die Reibung der Elektronen im Widerstand) in Wärme umgesetzt.

Einen weiteren Anwendungszweck für Widerstände finden wir in den nächsten Experimenten: Sie sind unentbehrlich beim Schutz von Leuchtdioden. Was das Besondere an Diodenstrukturen ist, so daß man sie nicht schutzlos einer Spannung ausliefern darf, wird in Abschnitt 7 näher erklärt. Doch so viel schon jetzt: Eine Leuchtdiode (abgekürzt LED) benötigt zum Leuchten nur einige Milliampere und weniger als 2 V Spannung dazu. Eine Batterie mit $U = 9\text{ V}$ hat also 7 V mehr, als der Leuchtdiode zuträglich ist. Wohin mit dem Rest?

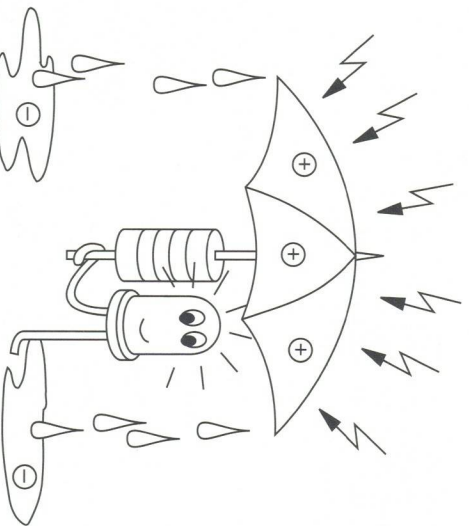


Bild 22. Schutz-Schlid: Statt Todesstoß für Leuchtdiode Spannung als Abfall am Widerstand.

15 Wir bauen den einfachen Stromkreis nach Bild 23 auf. Der Wert des Widerstandes beträgt $470\ \Omega$ (gelb-violett-braun). An der Leuchtdiode liegen nicht mehr als 2 V (das könnte man mit einem Voltmeter messen). Der Widerstand als Spannungsklau hat sich 7 V geschnappt.

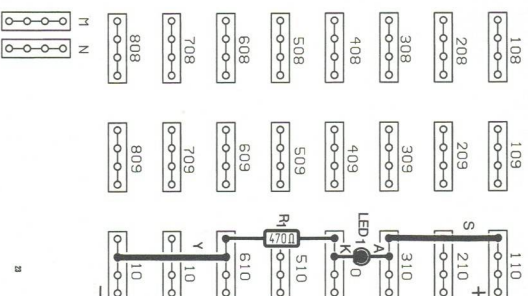
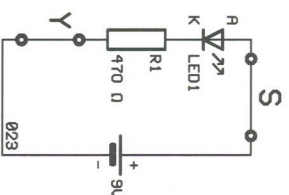


Bild 23. Einfacher Stromkreis im Wandel: Die Werte entscheiden, die Reihenfolge interessiert nicht.

Die Spannung, die über der Leuchtdiode „steht“, heißt *Flußspannung*. Soviel Spannung braucht sie nämlich, damit der Stromfluß zustandekommt. Legt man sie aber direkt an die Batterie, kann das ihr Tod sein! **Leuchtdioden daher stets mit Schutzwiderstand betreiben!**

16 Wir vertauschen die Reihenfolge von Leuchtdiode und Widerstand und stellen fest: Die Reihenfolge im Stromkreis spielt keine Rolle. Wichtig ist jedoch, daß die Leuchtdiode in Flußrichtung gepolt wird: Das längere Bein ist die Plusseite (*Anode*). Das Pfeilsymbol zeigt auf die abgeflachte Gehäusekante (*Katode*). Dazu später mehr. **Aufbaupläne genau beachten!**

17 Wir nehmen Widerstände mit höheren Werten für unsere Schaltung und beobachten, was passiert (z. B. 1 k Ω : braun-schwarz-rot, 5,6 k Ω : grün-blau-rot, 10 k Ω : braun-schwarz-orange, 15 k Ω : braun-grün-orange, 33 k Ω : orange-orange-orange).

18 Wir setzen wieder den $470\text{-}\Omega$ -Widerstand ein, ziehen aber jetzt die lange Drahtbrücke Y heraus und ersetzen sie durch den zweiten $470\text{-}\Omega$ -Widerstand. Was passiert?

Wir stellen fest: Je höher der Widerstand im Stromkreis ist, desto schwächer leuchtet die Leuchtdiode. Bevor wir uns nun mit den Gesetzmäßigkeiten dieses Verhaltens befassen, ein paar Worte zu einer kleinen Sprachschlampe. Eigentlich ist das Wort Widerstand in der Elektronik doppeldeutig. Zum einen drückt es eine Eigenschaft leitender Stoffe gegenüber dem elektrischen Strom aus: Sie setzen dem Stromfluß einen Widerstand entgegen, der sich als Zahlenwert und damit in Berechnungen verwenden läßt. Zum anderen bezeichnet das Wort elektrische Bauelemente, die ganz unterschiedlich aussehen können.

Laßt hundert Blumen blühen!

Mit Widerständen haben wir in der Elektronik ständig zu tun. Am häufigsten sicher mit den schon erwähnten „farbigen Würstchen“: Kohle- oder Metallschicht, auf Keramik gebrannt und mit Lack abgedeckt. Solange sie sich in der Schaltung nicht braun färbten oder gar qualmen, sind sie richtig eingesetzt. Wo es aber um größere Stromstärken und Spannungen geht (Leistung!), braucht man mehr Oberfläche und wärmebestes Material. Widerstandsdrat, auf Keramikröhren gewickelt, vielleicht mit Überzug, ist da angemessen. Diese Widerstände mögen es heiß, ohne den Dienst zu versagen. Mit Widerständen kann man Spannungen „teilen“, aus 9 V z. B. kann man also $2 \times 4,5\text{ V}$ gewinnen. Mehrere Widerstände in Reihe und ein Stufenwechsler, der zu den Verbindungsstellen führt, ergeben einen (mehr oder weniger grob) einstellbaren *Spannungsteiler* (Bild 24).

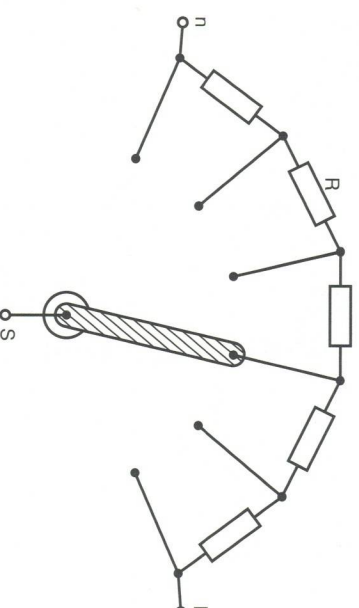


Bild 24. Spannungsteiler aus Festwiderständen: So kann man nur stufenweise ändern.

Besser ist, so etwas fertig vom Hersteller zu kaufen, bei dem sich jeder Zwischenwert einstellen lässt. Solch ein Teil heißt *Potentiometer*. Der mundaufale Techniker nennt es *Poti*. Auch da gibt es viele Bauformen, in Kohleschicht (Bild 25) wie in Draht, mit Achse für Knöpfe zum Drehen oder mit Schlitz für den Schraubendreher. Oder Flachbahntypen, wie man sie aus der Disco kennt. Allen gemeinsam ist der Schleifkontakt. Daher haben Potis (mindestens) drei Anschlüsse.

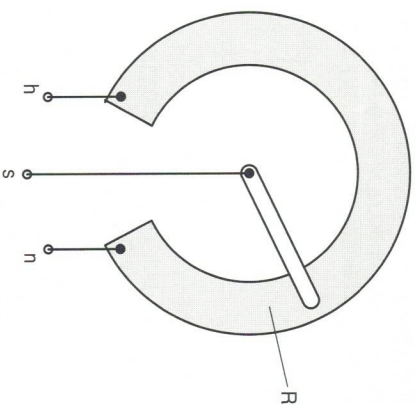


Bild 25. Potentiometer-Spannungsteiler. Jeder Zwischenwert ist möglich.

Bild 26 zeigt eine kleine Sammlung fester und einstellbarer Widerstände aus der Praxis.

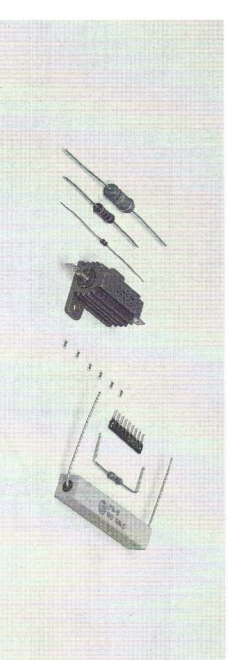


Bild 26. Vielfalt unter einer Flagge: Widerstände für (fast) alle Fälle.

Farbe ins Bild

Die Verbindung zwischen Teil und Eigenschaft ist der aufgedruckte Widerstandswert: Bei größeren Typen häufig als Zahl, sonst in Form farbiger Ringe. Die kann man nämlich in jeder Einbaulage sehen. Und damit es den Herstellern nicht zu schwer wird, ist man bezüglich Nennwert „tolerant“: Um einige Prozent darf der wahre Wert vom aufgedruckten schon abweichen, je nach Sortierung. Die zulässige Toleranz ist gleich mit als Farbring aufgedruckt. Die Bilder 27 und 28 zeigen Beispiele, die Tabelle nach Bild 29 hilft dabei, sich diesen

wichtigen Code einzuprägen. Denn wer will schließlich jedesmal nachschlagen...



Von links nach rechts:
rot = 2
violett = 7
rot = 2 Nullen
silber = 10% Toleranz
2.700 Ω
= 2,7 kΩ

Bild 27. So „decodiert“ man einen Widerstand.



Von links nach rechts:
braun = 1
schwarz = 0
gelb = 4 Nullen
gold = 5% Toleranz
100.000 Ω
= 100 kΩ

Bild 28. Klarer Fall: Das sind 100 kΩ mit 5 % Toleranz.

Farbe	1. Ring 1. Zahl	2. Ring 2. Zahl	3. Ring Nullen	4. Ring Toleranz
schwarz	0	0	—	—
braun	1	1	0	1 %
rot	2	2	00	2 %
orange	3	3	000	—
gelb	4	4	0000	—
grün	5	5	00000	—
blau	6	6	000000	—
violett	7	7	—	—
grau	8	8	—	—
weiß	9	9	—	—
gold	—	—	x0,1	5 %
silber	—	—	x0,01	10 %
o. Ring	—	—	—	20 %

Bild 29. Farbcod

Reihen und Parallel
Mit wenigen Widerständen lassen sich recht viele Werte zusammenstellen. Wie's dabei langgeht, testen wir schnell einmal aus.

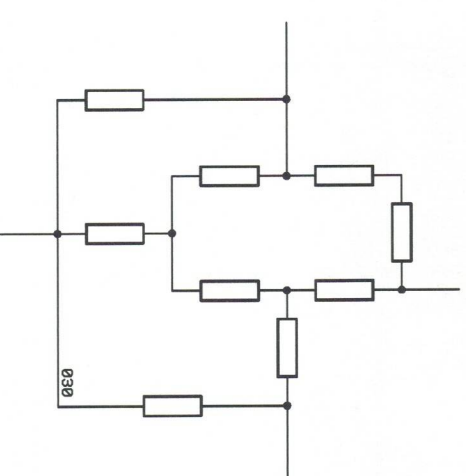


Bild 30. Widerstandsnetzwerke: Knoten und Maschen – ein irres Verwirrspiel von Kirchhoff & Ohm.

19 Wir bereiten einen Vergleich nach Bild 31 vor, zunächst aber noch ohne *R2*. Nun drücken wir *Ta1* und „merken“ uns die Helligkeit der Leuchtdiode. Dann drücken wir *Ta2*. Die Diode wird wesentlich geringer leuchten.

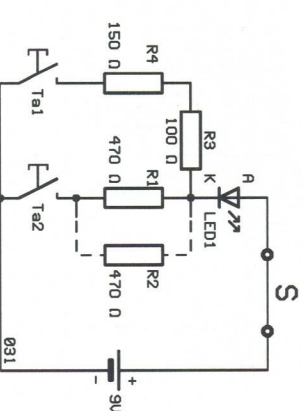


Bild 31. *R3 + R4 = R1 || R2* (sprich „parallel“): Test zur Kombination von Widerständen in Reihe und parallel.

20 Jetzt stecken wir *R2 parallel* zu *R1* und wiederholen den Test. Die Diode leuchtet diesmal in beiden Fällen etwa gleichhell.

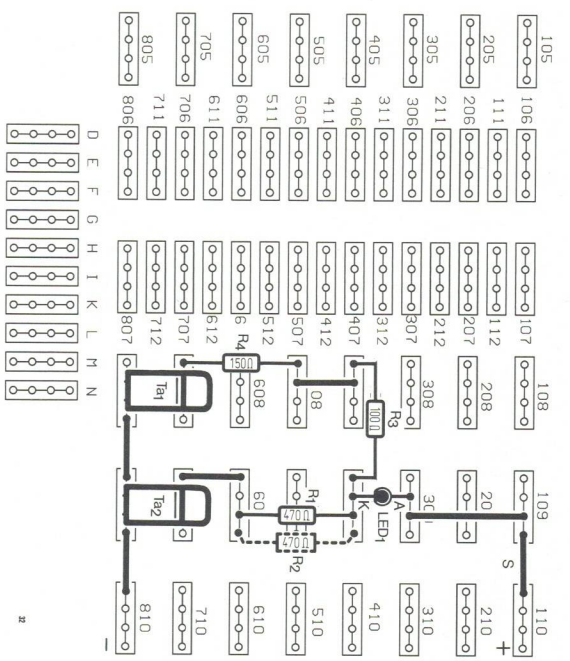


Bild 32. Aufbau zu Bild 31.

Wir stellen fest: Die *Parallelschaltung* von zwei 470- Ω -Widerständen wirkt etwa wie eine *Reihenschaltung* von 100 Ω und 150 Ω . Das ist noch etwas unübersichtlich.

21 Wir stecken darum das Experiment nach Bild 33 zusammen. R_3 wird zunächst überbrückt. Durch wechselseitiges Drücken von Ta1 und Ta2 vergleichen wir die Helligkeit der Leuchtdiode. Die wird bei Ta2 stärker leuchten als bei Ta1.

22 Wir entfernen die Brücke Y und wiederholen den Test.

Wir stellen fest: Die *Reihenschaltung* von zwei 470- Ω -Widerständen wirkt etwa wie ein Widerstand von 1 k Ω .
Auswertung: In Bild 31 ergibt die Reihenschaltung $R_3 + R_4 = 100 \Omega + 150 \Omega$ den Gesamtwert von 250 Ω . Fast genau so wirkt die Parallelschaltung von R_1 und R_2 (je 470 Ω). Ergebnis dieser Parallelschaltung: 235 Ω . Das „Geheimnis“: Bei Reihenschaltung wächst der Gesamtwiderstand, bei Parallelschaltung sinkt er. Den (technischen) Kehrwert eines Widerstandes nennt man *Leitwert*. Bei einer Parallelschaltung addieren sich die Leitwerte. Das rechnet sich einfach so: $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$. Bei nur zwei Widerständen kann man auch schreiben $R = (R_1 \cdot R_2)/(R_1 + R_2)$.

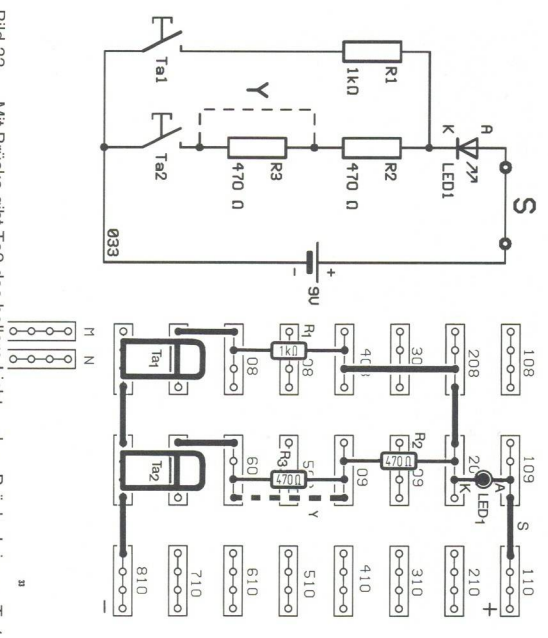


Bild 33. Mit Brücke gibt Ta2 das hellere Licht – ohne Brücke bringen Ta1 und Ta2 das gleiche Ergebnis, denn: $R_1 \approx R_2 + R_3$.

Beim Ausrechnen immer schön die gleichen Zehnerpotenzen benutzen, am besten Maßeinheiten „pur“: Besser $1 \cdot 10^3 \Omega$ als 1 k Ω ; es kann sonst böse Fehlschlüsse geben!



Bild 34. Dreimal ein Schritt in die richtige Richtung ...

5. Spannung, Strom und Widerstand – das Gesetz von Ohm

Menschen geben sich Gesetze, um ihr Zusammenleben in geordnete Bahnen zu bringen. Damit in der Natur alles geordnet verläuft, dafür sorgen die Naturgesetze. Der Mensch mußte sie „nur“ aufdecken und formulieren. Soeben waren wir auf dem besten Wege, dies für den elektrischen Stromkreis zu tun. Doch Georg Simon Ohm war da schneller – er hat es schon 1827 getan.

Wege zu Ohm
Viele Wege führen zu Ohm. Das werden wir gleich merken.

23 Nach Bild 35 begeben wir uns mit dem 10-k Ω -Potentiometer, mit einem 470- Ω -Widerstand (als Kaskastrophenschutz) und mit Leuchtdiode auf einen Weg zu Ohm. Dazu drehen wir am Poti.

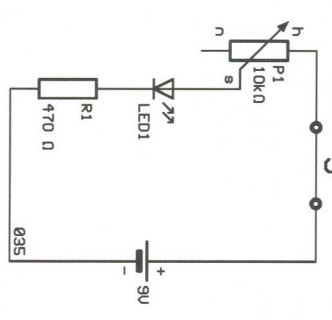


Bild 35. Poti als „dehnbarer“ Widerstand. Je mehr R_1 , um so weniger I .

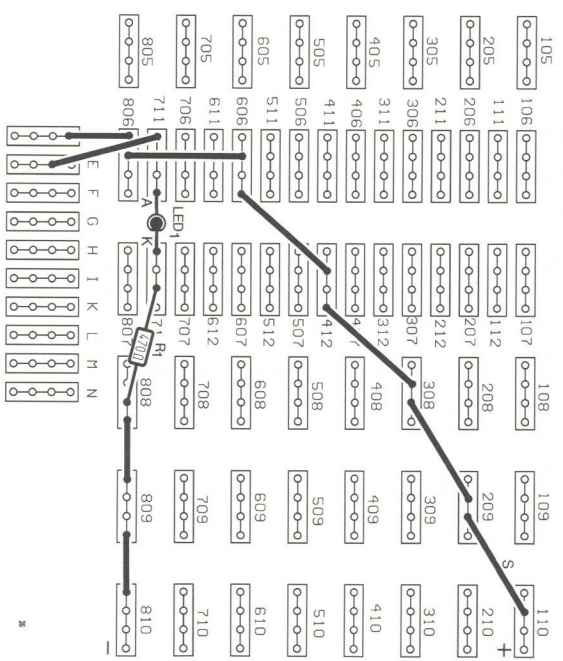


Bild 36. Aufbau zu Bild 35.

Wir stellen fest: Je mehr Widerstand zwischen Schleier und festem Anschluß eingeschaltet ist, um so weniger hell leuchtet die Diode. Da unsere Betriebsspannung U_B konstant ist, heißt das: Je mehr Widerstand, um so weniger Strom (der das Leuchten bewirkt).

24 Wir befördern das Poti zum Spannungsteiler, indem wir den noch freien Anschluß an Minus Batterie legen (Bild 37). Der Schleifer greift nun in Richtung Minus immer weniger Spannung von U_B ab. Wieder wird die Leuchtdiode dabei immer dunkler.

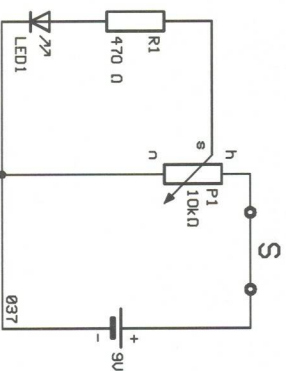


Bild 37. Freie Wahl von 0 bis U_B : Die abgegriffene Spannung U bestimmt den Strom I .

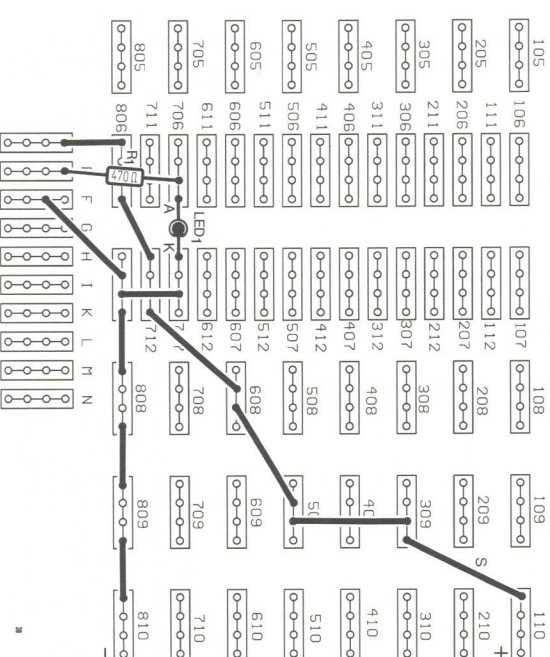


Bild 38. Aufbau zu Bild 37.

Wir folgern: Je weniger Spannung (bei gleichem Vorwiderstand), um so weniger Strom.

Also: Konstante Spannung U , wachsender Widerstand R – der Strom sinkt, konstanter Widerstand R , sinkende Spannung U – der Strom I sinkt ebenfalls. Und so einfach sind die Zusammenhänge: $I = U/R$, $U = I \cdot R$, folglich auch $R = U/I$.

Insider-Info 5

Leider ist eine elektronische Schaltung komplizierter als der einfache Stromkreis. Zur Berechnung muß man sie entwirren, in kleine Stücken aufteilen. Dafür hat Herr Kirchhoff zwei hilfreiche Gesetze entdeckt und formuliert: die **Knotenpunkt-** und die **Maschenregel**.

Die erste Regel lautet sinngemäß: Die Summe aller in einen Knoten hineinfließenden Ströme ist gleich der Summe der abfließenden. Strom kann nicht verlorengehen wie etwa Wasser aus einer löcherigen Leitung! Bild 39 zeigt einen Schaltungsausschnitt mit solchen Knoten. Für Mathematiker:

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5; I_5 = I_6 + I_7.$$

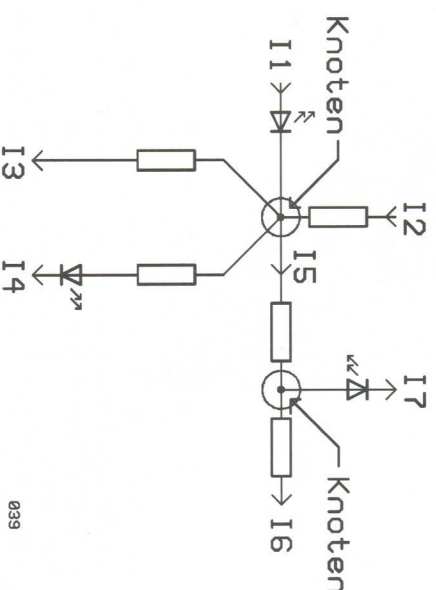


Bild 39. Zur Kirchhoffschen Knotenregel: Was zufließt, fließt auch wieder ab!

Die zweite Regel besagt: In einer geschlossenen Masche ist die Summe aller Spannungen gleich Null. Was Maschinen sind, zeigt uns ein Blick auf einen Zaun aus Maschendraht: Oben gabeln sich die Drähte, unten kommen sie wieder zusammen. Wie beim Beispiel nach Bild 40.

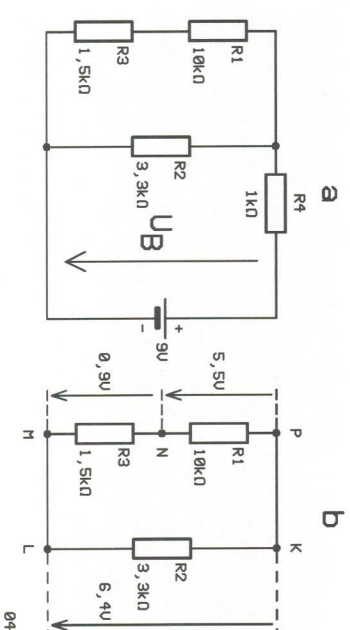


Bild 40. Zur Kirchhoffschen Maschenregel:
a – Stromkreis mit zwei Maschen,
b – Einzelmasche mit Spannungs-Zählpfeilen.

Alles klar?

Einstiegern hilft der „Maschenkrieger“:

1. Ein geschlossener Kreis wird als **Masche** bezeichnet. Er kann nur Widerstände oder auch Spannungsquellen enthalten.

2. Die Spannungen in einer Masche werden mit **Zählpfeilen** gekennzeichnet. Das können Batteriespannungen oder Spannungsabfälle über Widerständen sein.

3. Die Richtung der Zählpfeile wird nach der technischen Stromrichtung gewählt. Fließt also durch einen Widerstand ein Strom von Plus nach Minus, wird der Pfeil ebenfalls von Plus nach Minus gezeichnet.

4. Eine Masche wird von einem Startpunkt aus in der gewählten Richtung „einmal herum“ durchfahren, bis man wieder am Startpunkt ankommt. Trifft man dabei auf das Ende eines Spannungspfeils, ist die zugeordnete Spannung positiv zu rechnen, trifft man auf eine Pfeilspitze, rechnet diese Spannung negativ.

Betrachten wir nun beispielsweise die Masche nach Bild 40 b. Dort wurden bereits die Teilspannungen eingetragen. Man kann sie messen (wie, erfahren wir später) oder berechnen. Wir starten am Punkt K und wandern in Richtung L einmal herum. Auf dieser „spannenden“ Reise begegnen wir folgenden Werten: K nach L, Pfeilende bei K, also +6,4 V. L nach M, kein Spannungsunterschied. Also 0 V. M nach N: Pfeilspitze an M, also -0,9 V. N nach P, Wider Pfeilspitze, also -5,5 V. P nach K: 0 V. Ende der Reise. Addition der Teilspannungen dieser Masche: +6,4 V + (-0,9 V) + (-5,5 V) = 0 V.

Unfaßbarer Widerstand

Kaum glaubt man nun, alles sei klar, da tauchen neue Fragen auf.

25

Wir nehmen eine schon ältere 9-V-Batterie und schließen sie an unseren einfachen Stromkreis mit Leuchtdiode und 470-Ω-Widerstand an. Wir beobachten die Helligkeit der Leuchtdiode. Dann wechseln wir die Batterie gegen eine neue. Oder besser: Wir bauen nach Bild 41 bei- des gleichzeitig auf. Das Poti wird zuerst so eingestellt, daß sein Widerstand nicht im Stromkreis liegt (Schleifer an den Anschlag links im Bild).

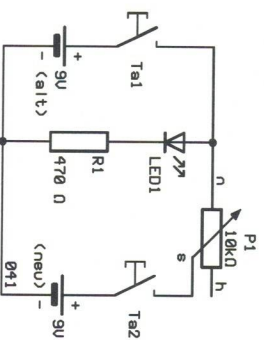


Bild 41.

Bei gleicher Helligkeit mit Ta1 wie mit Ta2: Der eingestellte Teilwert von P1 steckt unsichtbar in der alten Batterie.

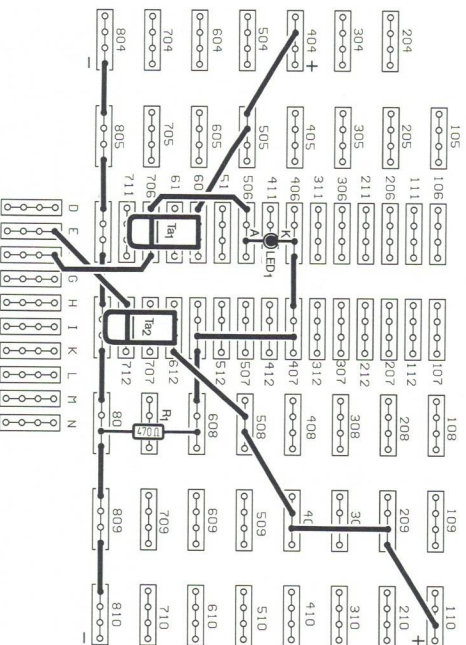


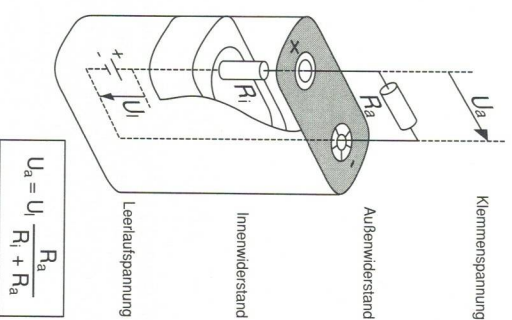
Bild 42. Aufbau zu Bild 41.

Wir stellen fest: Die Leuchtdiode leuchtet an der neuen Batterie wesentlich heller als an der alten – trotz gleicher Spannungsangabe auf beiden Batterien (9 V)!

26

Wir drehen nun so lange am Poti, bis die Leuchtdiode an der neuen Batterie genau so „funzelt“ wie an der alten.

Folgerung: In der alten Batterie muß sich so etwas wie ein Widerstand versteckt haben, dessen Wert dem unseres eingeschalteten Potistücks entspricht. Dieser Unsichtbare begrenzt wirkungsvoll den Strom. Er bleibt unsichtbar, wenn man die Batterie öffnet. Dieser Widerstand ist nämlich nur das Ergebnis der erschöpften Batterie, etwas „Chemisches“ also – eine Hilfsvorstellung.



$$U_a = U_i \frac{R_a}{R_i + R_a}$$

Bild 43. Insider rechnen auch mit Phantomen!

27

Nach Bild 44 bauen wir uns etwas Nützliches – einen 9-V-Batterietester frei nach McGyver: Mit kleinsten technischen Mitteln die größte Wirkung! Wenn die Leuchtdiode schon bei Anschluß des Prüflings kaum noch leuchtet, kann man diesen getrost entsorgen. Leuchtet sie zwar, wird aber beim Schließen von Ta1 wesentlich dunkler, war's das auch. Den Ta2-Test schließlich bestehen nur frische Batterien ohne größeren Rückgang der Helligkeit.

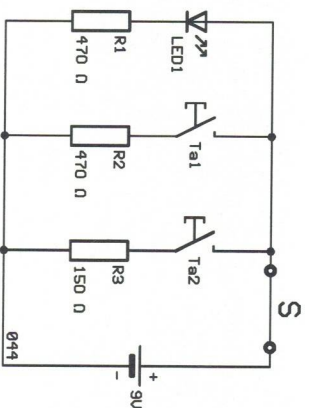


Bild 44.

Sparsame McGyver-Lösung für Batterietester: Leuchtet LED1 auch mit Ta2, ist Batterie frisch. Leuchtet sie nur noch bei offenen Tasten, reicht's nicht mehr lange.

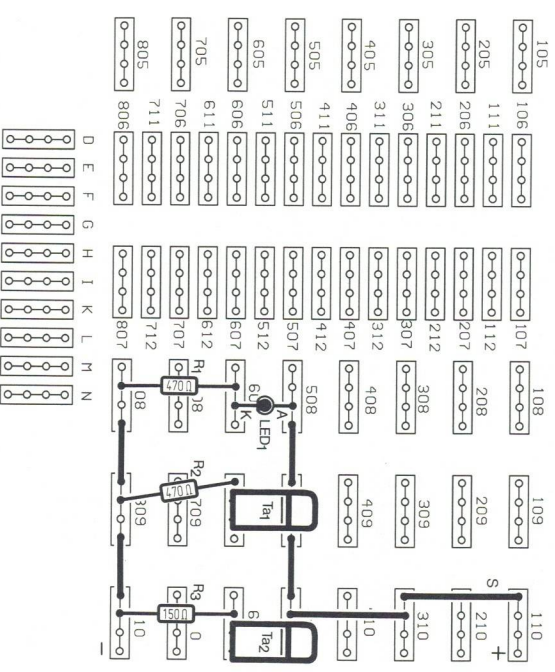


Bild 45. Aufbau zu Bild 44.

Jede Spannungsquelle hat einen *Innenwiderstand*. Man bezeichnet ihn meist mit R_i . Bei Batterien wächst er mit Alter und Erschöpfunggrad. In unserer Steckdose ist er allerdings sehr, sehr klein – und bleibt es. Vorsicht auch bei Akkumulatoren. Geladene Akkus und moderne Alkali-Mangan-Batterien haben ebenfalls einen sehr kleinen R_i . **Vorsicht – je kleiner R_i , desto größer ein eventueller Kurzschlußstrom!** Aus gutem Grund haben wir uns bei unseren Schaltungen für die kleine 9-V-Blockbatterie entschieden.

6. Kondensator: Box für Elektronen

Spannung, Strom, Widerstand – beim einfachen Stromkreis ging am Schluß alles mit rechten Dingen zu. Klarheit mit Ohm. Doch schon wird's wieder sonderbar. Schuld hat ein neues Bauelement im Stromkreis – ein *Kondensator*.

Strom in kleinen Dosen

Der Name Kondensator läßt sich mit Verdichter übersetzen. Was verdichtet er?

28

Wir fügen in den einfachen Stromkreis nach Bild 46 einen Kondensator ein und drücken die Taste. Was tut die Leuchtdiode? Obwohl wir die Taste schön festhalten, ist es mit dem Leuchten schnell vorbei. Auch Öffnen und erneutes Schließen hilft nichts. Hält hier schon wieder ein Geist seinen „Daumen“ dazwischen?

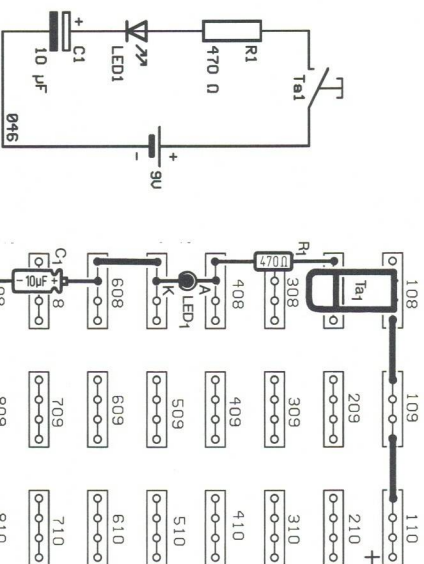


Bild 46. Strom in der Sackgasse: LED1 leuchtet nur beim ersten Tastendruck kurz auf.

29

Mit der Ergänzung nach Bild 47 kommen wir der Sache näher. Wir drücken nochmals Ta1. Es kann, muß aber nicht nochmals kurz leuchten. Ta1 bleibt nun offen. Dafür drücken wir jetzt Ta2. Wie reagiert die Leuchtdiode LED2 darauf?

Wir stellen fest: Im Stromkreis aus C1, Ta2, LED2 bleibt die Batterie „außen vor“. Dennoch leuchtet LED2 kurz auf, wenn man Ta2 drückt. Das Spiel läßt sich sogar beliebig oft wieder-

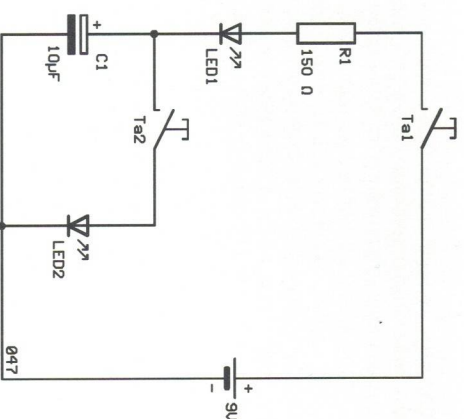


Bild 47. Ausweg über Ta2: Der Kondensator C1 gibt seine Ladung an LED2 ab und kann über Ta1 neu geladen werden.

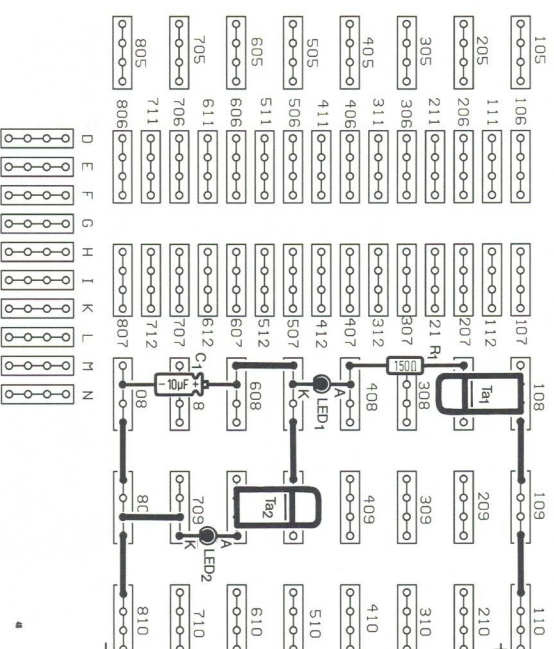


Bild 48. Aufbau zu Bild 47.

holen: Ta1 betätigen – LED1 leuchtet kurz, Ta2 drücken – LED2 leuchtet für einen Augenblick usw.

Über Ta1 „schieben“ wir mit Hilfe der Batterie offensichtlich Elektronen in den Kondensator hinein – exakt gesehen vom Minuspol her. Diese Elektronen stauen sich, füllen eine Art „Eimer“. Was vom anderen Kondensator-Anschluß in die Bat-

terie (zum Pluspol) zurückfließt, sind Elektronen, die aus dem Kondensator herausgedrückt werden. Ist der Eimer voll, hört dieser Rückfluß auf. Dafür ist nun der Kondensator zur Batterie auf Zeit geworden. Er hat eine Spannung von etwa 7 V angenommen. Das ist die Differenz zwischen Batteriespannung und LED-Flußspannung (weniger als 2 V, siehe Abschnitt 4). Der Kondensator ist also ein kleiner Speicher. Er hat jedoch nur wenig Energie gespeichert. Für LED1 besteht darum auch ohne Schutzwiderstand keine Gefahr. Bis auf ihre Flußspannung entlädt sich C1, wenn Ta2 gedrückt wird. Dann ist Schluß mit dem Leuchten. C1 kann jedoch über Ta1 jederzeit wieder neu geladen werden.

Flächen auf Distanz

Ein Kondensator besteht im einfachsten Fall aus zwei Metallplatten, die sich in einem bestimmten Abstand gegenüberstehen und keine leitende Verbindung miteinander haben; sie sind also voneinander isoliert. In der technischen Praxis allerdings benutzt man keine Platten, sondern hauchdünne, metallisierte Folien, zwischen denen man eine ebenso dünne isolierende Folie anordnet. Die Isolierschicht zwischen den Kondensatorplatten heißt *Dielektrikum* (spricht Di-Elektrikum). Je größer die Fläche der Metallfolie und je dünner die Isolierschicht, desto höher ist die Kapazität des Kondensators. Sie hat das Symbol C und die Maßeinheit *Farad*, abgekürzt mit F. Die Batterie im Stromkreis transportiert auf die Minusseite des Kondensators Elektronen, sowie davon dort Platz finden. Sie sitzen nur auf der Oberfläche, darum kann die Folie sehr dünn sein. Aus Platzgründen wickelt man übrigens oft die Bahnen zu einer Rolle. Je mehr Druck (Spannung) auf den Kondensator wirkt, um so mehr Elektronen nimmt er auf. Die Spannung greift über ihr elektrisches Feld durch den zwischenliegenden Isolator auf die andere Metallbahn. Von dort treten ebenso viele Elektronen die Flucht zum Pluspol an, wie auf den Minusbelag gelangen.

Die Sache mit dem elektrischen Feld ähnelt der Gewittersituation „Wolke gegen Kirchturm“. Nur würde hier der Knall die Zerstörung des Kondensators bedeuten. Darum steht – direkt oder verschlüsselt – die Angabe der höchstzulässigen Spannung auf dem Kondensator.

Insider-Info 6

Das elektrische Feld wirkt auch im Vakuum. Zwischen den Kondensatorplatten genügt also ein Nichts als Isolator. Luft tut es auch.

Die Kapazität errechnet sich aus $C = \epsilon_0 \cdot S/d$. Darin ist S die Fläche (nur eine Seite rechnen!); d bezeichnet den Abstand. Um zur Maßeinheit Farad zu kommen, braucht man für den Kondensator im Vakuum noch die *elektrische Feldkonstante* ϵ_0 (griechischer Kleinbuchstabe Epsilon). Sie

hat den Wert $8,859 \cdot 10^{-14} \text{ As/Vcm}$. Das Farad wurde als die Kapazität definiert, bei der ein Strom von 1 A in 1 s zu einer Spannungsänderung um 1 V am Kondensator führt. Die Amperesekunde ist das Maß für die Ladung, Symbol Q .

Beispiel: Viele der Federkontakte auf unserem Experimentierbord haben nur rund 0,25 cm Abstand zueinander. Ihre gemeinsame Fläche beträgt etwa $1,7 \text{ cm}^2$. Damit hätte ein solches Federpaar im Vakuum (praktisch auch in Luft) eine Kapazität von

$C = 8,859 \cdot 10^{-14} \cdot 1,7/0,25 = 0,6 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 0,6 \text{ pF}$. Durch den Kunststoff erhöht sie sich auf etwa 2 pF. Denn:

Wirksamer als Vakuum oder Luft sind feste Isolatoren. Um wieviel sich mit einem solchen Stoff die Kapazität erhöht, sagt uns die *relative Dielektrizitätskonstante* ϵ_r . Sie ist ein reiner Zahlenwert und liegt bei gebräuchlichen Isolatoren (Papier, Glas, Keramik, Glimmer) etwa zwischen 3 und 6. Wesentlich günstiger ist Aluminiumoxid. Es bildet sich in Elektrolytkondensatoren wie den in unseren Versuchen benutzten. Der Preis für die Kleinheit: ein Leckstrom, der die Ladung mehr oder weniger rasch ausgleicht.

Sanfte Übergänge

Der größte Kondensator in unserem Experimentierkasten hat $470 \mu\text{F}$ (Mikrofarad), also $0,47 \text{ mF}$ (Millifarad) oder $0,00047 \text{ F}$ (siehe weiter vorn Tabelle Seite 6). Das ist für die winzigen Elektronen schon ein recht großer „Einser“. Bei 9 V faßt er ziemlich viele davon. Solche Kapazitätswerte bieten nur *Elkos*, d. h. Elektrolytkondensatoren, siehe Insider-Info 6. Bei ihrem Anschluß müssen wir auf die richtige Polung achten, wie im Schaltsymbol vermerkt. Plus ist dort, wo das Gehäuse die umlaufende Kerbe hat. Der Minusanschluß liegt am Gehäuse. Beim stehenden $470\text{-}\mu\text{F}$ -Typ ist der Plusdraht länger als der Minusdraht. Die Gehäuse sind auch beschriftet.

30

Wir stecken das Experiment nach Bild 49 zusammen, lassen aber den Kondensator zunächst noch weg. LED1 reagiert auf Tastendruck wie gewohnt: Sie leuchtet bis zum Loslassen der Taste. Nun wird C1 dazugesteckt. Was geschieht, wenn wir Taster erneut drücken?

Wir stellen fest: Die Leuchtdiode hat es nicht mehr ganz so eilig mit dem Hellwerden, und sie tut das sanft. Weich verhält sie sich auch beim Loslassen der Taste – sie leuchtet noch etwas nach.

31

Wir vergrößern die Widerstandswerte von R1 und R2 auf $1\text{ k}\Omega$ bzw. $1,5 \text{ k}\Omega$. Was ändert das?

Wir bemerken: Zwar leuchtet LED1 jetzt nicht ganz so hell,

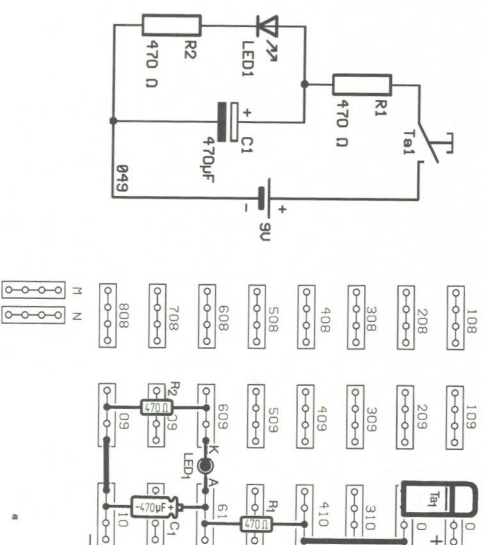


Bild 49. Ohne C1: ein ganz normaler Stromkreis. Mit C1 verläuft alles etwas verzögert.

dafür erreicht sie ihre größte Helligkeit noch etwas später. Und sie leuchtet auch länger nach.

32

Wir wechseln C1 gegen ein Exemplar mit $100 \mu\text{F}$ und benutzen wieder die Widerstände aus Bild 49. Ein Druck auf die Taste zeigt: Die Übergangszeiten sind deutlich kleiner als vorher.

Sortiert man die Erkenntnisse aus diesen Experimenten, so ergibt sich:

- Die Reihenschaltung aus R und C verzögert das Einschalten der Leuchtdiode.
- Die Entladung eines Kondensators dauert mit zunehmendem Wert des Widerstandes länger.
- Je größer der Widerstandswert, um so kleiner sind Lade- und Entladestrom.
- Ein größerer Kondensatorwert bewirkt wie ein größerer Widerstandswert eine Verlängerung von Lade- und Entladezeit.

Insider-Info 7

Das Produkt aus R und C einer Schaltung zum Auf- und Entladen eines Kondensators nennt man *Zeitkonstante*. Das Symbol dafür ist der griechische Kleinbuchstabe Tau (τ). Während des Ladevorgangs wird die Differenzspannung zwischen Batterie und Kondensator immer kleiner. Sie liegt über R, ergibt also nach Ohm einen immer kleiner werdenden Strom. Umgekehrt wird beim Entladen die Kondensatorspannung immer kleiner. Sie liegt über

dem Entladewiderstand. Also wird auch in diesem Falle der Strom immer kleiner. Lade- und Entladenspannung am Kondensator verlaufen darum nach einer Exponentialfunktion. Nach der Zeit τ hat sich C auf 63,2 % der verfügbaren Spannung aufgeladen. Beim Entladen ist die Kondensatorspannung nach der gleichen Zeit auf 36,8 % des Anfangswerts gesunken. Zeitglieder aus R und C sind wichtige Grundschaltungen der Elektronik.

Flächen im Verbund

Auch Kondensatoren kann man kombinieren. Beim *Parallelschalten* erhöht sich die verfügbare Fläche, also auch die Kapazität. Man zählt einfach zusammen: $C_{\text{ges}} = C_1 + C_2 + \dots$. $10 \mu\text{F}$ parallel zu $100 \mu\text{F}$ ergeben also $C_{\text{ges}} = 110 \mu\text{F}$. Bei der *Reihenschaltung* sieht es schon anders aus: Die Schaltung läßt sich zwar insgesamt auf die vorhandene Spannung auf, aber die Kondensatoren müssen untereinander teilen. Das Ergebnis: $1/C_{\text{ges}} = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots$. So werden aus $100 \mu\text{F}$ in Reihe zu $470 \mu\text{F}$ nur noch rund $82 \mu\text{F}$.

Zeit-Multiplikator

Wer, wie wir mit unserem Experimentierkasten, die richtigen Mittel hat, kann mehr aus einer Sache machen. Wir greifen dazu – wie schon bei der Geisterbeschörung – wieder nach einem (noch) unbekannten Bauteil.

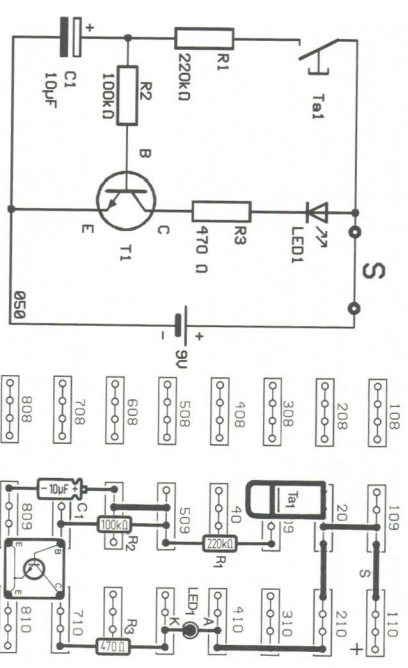


Bild 50. Arbeitsstellung: Mit hohen Widerstandswerten große Verzögerungen, durch Transistor auch dann helles Leuchten.

33

Wir fügen in den Entladekreis des Kondensators statt der Leuchtdiode die Basis-Emitter-Strecke eines Transistors ein. Außerdem verwenden wir viel höhere Widerstandswerte (Bild 50).

Der Strom, der in den Transistor fließt, wird darin mehrere hundert Mal verstärkt (mehr zur Funktion von Transistoren folgt später). Er darf also entsprechend klein sein, wenn die Leuchtdiode genauso hell wie vorher werden soll. Sie liegt im Kollektor-Emitter-Kreis, dort, wo der verstärkte Strom fließt. Es wurde gesagt, daß die Kondensatorladung bei kleinen Strömen viel länger reicht als bei großen. Darum leuchtet LED1 in unserem Experiment erst etwa 3 Sekunden nach Einschalten mit voller Helligkeit. Nach dem Abschalten nimmt die Helligkeit erst mehrere Sekunden später wieder deutlich ab.

Wechselnde Verhältnisse

Bis jetzt war klar – der Strom fließt in der Richtung, die die Batteriepolung vorgibt. Ein Gleichstrom also. Daß in unseren Netzsteckdosen Wechselspannung anliegt, weiß wohl jeder. Wechselspannung läßt sich transformieren, also mit kleinen Verlusten auf jede beliebige Spannungshöhe bringen.

34

Wir bauen das Experiment nach Bild 51 auf. Wieder mit einem neuen Bauelement – einem Ohrhörer. Er macht Ströme „hörbar“. Die beiden Leuchtdioden sollen zeigen, wo's diesmal langgeht. Sie sind antiparallelschaltet, also für unterschiedliche Richtung des Stroms.

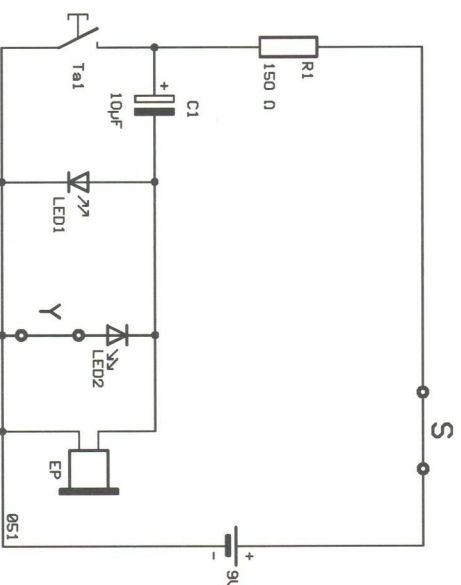


Bild 51. „Hilfsbatterie“ Kondensator mit eigener Richtung (Polum) – per Tastendruck zum Wechselstrom.

Diode, also auch LED, wirken wie Einbahnstraßen. Der Pfeil zeigt die (technische) Stromrichtung an. Der Verkehr (der Strom) kann erst dann in beiden Richtungen fließen, wenn neben einer Einbahnstraße eine zweite für die Gegenrichtung angelegt wird. Das haben wir mit der zweiten LED getan. Wir

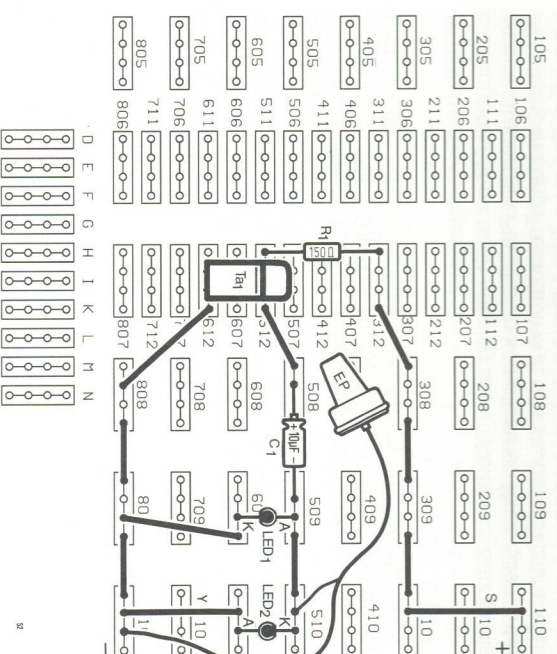


Bild 52. Aufbau zu Bild 51.

drücken nun Ta1, aber nur kurz. Sonst wird R1 warm, und die Batterie wird unnötig beansprucht. Dafür drücken wir dann lieber öfter.

Wir beobachten: Taste drücken – LED2 leuchtet kurz auf. Taste loslassen – LED1 leuchtet kurz. Das läßt sich beliebig wiederholen. Beim ersten Mal wird vielleicht LED2 noch dunkel bleiben. Jedesmal knackt es im Hörer – der Ton zum Bild.

Insider-Info 8

Ohrhörer sind elektromagnetisch-akustische Wandler. Sie nutzen die Wechselwirkung von stromdurchflossenen Leitern und Magnetfeldern. Fließt durch einen elektrischen Leiter ein Strom, baut sich um ihn kreisförmig-konzentrisch ein Magnetfeld auf. Wo Nord- und Südpol liegen, bestimmt die Stromrichtung. In unserem Ohrhörer ist eine solche Spule auf einen Permanentmagneten gesteckt. Sie verstärkt oder schwächt dessen Feld je nach Stromrichtung. Vor dem Magneten befindet sich ein dünnes Eisenplättchen, das dadurch mehr oder weniger stark angezogen wird. Diese Bewegung bewegt auch die Luft, und das hören wir.

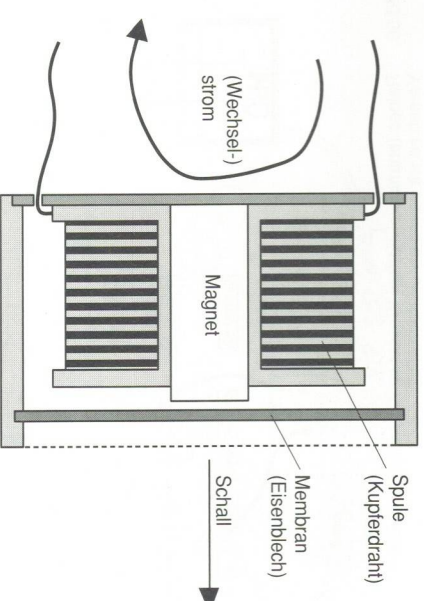


Bild 53. Kupfer und Eisen: Strom wird hörbar.

Die beiden gegensätzlich gepolten Leuchtdioden blinken also wechselweise. Das heißt, von C1 muß ein Strom kommen, der seine Richtung wechselt – eben ein *Wechselstrom*. Obwohl die Batterie nur Gleichstrom liefert. Dieser wirkt aber nur als Ladestrom für C1. Der fließt kurzzeitig, nachdem man Ta1 losgelassen hat. Bei Tastendruck wird der Kondensator zur schnell erschöpften Batterie. Mit Ta1 legt man ihren Pluspol an die gemeinsame Minusleitung. Der Entladestrom fließt dann genau umgekehrt – also durch LED2. Den Hörer kündigt die Richtung wenig. Er nimmt sich seinen Anteil in beiden Fällen, denn jedesmal steht über den Leuchtdioden eine Spannung von etwa 2 V. LED2 fehlt zwar wieder ein Schutzwiderstand, doch der ist bei der kleinen Energie aus dem 10 µF-Kondensator nicht zwingend nötig.

35

Mehr-Licht-Tip: Für C1 100 µF statt 10 µF und (statt Brücke Y) 33 Ω vor LED2; R1 kann auf 470 Ω erhöht werden. „Superhell“ wird's mit 470 µF und wieder 150 Ω für R1. Schutzwiderstand für LED2 nicht vergessen!

Das Prinzip der Kondensator-Umladung wird auch in der Praxis zur Spannungswandlung genutzt. Nur mit Halbleiterschalter statt Taste. Und selbstverständlich mit automatischer Umschaltung.

7. Leiten und Halbleiten

Wir kennen gute elektrische Leiter und nutzen sie – allen voran das Kupfer. Nicht minder wichtig sind Nichtleiter. Ohne sie könnte man den elektrischen Strom gar nicht sinnvoll einsetzen. Isolierstoffe halten ihn in den gewünschten Bahnen.

Doch die Natur liebt Übergänge. Dort sind die Stoffe angesiedelt, ohne die es keine Mikroelektronik gäbe – die *Halbleiter*. Der derzeit wohl wichtigste ist das Silizium. Man gewinnt es in beliebigen Mengen aus einfachem Sand. In Reinstform und bei Zimmertemperatur wirkt es zunächst wie ein Nichtleiter.

Fahrgemeinschaft im Kristallgitter

Umweltbewußte Nachbarn haben sich zu einer Fahrgemeinschaft verbunden. Reihum fährt jeder einmal die Kinder von allen zur Schule. Jeder hat sein Auto, aber es wird wechselseitig für mehrere genutzt. Eine enge, ziemlich störfeste Bindung herrscht.

Im Kristallgitter von reinem Silizium sieht es ähnlich aus. Die vier Elektronen auf der äußeren Schale wissen genau, zu welchem Atomkern sie gehören. Dennoch kreisen sie wechselseitig auch noch um je ein Nachbaratom. Den Gesamtverband verlassen sie nicht (Bild 54). Zumindest nicht bei Zimmertemperatur.

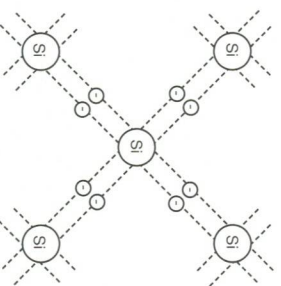


Bild 54. Elektronenpaarbindungen bei Silizium: Jedes Atom ist mit vier Nachbaratomen verbunden.

Wärmezufuhr jedoch bewirkt Außergewöhnliches: Höhere Temperatur vermag einige Elektronen trotz gesicherter Verhältnisse in Panik zu versetzen. Sie verlassen ihre Bindung, reißen dadurch Löcher. Eine an den Kristall angelegte Spannung bringt sie in gerichtete Bewegung – als Strom auf den positiven Pol zu. Je höher die Temperatur, um so mehr werden es. Genau im Gegensatz zu Metallen. Dort wird es für die Elektronen mit wachsender Temperatur schwieriger, sich zu bewegen, die Leitfähigkeit sinkt. Bei Halbleitern steigt also die Leitfähigkeit mit der Temperatur. Wird ein Loch von einem Elektron aus der Nachbarschaft gefüllt, reißt dieses wieder ein neues Loch. Das Loch wandert also, wenn Spannung anliegt, zum negativen Pol. Ohne Spannung dagegen läuft nichts! Die kleinen Männchen in Bild 55 zeigen, wo es langgeht. Die „Plättchen“, die sie nach rechts befördern, lassen das Loch, das sie reißen, nach links wandern.

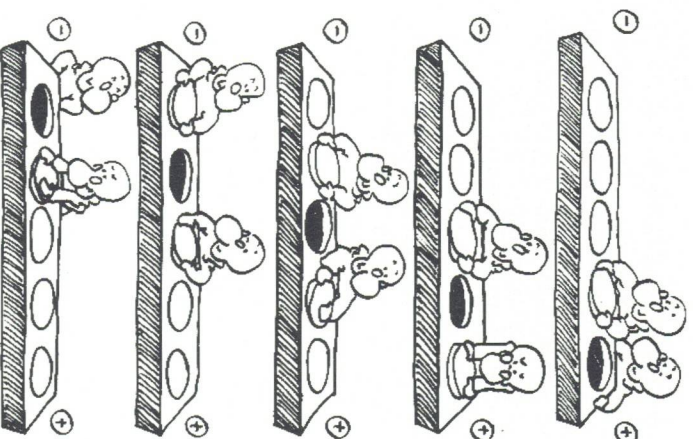


Bild 55. Löcher wandern (scheinbar) nach links, weil sie durch Plättchen entstehen, die (wirklich) nach rechts wandern.

Wir merken uns: Metalle leiten um so schlechter, je höher die Temperatur, Halbleiter leiten mit steigender Temperatur immer besser.

Gestörte Verhältnisse

Die schöne Ordnung der Fahrgemeinschaft stört ein „Zugereister“ ohne Auto. Plötzlich fehlt ein Platz. Wo immer sein Spröß mitfährt, muß ein anderer einen neuen Nachbarn fragen. Das „Auto zuwenig“ reißt ein Loch ins Gefüge. Und das sorgt für Bewegung. Doch auch Überfluß bringt Unruhe: Ein Auto mehr erhöht das Angebot an Platz über die Nachfrage. Es taucht mal da auf und mal dort. Wieder entsteht Bewegung im Gefüge.

Nützliche Konsequenzen

Störungen können auch nützlich sein. Wie etwas Salz in die Suppe streuen die Physiker in komplizierten Prozessen unter Wärmeeinwirkung Fremdatome in das saubere Silizium. Man nennt das *Dotieren*. Diese Fremden sind nicht wertlos, sondern

dem drei- oder fünfwertig. Bei dreiwertigen entsteht ein „Loch“, ein freier Elektronenplatz. Fünfwertige setzen dagegen ein Elektron frei, das niemand in der Nachbarschaft brauchen kann. Löcher wie Elektronen sind damit zur Wanderung verurteilt.

Ein Material mit solchen „Defekten“ vermag bereits bei normalen, „menschlichen“ Temperaturen Strom zu leiten, wenn man Spannung anlegt. Allerdings weniger stark als etwa Kupfer. Die freien Elektronen hangeln sich durch das Gitter zum Pluspol der Batterie, die Löcher zieht es zum Minuspol, wo es genügend Elektronen gibt. Denn Loch heißt ja Elektronenmangel. Lochwanderung ist also in Wahrheit eine Angelegenheit der Elektronen, die diese Löcher füllen. Unterwegs reißen sie dabei aber dort, wo sie herkommen, wieder neue Löcher auf. Das haben uns schon die Männchen in Bild 55 gezeigt.

36

Wir füllen ein kleines, sauberes Gefäß mit entmineralisiertem Wasser. (Es kann auch etwas geschnitzenes Eis von der Wand der Kühltruhe sein.) Dann hängen wir die blanken Enden von zwei Drähten so hinein, daß sie sich nicht berühren. Verbunden sind beide mit einer Anzeigeschaltung nach Bild 56. Wir beobachten die Leuchtdiode. Sie bleibt zunächst dunkel. Entmineralisiertes (oder kondensiertes) Wasser ist ein schlechter Leiter.

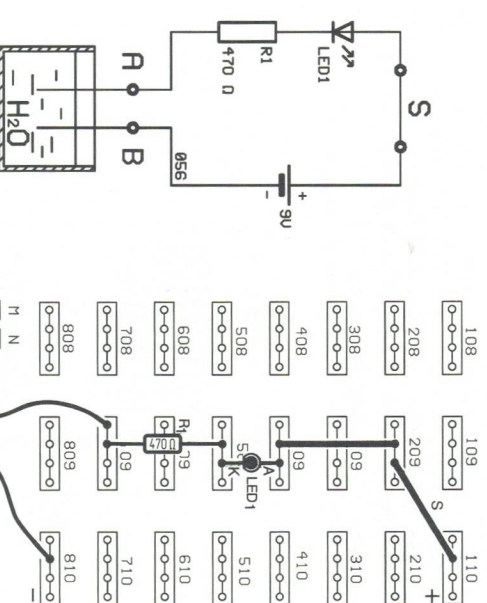


Bild 56. Reines (entmineralisiertes) Wasser ist ein schlechter Leiter. Versetzen wir es mit etwas Kochsalz!

Nun helfen wir mit einigen Körnchen Kochsalz nach und stellen fest: Die LED leuchtet! Wir folgern: Die „Dotierung“ mit Kochsalz hat die Leitfähigkeit des Wassers stark erhöht. Die Ursache liegt zwar nicht in Gitteränderungen, aber als Gleichnis macht sich die Sache gut.

Doch zurück zum Silizium. Man nennt das Material p-leitend, wenn die Löcher überwiegen, und n-leitend, wenn die Dotierung zu einem Elektronenüberschuß führt. Siehe dazu Bild 57.

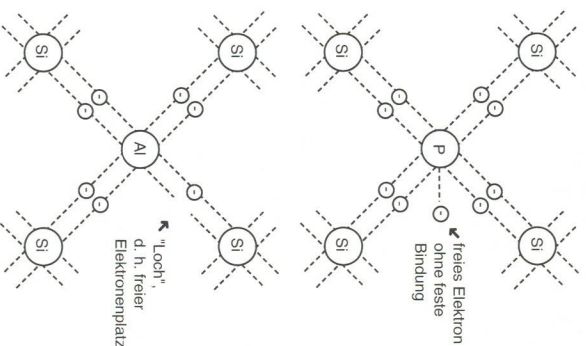


Bild 57. Störatome im Silizium-Kristallgitter setzen Ladungsträger frei: oben durch Phosphor (n-Überschuß), unten durch Aluminium (p-Überschuß).

Interessant wird es, wenn man auf einem Kristall beides nebeneinander erzeugt.

Geben und Nehmen – der pn-Übergang

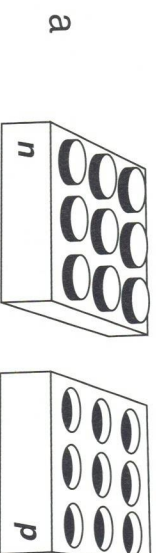
Es muß nicht immer eine Auseinandersetzung geben, wenn Gegensätzliches zusammentrifft. Im Gegenteil. Zwischen einem p- und einem n-leitenden Bereich liegt etwas Interessantes: ein pn-Übergang. Das ist eine Art Freihandelszone. Solange man von außen keinen Druck ausübt (sprich Spannung anlegt). Einige überschüssige Elektronen des n-Bereiches schieben sich auf der p-Seite an. Man sagt, sie diffundieren dorthin. Das bedeutet für den Grenzbereich auf der n-Seite positive und auf der p-Seite negative Ladung. Außen merkt man davon nichts. Insgesamt veranlaßt die Übergangszone an beweglichen Ladungsträgern.

Jetzt legen wir eine Spannungsquelle an p- und n-Seite. Zunächst mit dem Minuspol an p und mit dem Pluspol an n. Das entspricht den derzeitigen inneren Verhältnissen. Daher vergrößert sich die Grenzschicht. Es fließt kein Strom.

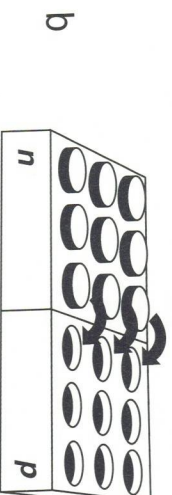
Nun polen wir die Spannungsquelle um. Jetzt überschweben die Ladungsträger die Grenzschicht. Von der n-Seite werden durch den negativen Pol der Quelle Elektronen geleitet, sowie die Löcher der p-Seite wünschen. Es fließt ein kräftiger Strom. Die Bildfolge 58 zeigt die Sache noch einmal im Plättchenmodell.

Die Elektronen-Einbahnstraße

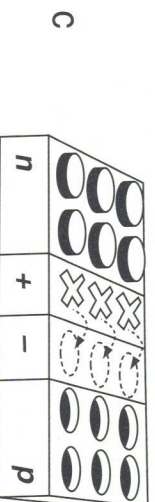
Wir haben es schon bei den Kondensatorversuchen erlebt: Dioden leiten nur in einer Richtung. Wir wußten nur noch nicht, warum. Jetzt erkennen wir: Dioden – das sind Gebilde



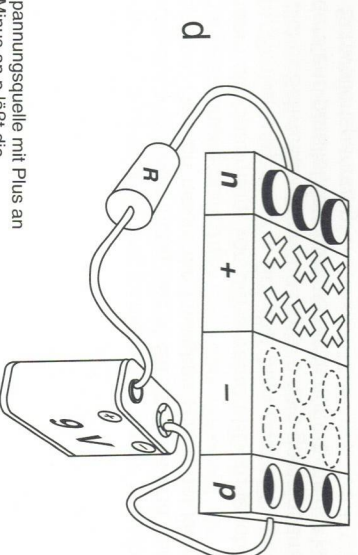
Plattenhaushalt von n (Überschuß) und von p (Mangel).



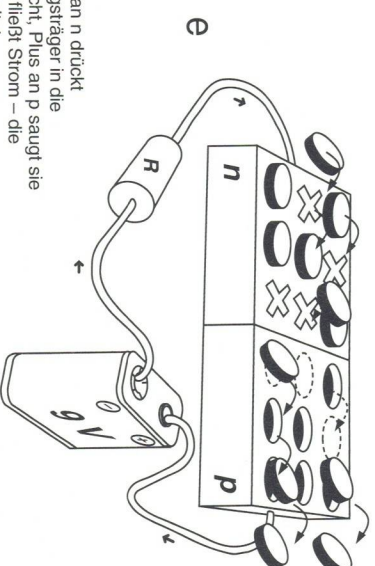
Beim Zusammenfügen diffundieren Elektronen durch die Grenzschicht nach p.



Bei n fehlen nun Elektronen, bei p sind Löcher aufgefüllt – die Grenzschicht ist an freien Ladungsträgern verarmt.



Eine Spannungsquelle mit Plus an n und Minus an p läßt die Verarmung zunehmen. Kein Strom – die Diode sperrt.



Minus an n drückt Ladungsträger in die n-Schicht. Plus an p saugt sie ab. Es fließt Strom – die Diode leitet.

Bild 58. Plattenmodell einer Diode aus n- und p-Material – Zustände je nach außen angelegter Spannung:

aus einer Paarung von p- und n-leitendem Material. Sie leiten nur, wenn eine Spannungsquelle mit Plus an der p- und Minus an der n-Seite angeschlossen wird. Umgedreht bewegt sich nichts. Das Männchen in Bild 59 hat das Problem genau vor sich: Das Wasser drückt gegen die Schließklappe und blockiert sich damit selbst den Weg. Füllt man es dagegen auf der anderen Seite ein, öffnet es sich die Klappe und fließt und fließt ...

37

Wir stecken aus zwei Leuchtdioden und einem Widerstand den Polprüfer nach Bild 60 zusammen. Nun wird für jede Batterie angezeigt, wo bei ihr Plus liegt: Plus an E – LED1 leuchtet, Plus an A – LED2 leuchtet.

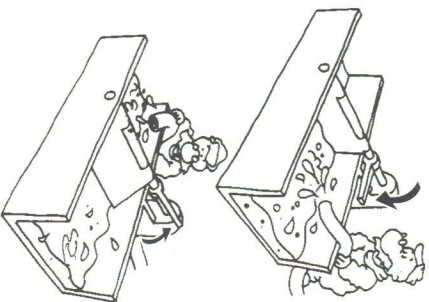


Bild 59.

Wassermodell der Diode, Sperrzustand: Wasser im rechten Kanalleil drückt die Schleusenklappe zu, Flußzustand: Wasser im linken Kanalleil öffnet sich selbst die Klappe nach rechts.

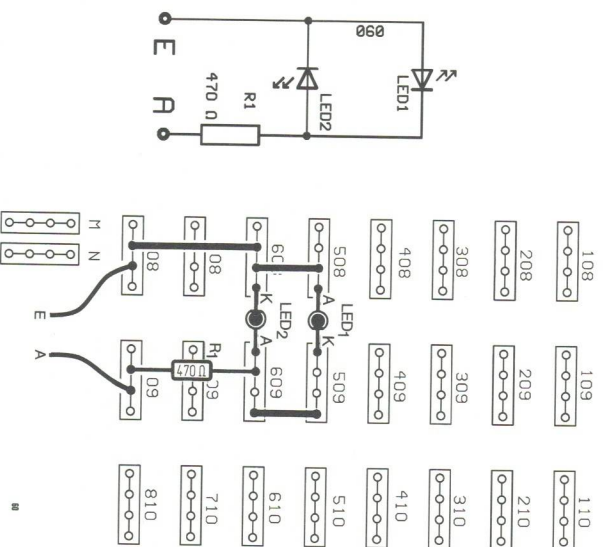
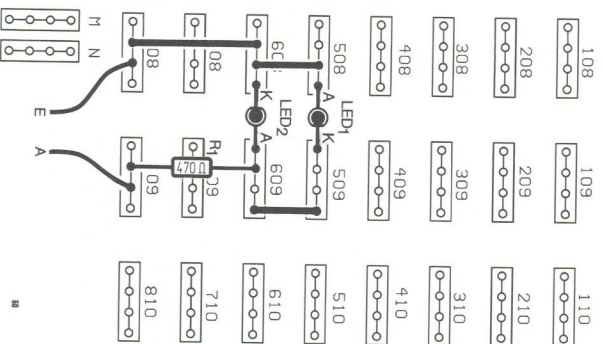


Bild 60.

Polaritäts-Deaktiv: Plus an E läßt LED1 leuchten, bei Plus an A leuchtet LED2.



Bunte Vielfalt

Daß es „mehrerlei“ Leuchtdioden gibt, sieht man schon an den Farben. Das kommt vom verwendeten Material (grün und gelb bei Gallium-Arsenid, rot bei Gallium-Arsenid-Phosphid).

Eine Materialfrage ist auch, wieviel Spannung für den Stromfluß erforderlich ist. Alles hat seinen Preis. Rote Leuchtdioden brauchen – je nach Typ – 1,5 V bis 1,7 V, gelbe und grüne zwischen 1,8 V und etwa 2 V.

38

Wir stecken gemäß Bild 61 zunächst nur LED2 (die grüne LED) ein und erst danach zusätzlich die rote. Wir bemerken erstaunt: Die grüne LED leuchtet kaum noch, sobald die rote hinzukommt. Diese leuchtet dafür ziemlich hell.

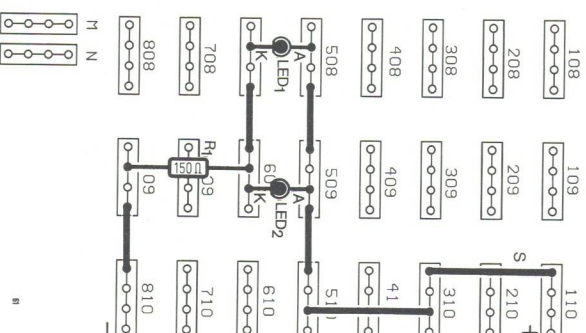
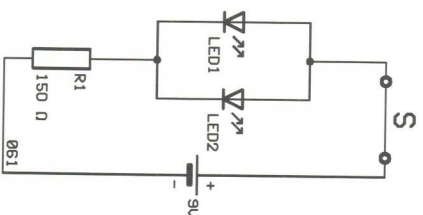


Bild 61.

Rot vor Grün: Steckt man die rote LED parallel zur leuchtenden grünen, geht deren Helligkeit zurück.

39

Wir erweitern Bild 61 um ein Poti (Bild 62). Wir drehen das Poti vom unteren Anschlag aus langsam hoch. Wir beobachten: Die rote LED beginnt schon im unteren Drehbereich zu leuchten, die grüne (schwach) erst kurz vor dem oberen Anschlag.

40

Wir teilen jeder LED einen eigenen Vorwiderstand zu (Bild 64) und wiederholen den Versuch. Wir stellen fest: Da jede LED einen eigenen Spannungsbedarf hat, kann auch die mit dem größeren Spannungsbedarf am Ende hell leuchten. Während die rote LED bei etwa 1/3 des Drehbereiches zu leuchten beginnt, folgt die grüne erst bei etwa 2/3. Wir schalten zum Vergleich wieder beide parallel (Ta1 drücken): Die grüne LED „erregt sich“ der roten.

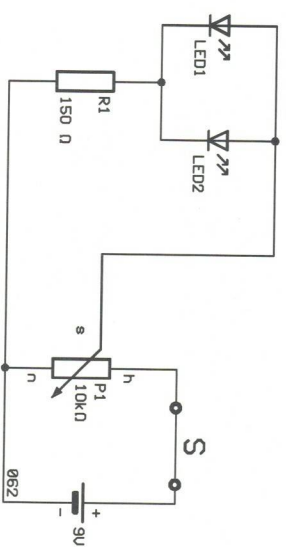


Bild 62.

Der Effekt von Bild 61 unter der „Spannungslupe“. Dreht man P1 langsam auf, leuchtet zuerst die rote, erst bei größerem Drehwinkel folgt die grüne LED.

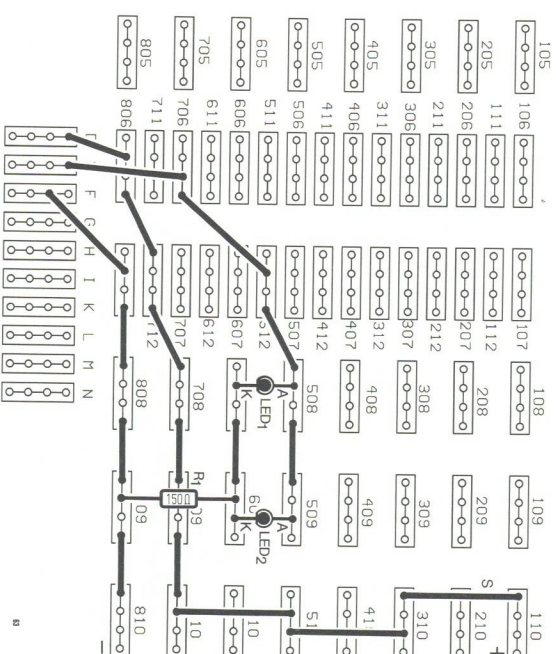


Bild 63. Aufbau zu Bild 62.

Wir folgern: Leuchtdioden unterschiedlicher Farbe brauchen unterschiedlich viel Spannung, damit Strom fließt und damit sie leuchten. Danach nimmt die Helligkeit schon bei kleiner Spannungserhöhung stark zu.

Man nennt die Spannung, von der an eine LED zu leuchten beginnt, *Schwellenspannung*. Schaltet man zwei LED unterschiedlicher Schwellenspannung hinter einem gemeinsamen Vorwiderstand parallel, leuchtet praktisch nur die mit der kleineren Schwellenspannung.

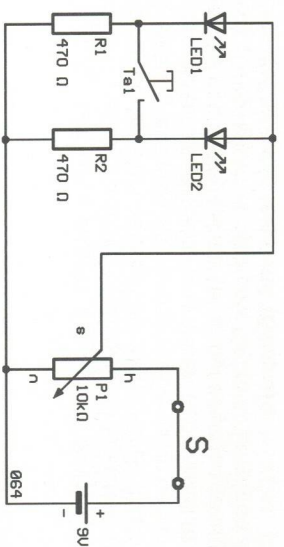


Bild 64. Getrennt marschieren (Ströme), vereint leuchten! Druck auf Ta1 führt zurück zu den Verhältnissen bei Bild 62.

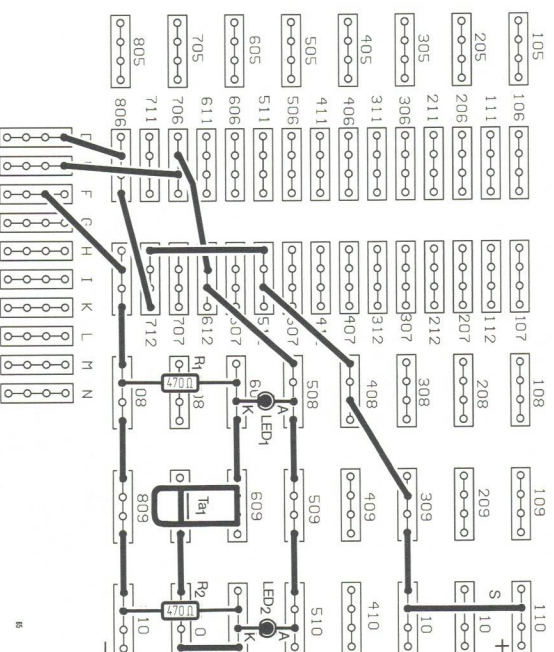


Bild 65. Aufbau zu Bild 64.

Insider-Info 9

Zur Sache. Die Physiker haben Modelle für Halbleiterbauelemente entwickelt. Danach beginnt der Stromfluß beim pn-Übergang, wenn die Ladungsträger von außen genügend Energie erhalten haben. Das hebt sie aus ihrer Ruhelage auf ein „Band“, auf dem sie sich frei bewegen können. Der Abstand zwischen Ruhelage und diesem Band entspricht der Schwellenspannung. Ist sie erreicht, können sehr viele Ladungsträger zum Stromfluß beitragen. Mit nur wenig mehr Spannung bewegt man praktisch alle. Das ist der *Sättigungsstrom*. Dabei entsteht jedoch schon so viel

Leistung, daß das Bauelement (also z. B. die Leuchtdiode) zerstört wird. Und das bei einer Spannung, die nur wenig über dem Schwellenwert liegt. Das erklärt, wozu der Vorwiderstand gebraucht wird.

Nicht nur Spannung, auch Wärmeenergie ist den Elektronen zur Bewegung recht. Daher verringert sich die Schwelle mit wachsender Temperatur.

41

Wir schalten eine rote und eine grüne Leuchtdiode in Reihe und vergleichen die Helligkeit (Bild 66). Jetzt fließt durch beide Dioden der gleiche Strom. Dennoch müssen sie nicht gleichhell leuchten. Je nach Typ und Exemplar gibt es Unterschiede. Hinzu kommt, daß unsere Augen für rotes Licht weniger empfindlich sind als für gelbes oder grünes.

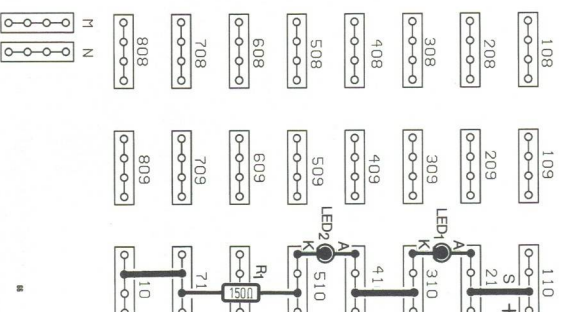
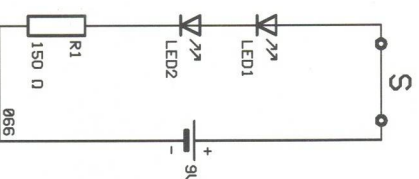


Bild 66.

Trotz gleicher Stromstärke unterschiedliche Helligkeit: Das Auge ist für Grün empfindlicher als für Rot, aber „superehrliche“ rote Leuchtdioden machen das bei Bedarf weit.

42

Wir benutzen die Schaltung nach Bild 66 künftig als Diodenprüfgerät. Unbekannte Diode einfach statt der grünen oder roten LED einstecken. Ist sie o. k. und stimmt die Polung, leuchtet die verbliebene LED.

Hilfe von außen

Die Schwellenspannung für einen bestimmten Strom ist kein fester Wert. Später, beim Transistor, läßt sich das wir-

kungsvoll zeigen. Hier nur ein Gedankenversuch: Wir kühlen in der Parallelschaltung nach Bild 61 die rote LED mit Eis und erwärmen die grüne vorsichtig (z. B. mit einem Fön). Im Ergebnis wird die rote weniger und die grüne mehr leuchten. Denn: Die Abkühlung hat die Schwellenspannung der roten LED erhöht, die Erwärmung die der grünen gesenkt. Bei höherer Temperatur braucht man also weniger Spannung zum Leuchten. Oft ist solche „Hilfe“ allerdings unerwünscht.

Die dritte Dimension

Wir haben (Leucht-)Dioden in Reihe geschaltet und zueinander parallel wie antiparallel gelegt. Jedemal ergab sich ein interessanter Effekt. Aber das Gegenänderschalten von zwei Dioden stellt alles in den Schatten. Allerdings erst, wenn das auf einem einzigen Kristall stattfindet: pn in Reihe zu np. Oder np in Reihe zu pn. Und nur unter bestimmten Bedingungen. Das ist das aufregende Thema des folgenden Abschnittes.

8. Der Transistor

Betrachten wir die linke Seite von Bild 67: Als Schaltung ist das eine Kombination von zwei Dioden mit je einem pn-Übergang. Bei angelegter Spannung kann Strom von B nach E fließen oder von B nach C – wieder in „technischer Stromrichtung“ gesehen.

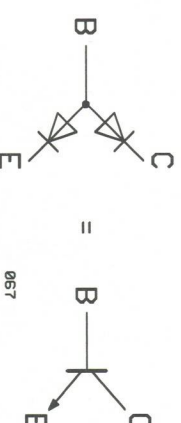


Bild 67.

Der npn-Transistor: Auf den ersten Blick „nur“ eine Kombination aus zwei Dioden (links). Doch das Schaltsymbol (wahlweise mit Kreis) deutet auf mehr (rechts).

Die Bezeichnungen E, B und C haben wir nicht zufällig gewählt. Die beiden Dioden befinden sich nämlich auf dem gleichen Siliziumkristall. Der p-Bereich ist beiden gemeinsam und ziemlich schmal. Dieser Bereich wird Basis genannt. Der untere Anschluß heißt Emitter, der obere Kollektor. Das Ganze ist ein *Transistor*. Die Namen sind „historisch“ bedingt. Eine solche npn-Anordnung leistet Erstaunliches. Die Dioden sind nur ein Teil der neuen Wahrheit. Darum auch das neue Schaltzeichen rechts in Bild 67.

43

Wir bauen die Testschaltung nach Bild 68 und prüfen damit die beiden npn-Transistoren unseres Ex-

perimentierkastens. Damit bestätigen wir Bild 67: Zwischen B und E liegt wirklich eine Diode, zwischen B und C ebenfalls.

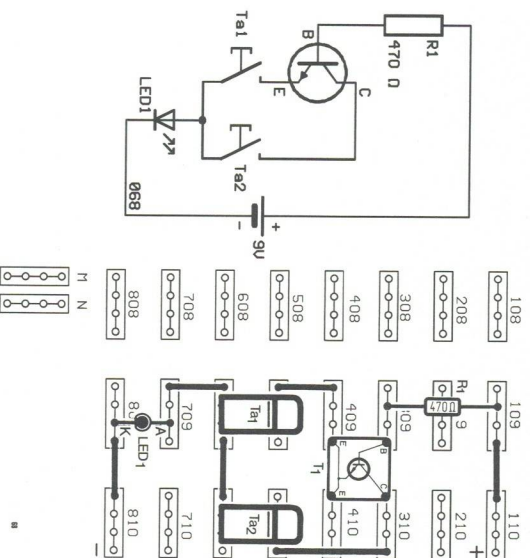


Bild 68. Transistorprüfer: LED1 leuchtet bei Tastendruck, also stimmt die Richtung der Diodenstrecken im Symbol.

Hinweis: Es gibt auch pnp-Transistoren. Das heißt, die Dioden sind umgedreht angeordnet, die Katoden statt der Anoden miteinander verbunden.

44

Mit der Schaltung nach Bild 69 machen wir den ersten Schritt in die neue Dimension. Was zeigt die Leuchtdiode? Zunächst bleibt sie dunkel – bis wir mit einem Finger die Steckfedern 609 (A) und 709 (B) überbrücken. Jetzt leuchtet sie deutlich. Mit einem leicht (!) angefeuchteten Finger läßt sich die Helligkeit noch steigern. Wir folgern: Durch einen kleinen Strom in den Basisanschluß (über den großen Hautwiderstand) haben wir einen viel größeren Strom bewirkt. Der fließt zwischen Kollektor- und Emitteranschluß.

45

Um sicher zu sein, daß es sich so verhält, wiederholen wir den Fingertest ohne Transistor (Bild 70): Höchstens bei stark befeuchteter Fingerkuppe und in dunkler Umgebung wird man ein schwaches Glimmen bemerken. Bei einer „guten“ Leuchtdiode braucht es dazu vielleicht 200 μ A, also 0,2 mA. Beim Test mit Transistor dagegen genügen etwa 5 μ A „Fingerstrom“ in die Basis für helles Leuchten. Im LED-Kreis fließen dabei fast 4 mA (Beispiel).

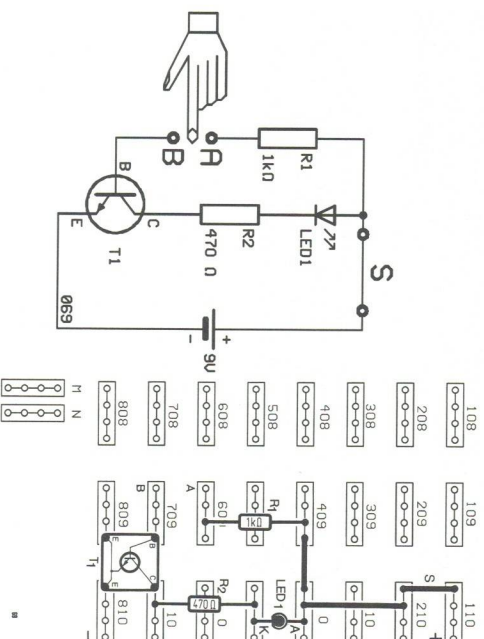


Bild 69. Sensortaste macht Verstärkerwirkung augenfällig: Durch großen Hautwiderstand nur kleiner Steuerstrom, dennoch großer LED-Strom.

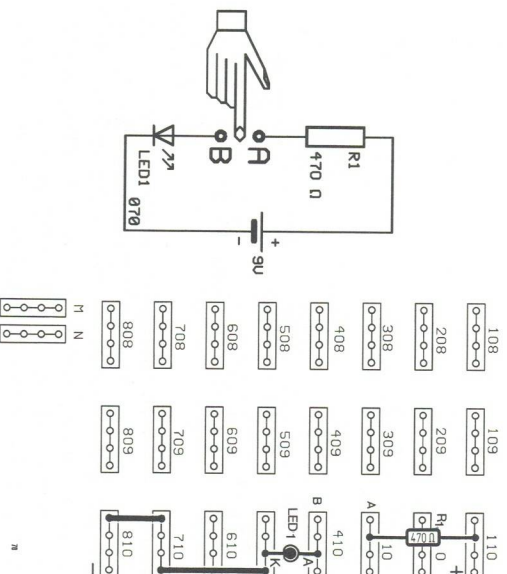


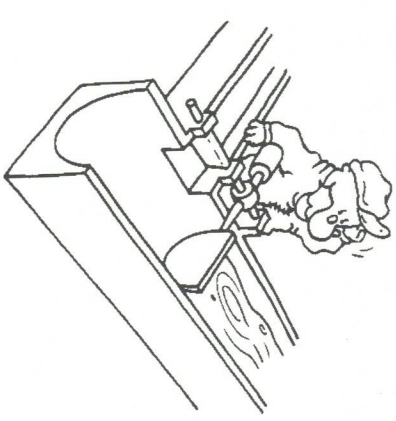
Bild 70.

Probe auf's Exempel: LED1 glimmt allenfalls ein wenig, wenn der Finger stark angefeuchtet wird. Hier verstärkt nichts!

Denkhilfen

Die enge Nachbarschaft der beiden n-Bereiche auf dem Transistorkristall wirkt also Wunder. Ein kleiner Strom verursacht einen wesentlich größeren. Der kleine Basisstrom fließt gemeinsam mit dem großen Kollektorstrom aus dem Emitteran-

schluß heraus. Ein Wassermodell liegt nahe (Bild 71): Leitet man etwas Wasser in den engen „Basis-Stichkanal“, öffnet es die Schleuse für den großen Wasserstrom im Hauptkanal zwischen Kollektor und Emitter. Je mehr Wasser im Basiskanal, um so weiter wird die Steuerklappe geöffnet – der Kollektorstrom läßt sich beliebig dosieren!



Hauptreisklappe geschlossen – kein Strom



Bild 71. Transistor als gesteuerte Schleuse.

Die Bildfolge 72 arbeitet wieder mit dem Plättchenmodell. Bereits ohne angelegte Spannung bewirkt die Diffusion in den Grenzbereichen Verarmungszonen. Die n-Grenzsichten nehmen positive, die p-Grenzsichten negative Ladung an. Spannung an der Basis-Emitter-Diode in Durchlaßrichtung baut die Verarmungszone in diesem Bereich ab. Der Bereich wird mit Ladungsträgern überschwemmt. Da die p-Schicht sehr dünn ist, erreichen Elektronen auch die Verarmungszo-

ne auf der Kollektorseite. Dort liegt eine positive Spannung an. Dadurch ergibt sich ein gegenüber dem Basisstrom großer Kollektorstrom.

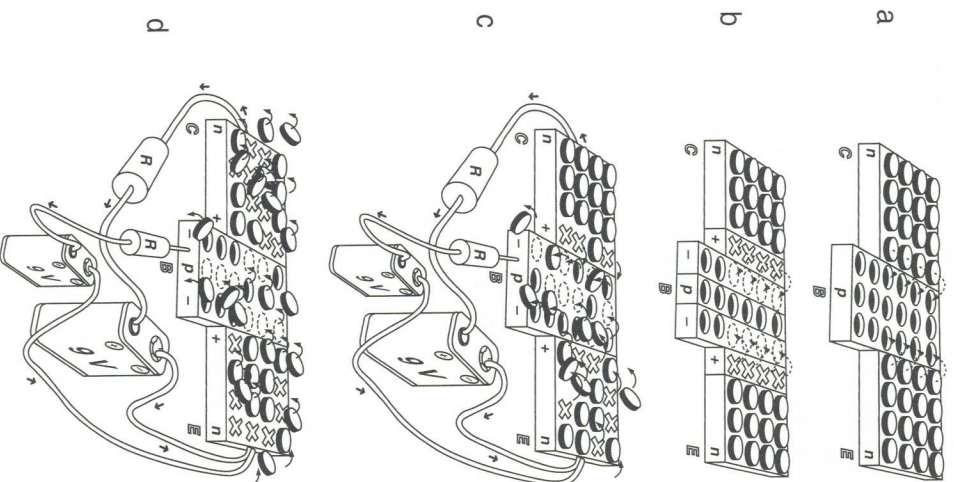


Bild 72. Transistor als Plättchenmodell:

- Plättchen (Elektronen) diffundieren von beiden n-Bereichen in den „lochleitenden“ p-Bereich.
- Die entstehenden Verarmungszonen reichen weit in die Basis hinein. Ergebnis: positive Ladung der n-, negative der p-Grenzschichten).
- Zwischen Basis- und Emitterschluß wird eine Spannung angelegt, die die Verarmungszone zwischen beiden ab baut und sie mit Ladungssträgern überschwemmt.

d Da die Basisseicht sehr dünn ist, gelangen auch Elektronen in die Kollektor-Verarmungszone. Dadurch läßt die zwischen Kollektor und Emittor angelegte Spannung einen großen Strom fließen.

Emitterschaltung

Unsere Fingerkuppe ist auf Dauer natürlich kein sinnvolles Bauelement. Der Versuch nach Bild 69 zeigt jedoch, wie bestimmte Sensor-Eingaben an Geräten funktionieren. Ersetzen wir nun den schwankenden Hautwiderstand von einigen hundert Kiloohm durch einen soliden Festwiderstand!

46

Gemäß Bild 73 werden statt der Sensorstrecke eine Taste und ein Widerstand eingefügt. Schließlich ist die B-E-Strecke eine sensible Diode, die einen Schutzwiderstand braucht. Wir stellen fest: Trotz des hohen Widerstandswertes sendet die Leuchtdiode bei Druck auf die Taste ziemlich helles Licht aus.

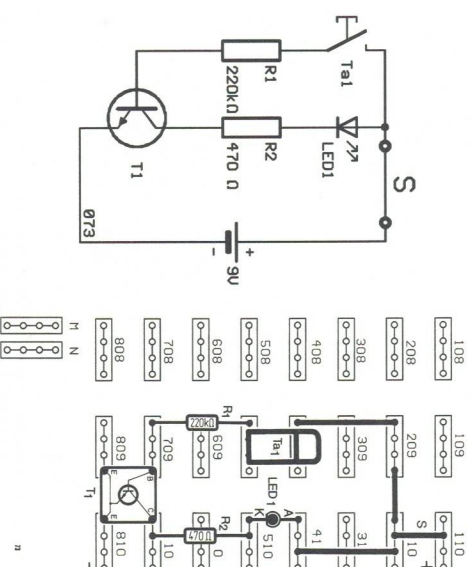


Bild 73. Kleine Ursache (Basisstrom) – Große Wirkung (Kollektorstrom)!

In diesen Versuchen erkennen wir immer zwei Kreise: den *Steuerkreis* auf der Basisseite und den *Lastkreis* (wo die Wirkungen auftreten) auf der Kollektorseite. Beiden gemeinsam ist der Emittor, der Transistor arbeitet in *Emitterschaltung*. Oder, da die „Folgen“ am Kollektor auftreten, als *Kollektorfölger*.

Und wieder eine Schwelle

Wie groß ist in Bild 73 eigentlich der Basisstrom I_B ? Grob gerechnet ergibt er sich aus $I_B = U_B/R_1$. (U_B ist die Batteriespannung.) Ganz stimmt das nicht, denn die B-E-Strecke hat als Diode ebenfalls eine Schwellenspannung.

47

Wir bauen die Testschaltung nach Bild 74 auf. Durch den Trick mit der grünen LED2 verschaffen wir uns eine relativ stabile Spannung von etwa 2 V. Das gilt, solange der Potischleifer zu höchstens 3/4 aufgedreht wird. Wir beginnen am unteren Anschluß und beobachten LED1. Wir bemerken: Bei etwa 1/3 des Stellbereiches beginnt LED1 (zunächst schwach) zu leuchten. Jetzt nur noch vorsichtig weiterdrehen, denn das Leuchten wird rasch stärker.

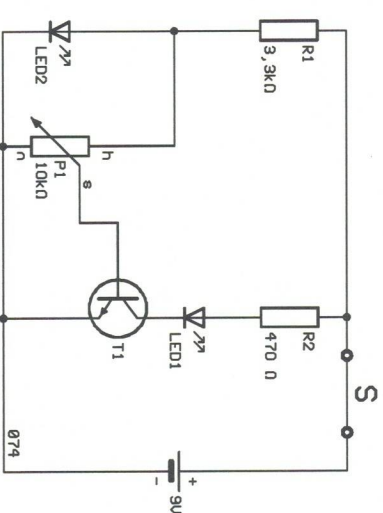


Bild 74.

Schwellenwirkung: Basisstrom und damit Kollektorstrom setzen bei bestimmter Steilung von P1 ziemlich plötzlich ein.

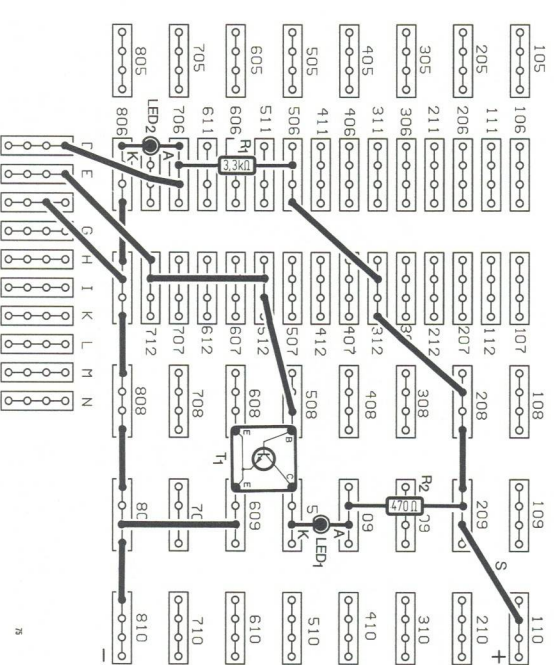


Bild 75. Aufbau zu Bild 74.

Wir folgern: Die Schwellenspannung unserer Basis-Emitter-Diode beträgt knapp $1/3$ von der (grünen) LED2. Mit einem Voltmeter würde man feststellen, daß das Leuchten ab etwa 0,55 V beginnt. Schon ab 0,7 V wird LED2 kaum noch heller. Der Transistor hat dann nämlich so ziemlich alle seine freien Elektronen auf die Reise geschickt. Man spricht von *Sättigung*. Unter diesen Bedingungen mißt man zwischen Kollektor und Emitter nur noch eine kleine Spannung im Millivoltbereich. Der Transistor ist jetzt „durchgeschaltet“.

Verstärker oder Schalter?

Solange sich die Höhe des Kollektorstromes noch nach dem Basisstrom richtet, also unterhalb der Sättigung, ist der Transistor ein ausgezeichnete Verstärker. Seine *Stromverstärkung* B in Emittererschaltung errechnet sich aus $B = I_C/I_B$. Zwischen etwa 400 und 800 liegen die Stromverstärkungswerte bei dem von uns verwendeten Transistortyp. Der Höchststrom im Kollektorkreis kann aber nur so groß werden, wie es U_B und die Bauelemente in diesem Kreis zulassen. Beispiel: $U_B = 9\text{ V}$, $U_F = 2\text{ V}$ (grüne oder gelbe Leuchtdiode), $R = 470\ \Omega$. Der Höchststrom ergibt sich dann (Transistor-Sättigungsspannung vernachlässigt) zu: $I_{\max} = (U_B - U_F)/R \approx 15\text{ mA}$.

Der Strom von 15 mA erfordert bei $B = 400$ einen Basisstrom von ca. $40\ \mu\text{A}$. Speist man ein Mehrfaches davon ein, wird der Transistor, wie erwähnt, gesättigt, voll „durchgeschaltet“. In dieser Form werden Transistoren häufig eingesetzt und miteinander verknüpft. Sie sind durchaus keine idealen Schalter. Dafür ist der Schaltvorgang mit wenig „Kraft“ verbunden. Ein kleiner Strom genügt. Und der kann sogar über weite Strecken herangeführt werden. Transistor-Schalter lassen sich also auch *fernsteuern*.

Aus Ja wird Nein

Eine Emitterstufe hat ihren eigenen Kopf. Das zeigt das folgende Experiment. Beteiligt sind ein „echter“ und ein Transistor-Schalter.

48

Sobald die Batterie an die Schaltung nach Bild 76 angeschlossen wird, leuchtet LED2. Das heißt: Ja – der Transistor ist durchgeschaltet. Ta1 ist jedoch offen („Nein – Ta1 ist *nicht* durchgeschaltet“). Jetzt drücken wir die Taste. LED1 leuchtet und zeigt an, daß Ta1 geschlossen ist („Ja“). Dafür leuchtet LED2 nicht mehr. Der Transistorschalter ist offen („Nein“).

Wir folgern: Am Ausgang einer Emittererschaltung tritt immer das Umgekehrte zu dem ein, was am Eingang passiert. Letzterer haben dafür den Namen *Inverter* erfunden. Was geschieht nun, wenn an den Ausgang eines solchen Inverters der Eingang eines zweiten angeschlossen wird?

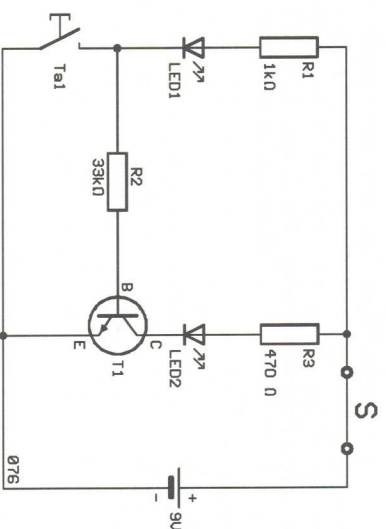


Bild 76. Emittererschaltung („Kollektorfolger“) – ein Widerstandsgeist: Schalter am Eingang geschlossen („Ja“) – Transistoraufplurkreis gesperrt

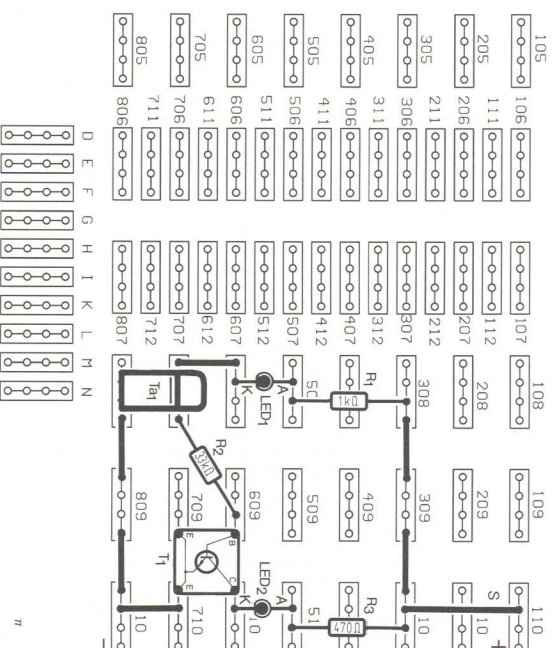


Bild 77. Aufbau zu Bild 76.

49

Wir verändern und erweitern unseren Inverter gemäß Bild 78 und stellen fest: LED1 und LED2 bleiben dunkel! Jetzt drücken wir Ta1 und – beide Leuchtdioden werden hell! Ein großer Aufwand für „2 × Nein = Ja“? In später folgenden Schaltungen werden wir sehen, wie nützlich das sein kann.

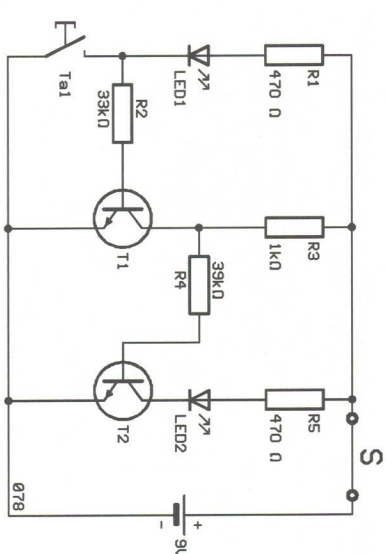


Bild 78. 2 × Nein = Ja: Druck auf Ta1 läßt Strom durch LED1 fließen. Gleichzeitig fließt auch Strom durch LED2.

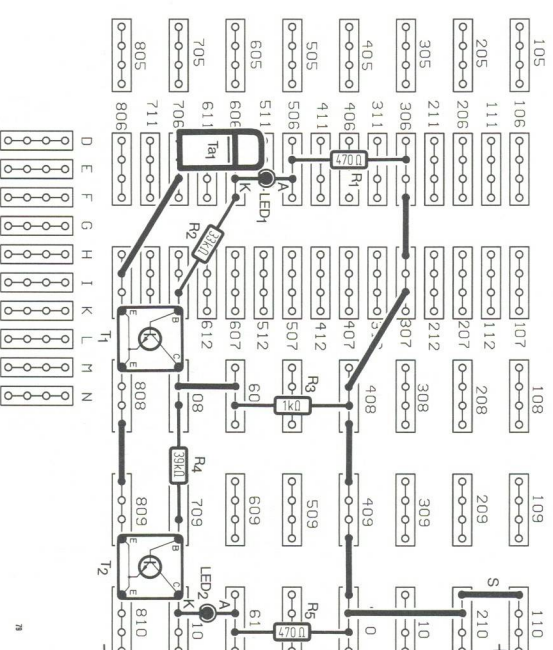


Bild 79. Aufbau zu Bild 78.

Kollektorschaltung

Vermeht um den kleinen Basisstrom, kommt der Kollektorstrom zum Emitter wieder heraus. Also können wir wohl auch hier unsere „Last“ (LED plus R) anschließen!

50

Wir stecken die Schaltung nach Bild 80 zusammen und bemerken: LED2 bleibt dunkel, solange Ta1 offen ist. Ebenso auch LED1. Drücken wir Ta1, leuchten beide auf.

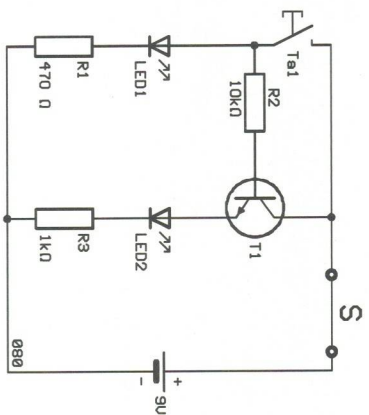
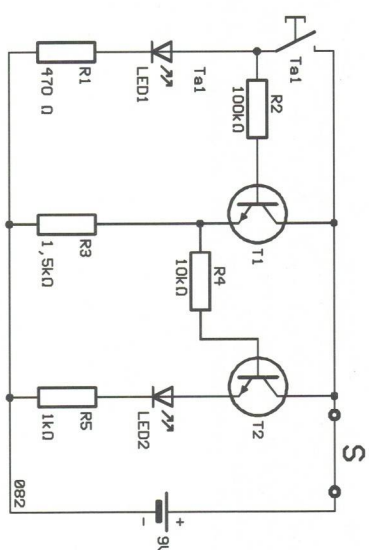


Bild 80. Kollektorschaltung („Emitterfolger“) – denkt positiv, Ausgang folgt Eingang. Geschlossene Ta1 (LED1 leuchtet) läßt auch LED2 leuchten (Transistor durchgeschaltet).



82. $2 \times \text{Ja} = \text{Ja}$: Zwei Emitterfolger hintereinander bleiben bei der Wahrheit.

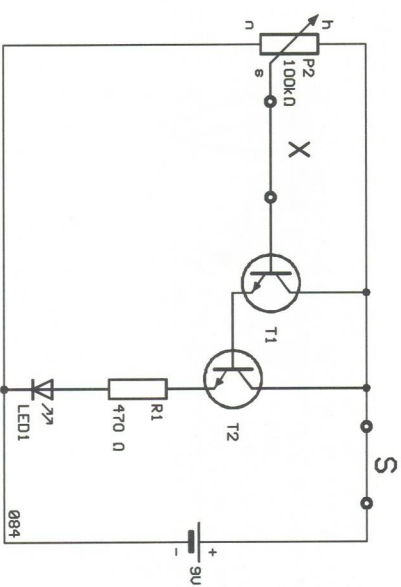


Bild 84. Darlington-Schaltung – ein empfindlicher Sensor. Braucht zwar viel Steuerspannung (P2 hochdrehen) doch wenig Steuerstrom. LED1 leuchtet selbst bei trockener Fingerkuppe statt Brücke X.

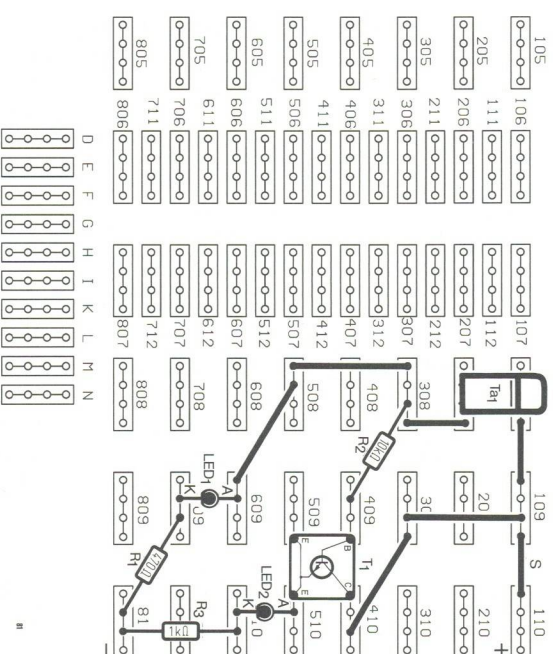


Bild 81. Aufbau zu Bild 80.

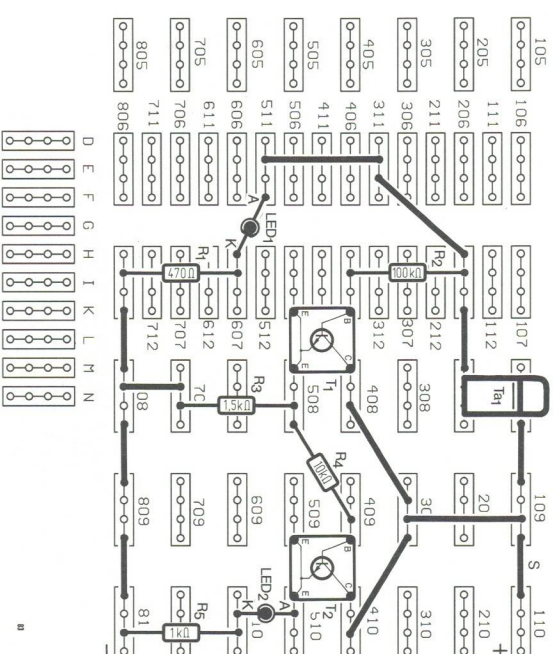


Bild 83. Aufbau zu Bild 82.

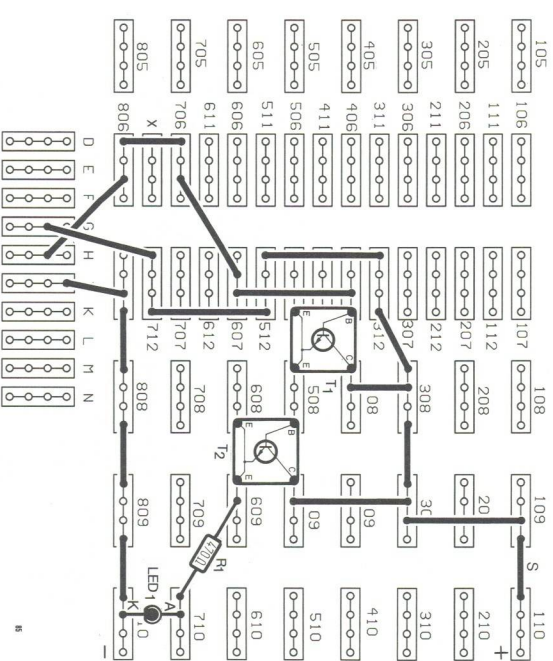


Bild 85. Aufbau zu Bild 84.

Zum Verständnis: Beide Male liegt die Taste zwischen Basis und dem für Ein- und Ausgangskreis gemeinsamen Transistoranschluß. Die Schaltung nach Bild 80, auch *Emitterfolger* genannt, folgt jedoch brav dem „Ja“ am Eingang mit einem „Ja“ am Ausgang.

51

Zur Bestätigung schalten wir auch hier einen zweiten Emitterfolger dahinter (Bild 82). Nichts ändert sich: Ja bleibt Ja. Beide Leuchtdioden werden hell, wenn wir Ta1 betätigen.

B · B – die Stromlawine

Wir gehen einer weiteren interessanten Eigenschaft von zwei hintereinandergeschalteten Emitterfolgern nach:

52

Dazu untersuchen wir die Schaltung nach Bild 84. Der Potischleifer wird langsam von unten nach oben gedreht. Wir beobachten die Leuchtdiode und erkennen: Für helles Leuchten muß der Schleifer ziemlich weit oben stehen. Braucht die Schaltung also viel Steuerstrom? Das mag der nächste Versuch entscheiden.

53

Wir entfernen die Brücke X und setzen dafür eine trockene(!) Fingerkuppe ein. Wir stellen erstaunt fest: Schon eine leichte Berührung beider Kontaktflächen läßt die LED hell leuchten! Das funktioniert sogar, wenn jeweils eine Hand eine der Flächen berührt.

Wir betrachten nun die Schaltung näher und erkennen: Auf der Steuerseite muß jetzt zum einen gleich die doppelte Ba-

sis-Emitter-Schwellenspannung überwunden werden. Hinzu kommt „hinter“ dem zweiten Emitter noch die Flußspannung der Leuchtdiode. Und sobald ein Strom zu fließen beginnt, entsteht über dem Widerstand im Emittierkreis ebenfalls eine Spannung – alles zusammen eine ganze Menge.

Das war die schlechte Nachricht. Die gute lautet: Ein Ausgangsstrom von beispielsweise 10 mA erfordert in einer solchen Schaltung zunächst für T2 einen Basisstrom von 10 mA, heran und sagen $B = 100$. Dann braucht T2 100 μA . Mehr muß T1 nicht liefern. Hat er ebenfalls ein B von 100, braucht die gesamte Schaltung den lächerlichen Eingangsstrom von 1 μA . Folgerung: Diese Transistorkombination (sie trägt den Namen *Darlington-Schaltung*) verhält sich wie ein einziger Transistor mit der Stromverstärkung $B1 \cdot B2$. Man kann sie auch mit Last im Kollektorkreis einsetzen.

Emitterfolger als „Zeitlicht“

Bereits in Abschnitt 6 haben wir einen Transistor eingesetzt, um Vorgänge in Kondensatoren besser sichtbar zu machen. Der kleine Basisstrom entlädt einen Kondensator recht langsam. Nun ist die Entladekurve, wie festgestellt, eine Exponentialfunktion. Insider wissen, da geht's am Ende ziemlich träge zu. Besser, man benutzt diesen Bereich nicht. Da kommt uns der Emitterfolger entgegen.

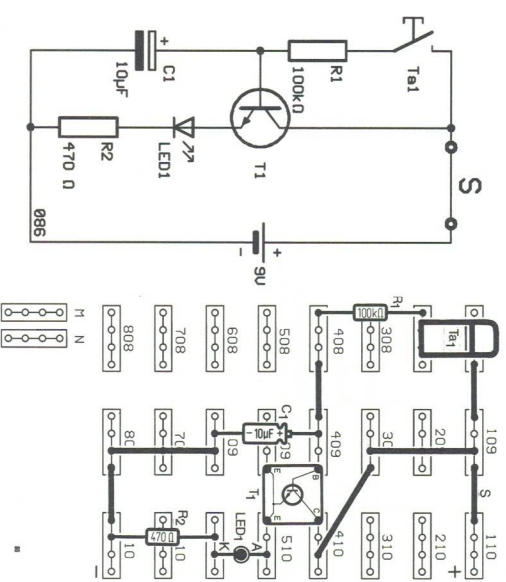


Bild 86. Kondensator als „Batterie auf Zeit“. Bei Druck auf Ta1 lädt sich C1 über R1 auf – LED1 beginnt zu leuchten. Nach Loslassen der Taste sorgt C1 noch eine Weile für Basisstrom und damit für Licht.

54

Wir stecken die Schaltung nach Bild 86 zusammen und drücken die Taste. Zunächst geschieht eine kleine Weile nichts. Dann beginnt die LED zu leuchten. Nun lassen wir die Taste los und – die LED leuchtet weiter. Mit langsam abnehmender Helligkeit.

Über die gedrückte Taste haben wir den Kondensator von der Batterie her aufgeladen. Er ist damit selbst zur „Batterie auf Zeit“ geworden. Seine durch den Basisstrom langsam abnehmende Spannung hält den Transistor eine Weile „durchgeschaltet“. Die LED verlischt, wenn die Kondensatorspannung etwa auf die Summe von Flußspannung der LED und Schwellenspannung des Transistors gesunken ist.

55

Wir wiederholen den Versuch mit größeren Kondensatoren. Die Lade- wie die Entladezeiten werden entsprechend größer. Wir verringern darum R1 auf 100 Ω . Der Taster muß nur noch kurz gedrückt werden. U_C erreicht praktisch U_B.

Schwelle mit Gefühl

Schwellenspannungen sind temperaturabhängig. Das haben wir schon in Abschnitt 7 gelernt. Wir wollen uns nun mit Folgen daraus und Maßnahmen dagegen beschäftigen.

56

Wir greifen auf die Schaltung nach Bild 74 zurück und gehen in eine dunkle Ecke. Dort stellen wir das Poti so ein, daß die LED gerade noch nicht erkennbar leuchtet. Nun erwärmen wir den Transistor vorsichtig mit einem Fön. Wir sehen, wie die Leuchtdiode langsam aufleuchtet, solange Wärme zugeführt wird. Danach geht sie langsam wieder aus. Man kann das vorsichtig mit einer kalten Zange o. ä. beschleunigen.

Erklärung: Bei Siliziumtransistoren sinkt die Schwellenspannung um jeweils etwa 2 mV, wenn die Temperatur um 1 °C steigt. Bei Erwärmung von 20 °C auf 70 °C braucht der Transistor für gleichen Kollektorstrom also 100 mV weniger Basis-Emitter-Spannung als bei Zimmertemperatur. Was tun?

Ausgleich durch Gleiche

Auf den Chips unserer integrierten Schaltkreise funktioniert es hervorragend, aber auch mit zwei Transistoren gleichen Typs geht es recht gut: Das Ausgleichen von Temperatureffekten.

57

Wir bauen die Schaltung nach Bild 87 auf und stellen am Poti für LED2 (grün) schwaches Leuchten ein (also im ersten Drittel des Drehbereichs). Dann richten wir unseren Fön zunächst auf T1 (dabei Wärmestrom evtl. mit Pappe von T2 fernhalten): Das Leuchten nimmt ab. Nun heizen wir nur T2. LED2 wird wieder heller. Danach lassen wir

abkühlen und föhnen beide Transistoren gemeinsam – die Helligkeit ändert sich kaum noch!

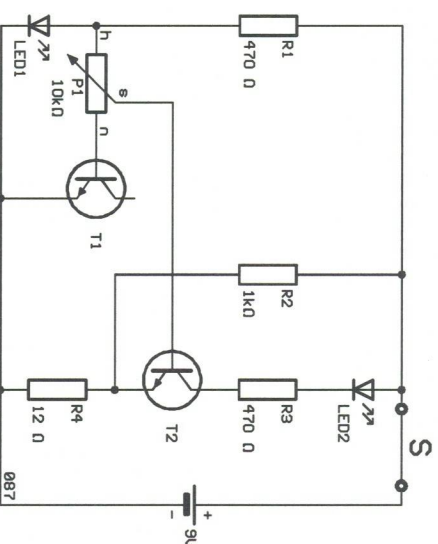


Bild 87.

Wärmewirkungen: Poti auf schwaches Leuchten von LED2 stellen, dann T2 mit Warmluft anblasen: Licht wird heller. Warmluft nun nur auf T1: Leuchten wird schwächer. Warmluft auf beide Transistoren: kaum noch Wirkung.

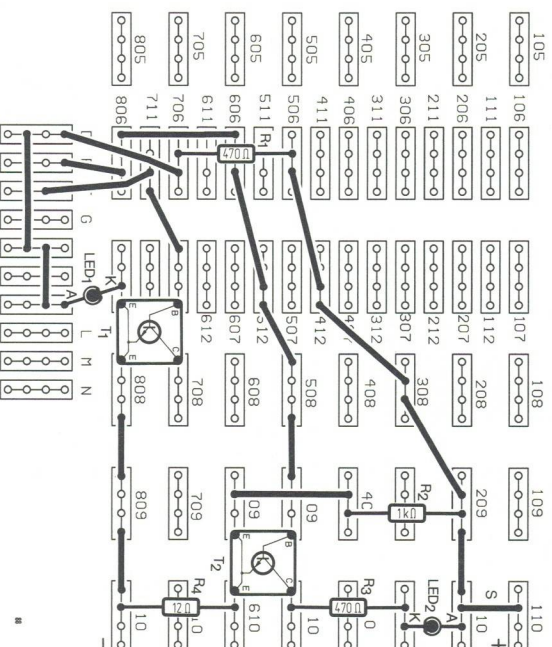


Bild 88. Aufbau zu Bild 87.

Erklärung: Beim Erwärmen von T1 sinkt die B-E-Spannung von T1 und damit die für T2 eingestellte Spannung unter den Schwellwert. Erwärmt man dagegen T2, führt die eingestellte Spannung zu einem höheren Kollektorstrom. Werden beide gleichzeitig aufgeheizt, heben sich die Wirkungen der Änderungen auf den Kollektorstrom von T2 auf. So etwas nennt man *Temperatur-Kompensation*.

9. Zu zweit kein Problem: Transistoren schalten

Wo einer sich schwer tut, geht's viel besser im Team. Beim Schalten sind Übergänge unerwünscht. Ein Transistor, der nur „halb zu“ ist, setzt Leistung um, wird warm. Diese Leistung geht für den gewünschten Zweck verloren. Zusammenarbeit vermeidet solche Übergänge. Wir lernen jetzt Transistor-„Paarungen“ mit interessanten Wirkungen kennen. Sie sind auch wichtige Grundbausteine der Computer. Dazu zurück zu Bild 78 („2 x Nein = Ja“).

58

In Bild 89 ist, anders als in Bild 78, der Kollektor von T2 mit dem oberen Anschluß von Ta1 verbunden. Wir stellen fest: Es passiert erst einmal nichts. Nun drücken wir Ta1. Erwartungsgemäß leuchten beide Dioden. Lassen wir Ta1 wieder los: Die Dioden leuchten weiter! Erst Druck auf Ta2 hilft. Dadurch leiten wir kurzzeitig den Basisstrom für T2 an diesen vorbei und nach Minus ab. Jetzt erst verflöschen beide Leuchtdioden.

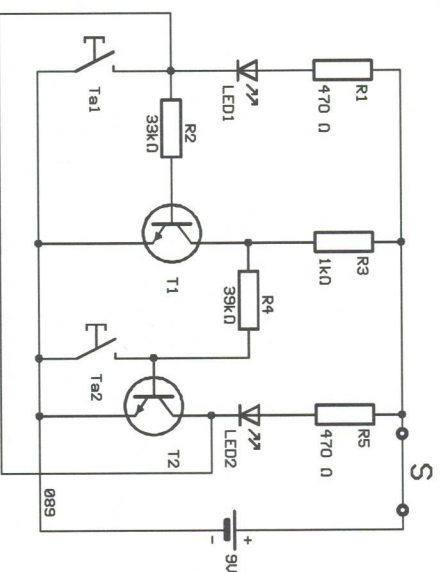


Bild 89. „2 x Nein = Ja“ mit Rückführung ergibt zwei stabile Zustände.

Wir folgern: Bildet man aus zwei Invertiern durch eine Rückführung vom Ausgang auf den Eingang einen „Ring“, entsteht eine Schaltung mit zwei stabilen Zuständen. Wir wollen sie nun diesem Zweck besser anpassen:

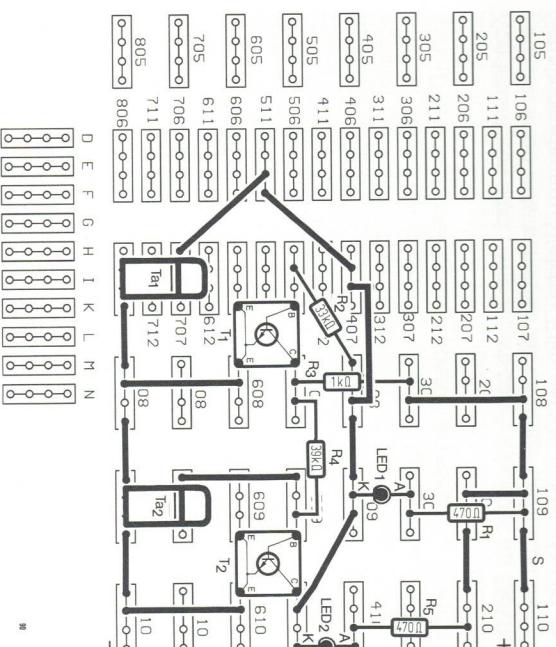


Bild 90. Aufbau zu Bild 89.

Stabile Zweideutigkeit: Statisches Flipflop

Namen hat diese Schaltung viele: vom sinnfälligen *Flipflop* (man hört es richtig „knipsen“) bis zum seriösen *bistabilen Multivibrator* oder der *bistabilen Kippstufe*. Die Schaltung speichert den Zustand, den man ihr eingibt: ein Transistor leitet, der andere sperrt. Bis man die Sache in die andere Lage kippt. Auch die bleibt wieder stabil. Das kleinste Gedächtnis der Welt.

59

Wir bauen uns nach Bild 91 eine solche Speicherzelle. Die Leuchtdioden sind die Zustandsanzeigen. Wir stellen fest: Bei Anschluß der Batterie leuchtet LED2. LED1 ist dunkel. Druck auf Ta1 ändert daran nichts. Ein kurzer Druck auf Ta2 jedoch kehrt die Verhältnisse um. Dabei bleibt es, bis wir auf Ta1 tippen. Das führt in den Ursprungszustand zurück.

Bild 91 zeigt uns: T1 und T2 sind nicht chancengleich, selbst bei absolut gleichen Daten. R2 hat einen kleineren Wert als R3. Beim Anschalten der Batterie erhält T2 den höheren Basisstrom. Seine Kollektorspannung ist darum kleiner als die von T1. Daher erhält T1 noch weniger Basisstrom, und seine Kollektorspannung steigt. Am Ende des Einschaltvorganges ist T2 praktisch nach Minus durchgeschaltet (U_{CE} unter 0,3 V). Dafür ist T1 „total zu“. All das läuft blitzschnell ab. Nur auf dem Papier kann man „Zeitupe“ spielen – eine gute Art zum Verstehen von Schaltungsfunktionen!

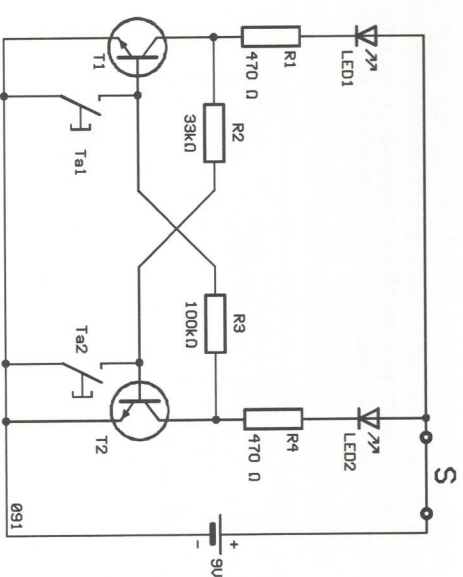


Bild 91. Statisches Flipflop, Hinzelle von Computern.

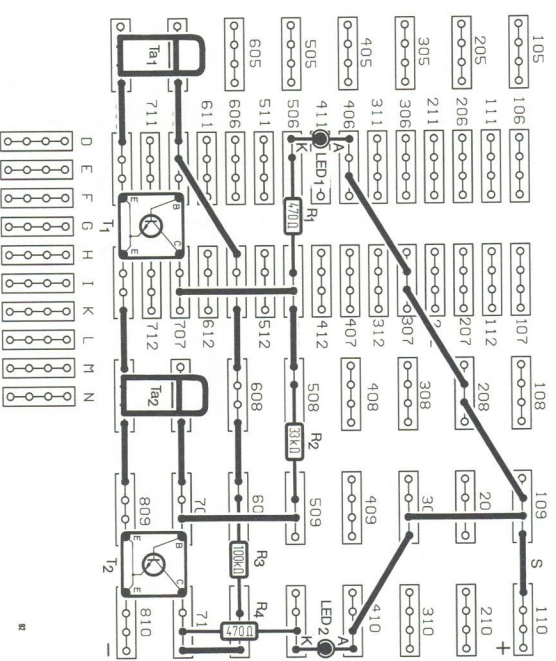


Bild 92. Aufbau zu Bild 91.

Flipflop als Single

Auf den Chips unserer Computer sind viele Zehntausend Flipflop-Zellen miteinander verknüpft. Aber auch solo ist das „FF“ ein starker Typ. Da kommt es auf Details an.

60 Wir tauschen in Bild 91 $R2$ und $R3$ gegeneinander aus. Es zeigt sich: Beim Anschalten der Batterie leuchtet jetzt LED1. Die Werte dieser Widerstände bestimmen also tatsächlich die Einschaltlage unseres Flipflop. Durch den kleinen Wertetrick wird das FF zu einem zuverlässigen Partner. Beispielsweise in Alarmanlagen.

61 Wir ergänzen die Schaltung nach Bild 91 durch das Verstärkermodul aus unserem Experimentierkasten. Es wird wieder beschaltet wie bei der Geisterbeschwörung. Das ergibt einen Tongenerator. In Ruhelage leuchtet LED2. Einschaltet wird das Modul diesmal aber mit T1 (Bild 93). Dazu schließen wir es einfach statt LED1 an das Flipflop an. $R4$ begrenzt den Strom. Dadurch bleibt die Kollektorspannung U_{CE} über T1 klein, wenn dieser durchgeschaltet ist.

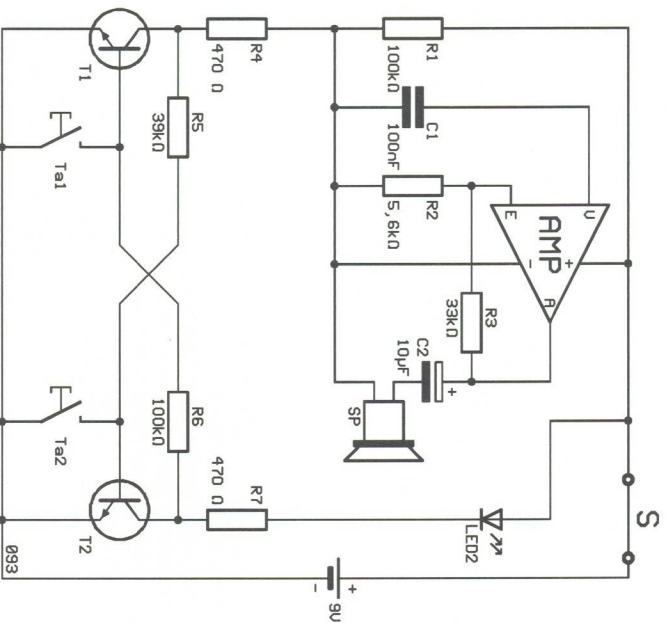


Bild 93. Flipflop als Einzelkämpfer: Nach Auslösung über Ta2 Daueralarm. Rücksetzen (Löschen) nur mit Ta1.

Wir stellen fest: Der Lautsprecher ist stumm. Bei Druck auf Ta2 gibt's Alarm. Der Alarmton dauert an, auch nach Loslassen von Ta2. Das FF hat sich also „gemerkt“, daß da was war. Rücksetzen in die Ruhelage ist nur mit Ta1 möglich. Anwendung: Statt Ta2 wird in der Praxis z. B. ein magnetisch betätigter Schalter (*Reed-Relais*) an einem Türrahmen montiert. Der Schalmagnet wird so am Türflügel angebracht, daß

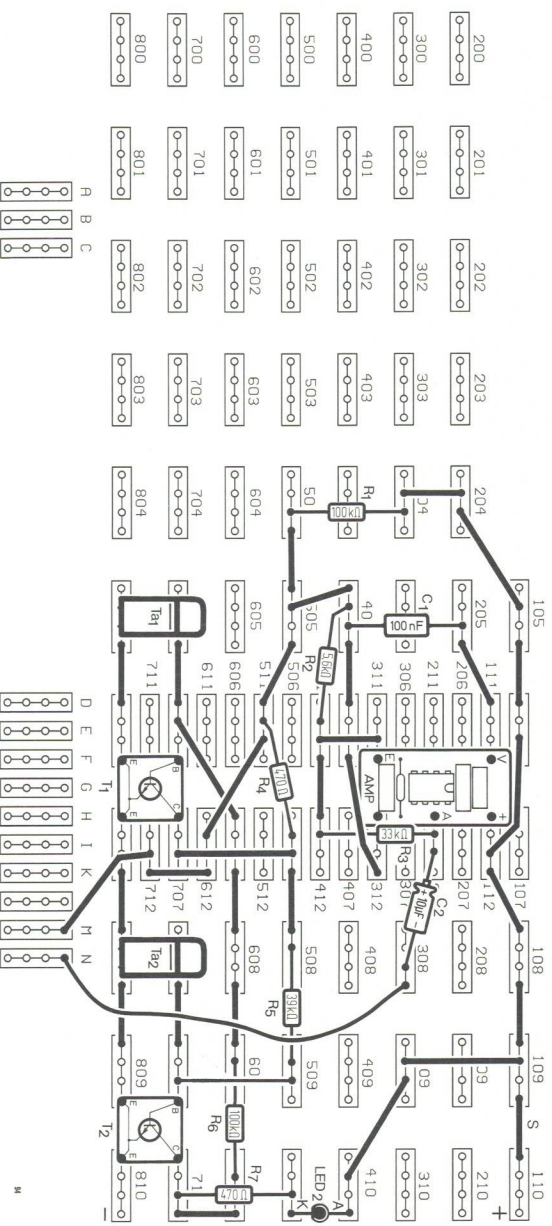


Bild 94. Aufbau zu Bild 93.

er beim Öffnen „im Vorübergleiten – mal eben“ den Kontakt schließt. Das genügt für Dauer-Lärm. Einbrecher scheuen so etwas. Der Fall für Zwei ist erledigt.

Einer für Zwei: Dynamisches Flipflop

Sogar mit nur einer Taste läßt sich ein FF hin- und herschalten. (Neudeutsch heißt das *Toggeln*). Allerdings gegen Aufpreis. Dafür steigt auch der Gebrauchswert.

62 Die Schaltung nach Bild 95 belegt unsere Steckplatte schon ziemlich dicht. Je zwei Widerstände, Dioden und Elkos kommen gegenüber Bild 91 hinzu. Also beim Montieren auf die Richtung achten (bei den Elkos umlaufende Kerbe = Plus, bei den Dioden Ring = Kathode). Nach Anschluß der Batterie sehen wir: Eine LED leuchtet, die andere ist dunkel. Wir drücken Ta1 mehrmals und merken: Jeder Druck auf die Taste schaltet die gerade dunkle LED ein, während die andere verlischt. Die Taste hat sich zum Wechselschalter gemauert! Das verdanken wir den Kondensatoren. Aus der *statischen* ist eine *dynamische* Ansteuerung geworden. (Dynamisch, weil es auf Änderungen reagiert.) Wie funktioniert das?

Kondensatoren sind – wie wir wissen – Speicher für Elektroden. Mit ihren unterschiedlichen Ladungen läßt sich unsere Schaltung steuern. Welcher Elko gerade aufgeladen ist, bestimmen die Zustände der Transistoren (auf oder zu). Leuchtet LED1, ist T1 gerade durchgeschaltet. C1 läßt sich auf. Der Ladestrom fließt (technische Stromrichtung) von Plus Batterie über LED2, $R5$, $R6$ zur Plusseite von C1. Per „Fernwirkung“

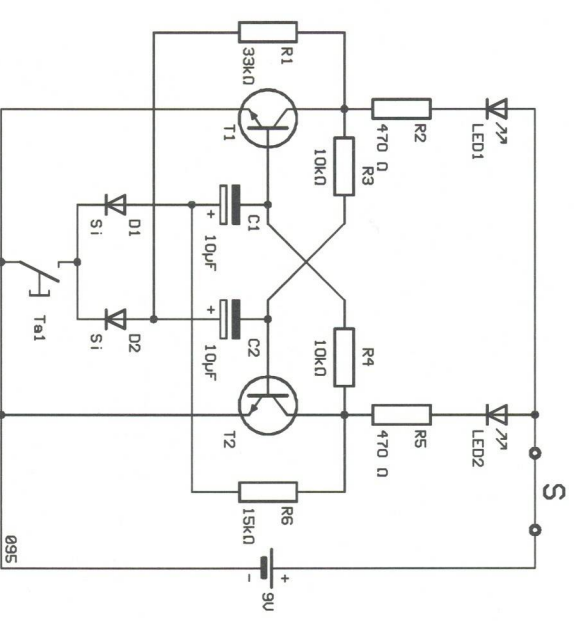


Bild 95. „Flüchtige“ Steuerung: dynamisches Flipflop – eine Taste genügt!

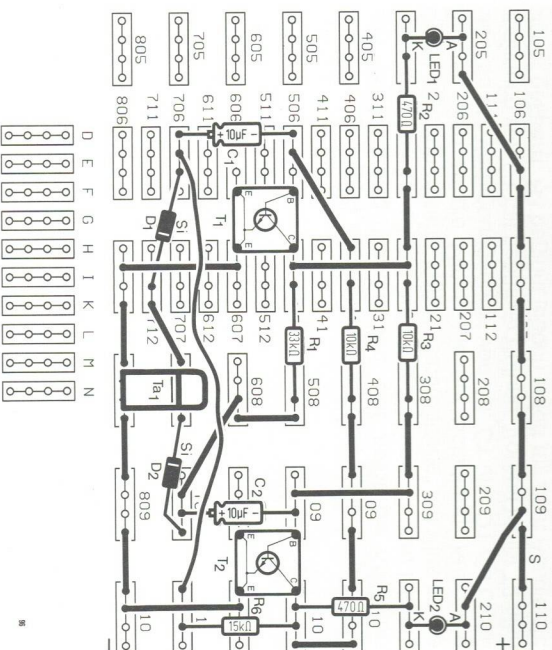


Bild 96. Aufbau zu Bild 95.

über die Isolierschicht von $C1$ gelangt er als Steuerstrom in die Basis-Emitterstrecke von $T1$. Parallel dazu kommt ein Basisstrom über $R4$ zustande. Während der Ladezustand praktisch zu Null wird, wenn der Kondensator aufgeladen ist, fließt der Strom über $R4$ weiter. $T1$ bleibt also durchgeschaltet. $C2$ ist währenddessen nahezu ohne Ladung. Dafür sorgen $R1$ und $R3$. Mit einem kurzen Druck auf $Ta1$ kehrt sich alles um. Das macht die „Batterie“ $C1$. Über $Ta1$ und $D1$ wird sie mit Minus an die Basis und mit Plus an den Emitter gelegt. ($D1$ und $D2$ entkoppeln die beiden Stromkreise voneinander.) Die negative Spannung an der Basis sperrt den npn-Transistor. Der braucht ja zum Leiten positive Basisspannung. Man kann es auch so sehen: Der über $R4$ kommende Basisstrom wird von $C1$ vorübergehend „abgesaugt“.

Insider-Info 10

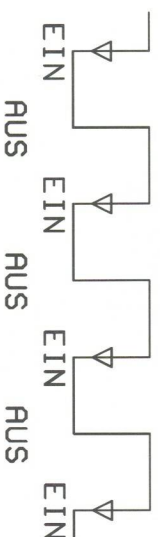
Sperrschichten halten verständlicherweise nicht unbegrenzt hohe Spannungen aus. In den Datenblättern (den „Steckbriefen“ unserer Bauelemente) findet man Angaben dazu. Leuchtdioden und die Basis-Emitterstrecken bipolarer Transistoren sollten nicht höher als mit 5 V belastet werden. Doch es kommt auch auf die verfügbare Energie an, ob „ein wenig drüber“ schon gefährlich wird. Glücklicherweise nehmen unsere Transistoren die negative Kondensatorspannung zum Sperren noch nicht übel. Dazu hat der Kondensator zu wenig Energie zu bieten.

Impuls geteilt durch Zwei

Spielen wir ein wenig mit dem Wechselschalter. Jedes zweite Mal, wenn der Taster betätigt wird, schaltet auch der Kollektor von $T2$ nach Minus. Es entsteht also ein „negativer Ausgangsimpuls“. Oder: 100 Eingangsimpulse = 50 Ausgangsimpulse. Wir haben soeben einen Frequenzteiler entdeckt. Zum Verständnis: Die Frequenz ist ein Maß für die Geschwindigkeit, mit der ein regelmäßig wiederkehrendes Ereignis auftritt. Betrachten wir ein Zahnrad in einem Getriebe. Bei einem Umlauf je Sekunde hat es genau eine Frequenz von 1 Hz (Hertz). Unterstellt es auf ein größeres mit doppelt so vielen Zähnen, dreht sich jenes erst alle 2 Sekunden einmal. Es rotiert also mit 0,5 Hz.

Die Umsetzung bei unserem dynamischen Flipflop läßt sich besser mit Bild 97 beschreiben. Betrachtet werden die von $Ta1$ stammenden Eingangsimpulse und die Reaktion am Kollektor von $T2$. Wir können diese Impulse einem zweiten Flipflop zuführen. $T2$ des ersten nimmt dann die Funktion von $Ta1$ des zweiten FF an. Ganz klar: Auch dort wird „geteilt“ – zwischen erstem Eingang und letztem Ausgang 2:1:0,5 oder 4:1! Mit drei FF schließlich kommt man auf 8:1. All das erledigen heute viel besser und auf kleinstem Raum integrierte Schaltkreise wie der 4024 in unserem Experimentierkasten. Dazu später mehr.

TASTER:



KOLLEKTOR $T2$:



Bild 97.

Impulsdiagramme der Taste und des Ausgangs von $T2$: Erst bei jedem zweiten Tastendruck reagiert die Leuchtdiode $LED2$.

Auch einzeln ist dieses Flipflop gut verwendbar. Das zeigt das folgende Experiment.

63

Wir ersetzen in Bild 95 $Ta1$ durch den Fototransistor aus unserem Experimentierkasten. Merkmitle zum Anschluß: K wie Kollektor = kürzeres Anschlußbein. Das gehört an $D1$, $D2$. In einer dunklen Ecke richten wir eine gut gebündelte Taschenlampe auf den Fototransistor und knipsen mehrmals ein und aus. Wir stellen fest: Das Flipflop läßt sich auch mit Lichtimpulsen umschalten. Licht bedeutet, daß der Fototransistor leitet (Schalter ein). Ein Röhren aus schwarzem Papier über den Fototransistor gestülpt sorgt dafür, daß der Unterschied in seiner Leitfähigkeit zwischen „Licht“ und „nicht Licht“ groß genug ist.

Dynamik anderer Art: Monostabiler Multivibrator

Die folgenden kleinen Änderungen haben große Wirkung:

64

Wir bauen unser dynamisches Flipflop geringfügig um (Bild 98). Als stabilen Zustand erkennen wir, daß $LED2$ leuchtet. Drücken wir (kurzi) $Ta2$: $LED2$ verlöscht, $LED1$ leuchtet. Nichts Neues? Abwarten! Nach einigen Sekunden klappt die Sache zurück. Nun leuchtet wieder $LED2$. Das läßt sich beliebig oft wiederholen. Ein wenig anders wird's, wenn wir $Ta2$ sehr lange drücken. Nach Loslassen der Taste leuchtet $LED1$ kaum noch eine Sekunde weiter.

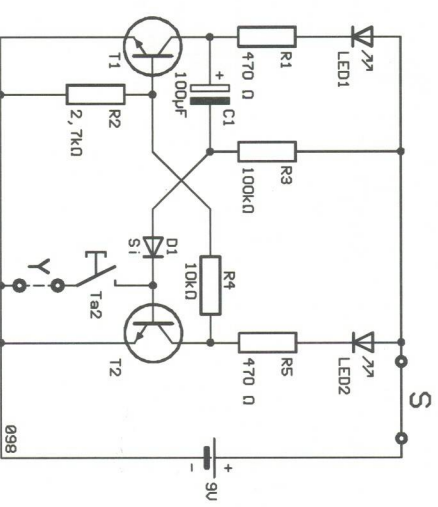


Bild 98.

Stabil mit „flüchtigem“ Zustand: Monoflop. $R3$ und $C1$ bestimmen, wie lange $LED1$ nach Tastendruck leuchtet.

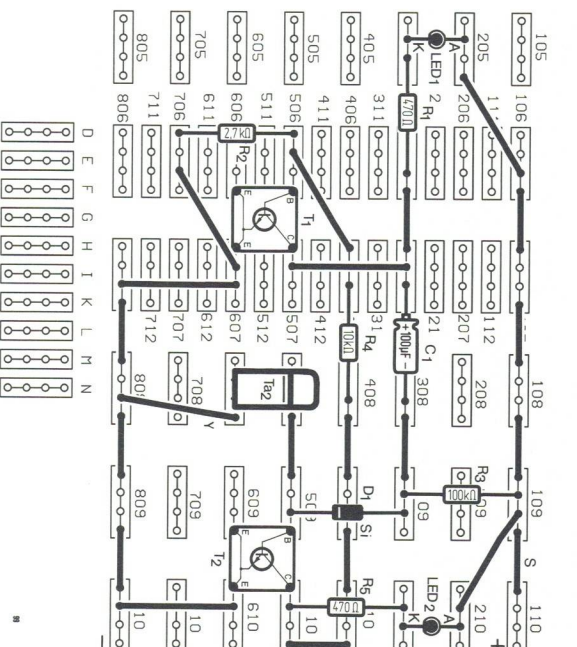


Bild 99. Aufbau zu Bild 98.

65 Wir überbrücken D1 und wiederholen den Versuch bei kurz gedrückter Taste. Jetzt ist die Leuchtzeit von LED1 wesentlich kürzer. Bleibt Ta2 zu lange gedrückt, geht LED2 fast sofort nach Loslassen wieder an.

Ordnen wir die Ergebnisse: Für die beiden Transistoren besteht von der Ansteuerung her keine Chancengleichheit. Während T2 über R3 direkt von Plus gesteuert wird, erhält die Basis von T1 erst über den Spannungsteiler R5 – R4 – R2 Strom. Beim ersten Anschalten der Batterie ist außerdem C1 noch leer. Sein Ladestrom unterstützt daher T2 beim Durchschalten.

Sobald aber T2 über R3 voll durchgeschaltet ist, bleibt für die Basis von T1 praktisch keine Spannung übrig. C1 lädt sich also in aller Ruhe auf. Seine Spannung erreicht dabei nie die der Batterie, denn in Serie liegen LED1, D1 und die B-E-Strecke von T2.

Die Ladung von C1 kommt erst ins Spiel, wenn T2 mit Hilfe von Ta2 kurzzeitig gesperrt wird. Das heißt, die Kollektorspannung von T2 wächst auf etwa 7 V und T1 wird leitend. Damit legt sich unsere „Kondensatorbatterie“ mit Plus an die Emittter, also an die Minusseite der Schaltung. Kurzzeitig steht so am Verbindungspunkt von R3, C1 und D1 die Ladespannung von C1 mit negativer Polung. Vorerst bleibt T2 also sicher gesperrt. R3 beginnt jedoch sofort mit dem Ausgleich: Plus 9 V gegen etwa Minus 6 V. Dadurch baut sich die Kon-

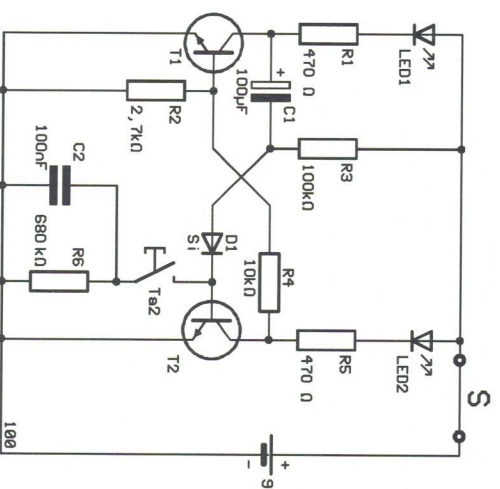


Bild 100. Dynamische Starttaste beim Monolop: Kann beliebig lange gedrückt werden!

densatorladung mit der Zeitkonstanten $R3 \cdot C1$ ab. (Die Zeitkonstante hatten wir in Abschnitt 6 kennengelernt.) Mehr noch – der Ladestrom von C1 unterstützt ... aber das hatten wir ja schon. Nebenbei wird auch klar, daß ohne D1 alles viel

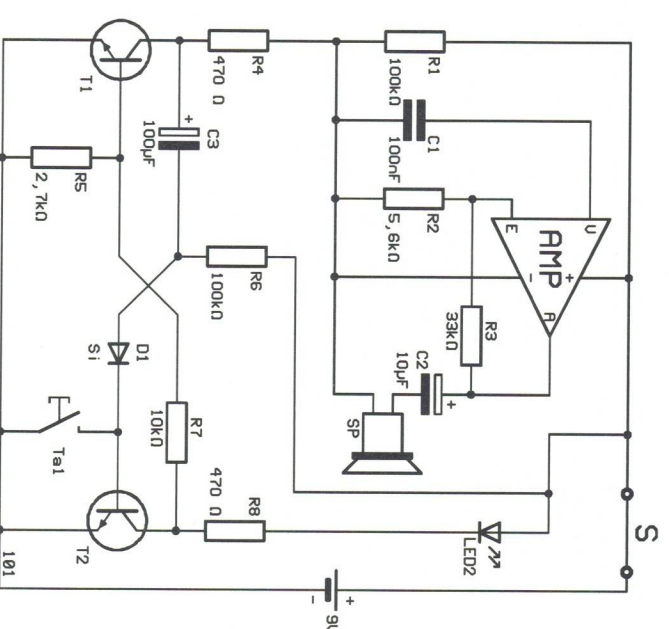


Bild 101. Monoalarm: Zeitlich sehr begrenzt.

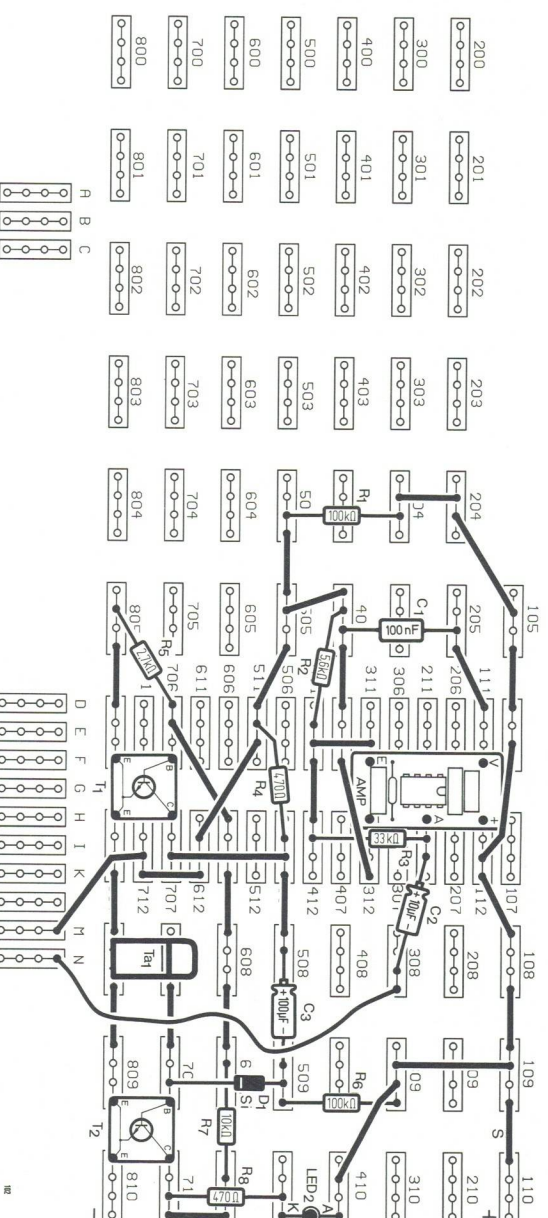


Bild 102. Aufbau zu Bild 101.

schneller geht – T2 schaltet dann bereits zwischen 0,6 V und 0,7 V wieder durch. Man nennt eine solche Schaltung, die nur einen („mono“) stabilen Zustand hat, einen *monostabilen Multivibrator* oder salopp *Monoflop*. Was bleibt, ist der Ärger mit der zu lange gedrückten Taste. Auch dagegen hilft „Kondensator-Dynamik“.

66 Wir ergänzen Bild 98 um eine kleine Trickschaltung. Wir entfernen dazu die Brücke Y in Bild 99 und setzen statt dessen C2 und R6 nach Bild 100 ein. Danach können wir Ta2 drücken, solange es uns gefällt. Und stellen erfreut fest: LED1 leuchtet immer für die gleiche Zeit, geht bei länger gedrückter Taste also sogar vor dem Loslassen aus.

Wir verkleinern C1 von 100 μF auf 10 μF und erleben das gleiche. Oder wir verkleinern R3 von 100 k Ω auf 10 k Ω . Nebenbei zeigt sich: Je größer C1, um so länger die Leuchzeit von LED1, je kleiner R3, um so kürzer. Vorsicht jedoch vor zu großem R3 (z. B. 680 k Ω): T2 wird nicht mehr richtig durchgeschaltet! Es gehört nicht viel Phantasie dazu sich auszudenken, was man mit einem solchen „Kurzeitgeber“ alles anfangen kann.

67 Wir setzen unser *Monoflop* statt des Flipflop in Bild 93 ein. Jetzt gibt's nur noch Kurzalarm, wenn die Tür geöffnet wird. Das wäre doch eine praktische Ladenbinde für Tante Emma?

Eigendynamik: Astabiler Multivibrator

Wer munter auf den Taster drückt, kann mit dem dynamischen Flipflop auch Wechselblinker spielen. Besser geht's wieder elektronisch.

68 Rüsten wir den Aufbau nach Bild 98 etwas um (Bild 103). Tatsächlich – es blinkt von selbst Unermüdlich, wie sich das für Automaten gehört. Wir stellen die übliche Frage: Wie funktioniert das?

Im Grunde haben wir uns schrittweise diesem Effekt genähert. Dazu nochmals ein Blick auf unser Monoflop. Der eben gebaute „AMV“ (Technikertargon für den astabilen Multivibrator) ist eigentlich fast die Doppelung der linken Seite des „MF“: R2 und R3 versorgen die Basisanschlüsse mit Strom, C1 und C2 sorgen für Bewegung. Da nun beide Teile über Kondensatoren gekoppelt sind, bleibt's auf keiner Seite stabil. Diesmal sind die Startbedingungen gleich. Darum siegt zunächst der Transistor mit der größeren Verstärkung. „Eingeschungen“ geht es dann so:

T1 sei gerade durchgeschaltet. C1 liegt dann mit seiner Plusseite am Minusanschluß der Batterie und sperrt damit T2. Während sich der größere R2 noch um die Umladung von C1

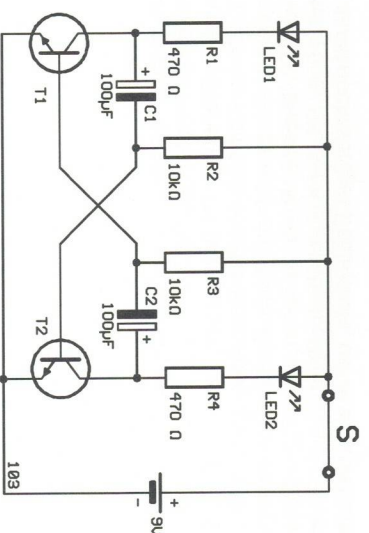


Bild 103. Multistabiler astabiler Multivibrator. C1 und C2 sorgen für Bewegung, zusammen mit R2 und R3 bestimmen sie die Verweilzeiten in jeder Lage.

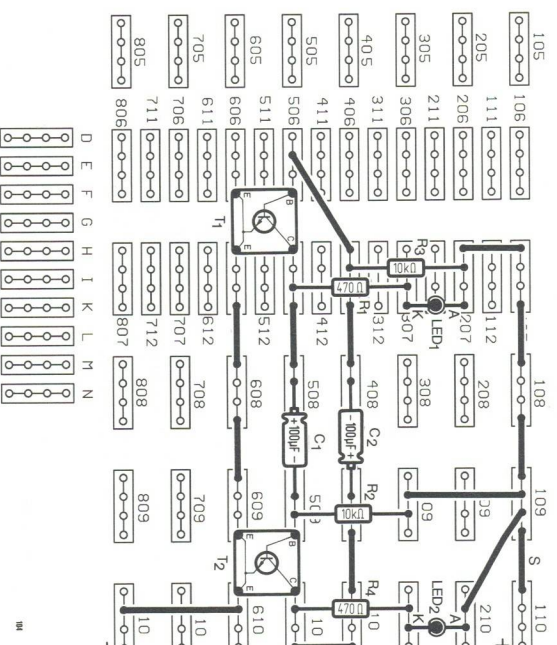


Bild 104. Aufbau zu Bild 103.

benötigt, lädt sich C2 viel schneller auf mehr als 6 V – vom gesperrten T2-Kollektor her über die Basis-Emitter-Strecke von T1. Parallel dazu fließt über R3 Basisstrom in T1. Doch nun kommt die Ladung von C1 in den kritischen Bereich: Von -6 V (bezogen auf die Basis von T2 gegen Minus) ist er vom Strom durch R2 schließlich auf etwa +0,6 V aufgeladen worden. Das reicht, damit T2 zu leiten beginnt. Dadurch wird der Plusbelag von C2 zunehmend nach Minus „gezogen“. Er leitet damit den

Basisstrom von T1 ab. Dessen Kollektorspannung steigt, weil der sinkende Basisstrom sinkenden Kollektorstrom bewirkt. Damit unterstützt C1 den Basisstrom für T2. Hat also T2 erst einmal zu leiten begonnen, geht der Rest ziemlich schnell. Danach ist wieder für eine Weile Ruhe – LED2 leuchtet, LED1 ist dunkel. Bis auf der Minusseite von C2 die Spannung auf den Schwellenwert der Basis von T1 gestiegen ist. Wie's weitergeht, wissen wir schon.

Das Ergebnis dieses ewigen Hin und Her sind periodische Rechteckimpulse an beiden Kollektoren. Leuchtende LED zeigt stets die Leitzzeit des jeweiligen Transistors an. Bei gleichen Bauelementwerten sind beide Zeiten gleich.

Genauer betrachtet ist es also hauptsächlich das Duo aus Basiswiderstand und Kondensator, das diese Zeiten bestimmt. Das „linke“ Paar ist für die Sperrzeit des „rechten“ Transistors (also die Leitzzeit des linken) verantwortlich, das „rechte“ für die Sperrzeit des „linken“ Transistors.

69 Wir überprüfen diese Behauptungen mit einigen Werten für R2, R3 und C1, C2. Die symmetrische Erstbestückung blinkt gemütlich und gleichmäßig. Das macht sie für Warmbaken u. ä. geeignet. Mit kleineren Kapazitäten wird es hektischer. Man kann das aber mit größeren Widerstandswerten wieder ausgleichen – solange sie noch genügend Basisstrom zulassen.

Für Auge und Ohr

Wir wissen bereits: Wie oft sich ein Zustand je Sekunde wiederholt, das wird durch die Angabe der Frequenz ausgedrückt. Bis höchstens etwa 20 Hz vermag das Auge solches zu erkennen. Dann verschnitzelt das Filmmern zum Dauerleuchten. Bei höheren Frequenzen bemühen wir besser unsere Ohren.

70

Anstelle von LED2 in Bild 103 schließen wir den Lautsprecher unseres Experimentierkastens an. Außerdem speisen wir gemäß Bild 105 die Basis von T1 über das 100-k Ω -Poti. Als Kondensatoren benutzen wir die beiden Exemplare mit 0,1 μF . Unser Multivibrator kommt damit ins Reich der Töne. Drehen wir an P2 und lauschen den Ergebnissen! Es kommen Frequenzen zwischen etwa 150 Hz und knapp 2 kHz zustande. Damit kann man doch Musik machen! Etwa so: Taster anstelle Brücke X, eine Hand am Potiknopf, die andere am Taster. Es braucht nur wenig Übung, und wir kennen die Potistellen für bestimmte Töne. Drehen und Tasten, dabei ein wenig nachziehen – es klingt wie am Strande von Hawaii... Und wenn das zu leise ist, der verkleinert R4 auf 100 Ω . Da fließt dann allerdings viel Strom. Das lohnt sich auf Dauer nur mit dem KOSMOS Netzgerät X.

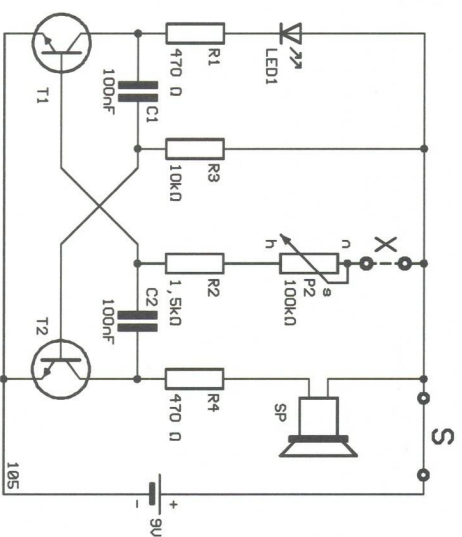


Bild 105. Wer nicht sehen will, darf hören: Multivibrator für den Tonfrequenzbereich (Lausprecher statt LED2). Lauter mit 100 Ω für R4. LED1 zeigt nur noch an, daß es „läuft“. (Nützlich bei Frequenzen oberhalb Hörgrenze, z. B. mit 6800 pF statt 0,1 μ F.)

Der astabile Multivibrator ist also eine äußerst vielseitige Schaltung, ebenso gut für Warmlinker wie für Prüftongeber, elektronische Musik und schließlich in der Funktion eines „elektronischen Herzens“ – als Takgeber in digitalen Schaltungen.

Schwellen mit Sprung: Schmitt's Trigger

Wieder koppeln wir zwei Transistoren miteinander. Diesmal aber „gemischt“ – zwischen Basis und Kollektor und auf der gemeinsamen Emittenseite.

71

Wir stecken dazu die Schaltung nach Bild 107 zusammen und beobachten LED1. Sie ist hell oder dunkel – je nach Einstellung von P1. Doch diese Abhängigkeit ist merkwürdig. Bewegt man den Schleifer nach unten, schaltet sich die Leuchtdiode irgendwann ein. Um sie wieder auszuschalten, muß nun aber der Schleifer über diesen Punkt hinaus viel weiter hochgedreht werden! Erst dann geht sie ebenso plötzlich wieder aus.

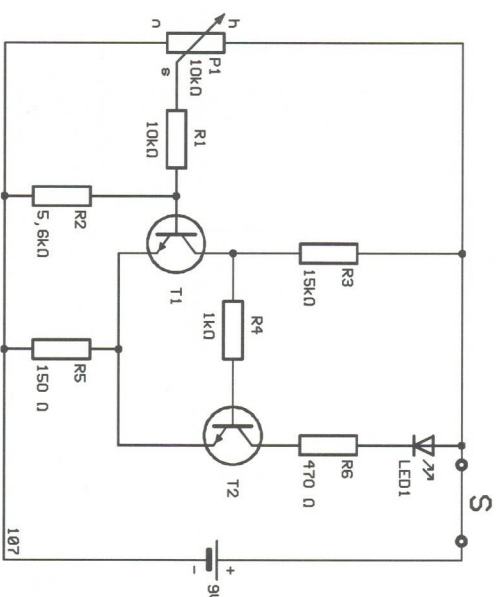


Bild 107. An der Schwelle zwischen analog und digital: Schmitt-Trigger mit Hysterese.

Wir suchen die Ursachen für dieses Verhalten und stellen fest: Bei großer Teilerspannung an P1 ist T1 durchgeschaltet. Er leitet daher den Basisstrom für T2 ab. T2 ist gesperrt, die LED dunkel. Dreht man P1 nach unten, sinkt der Basisstrom von T1. Seine Kollektor-Emitter-Spannung steigt daher an. Gelangt sie in den Bereich der Basis-Emitter-Schwellenspannung von T2, beginnt dieser zu leiten. Dadurch wächst die Spannung über R5, denn durch ihn fließt jetzt mehr Strom. T1 erhält damit noch weniger Basisstrom, der Kollektorstrom von

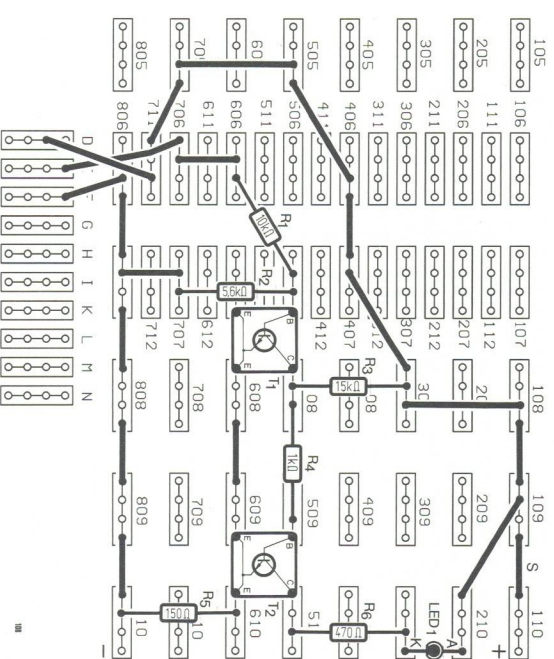


Bild 108. Aufbau zu Bild 107.

T2 steigt weiter – die Sache kippt. Wir brauchen also mit dem Poti nur in den kritischen Bereich zu fahren, den Rest besorgt die Schaltung selbst. Daher der Name *Schwellenwertschalter*. Nach dem Kippen fließt durch R5 ein relativ großer Strom. In Bild 107 sind es etwa 10 mA. Über R5 stehen also rund 1,5 V. Klar – damit T1 wieder leidend werden kann, braucht man nun eine ziemlich hohe Spannung am Poti – so etwa 2,1 V gegen Minus. Entsprechend weit muß man es also hochdrehen. Dann jedoch geht's rasant genau anders herum. Da nun T1 den Basisstrom von T2 zunehmend „absaugt“, sinkt auch die Spannung über R5, und T1 zieht kräftig durch. Sein kleiner Kollektorstrom (rund 0,6 mA) bringt ja über R5 kaum 90 mV zustande. Bei solchem Verhalten spricht man von *Hysterese*. Wir erkennen nebenbei: Der „tote Bereich“ (die Hysterese) zwischen den Schaltpunkten hängt vom Verhältnis der Ströme beider Transistoren ab. Er wird verringert, wenn man R3 oder (und) R5 verkleinert oder (und) R6 vergrößert. Aber wofür ist solche Hysterese eigentlich gut? Zwei Beispiele dazu:

1. Eine Straßenlaterne wird von einem Dämmerungsschalter gesteuert. Abends nimmt die Helligkeit stetig ab, und sie schaltet sich ein. Am Morgen läuft es umgekehrt. Zwischen- und Auspunkt jedoch Wölken. Es wäre nicht schön, wenn Ein- und Auspunkt so dicht nebeneinander liegen würden, daß eine Wolke die Laterne anknipt. Mit Herrn Schmitt läßt sich das vermeiden.

2. Ein Gerät wird von einem Akku gespeist. Es schaltet sich ab, wenn der Akku seine Entlade-Schlussspannung erreicht hat. Nach dem Abschalten wird seine Spannung aber wieder etwas höher. Nur eine Automatik wie der Schnitt-Trigger kann verhindern, daß daraus ein unsinniges Ein-Aus-Ein-Aus wird.

Schwellwertschalter sind schließlich wichtige „Kontaktstellen“ zwischen der analogen und der digitalen Welt. Schaltungen, die nur Ja und Nein verstehen, brauchen solche Dolmetscher: Nicht hell bis ein wenig hell = Nein, mehr hell bis blendend hell = Ja. Der Graubereich wird ausgeblendet.

10. Transistor als Verstärker

Der Transistor ist heute das wichtigste Bauelement der Elektronik – ob in seiner ursprünglichen Form als „Einzelkämper“ im eigenen Gehäuse oder mit vielen anderen auf einem Chip integriert. Daß es jedoch nicht einfach „den“ Transistor gibt, wissen wir schon. Unterschiedliche physikalische Wirkungen führten zu vielen Lösungen, und für jede von ihnen gibt es Einsatzmöglichkeiten. Bipolare Transistoren mit den Zonenfolgen npn und pnp sind aber noch immer die robusten Favoriten für den Praktiker.

Die Hauptaufgabe eines Transistors ist die Verstärkung und alles, was sich damit anfangen läßt. Wir wissen bereits, daß der bipolare Transistor zunächst ein Stromverstärker ist: Kleiner Basisstrom bewirkt großen Kollektorstrom. Fügt man in den Ausgangskreis einen Widerstand ein, bewirkt der verstärkte Strom einen Spannungsabfall, der um so größer ist, je mehr Strom in die Basis fließt – bis der Transistor alle seine unter den aktuellen Umständen verfügbaren Ladungsträger mobilisiert hat. Dann ist er gesättigt. Mehr geht nicht. Hier liegt die obere Grenze der Verstärkerwirkung. Die untere Grenze ergibt sich daraus: Ein Eingangsstrom fließt erst, wenn die Schwellenspannung der Basis-Emitter-Eingangsdiode überschritten ist. Unterhalb von etwa 0,6 V findet also nichts statt. Oberhalb davon muß dafür gesorgt werden, daß sich der Eingangsstrom in zulässigen Grenzen hält. Unsere Kleinsignaltransistoren nehmen bereits Basisströme über, die 50 mA übersteigen. Ströme lassen sich mit Widerständen begrenzen. Das wissen wir schon und sollten es auch nie mehr vergessen. Was aber, wenn die Spannung der Quelle, deren „Signal“ verstärkt werden soll, die Eingangsschwelle nicht überwindet oder gar die Richtung wechselt?

Verstärker für Wechselspannung

Ein Wechselstrom ändert ständig seine Richtung, das haben wir in Abschnitt 6 erfahren. Kondensatoren sind daher kein wesentliches Hindernis für ihn – im Gegensatz zum Gleichstrom, für den ein Kondensator eine absolute Sperre bedeu-

tet. Interessant sind Wechselströme für uns, weil – um nur ein Beispiel zu nennen – hinten an einem Mikrofon eine Wechselspannung herauskommt, wenn vorne Schallwellen auftreten. Argierlicherweise ist diese vom Mikrofon erzeugte Wechselspannung so winzig, daß sie erst noch gewaltig verstärkt werden muß, damit der Lautsprecher mit soundsoviel „Phons“ dröhnen kann. Oder auch leise, wenn wir es wollen. Der Verstärker liefert es hinten so, wie es vom eingespeist wird. Er verstärkt *analog*. Wir erinnern uns: Nur Ja oder Nein – das ist *digital*. Im vorigen Abschnitt haben wir das kennengelernt. Bild 109 zeigt einen einfachen Wechselspannungsverstärker. Die zu verstärkende Wechselspannung kann über den Kondensator (fast) ohne Mühe auf die Basis des Transistors gelangen, für eine eventuelle Gleichspannung wäre dieser Weg versperrt. Transistoren funktionieren aber nun einmal mit Gleichspannung, und deswegen hängt die Schaltung ja auch an einer Batterie. Wozu dient die Gleichspannung?

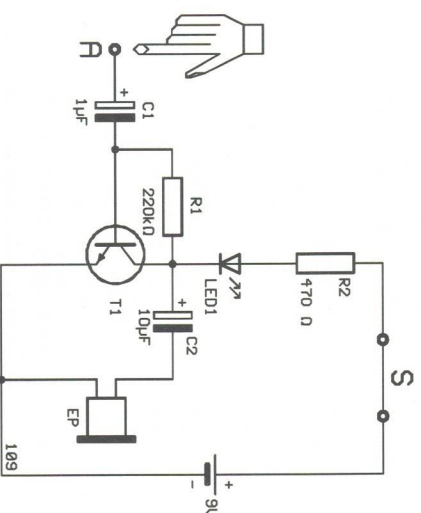


Bild 109. Einfacher Wechselspannungsverstärker: Verstärkt sogar „Brummen aus dem Finger!“ ($R1=R_B$, $R2=R_C$)

Geteilte Batteriespannung

Es klingt ein bißchen verrückt: Damit die Wechselspannung ordnungsgemäß verstärkt werden kann, muß der Transistor durch die Gleichspannung – auch, wenn vor dem Mikrofon Totenstille herrscht – ständig etwas leitend gehalten werden. LED1 zeigt uns das an. Durch den Widerstand vom Kollektor zur Basis versorgt sich der Transistor sozusagen selbst aus seiner Kollektorspannung mit Basisstrom, um leitend zu werden. Wählt man für diesen Widerstand z. B. einen Wert, der um den Faktor der Transistor-Stromverstärkung höher ist als der des Kollektor-Widerstandes, so liegt die Kollektorspannung etwa auf dem halben Wert der Batteriespannung, also: $U_C = U_B/2$ bei $R_B = B \cdot R_C$.

Insider-Info 11

Der Basisstrom wiederum errechnet sich aus $I_B = (U_C - U_{BE})/R_B$. Wenn wir vereinfacht die Flußspannung der Leuchtdiode für unsere Rechnung von der Batteriespannung abziehen und das Ergebnis als neue Batteriespannung U_B bezeichnen, errechnet sich die Kollektor-Emitter-Spannung zu $U_{CE} = U_B - B \cdot I_B \cdot R_C$. Für I_B setzt man ein: $I_B = (U_C - U_{BE})/R_B$. Daraus läßt sich alles interessante ableiten. Experten schreiben ein kleines Computerprogramm, um den Verlauf der Spannung am Kollektor über dem Widerstand R_B oder auch in Abhängigkeit von der Stromverstärkung bei festgelegtem R_B grafisch darzustellen. Kleine Denkhilfe: Um die LED-Flußspannung reduzierte Batteriespannung U_B etwa 7 V, Basis-Emitter-Schwellenspannung U_{BE} rund 0,6 V.

Dieser Wert ist nun sehr praktisch: Wir stellen uns vor, aus dem (gedachten) Mikrofon kommt eine Wechselspannung auf die Basis. Da die Polarität dieser Wechselspannung sich ständig ändert, „wackelt“ auch die Kollektorspannung um den genannten Mittelwert der Batteriespannung hin und her. Sie wird über den Kondensator C2 dem Ohrhörer zugeführt.

Opas Brummtest reaktiviert

72

Wir bauen den Wechselspannungsverstärker nach Bild 110. Schaltbild 109, auf. Um einen ersten Test durchzuführen, bedienen wir uns einer List, die schon Opa mit seinen alten Röhrenradios zu schätzen wußte: Ständig und überall sind wir von elektrischen 50-Hz-Feldern unserer Energieversorgung umgeben. Unser Körper verhält sich zur Umgebung wie ein Kondensator mit einer Kapazität von ein paar Hundert Pikofarad. Er ist darum eine hervorragende „Brumquelle“. Wenn wir auf den offenen Eingang A unseres Wechselspannungsverstärkers fassen, ertönt im Ohrhörer ein Brummen: Es ist, als ob eine Wechselspannung über einen Kondensator (das sind wir!) auf den Eingang gekoppelt würde.

73

Es kann natürlich auch probiert werden, einmal die Musik eines Kofferradios oder Walkmans zu verstärken: mit etwas handwerklichem Geschick schließen wir dazu die beiden Pole des Radio-Kopfhöreranschlusses an den Eingang A und den Minuspol unserer Schaltung an.

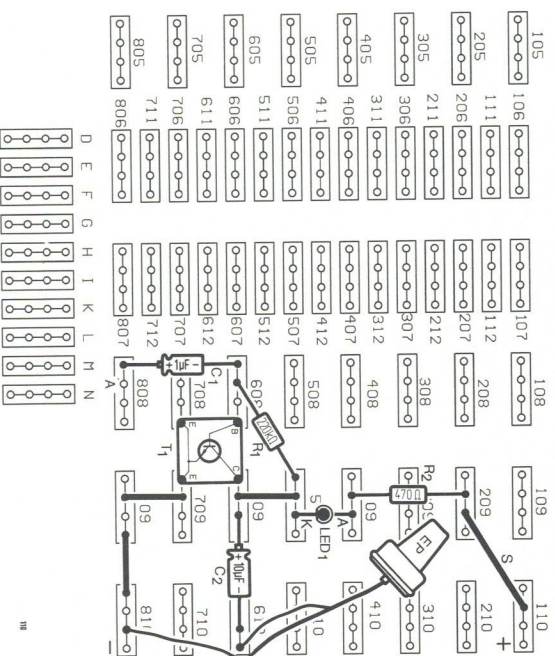


Bild 110. Aufbau zu Bild 109.

Arbeitspunkt und Gegenkopplung

Durch eine entsprechende Beschaltung haben wir oben einen Transistor mit einem gewissen Basisstrom versorgt. Er kann dadurch *Signalspannungen* verstärken. Der Fachmann spricht dabei vom *Einstellen des Arbeitspunktes*. Eine solche Signalspannung war in unserem Fall eine Wechselfeldspannung. In anderen Schaltungen kann es auch eine winzige Gleichspannung sein, die (*analog*) verstärkt werden soll. Man nennt es übrigens *Gegenkopplung*, wenn ein Widerstand vom Kollektor (vom Ausgang) zur Basis (zum Eingang) geschaltet wird. Durch eine *Gegenkopplung* erhält man einen recht stabilen Arbeitspunkt; außerdem bewirkt eine Gegenkopplung auch eine Verminderung von eventuellen Verzerrungen der Sprache und Musik.

Klopffzeichen

Mikrofone werden nicht nur für Sprache und Musik verwendet. Das zeigt das folgende Experiment.

74

Wir bauen die Schaltung nach Bild 111 auf. Das Ergebnis ist eine kleine Erdbebenwarte. Sie läßt sich leicht erschüttern und reagiert darauf mit flackernden Lichtsignalen.

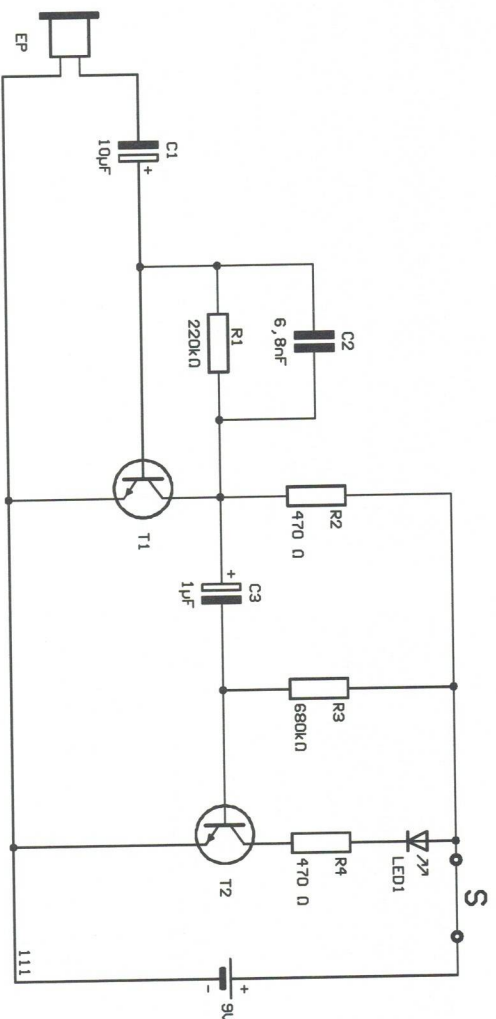


Bild 111. Erschütterndes Ergebnis: Klopfen läßt Leuchtdiode flackern.

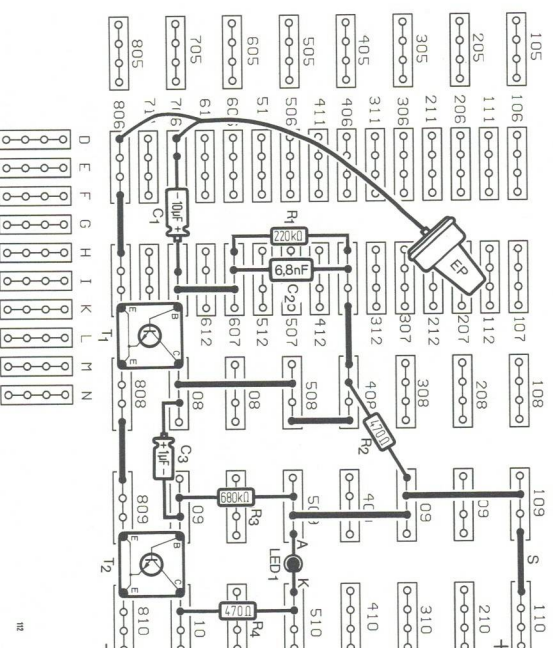


Bild 112. Aufbau zu Bild 111.

Als Mikrofon wird der Ohrhörer benutzt, denn sein Prinzip ist umkehrbar: Wechselfeldspannung wird zu Schall, Schall aber auch zu Wechselfeldspannung. Nicht eben viel, aber die beiden Verstärkerstufen machen mehr daraus. Man legt den Hörer

am besten auf eine Tischplatte, auf die dann kräftig geklopft wird. Für höhere Frequenzen ist die Sache weniger empfindlich. Das kommt durch C2. Im Hörer befindet sich eine Magnetpule, eine Induktivität, deren Widerstand mit der Frequenz wächst. Der Widerstand der Kapazität dagegen wird mit wachsender Frequenz kleiner. Mit zunehmender Frequenz wird daher der in den Basisstrom fließende Gegenkopplungsstrom größer, während der Eingangsstrom vom Hörer her sinkt. Da der Ohmsche Widerstand des Hörers ziemlich klein ist, braucht man den Koppelkondensator, sonst bliebe die Basisstrecke gesperrt. Die zweite Stufe der Schaltung erhält ihren Basisstrom über einen Widerstand direkt von Plus der Batterie her. Damit fehlt die ausgleichende Wirkung für den Arbeitspunkt, und dieser ist stärker von der Stromverstärkung abhängig. Die Werte wurden so gewählt, daß die Leuchtdiode von einem mittleren Wert aus deutlich ihre Helligkeit in beiden Richtungen ändert, wenn das lokale Tischplattenbeben einsetzt.

Gleitende Übergänge

Mit der folgenden Schaltung wenden wir uns wieder den gleitenden Übergängen zu, die der Analogtechnik eigen sind.

75

Wir bauen die Schaltung nach Bild 113 auf und drehen den Schleifer des Potentiometers gefühlvoll vom Anschlag n aus nach rechts. Wir bemerken: Schon nach relativ kleinem Drehwinkel zeigt sich in der Leuchtdiode ein leichtes Glimmen. Die Helligkeit wächst mit zunehmendem Drehwinkel immer mehr, bis sie bereits vor dem Anschlag h ihren vollen Wert erreicht. All das läßt sich beliebig oft auch in umgekehrter Richtung wiederholen. Das langsame

Verlöschten beim Zurückdrehen erinnert an die Wirkung der bekannten Dimmerschaltungen, mit denen Energie gespart werden kann.

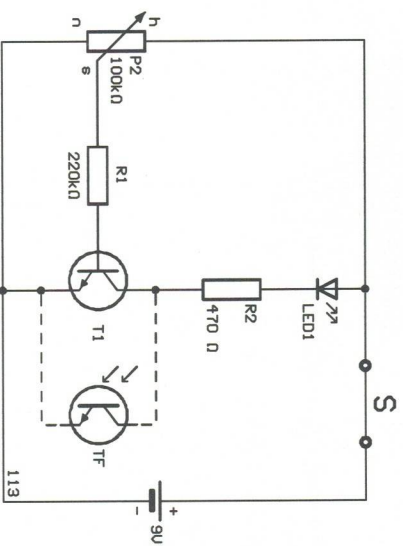


Bild 113. Einfacher Gleichstromverstärker: LED1 wird um so dunkler, je weiter Schleifer s in Richtung n gedreht wird („Verdunkelungsschaltung“).

strom ($U_B - U_{BE}/R_1$). Mit nicht ganz 40 μA würden bei einer Stromverstärkung von z. B. $B = 500$ rund 20 mA Kollektorstrom fließen können. Gemäß ($U_B - U_E)/R_2$ sind jedoch nur nicht ganz 15 mA möglich. In solchen Fällen sagt man, der Transistor wird nahe seiner Sättigung betrieben. Für unsere Kleinleistungstypen rechnet man mit 0,2 bis 0,3 V Sättigungsspannung. Sie ist von Basisstrom, Kollektorwiderstand und Betriebsspannung abhängig. Genaue Auskunft geben die Kennlinien des jeweiligen Typs.

Widerspruch

Vom Basisstrom verursachter Kollektorstrom ließ die LED in Bild 113 leuchten. Im Eingangskreis von Bild 115 sieht es nicht anders aus als bei Bild 113. Die LED im Ausgangskreis reagiert jedoch genau „andersherum“.

76

Wir stecken die Schaltung nach Bild 115 zusammen und drehen am Poti. Wir sehen: Schleifer unten – LED1 leuchtet! Schleifer nach oben: LED1 geht langsam aus.

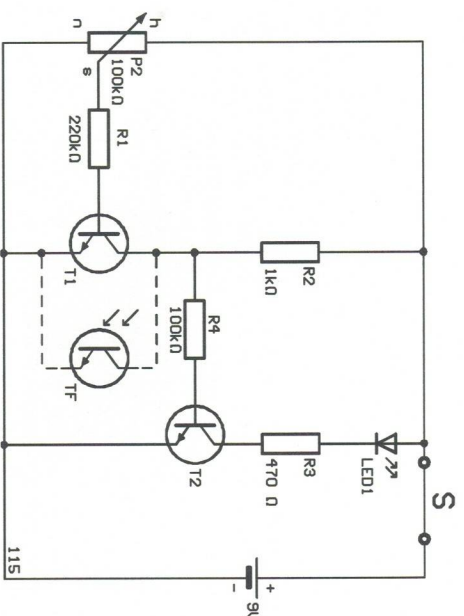


Bild 115. Das Gegenteil von Bild 113: Schleifer in Richtung n läßt LED1 immer heller werden.

Genauer betrachtet haben wir zwei Inverter hintereinandergeschaltet. Beginnt der erste zu leiten (Poti langsam hochdrehen), entzieht er damit dem zweiten zunehmend den Basisstrom. Was wir in der Digitaltechnik also vermeiden haben, das geschieht mit dem Poti gewollt: Wir „durchfahren“ den Bereich zwischen Nichtleiten und vollem Leiten. Die Heiligkeit der Leuchtdiode folgt bei beiden Versuchen der Drehung am Poti „analog“. Nur jetzt umgekehrt zu Bild 113. Auch diesmal hat die scheinbare Verschwendung vielfach ihren Sinn. Man kann damit flexibel auf ganz unterschiedliche Eingangssigna-

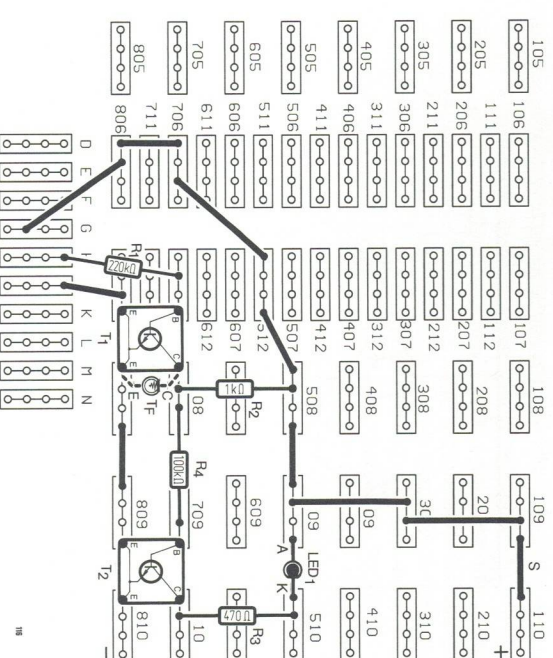


Bild 116. Aufbau zu Bild 115.

le reagieren – stets findet sich die zur Weiterverarbeitung günstigste Konstellation. Dazu gleich noch zwei Versuche.

77

Wir ersetzen T1 in Bild 113 durch den Fototransistor unseres Experimentierkastens und beobachten LED1. Es zeigt sich: Bei nicht zu hellem Umgebungslicht bleibt die Leuchtdiode dunkel. Jetzt nähern wir dem Fototransistor langsam eine Taschenlampe. Wir stellen fest: Je näher die Lampe, um so heller leuchtet LED1.

Der Fototransistor hat zwar keinen Basisanschluß, doch Licht wirkt wie die Spannung am Abgriff unseres Potis: Der Transistor leitet um so stärker, je mehr Licht auf ihn fällt.

78

Der gleiche „Austausch“ wird nun in Bild 115 vorgenommen. Dann ziehen wir uns wieder in eine dunkle Ecke zurück. Wir sehen LED1 hell leuchten. Das ändert sich, wenn wir den Strahl einer Taschenlampe auf den Fototransistor richten. Je näher die Lampe, um so dunkler die Leuchtdiode.

Wir stellen fest:

- Die Wirkrichtung bei Bild 115 ist umgekehrt zu der in Bild 113, denn es liegen zwei Emitterstufen hintereinander.
- Die Empfindlichkeit auf Licht ist bei Bild 115 deutlich höher als bei Bild 113, denn es liegen zwei Verstärkerstufen hintereinander.

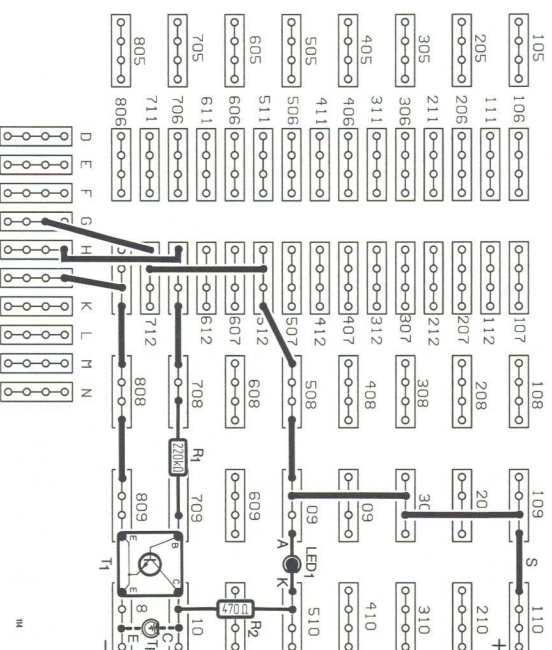


Bild 114. Aufbau zu Bild 113.

Der „tote Gang“ am Anfang erklärt sich aus der Basis-Emitter-Schwellenspannung von rund 0,6 V. Diese Spannung muß am Teilerpunkt mindestens vorhanden sein, damit der Transistor zu leiten beginnt. Am Anschlag h fließt dann der Basis-

Spar-Effekt

Bei den soeben betrachteten Schaltungen ist der Emitter gemeinsame Elektrode für Eingangs- und Ausgangskreis. Zum Schutz der Basisstrecke vor zu hohen Strömen ist ein Widerstand zur Strombegrenzung erforderlich. Den kann man sich in der Kollektorschaltung nach Bild 117 sparen. Zumindest, wenn man den Kollektor zuverlässig angeschlossen hat. Unersere Transistoren schützen sich in Kollektorschaltung vor zu hohen Basisströmen selbst. Ihre Kollektorsättigungsspannung ist kleiner als die Basis-Emitter-Schwellenspannung.

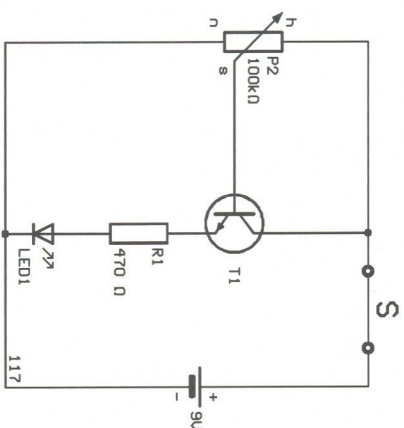


Bild 117. Kollektorschaltung, auch Emitterfolger genannt: LED1 wird erst bei höherer Einstellung an P2 langsam hell.

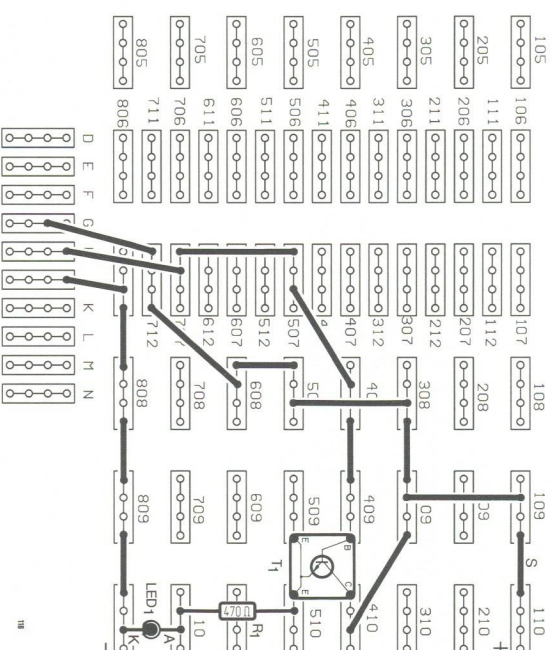


Bild 118. Aufbau zu Bild 117.

79

Wir bauen die Schaltung nach Bild 117 auf und drehen wieder langsam am Poti von n nach h. Dabei zeigt sich: Erst dann, wenn am Schleifer des Potentiometers eine Spannung $U_{BE} + U_F$ erreicht ist, beginnt diesmal die LED zu leuchten. Die Schaltung braucht also wesentlich mehr Eingangsspannung, damit die LED leuchtet. Und sie verhält sich auch insgesamt ganz anders. Das hatten wir aber schon weiter vorn (und anlässlich der Darlingtonschaltung) diskutiert. Wie das aus der Sicht der Analogtechnik wirkt, geht aus unserer Insider-Info hervor.

Insider-Info 12

Wir haben die Kollektorschaltung schon kurz im Abschnitt 9 kennengelernt. Diesmal geht es uns wieder um das Verhalten im „aktiven Bereich“, also zwischen Ja und Nein. Zum einen: Ausgang dieser Stufe ist der Emitter. Die am Arbeitswiderstand (inklusive LED) auftretende Spannung ist um den Wert U_{BE} kleiner als die Eingangsspannung. Aus der Sicht der Digitaltechnik betrachtet ergibt also „Ja“ am Eingang auch „Ja“ am Ausgang. Im Bereich der Analogtechnik und damit auch auf Wechselspannungs-Aussteuerung bezogen sagt man, die Signale an Ein- und Ausgang sind *in Phase*, während sie bei der Emittererschaltung zueinander gegenphasig (um 180° versetzt) auftreten. Und – sie werden bezüglich der Spannung nicht verstärkt. Daher die bisweilen benutzte Bezeichnung Eins-Verstärker. Die Kollektorschaltung, auch Emitterfolger genannt, hat aber noch eine wichtige Eigenschaft: Ihr Eingang ist hochohmig. Das hatten wir ebenfalls bereits in Abschnitt 9 festgestellt.

Einsehen läßt sich das durch folgende einfache Betrachtung: Der Emitterstrom (die Summe von Basis- und Kollektorstrom, also etwa dem Kollektorstrom entsprechend) ergibt sich genügend genau aus

$$I_E = I_B \cdot B. \quad I_B \text{ wird von der Eingangsspannung } U_{\text{ein}} \text{ „angetrieben“: } U_{\text{ein}} = U_{BE} + I_E \cdot R_E + U_{BE} + B \cdot I_B \cdot R_E.$$

Daraus ergibt sich, wenn man U_{BE} gegenüber U_{ein} vernachlässigt, ein Eingangswiderstand von etwa $B \cdot R_E$. Für diese Betrachtung enthält LED1 in Bild 117i R_E entspricht $R1$.

11. Komplementärschaltungen

Daß es nicht einfach „den“ Transistor gibt, haben wir schon festgestellt. Die besten Fertigungsergebnisse bestimmten jeweils, was bevorzugt eingesetzt wurde. Lange Zeit dachte und arbeitete man überwiegend in npn, also mit positiver Kollektor- und Basis-, aber negativer Emitterspannung. Bei der Zonenfolge pnp ist es genau umgekehrt. Transistoren mit die-

sem Aufbau ergänzen daher die npn-Typen – man sagt, sie sind zu jenen *komplementär*. Mit der Verfügbarkeit beider Typenreihen mit vergleichbaren Eigenschaften wurden Verknüpfungen zwischen ihnen interessant. Die Schaltungen blieben dabei nicht auf Bekanntes beschränkt, es ließen sich auch Spezialstrukturen nachbilden, wie sie etwa in *Vier-schichtdioden*, *Thyristoren* und *Tracs* Verwendung finden. Dabei kommt es dann auch auf die Betrachtungsweise und auf die nähere Kenntnis dieser Mechanismen an, wie eine solche Schaltungen in viele Gebiete der elektronischen Schaltungstechnik ein.

In unserem Experimentierkasten befindet sich ein solcher pnp-Transistor. Erforschen wir mit ihm die Welt der „Komplementären“!

Komplementäres RS-Flipflop (Thyristor-Struktur)

Ein *Thyristor* ist ein Halbleiterbauelement aus mehreren n- und p-Schichten, das durch einen Zündimpuls eingeschaltet wird. Löschen läßt es sich erst wieder, wenn der Strom unter einen gewissen Wert sinkt. Auch in der folgenden Schaltung wirken mehrere n- und p-Schichten zusammen – in Form der beiden Transistoren. Und sie verhält sich ähnlich wie ein solcher Thyristor. Gleichzeitig wirkt sie als Flipflop.

80

Zur Untersuchung dieses komplementären Flipflop wird die Schaltung nach Bild 119 aufgebaut. Mit den beiden Leuchtdioden beobachten wir, ob und wann in den beiden Zweigen der Schaltung Strom fließt. Wir drücken

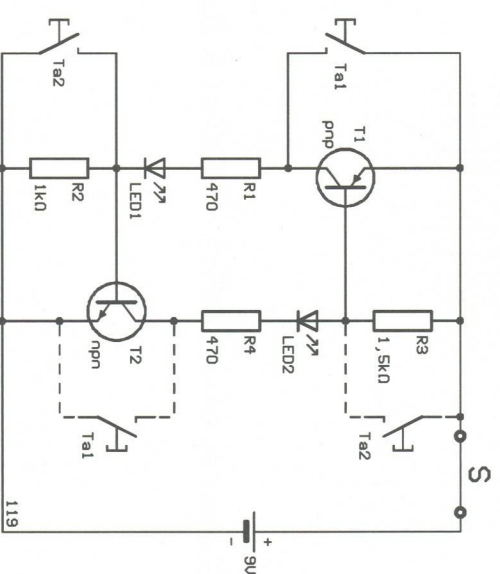


Bild 119. Komplementäres RS-Flipflop: Mehrschichtanordnung mit Thyristoreigenschaften.

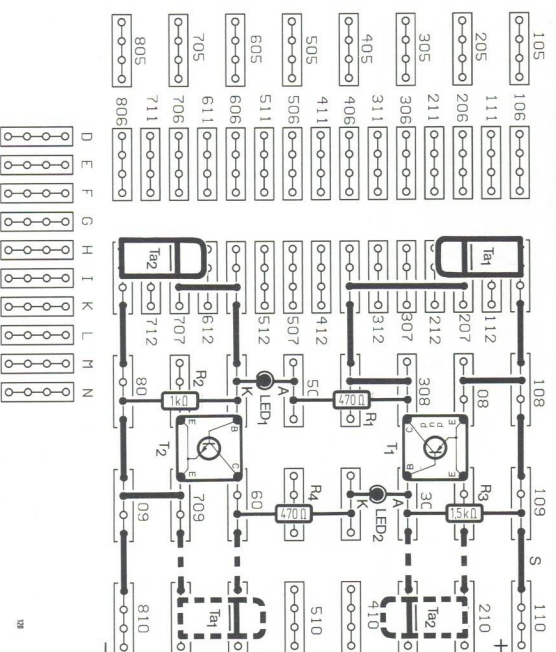


Bild 120. Aufbau zu Bild 119.

dazu auf den Taster Ta2 und sind enttäuscht. Es rührt sich nichts. Nun drücken wir Ta1 und sehen: Beide Dioden leuchten. Wir lassen Ta1 los und erkennen: Die Dioden leuchten weiter. Jetzt versuchen wir es nochmal mit Ta2 und freuen uns: Geschafft – die Ströme fließen nicht mehr, beide LED sind dunkel.

Betrachtet man Bild 119 näher, ist zu erkennen: Die beiden Transistoren sind wechselseitig verbunden – jeweils der Kollektor des einen über LED und Schutzwiderstand mit der Basis des anderen. Mit dem oberen Taster Ta1 versetzen wir die Schaltung in den leitenden Zustand – wir setzen die Schaltung. Der untere Taster Ta2 holt ihn in die Ruhelage zurück – die Schaltung wird *rückgesetzt*. Daher die Bezeichnung *RS-Flipflop*.

81 Wir tauschen die Taster „diagonal“ aus: Ta2 kommt parallel zu R3, Ta1 überbrückt die Kollektor-Emitter-Strecke von T2. Nun versuchen wir's wieder mit dem Knöpfchendrücken. Es stellt sich heraus: Die Schaltung funktioniert wie vorher, nur liegt die S-Taste jetzt unten und die R-Taste oben.

Elektronische Überstrom-Sicherung

Unser Flipflop hat schon manches Bauelement vor Überlastung gerettet. Wie das geht, zeigt der folgende Versuch.

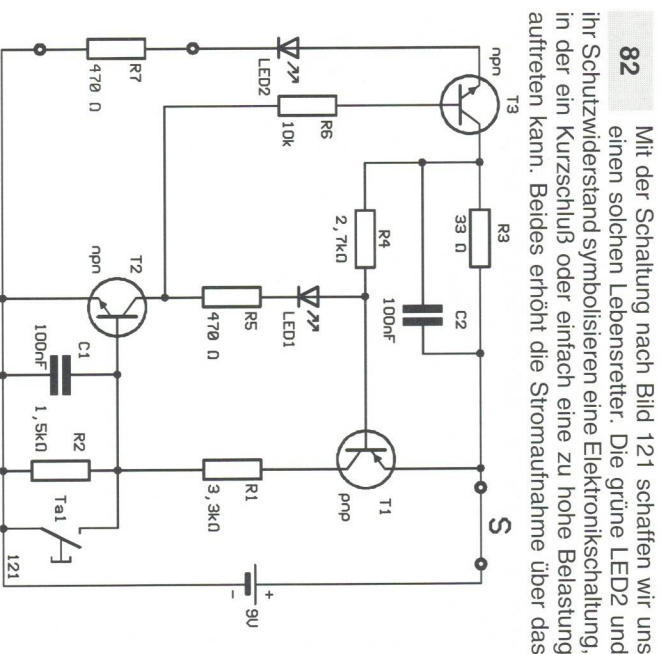


Bild 121. Rettele schon manches Bauelement: Elektronische Überstromsicherung mit komplementärem RS-Flipflop.

82 Mit der Schaltung nach Bild 121 schaffen wir uns einen solchen Lebensretter. Die grüne LED2 und ihr Schutzwiderstand symbolisieren eine Elektronikschaltung, in der ein Kurzschluß oder einfach eine zu hohe Belastung auftreten kann. Beides erhöht die Stromaufnahme über das

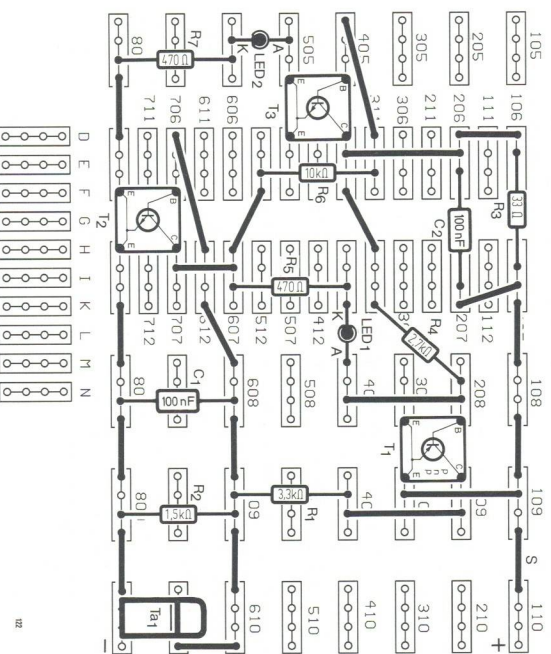


Bild 122. Aufbau zu Bild 121.

normale Maß, und die Spannungsquelle, eine zwischengeschaltete Stabilisierungsschaltung oder die Schaltung selbst könnten Schaden nehmen. Das wollen wir verhindern.

Nach dem Einschalten leuchtet LED2 – die Welt ist in Ordnung. Mit einem Widerstand von 150 Ω parallel zu R7 überlasten wir jetzt die Schaltung und stellen fest: LED2 verlischt schlagartig, statt hell aufzublitzen und dabei zu „sterben“. Dafür leuchtet LED1 auf und signalisiert damit den Ausfall.

Wir entfernen den Überlastwiderstand und drücken kurz Ta1: LED1 verlischt und LED2 leuchtet wieder. Wir versuchen es mit dem Widerstand nochmal: Diesmal hilft Ta1 nur, solange man ihn drückt. Das zeigt, daß die Ursache für den Ausfall noch besteht.

Wo liegt der Schutzmechanismus dieser Schaltung? Wir erkennen in T3 einen Transistor in Kollektorschaltung. Er wird vom Basisstrom über R4, LED1, R5 und R6 durchgeschaltet. Denn T2 ist zunächst gesperrt (LED1 ist dunkel). T1 und T2 sind zu einem Komplementär-Flipflop wie in Bild 119 verknüpft. Damit es nicht zu schnell reagieren kann, wird seine Funktion mit C1 und C2 etwas gebremst. Beim Einschalten könnte es sonst unerwünscht auslösen.

Entscheidend für die Schutzwirkung ist R3. Durch ihn fließt der Strom, dessen Höhe überwacht werden soll. Bei 33 Ω reichen etwa 15 mA aus, damit T1 leitend wird, denn die Spannung über R3 wirkt als Basis-Emitter-Spannung. Wenn T1 zu leiten beginnt, schaltet auch T2 durch und öffnet T1 mit seinem Kollektorstrom völlig – der bekannte Flipflop-Mechanismus. Rücksetzen mit Ta1 ist erst möglich, wenn die Spannung über R3 abgeklungen, der erhöhte Strom also verschwunden ist.

83 Wir entfernen C1 und C2 aus der Schaltung nach Bild 121 und schließen danach die Batterie an. Wir stellen fest, daß die Sicherung jetzt dazu neigt, beim Einschalten anzusprechen.

84 Nun stecken wir die Kondensatoren wieder ein. Zusätzlich legen wir parallel zu R7 einen 10-µF-Elko mit Plusanschluß in Richtung LED2. Wir nehmen zur Kenntnis, daß die Sicherung schon auf den kurzen Stromstoß reagiert, mit dem der Kondensator aufgeladen wird.

PUT-Metronom – eine knackige Schaltung
Im Verhalten der Schaltung nach Bild 123 erkennen Experten Ähnlichkeiten mit speziellen, anodensetting steuerbaren Thyristoren und programmierbaren *Unijunction-Transistoren* (PUTs). Uns interessiert mehr, was sie kann.

85 Die Schaltung nach Bild 123 ist rasch aufgebaut. Wir hören im Lautsprecher kurze, „trockene“

Knackgeräusche. Wir drehen an P2 und erkennen: Je näher der Schleifer s dem Anschluß h kommt, um so schneller wird die Folge dieser Impulse. Ihre Frequenz steigt von etwa 0,5 Hz bis 5 Hz. Das kann man z. B. gut für ein Metronom nutzen.

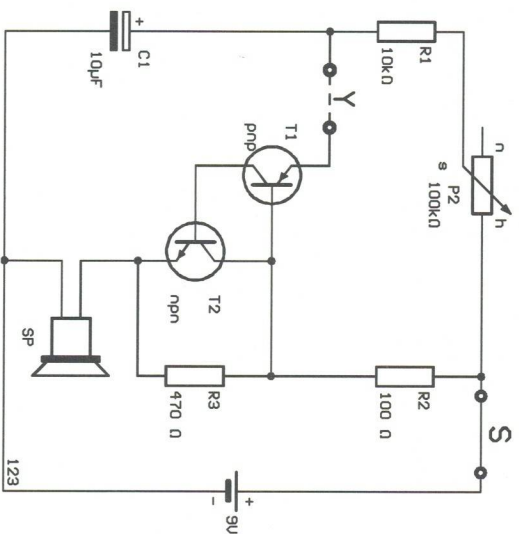


Bild 123. Komplementär-Metronom: Erinert an Unijunction-Transistor.

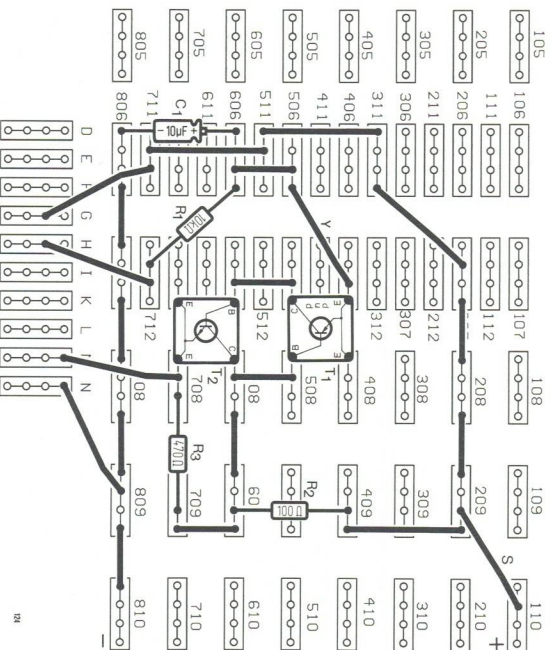


Bild 124. Aufbau zu Bild 123.

86 Wir tauschen $C1$ gegen einen Kondensator mit kleinerer Kapazität – zunächst 100 nF, dann 6,8 nF – und vernehmen nun Töne.

87 Bei $C1 = 6,8$ nF tauschen wir $R1$ gegen 33 k Ω aus und fügen zwischen $C1$ und den Emitter von T1 statt der Brücke Y einen 10-k Ω -Widerstand ein. Die Schaltung beantwortet das mit deutlich lauterem Tönen.

Dieses Verhalten wird bei näherer Betrachtung von Bild 123 verständlich: $C1$ wird über $R1$ und P2 vom Plus der Batterie her aufgeladen. Die Ladezeit hängt vom eingestellten Wert von P2 ab. T1 wird leitend, wenn die Spannung an $C1$ um den Wert der Basis-Emitter-Schwellenspannung von T1 über die Teilerspannung am Verbindungspunkt von $R2$ und $R3$ ansteigt. Wenn T1 zu leiten beginnt, öffnet sein Kollektorstrom auch T2 – die Schaltung „zündet“ schlagartig. Im Lautsprecher wird ein kurzes Knacken hörbar. Der Kondensator ist wegen des kleinen Lautsprecherwiderstandes schnell entladen.

Wird der Kondensator verkleinert, steigt die Frequenz der Auf- und Entladungen: Wir hören Töne. Mit dem zusätzlichen Widerstand schließlich wird die Entladezeit verlängert. Statt der kurzen „Nadeln“ fließt der Strom durch den Lautsprecher über längere Zeiten.

Man beachte, daß der Spannungsteiler die Batterie ständig mit einem Strom von etwa 15 mA belastet! Also: Drahtbrücke S nicht zulange einstecken.

Komplementär-Blinker

Blinker wie der nach Abschnitt 9 funktionieren meist auf Antrieb. Sie zeigen „lebendige“ Elektronik mit kleinem Aufwand und gehören darum zu den beliebtesten Einstiegsprojekten. Der folgende Blinker in Komplementärtechnik ist etwas anspruchsvoller. Er erfordert zunächst eine kleine Justierarbeit. Dafür kann er sich auf manche Weise nützlich machen.

88

Der Komplementärblinker wird nach Bild 126 zusammengesetzt. Zunächst drehen wir den Stellwiderstand P1 auf Minimum (s an h) und schließen die Batterie an. Dann wird der Schleifer vorsichtig in Richtung n gedreht und dabei die Leuchtdiode beobachtet. Wir erreichen den Blinkensatz und drehen noch etwas weiter. Es zeigt sich, daß LED1 nun ständig leuchtet. Das wollen wir aber nicht, und so drehen wir etwas zurück, bis es wieder hübsch blinkt. Wie kommt dieses Verhalten zustande? Von Minus aus gesehen erhält T1 über den Spannungsteiler aus $R1$ und P1 Basis-Emitter-Spannung. Schon mit einem kleinen Teil von P1 wird die Basis-Emitter-Schwellenspannung erreicht, und T1 beginnt zu leiten. Dreht man nun weiter, bleibt T1 ständig leitend, und mit Blinken wird nichts. Also nur so weit drehen,

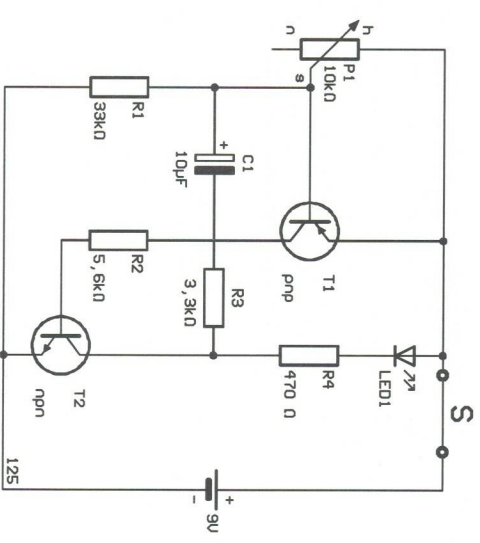


Bild 125. Komplementärblinker mit Energiespareffekt: Temperatur- und Spannungsabhängigkeit lassen sich sinnvoll nutzen!

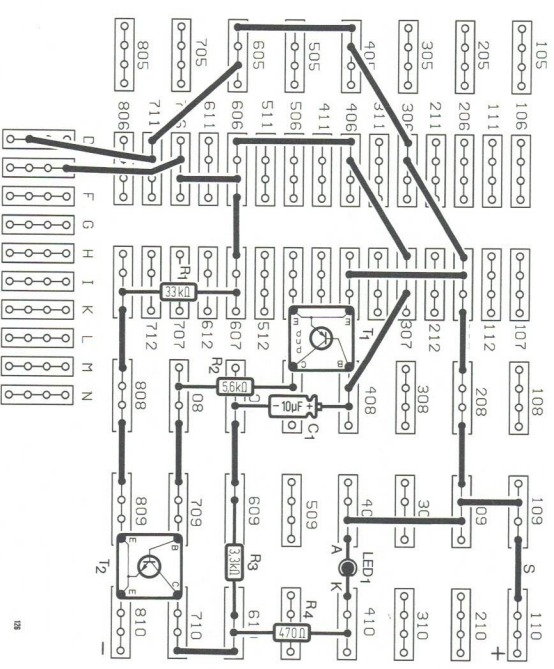


Bild 126. Aufbau zu Bild 125.

daß es gerade losgeht. Den Rest übernimmt die „Dynamik“ der Schaltung. Denn: Von T1 erhält nun T2 Basisstrom und beginnt ebenfalls zu leiten. Dadurch entsteht sowohl für das RC-Glied $R3, C1$ als auch für LED1 ein Strompfad nach Minus. Der Strom durch das RC-Glied läßt T1 stärker leiten, so

daß T2 schnell in die Sättigung gerät. Die LED leuchtet also bereits kurz nach Leuchteinsatz hell. Je nach seiner Kapazität und der Größe des Reihenwiderstands lädt sich C1 nun durch den Basisstrom von T1 auf, so daß dieser Strom laufend kleiner wird.

Sobald T2 auf diese Weise den Sättigungsbereich verläßt, steigt seine Kollektorspannung wieder schnell an und trägt dazu bei, daß der Strom durch das RC-Glied nicht nur zu Null wird, sondern anschließend die Richtung wechselt. T2 sperrt, und LED1 verlischt. Der relativ kleine Strom, mit dem sich nun C1 über LED1 entlädt, ergibt höchstens im Dunkeln einen schwachen Lichteffekt. Der Kondensator C1, vorher bei 9 V Batteriespannung auf fast 8 V aufgeladen (begrenzt durch Sättigungsspannung von T2 und Basis-Emitterspannung von T1), entlädt sich über P1, LED1, R4 und R3. Solange der Entladestrom fließt, erzeugt er über P1 eine Sperrspannung für die Basis von T1. Nach Abklingen dieses Stroms stellen sich am Spannungsteiler aus P1 und R1 wieder die Startverhältnisse ein, und der nächste Blinkzyklus beginnt.

89 Wir schließen nacheinander den Blinker an eine frische und an eine schon ziemlich verbrauchte Batterie an. Es zeigt sich: Hat man die Schaltung mit der einen Batterie zum Blinken gebracht, tut sie das mit der anderen höchstwahrscheinlich nicht. Wir müssen neu justieren.

Das heißt aber: Die Funktion unseres Blinkers hängt von der Batteriespannung ab! Dieses Verhalten erscheint zunächst nachteilig. Doch ein guter Techniker wirkt bisweilen wie ein Inverter – er dreht negative Wirkungen ins Positive.

90 Nutzen wir also den Blinker einfach zur Spannungsanzeige! Den gewünschten Punkt stellt man an P1 bei Sollspannung ein. Sinkt die Spannung, hört das Blinken auf. Über die Frage, wie sich dieses „Nicht-Signal“ auswerten läßt, mag jeder selbst nachdenken. (Anregungen gibt's am Ende dieses Abschnittes.) Umgekehrt kann die Schaltung damit auch zur Ladekontrolle von Akkumulatoren eingesetzt werden: Blinkt es, ist die Lade-Schlussspannung erreicht.

91 Bei richtig justierter Blinkerschaltung erwärmen wir einen oder beide Transistoren, z. B. mit einem Fön. Wir stellen fest: Die Blinkfunktion wird auch von der Temperatur beeinflusst.

Ursache dieses Effekts ist vor allem die Temperaturabhängigkeit von Basis-Emitter-Spannung und Stromverstärkung. Doch auch diese Not kann zur Tugend invertiert werden: Indem wir z. B. den pnp-Transistor auf ein Bauelement kleben, das sich nicht zu stark erwärmen soll. Tritt dieser Fall ein, blinkt unsere Schaltung.

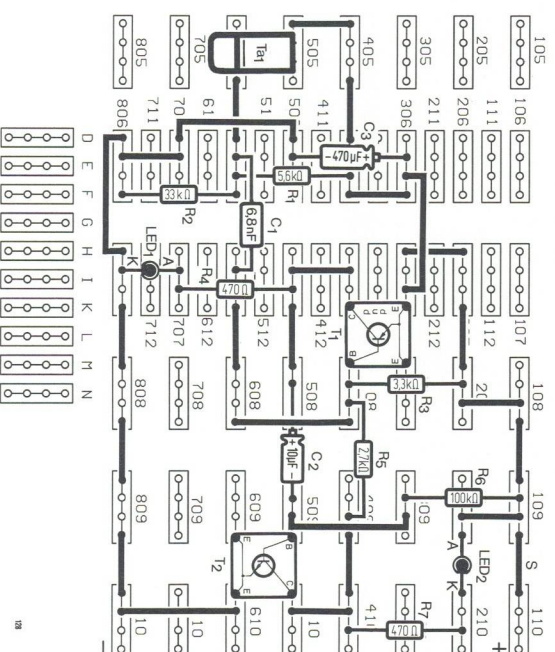


Bild 128. Aufbau zu Bild 127.

92 Wir wechseln C1 gegen einen 6,8-nF-Kondensator und schließen statt LED1 den Lautsprecher unseres Experimentierkastens an.

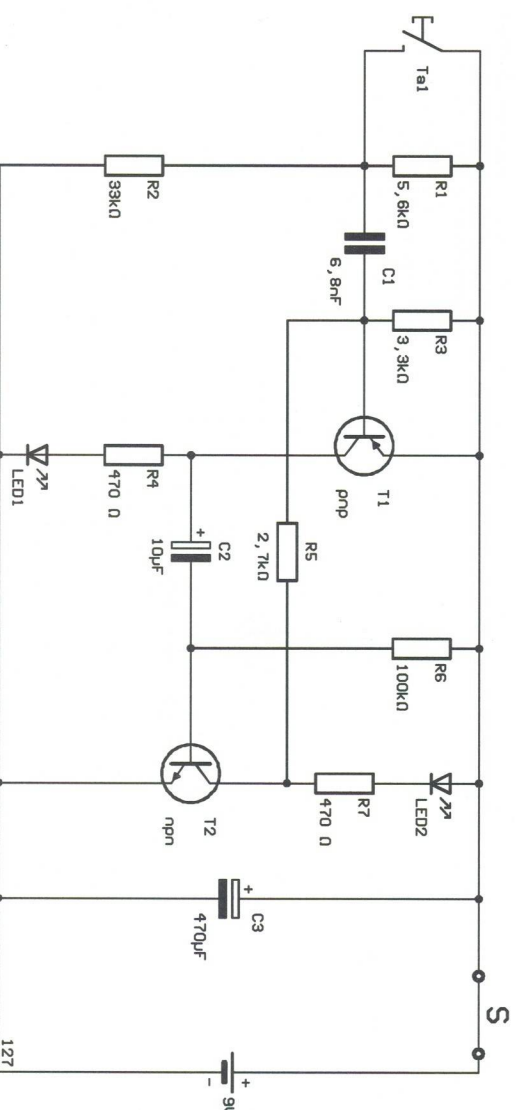


Bild 127. Komplementäres Monoflop: Bei Tastendruck sperren beide Transistoren. Zeitbestimmend sind R6 und C2.

Anschließend drehen wir wieder langsam an P1. Was schon fast zu erwarten war, tritt ein: Unser Komplementärblinker zum Tongenerator. Damit ergeben sich aber in den genannten Beispielen neue Möglichkeiten für die Signalisierung von Spannung und Temperatur!

Monostabil in komplementär

Eine monostabile Kippstufe ist gewissermaßen ein nichtfertig-gewordener astabiler Multivibrator. Nach dem Anstoßen führt er eine einzige Schwingung aus, dann wartet er wieder. Man kann ein solches „Monoflop“ u. a. gut als Zeitschalter einsetzen.

93 Nach Aufbau der Schaltung gemäß Bild 127 schließen wir die Batterie an und stellen fest, daß die beiden Leuchtdioden ständig leuchten. Nun drücken wir den Taster Ta1. Es zeigt sich, daß beide Leuchtdioden kurz verlöschen, dann aber wieder leuchten. Die Schaltung verhält sich damit tatsächlich wie ein Monoflop.

Der Taster kann beliebig lange gedrückt werden, ohne daß es die Dunkelzeit beeinflusst. Das liegt an der dynamischen Ankopplung über den Kondensator C1. Wir hatten diesen Trick schon in Abschnitt 9 kennengelernt.

94 Wir vergrößern C2 von 10 µF über 100 µF auf 470 µF. Es zeigt sich, daß die Dunkelzeit proportional zur Größe von C2 steigt – von rund 1 s auf etwa 50 s.

Wir betrachten kurz die Funktionsweise der Schaltung: Die Leuchtdioden sind die Zustandsanzeigen. Im Ruhezustand leuchten beide, denn T2 ist durch den an Plus liegenden Basiswiderstand R_6 genügend weit durchgeschaltet. Damit erhält auch T1 ausreichend Basisstrom und LED1 in seinem Kollektorkreis leuchtet. Die Schaltung enthält eine Art „Zünder“ in Form des Kondensators C1 an der Basis von T1. Er ist bei 9 V Batteriespannung auf etwa 1 V aufgeladen. Diese Spannung gelangt beim Schließen der Taste als kurzzeitige Sperrspannung an die Basis von T1. Die positiv geladene Seite von C2 vor der Basis von T2 wird dadurch von Plus getrennt und liegt damit plötzlich in Reihe mit LED1 und R_4 als „Sperrbatterie“ an der Basis-Emitter-Strecke von T2. Die Entladung von C2 dauert deutlich länger. Anfangs ist C2 auf etwa 8 V aufgeladen. LED1 verringert die für die Basis-Emitter-Strecke von T2 wirksame Sperrspannung auf gerade noch zulässige 6 V (Richtwert). Während die Auslösung durch den „Zünder“ an T1 nun längst abgeklungen ist, bleibt T2 durch den wesentlich langsameren Ladungsausgleich vorerst weiterhin gesperrt, so daß auch T1 noch nicht wieder leiten kann. Über den an Plus liegenden Basiswiderstand von T2 (100 k Ω) baut nun ein kleiner Strom die Sperrspannung an T2 langsam ab. Ist der positive Wert von 0,6 V erreicht, beginnt T2 wieder zu leiten. Damit leitet auch T1, was wiederum T2 rasch ganz durchschaltet – der Wartezustand ist wieder hergestellt, in dem beide Dioden leuchten.

95

Näher an praktische Einsatzfälle führt es, wenn die Schaltung gemäß Bild 129 durch T3 erweitert wird. Wird darin T1 gedreht, leuchtet LED2 für die Monofloppetzeit, während LED1 als „Bereitschaftsanzeige“ in diesem Zeitraum dunkel ist.

Die Schaltung nach Bild 129 ist als Empfehlung für Insider gedacht. Dazu folgende Erklärung: Mit D1, D2 und LED3 werden die zusätzliche Stufe und das Monoflop entkoppelt. Ohne sie würde T1 über den Basis-Emitter-Pfad von T3 ständig durchgeschaltet. Wie man sieht, kann auch mit einer Leuchtdiode entkoppelt werden. Trotz der Flußspannung von D2 sperrt dadurch T2 sicher den zusätzlichen Transistor. Dieser wirkt als Inverter. Dadurch leuchtet LED2 nur in der Monoflopzeit.

Die Schaltung ist nicht ganz problemfrei. Wiederum für Insider: In Schaltungen mit mehreren Transistoren können leicht Selbstregenererscheinungen auftreten. In unserem Falle wird das Monoflop dadurch zum astabilen Multivibrator – es flimmert oder blinkt ständig! Ursache ist die Verkopplung zwischen Ausgang und Eingang über den Innenwiderstand der Batterie. Daher für diesen Versuch frische Batterie oder KOS-MOS Netzgerät X benutzen!

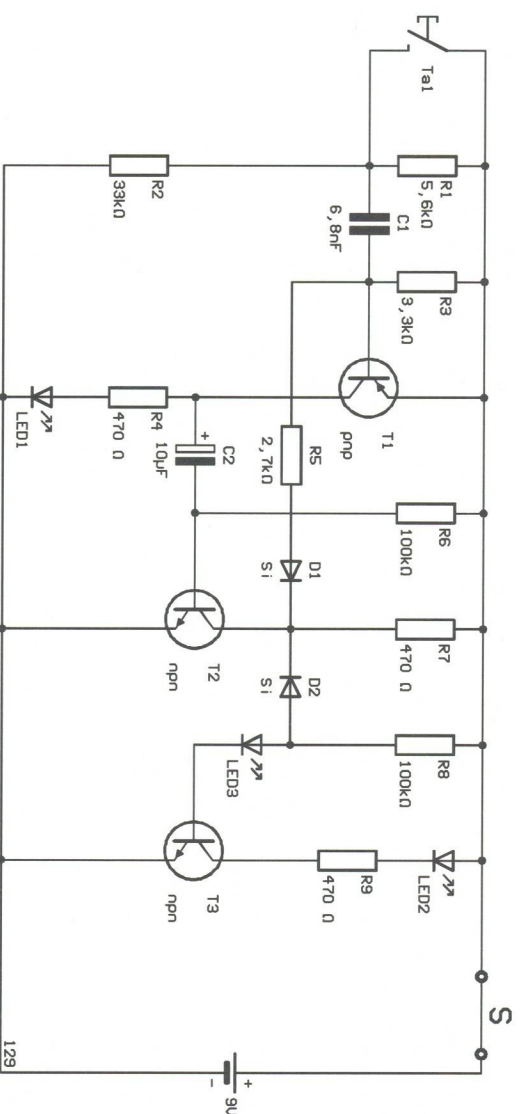


Bild 129. Treppenlichtmodell: Mit Dioden gekoppelte Schaltungsstufe reagiert auf Tastendruck mit Zeitlicht.

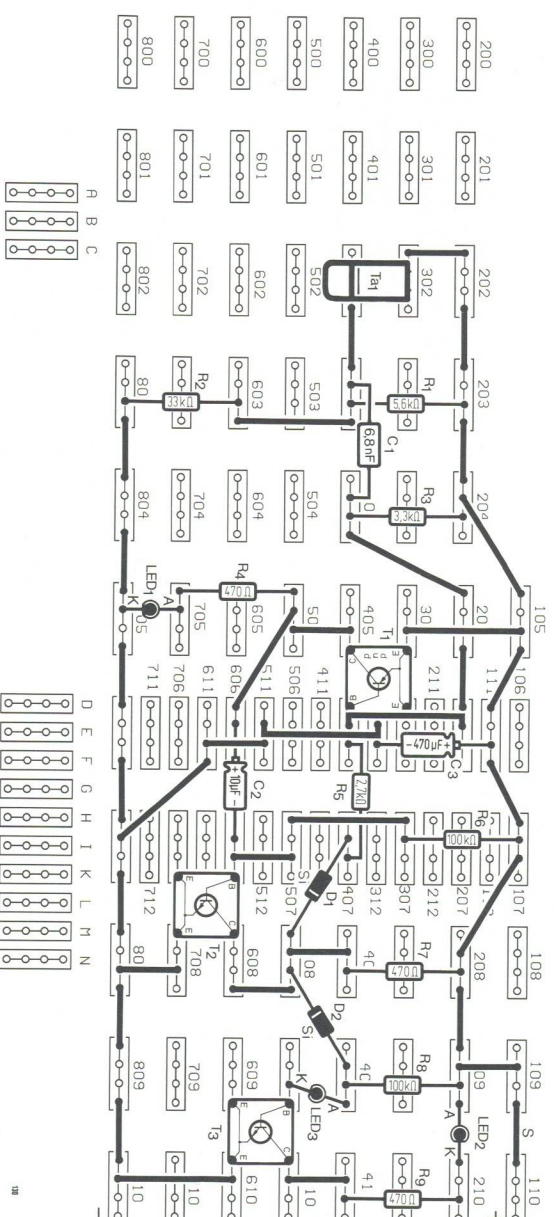


Bild 130. Aufbau zu Bild 129.

pnp-Darlington

Eine Darlington-Schaltung aus zwei npn-Transistoren haben wir schon in Abschnitt 8 kennengelernt. Das Prinzip „B1 · B2 = Bges“ funktioniert mit npn- wie mit pnp-Transistoren und so- gar in komplementärer Verbindung. Man muß nur die jeweils zutreffende Batteriepolung beachten. Das heißt: Plus am Emittter bei pnp, Plus am Kollektor bei npn (Bild 131).

96 Der Aufbau nach Bild 132 liefert den Beweis. Wir bilden mit einer Fingerruppe (sie kann trocken sein) eine hochtrockne Brücke von F1 (A, Steckeder 406) nach Minus (B, Steckeder 506). Die Leuchtdiode zeigt uns, daß jetzt Strom fließt. Finger wegnemen: Sie verlischt. Der Eingang an F1 wirkt als Sensor.

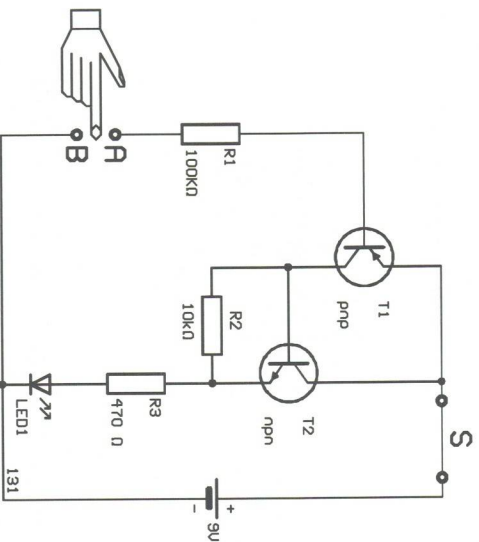


Bild 131. Komplementär-Darlington: Fast zu empfindlich.

97 Nun wird R_1 durch den 1,5-M Ω -Widerstand des Experimentierkastens ausgetauscht. Die Wiederholung des Tests zeigt: Es funktioniert noch immer. Selbst dann, wenn wir alle Widerstände aus unserem Kasten hinter-einanderschalten, bringen wir LED1 mit dem Finger zum Leuchten.

98 Wer über das KOSMOS Netzgerät X verfügt, setzt es jetzt statt der Batterie ein. (Richtige Polung beachten: Rot ist Plus!) Wiederholt man den Fingertest, so genügt es jetzt, nur noch die F1-Seite zu berühren!

Wir entfernen den Widerstand R_2 und schließen die „Antenne“ aus unseren Geisterversuchen an

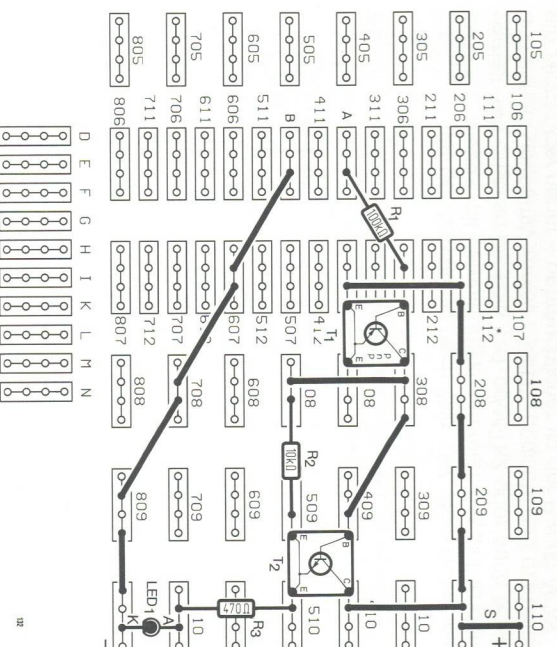


Bild 132. Aufbau zu Bild 131.

R1 an. Nachdem wir der Antenne ein durch Reiben aufgeladenes Lineal, flackert LED1. Die Schaltung reagiert nun also auch auf elektrische Felder.

100 Die Batterie im vorigen Versuch wird nun wieder – so vorhanden – durch das Netzgerät ersetzt. Dann legen wir ein Stückchen Papier oder eine andere Isolierfolie auf den Sensorkontakt. Durch dieses „Dielektrikum“ hindurch schalten wir mit dem Finger wieder die Leuchtdiode ein!

Im Unterschied zu unseren ersten Geisterversuchen können wir all das nun auch erklären. Unsere Schaltung verstärkt sehr hoch und ist darum sehr empfindlich. Mit Netzgerät haben wir neue Varianten von Opas Brummetest erlebt – diesmal optisch. Das heißt, wir haben per Kondensator (Papier als Dielektrikum) mit dem Finger Netzbrummspannung eingespeist. Ihre negativen Anteile haben T1 durchgeschaltet. Auch beim Finger als Kontaktbrücke (Versuche mit Batterie) kommt der Basisstrom für den pnp-Typ T1 „von unten“, von Minus her. Der um den Stromverstärkungsfaktor größere Kollektorstrom steuert als Basisstrom den npn-Transistor T2. Sein Emittor ist Ausgang. Dieser Schaltungsteil stellt also wieder eine Kollektorstufe dar. Der Strom im Ausgangskreis ist um den Stromverstärkungsfaktor von T2 größer als dessen Basisstrom. Beispiel für $B1 = B2 = 400$: Für 16 mA Ausgangs-

12. Transistorlogik

Digitaltechnik und Computer gab es schon vor der ersten integrierten Schaltung. (Frühe Rechenmaschinen arbeiteten sogar noch mit Relais.) Der Umgang mit der zweitwertigen, der binären Logik läßt sich darum auch mit einfachen Transistorschaltungen üben. Und für manches kleine Problem reicht eine solche Schaltung auch heute noch. In Abschnitt 8 lernten wir bereits den Inverter kennen, und in Abschnitt 9 haben wir uns mit weiteren Grundschaltungen der Digitaltechnik beschäftigt.

An die logischen Regeln, nach denen Computer funktionieren, muß man sich erst gewöhnen. In einem solchen Datenverarbeitungswunder werden zweitwertige Signale verarbeitet. Dazu braucht man sogenannte *Gatter*, die auf Ja bzw. Nein am Eingang eindeutig mit Ja oder Nein am Ausgang antworten. Wir wählen für die „Ja“ – Eingabe das Schließen eines Tasters, mit dem Plus an den jeweiligen Eingang geschaltet wird. Am Ausgang soll daraufhin eine Leuchtlampe bei „Ja“ aufleuchten. Die Signale werden an mehrere Eingänge gelegt. Das Ergebnis erscheint am Ausgang. Es hängt davon ab, um welche Art Gatter es sich handelt. Diese Gatter haben englische Bezeichnungen.

Da gibt es das *AND*: Ja UND Ja gleich Ja. Also: Beide Eingänge müssen Ja erhalten, damit am Ausgang Ja erscheint. Weiterhin das *OR*: Ja ODER Ja gleich Ja. Spannender wird es, wenn die Schaltung gleich noch alles umdreht, wie der Inverter aus Abschnitt 8. So entstehen *NAND* (NOT AND) und *NOR* (NOT OR). Beim *NAND*: Ja UND Ja gleich NICHT Ja (also Nein); beim *NOR*: Ja ODER Ja gleich NICHT Ja (also wieder Nein). Ob das klar ist, soll jetzt praktisch überprüft werden.

101 Mit der Schaltung nach Bild 133 bauen wir uns ein Gatter mit zwei Eingängen. Leuchtet LED1, soll das „Ja“ am Ausgang heißen. An den beiden Eingängen liegt zunächst kein Signal – das heißt Nein. Die Widerstände R_1 und R_2 „ziehen“ die Eingänge auf Null (Minus). Wir drücken nun Ta1 (das soll Ja am Eingang heißen) und erwarten ein Ergebnis. Doch die Schaltung will noch nicht. Wir lassen Ta1 los und drücken statt dessen Ta2. Das gleiche enttäuschende Ergebnis. Was soll's – drücken wir einfach beide Taster! Ge-schafft – LED1 hat aufgegeben. Egal, welchen Taster (oder beide) wir nun loslassen – sofort geht sie wieder an.

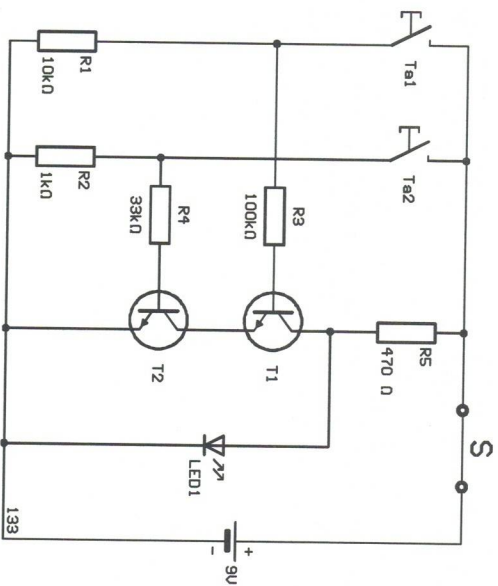


Bild 133. Transistor-NAND: LED1 leuchtet NICHT, sobald Ta1 UND Ta2 gedrückt werden.

NAND-Gatter			
Ta1	Ta2	LED1	
0	0	1	
1	0	1	
0	1	1	
1	1	0	

Bild 133a. Wahrheitstabelle zum NAND-Gatter

Überdenken wir die einzelnen Testschritte, so zeigt sich: Nur, wenn am oberen *und* am unteren Eingang „Ja“ angelegt wird (positive Spannung – man spricht daher auch von *positiver Logik*), sagt die Schaltung Nein. (Ausgang schaltet von hoher Spannung – LED leuchtet – auf niedrige, d. h., LED geht aus.) Ana. Das also ist ein NAND in Transistortechnik.

102 Mit dem pnp-Transistor erweitern wir unser NAND gemäß Bild 135. Wir stellen fest: LED1 ist jetzt dunkel, wenn die Taster offen sind. Wir drücken wieder erst auf einen und dann auf beide und erkennen: Alles ist umgekehrt zum vorigen Versuch. Ja und Ja gleich Ja! Damit haben wir ein *Und*- bzw. *AND-Glied* mit zwei Eingängen gebaut.

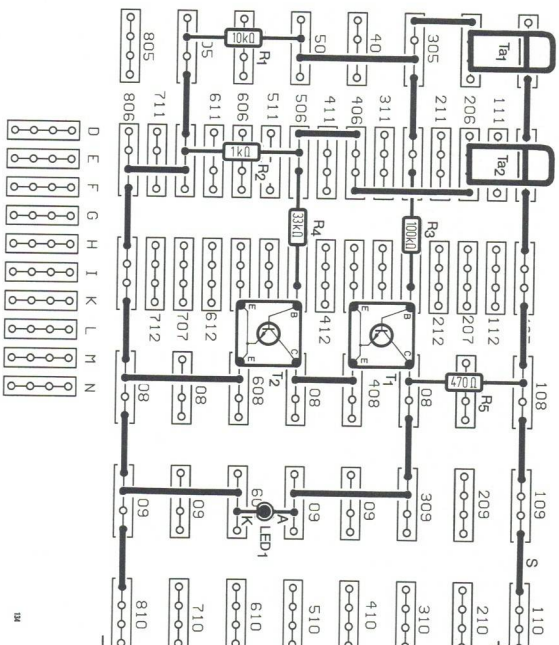


Bild 134. Aufbau zu Bild 133.

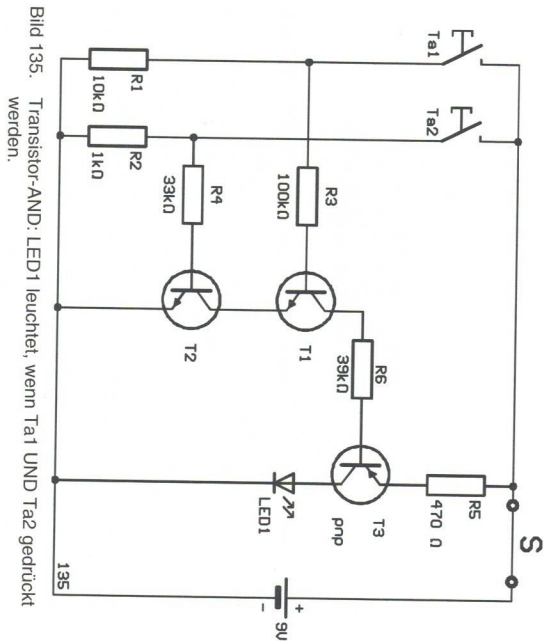


Bild 135. Transistor-AND: LED1 leuchtet, wenn Ta1 UND Ta2 gedrückt werden.

103 Mit der Schaltung nach Bild 137 stecken wir ein Gatter mit Verneinung zusammen, das sich anders verhält: Wir drücken beliebig Ta1 *oder* Ta2 oder auch beide und sehen: Jedermal verlischt LED1. Logisch, daß man dies ein *Nicht-Oder* nennt – gebräuchlicher ist der Begriff *NOR*.

AND-Gatter			
Ta1	Ta2	LED1	
0	0	0	
1	0	0	
0	1	0	
1	1	1	

Bild 135a. Wahrheitstabelle zum AND-Gatter

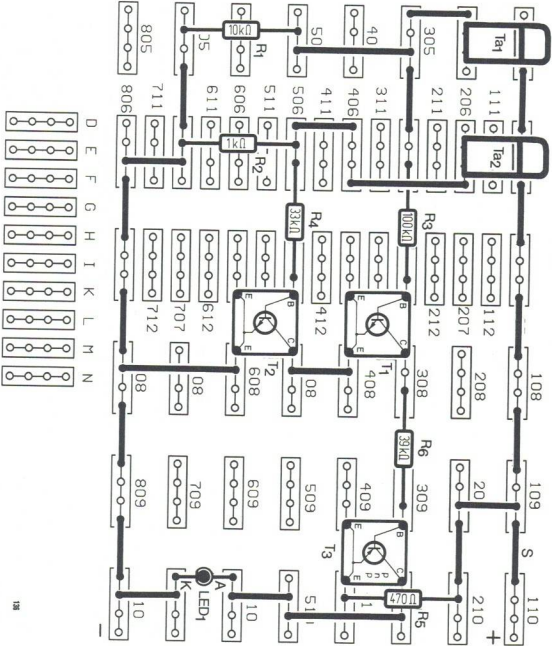


Bild 136. Aufbau zu Bild 135.

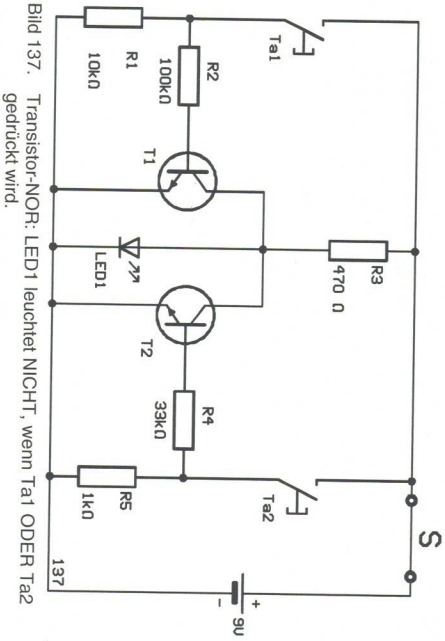


Bild 137. Transistor-NOR: LED1 leuchtet NICHT, wenn Ta1 ODER Ta2 gedrückt wird.

NOR-Gatter

Ta1	Ta2	LED1
0	0	1
1	0	0
0	1	0
1	1	0

Bild 137a. Wahrheitstabelle zum NOR-Gatter

104

Durch unseren pnp-Transistor erweitern wir auch diese Schaltung (Bild 139). Bei Anschluß der Batterie bleibt LED1 zunächst dunkel. Drückt man nun Ta1 oder Ta2 oder beide, leuchtet sie auf. Damit verfügen wir nun auch über ein *Oder-* bzw. *OR-Gatter*.

Alle diese Schaltungen gibt es inzwischen in unvorstellbaren Stückzahlen, zu Hunderttausenden auf Siliziumchips integriert. Ein elektronischer Mikrokosmos, in dem die unbestechliche Logik regiert und sonst nichts. Es wird Zeit, daß auch wir integrierte Schaltungen in unsere Experimente einbeziehen.

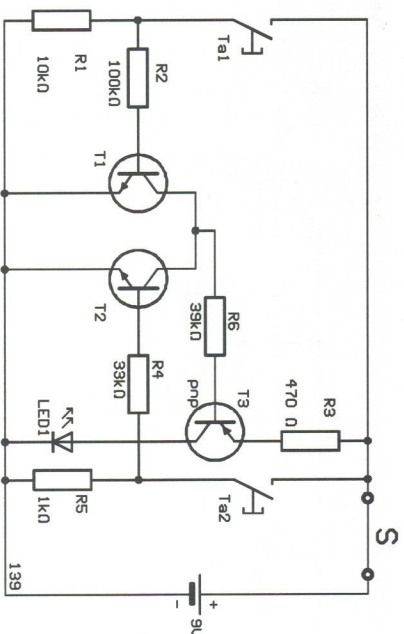


Bild 139. Transistor-OR: LED1 leuchtet, wenn Ta1 ODER Ta2 gedrückt wird.

OR-Gatter

Ta1	Ta2	LED1
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

Bild 139a. Wahrheitstabelle zum OR-Gatter

13. Von der Spannung zur Leistung: AMP TBA 820

Unser Experimentierkasten verfügt über ein kleines Krattpaket – einen integrierten Verstärkerbaustein, an den ein Lautsprecher angeschlossen werden kann. Auf dem steckbaren Modul befinden sich noch einige für die Funktion nötige Bauelemente. Alles zusammen betrachten wir von den fünf Steckerstiften her als eine Einheit mit dem entsprechenden Symbol.

Verstärkt alles, was sich hören läßt

Das Symbol für solche Verstärker (engl. amplifier, darum AMP) ist ein Dreieck. Wir begegnen ihm in vielen Schaltungen. Links liegen die Eingänge, rechts ist der Ausgang; oben Plus-, unten Minusanschluß für die Batterie. Aber wieso die Eingänge? Wozu das gut ist, werden wir im Abschnitt über *Operationsverstärker* noch näher erfahren. Ein spezieller „OP“ ist auch unser AMP. Für seine Eingänge gibt es eine klare Funktionsteilung: Was verstärkt werden soll, kommt an Eingang E. Um *wieviel* es verstärkt wird, bestimmen wir durch die Außenbeschaltung am Eingang V. Dieser spezielle AMP ist nämlich innen kräftig gegengekoppelt. Das mindert Verzerrungen und hält die Verstärkung in vernünftigen Grenzen. Der Verstärker wird dadurch berechenbar.

Die höchste Verstärkung (und dabei auch erhebliches Zittern und Klirren im Lautsprecher) ergibt sich, wenn Eingang V wechsellspannungsmäßig über einen Elko direkt an Minus gelegt wird. Etwa bis 470 Ω aufwärts in Reihe zu diesem Kondensator ergibt sich mit wachsendem *F* sinkende Verstärkung. Je kleiner also *F*, um so mehr wird verstärkt, und um so stärker verzerrt der AMP. Probiert es selbst in den folgenden Beispielen!

105

Mit dem Experiment nach Bild 141 zeigt der AMP, was er 'drauf hat. Zunächst mit möglichst frischer Batterie. Im Lautsprecher sind sonderbare Geräusche zu hören: Pfeifen, Brummen, Knacken, was eben so als elektronisches Störfeld im Raum ist. Geisterstimmen oder Sphären-

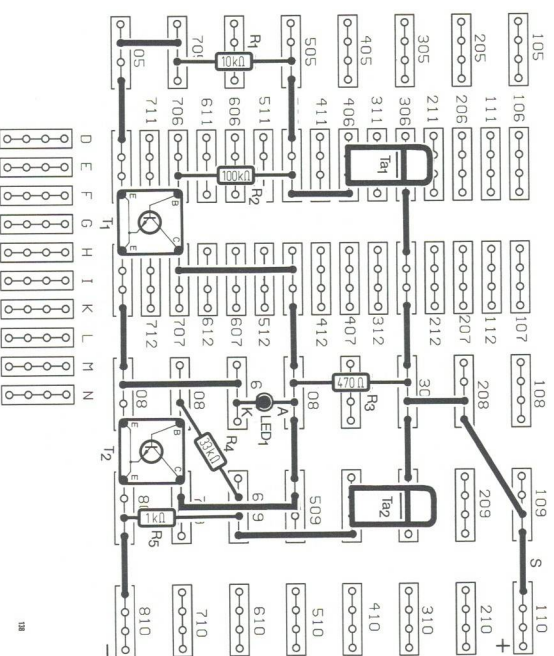


Bild 138. Aufbau zu Bild 137

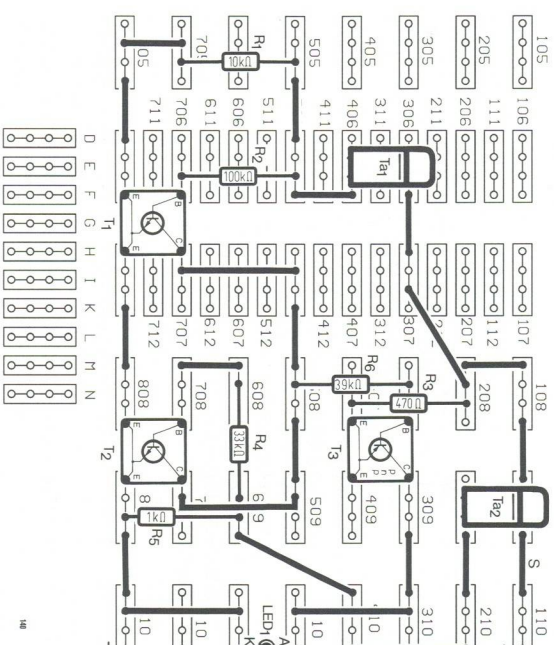


Bild 140. Aufbau zu Bild 139

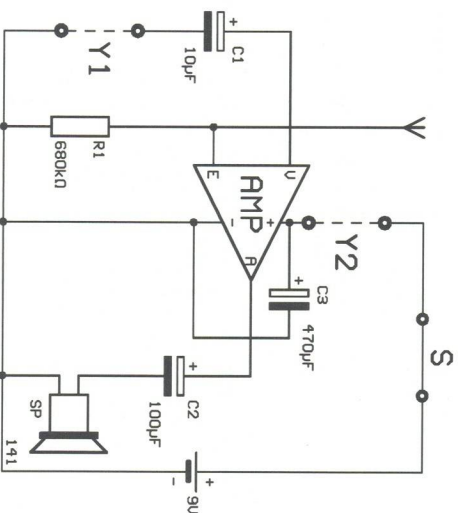


Bild 141. Läßt Geister sprechen und findet Netzleitungen unter Putz: AMP – empfindlicher integrierter Leistungsverstärker, mit C1 auf maximale Verstärkung eingestellt.

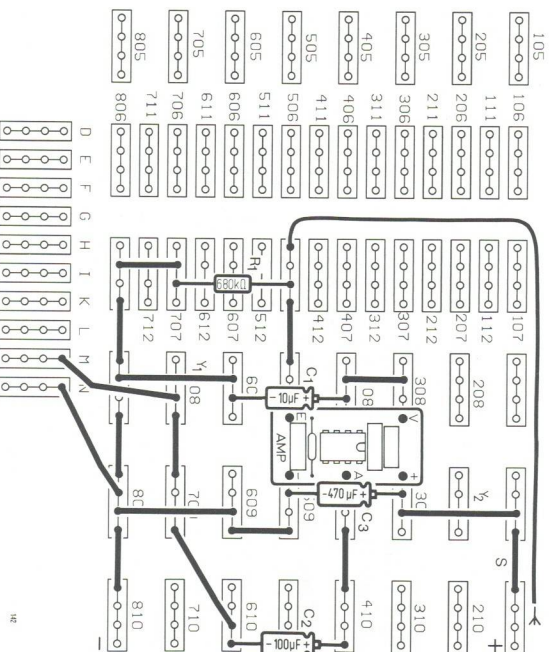


Bild 142. Aufbau zu Bild 141.

musik kann daraus werden, wenn wir den schon bei der Geisterbeschworung benutzten Antennendraht anfassen. Richtig schön klingt das nicht.

Wir ziehen nun *die Brücke Y1* raus und stellen fest: Alles wird ziemlich leise. Das ist ja auch der Extremwert der Verstärkungsminderung: Unendlich großer Widerstand in Reihe zu C1! Jetzt können wir, wie oben angedeutet, mit Widerständen zwischen 470 Ω und 1,2 Ω die Verstärkung wieder erhöhen. Die Widerstände werden anstatt der Brücke Y1 eingesetzt.

106

Nun ist eine ältere Batterie an der Reihe. Sie macht uns kein Vergnügen: Der Lautsprecher knurrt und laut uns an wie ein alter Hofhund. Darum wechseln wir wieder auf die neue Batterie, stecken aber zwischen Plus Batterie und Plus Schaltung einen Widerstand von 100 Ω , anstelle der Brücke Y2, ein. Was hören wir? Ähnlich Unfreudliches wie eben. Das Jaulen oder Knurren ist also offenbar eine Wirkung des hohen Innenwiderstandes der alten Batterie – und der hohen Verstärkung. Das können wir durch Erhöhen des Reihewiderstandes zu C1 überprüfen. Der Fachmann sagt, der Verstärker erregt sich selbst – er schwingt. Die genauen Effekte hängen vom Zustand der Batterie ab. Bei frischer Batterie und dem künstlichen Innenwiderstand von 100 Ω hilft aber noch dies: Ein Kondensator von 470 μF (wir haben einen im Kasten) direkt zwischen Plus und Minus am AMP. Und vielleicht muß auch der Widerstand vor Anschluß V vergrößert werden. Solche Schwierigkeiten gehören zum Alltag des Elektroniklers.

107

Sofern vorhanden, wechseln wir nun zum KOS-MOS Netzgerät über. Das spart Batterien. Kann sein, daß der Lautsprecher nun erst einmal zornig brummt. Wir erinnern uns an Opas Brummtest – offenbar fängt unser Aufbau kapazitiv Netzbrumm ein. Dagegen hilft in der Praxis das *Abschirmen*, d. h., die Schaltung wird in ein Metallgehäuse eingeschlossen – wie etwa beim Autoradio.

Wir halten fest: Sowohl zu hohe Verstärkung wie auch ein zu großer Innenwiderstand der Spannungsquelle können bewirken, daß etwas nicht so funktioniert wie auf dem Papier. Da hilft: Verstärkung verringern, Innenwiderstand mit großem Kondensator für Wechselspannung verkleinern, Schaltung gegen Störfelder von außen abschirmen.

Wunschöne

Es gibt Mittel, am Eingang eines Verstärkers Erwünschtes von Unerwünschtem zu trennen, das die Antenne aufnimmt. Goldsucher nehmen ein Sieb: Sand und Wasser rutschen durch, die größeren Sachen bleiben. Die kann man dann in Ruhe nach der Farbe sortieren.

Auch zum Radiohören braucht man ein Sieb. Es besteht aus Spule und Kondensator und heißt *Schwingkreis*. Jeder Rundfunksender hat seine bestimmte Frequenz. Kennt man sie, können passende Werte für Spule und Kondensator errechnet werden. Im Experimentierkasten findet Ihr ein *Mittelwellenmodul* (L-Modul) mit einer geschlittenen Spule und einen passenden *Drehkondensator*, im Technikfargaron einfach *Drehko* genannt. Mit ihm, parallel zur Spule gelegt, kann man auf Sender-

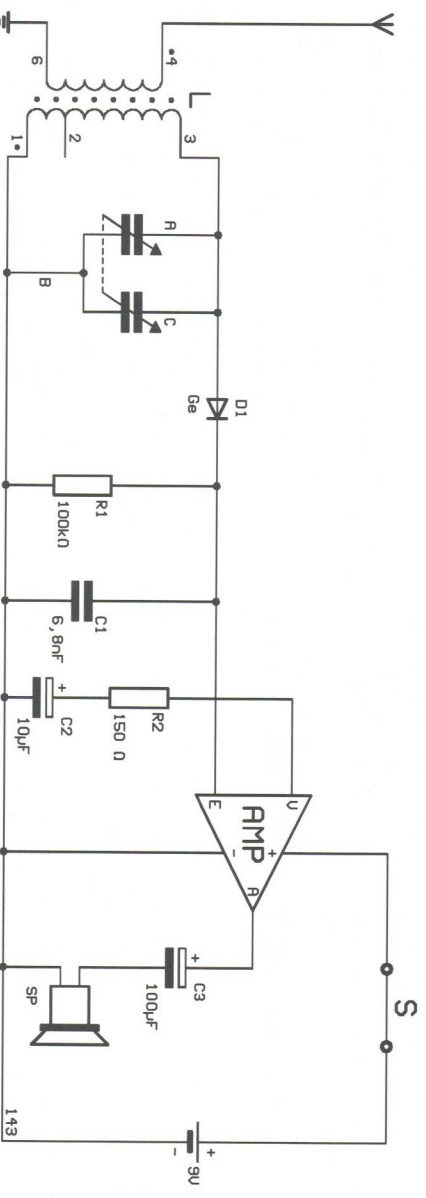


Bild 143. AMP macht Detektor salonfähig: Einfachst-Radio mit Abstimmmöglichkeit.

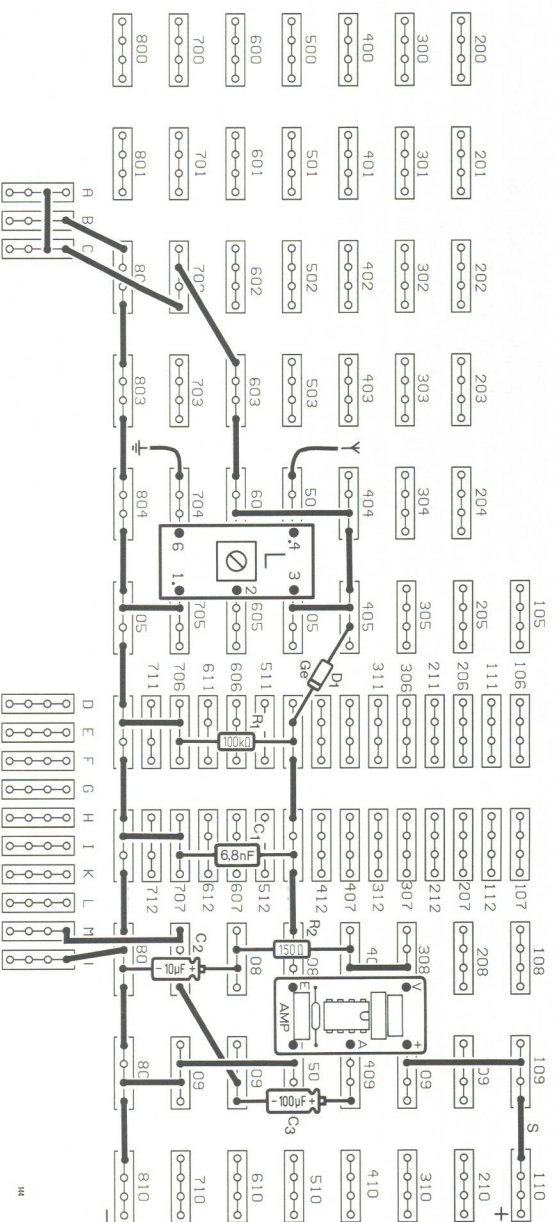


Bild 144. Aufbau zu Bild 143.

suche gehen. Stimmt die Senderfrequenz mit der gerade eingestellten *Resonanzfrequenz* unseres Schwingkreises überein, hebt sich dieser Sender deutlich aus allem anderen heraus, was sonst noch in der Luft ist. Das so am Schwingkreis erscheinende Signal kann zu unserer Freude bis zur Wiedergabe von Sprache und Musik weiterverarbeitet werden.

108 Wir stecken dazu die Schaltung nach Bild 143 zusammen und drehen einmal langsam den Drehko von Anschlag zu Anschlag. Was dabei zu hören ist, hängt von vielen Faktoren ab. Ist ein Mittelwellensender in der Nähe, genügt als Antenne wieder unser Drahtstückchen. Wohnen wir jedoch weiter weg, braucht es schon etwas mehr Draht. Oft kommt man aber noch mit einer *Zimmerantenne* aus: Einige Meter Draht so hoch wie möglich anbringen. Und die *Erde* nicht vergessen. Das tut meist auch schon ein Stück Draht, das auf dem Fußboden verlegt wird. Besser geht's mit Wasserleitung oder Zentralheizungskörper. Probiert es aus!

Überhaupt kann die Wellenjagd ein abendfüllendes Programm werden. Wohl auf keinem anderen Gebiet ist früher so viel gebastelt und probiert worden wie gerade auf diesem. Weiter unten findet Ihr dazu noch eine Menge Stoff! Wieso das alles funktioniert, darüber sollten wir uns jedoch rasch noch etwas informieren.

Kurzer Ausflug ins hochfrequente Ländle

In Bild 143 erkennt der Fachmann die moderne Variante der Urform eines Radios: Schwingkreis plus HF-Gleichrichterdiode – das ist der legendäre Rundfunk“ unter die Leute brachte. Allerdings zunächst ohne die Hilfe eines Verstärkers wie unser AMP und mit dem Geduldspiel, auf einem Bleisulfidkristall o. ä. mit einer Drahtspitze den besten Punkt zu finden. Um die Botschaft vom Funkhaus in die gute Stube zu bringen, benutzt man hochfrequente Schwingungen. Eine typische Mittelwellenfrequenz ist z. B. 1 MHz (eine Million Schwingungen in der Sekunde). Solche schnellen Schwingungen haben

eine interessante Eigenschaft: Die Wechselfelder aus elektrischen und magnetischen Feldlinien vermögen sich von dem Metallmast zu lösen, den man Sendeantenne nennt. Sie breiten sich kreisförmig um ihn herum aus, so, als ob jemand einen Stein in ruhiges Wasser geworfen hätte. Das geschieht mit Lichtgeschwindigkeit: 300.000 km je Sekunde. Zwischen zwei „Wellenbergen“ einer solchen HF-Schwingung mißt man darum bei 1 MHz eine Entfernung von 300 m. Das ist die *Wellenlänge*, die mit dem griechischen Buchstaben Lambda benannt wird. Für einen guten Wirkungsgrad beim Senden hat der Sendemast je nach Wellenlänge ebenfalls eine bestimmte Länge. Darum sind diese Gebilde so hoch.

Das Geheimnis des Detektors

Eine Million Schwingungen je Sekunde hört kein Mensch. Spätestens bei etwa 16.000 Hz ist bei unseren Ohren Schluß. Die hochfrequenten Wellen sind auch nur das Transportmittel, mit dem man erst mal in den freien Raum gelangt, weg vom Draht. Vorher werden sie mit dem „beladen“, *moduliert*,

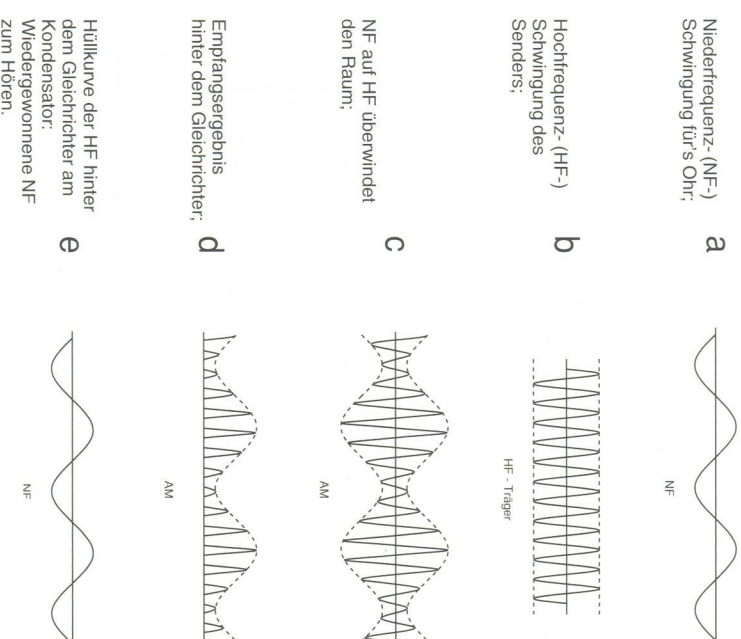


Bild 145. Erste Lektion in Rundfunktechnik:

was wir hören können. Bei Kurz-, Mittel- und Langwelle geschieht das durch *Amplitudenmodulation, AM*. Das heißt: Die Schallschwingungen verändern symmetrisch die Schwingungsweite, also die Amplitude der HF-Schwingung (s. Bild 145c).

Der Detektor holt die Botschaft wieder vom hochfrequenten Träger herunter. Er ist ein Gleichrichter, d. h., er läßt Strom nur in einer Richtung durch. In unseren Radios trennt er die symmetrische Schwingung längs ihrer Nulllinie und liefert damit Halbwellen mit der Tonschwingung huckepack. Nun noch weg mit der HF, dafür sorgt ein Kondensator. Seine Ladung folgt nur den Spitzenwerten der HF, und deren „Verbindungsline“ ist (siehe Bild 145e) unsere Tonfrequenz. Auf die hat der AMP nur gewartet, und – kräftig verstärkt – liefert er sie dem Lautsprecher ab. Dieser wandelt sie in hörbare Schallwellen um, so, wie sie im Sender ins Mikrofon gelangt sind. Und praktisch in dem Augenblick, wo der Schall entstand. Man fährt ja schließlich mit Licht-Speed.

In dieser Dienstleistungsfunktion werden wir dem AMP noch oft begegnen. Aber auch mit Eigenständigem, denn er kann mehr, als einfach nur Eingangsspannungen verstärken!

14. Transistor der anderen Art: MOSFET

Das hat die Elektronik bei den bipolaren Transistoren schon immer geärgert: Keine Verstärkung ohne (wenn auch kleine) Steuerleistung; kein Kollektorstrom ohne (wenn auch oft winzigen) Basisstrom, selbst bei der Darlington-Schaltung. Doch Ströme in Halbleitern lassen sich auch anders steuern: durch elektrische Felder. Denken wir in diesem Zusammenhang an den Kondensator: Der Ladestrom fließt ja nicht wirklich durch die Isolierschicht, die Ladung der einen Seite wirkt nur auf die Ladungsträger der anderen.

Auf ähnlicher Basis hat man einst *Feldeffekttransistoren* entwickelt. Das heißt: Der Strom wird durch ein elektrisches Feld, also eine Spannung, gesteuert. Steuerstrom fließt praktisch nicht.

109

Wir überzeugen uns gleich davon, wie das geht. 146 lassen sich nette Spielchen treiben. Der Antennendraht stammt noch aus der Geisterbeschworung. Mit der Hand in seiner Nähe können wir die LED zum Leuchten bringen oder ausschalten. Wann was geschieht, ist aber nicht so recht vorhersehbar. Wandern wir mit der Steckplatte im Zimmer herum, wird's mal hell und mal dunkel. Metallgegenstände, elektrische Leitungen, sogar die lieben Mitmenschen bringen die LED durch ihre bloße Nähe zum Leuchten oder bewirken auch das Gegenteil. Chaos der elektrischen Felder ringsum!

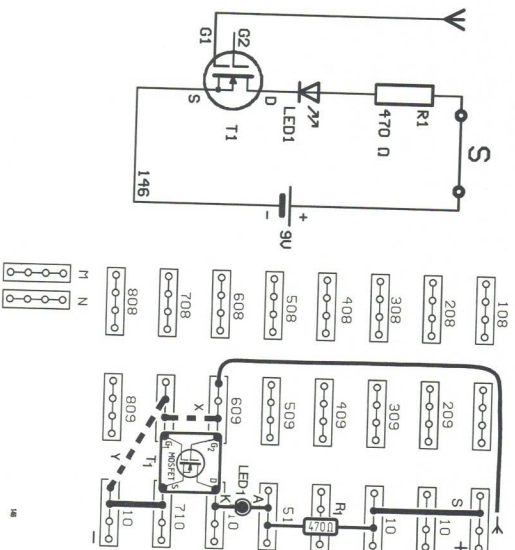


Bild 146. Störfeld-Indikator: Chaotische Anzeige, aber keine Geister.

Unser Wundertransistor hat zum Steuern einen Anschluß aus Metall, eine *Elektrode*. Sie ist durch Siliziumdioxid von einem geeignet dotierten, leitfähigen *Kanal* im Halbleiter isoliert. Das Leitvermögen dieses Kanals wird durch ein elektrisches Feld beeinflusst. Es entsteht durch die angelegte Steuerspannung. Dieser Aufbau führte zum Namen *MOSFET* (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). Je nach Aufbau und Dotierung leitet der Kanal von sich aus (im Symbol mit durchgezogener Linie dargestellt) oder erst bei entsprechender Steuerspannung (unterbrochene Linie). Der Strom fließt also nicht durch p- und n-Zonen, sondern bleibt in einem Kanal festgelegter Dotierung. Darum nennt man diese Typen auch *Unipolartransistoren*.

Die Quelle hinterm Tore ...

Die MOSFET-Anschlüsse haben andere Namen, als die von bipolaren Transistoren. Wir stellen einen vereinfachten Vergleich an:

Steueranschluß bipolar: Basis, unipolar: *Gate* (Tor); Gegenelektrode der Steuerung, „unterer“ Anschluß des Hauptkreises, bipolar: Emitter, unipolar: *Source* (Quelle); zweiter („oberer“) Hauptanschluß, bipolar: Kollektor, unipolar: *Drain* (Senke).

Man kann es auch so deuten: Emitter und Source senden die von Basis bzw. Gate gesteuerten Ladungsträger aus, Kollektor und Drain sammeln sie wieder ein bzw. lassen sie „abfließen“ (Drainage ...). Aus der Vielzahl erhältlichiger MOSFETs haben wir einen besonders interessanten in unseren Experimentierkasten auf-

genommen. Er hat sogar zwei Steuerelektroden und leitet auch bei 0 V Gate-Source-Spannung noch. Er sperrt erst bei negativer Steuerspannung. Man nennt das *Verarmungstyp*. Ähnlich heißt das Ding *n-Kanal-Dual Gate MOS-Feldeffekttransiode*, *Verarmungstyp* (Tetode, weil vier Anschlüsse). Bleiben wir also besser beim einfachen „MOSFET“. Den Prinzipaufbau unseres Typs zeigt Bild 147.

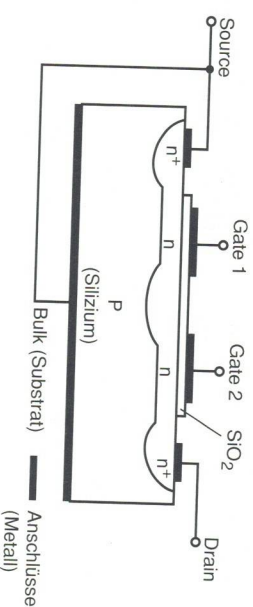


Bild 147. Dual-Gate-MOSFET: Zwei isolierte Steuerelektroden auf n-leitendem Kanal.

Doppelt sperrt besser

Die beiden Steuerelektroden erinnern an unser NAND aus Abschnitt 12: Nur, wenn beide Elektroden eine gegenüber dem Sperrwert positive Spannung erhalten („Ja“), leitet der Hauptstromkreis (Ausgang führt „invertiertes Ja“). Wir wollen das etwas genauer betrachten. Wann leitet er nun, und wann leitet er nicht?

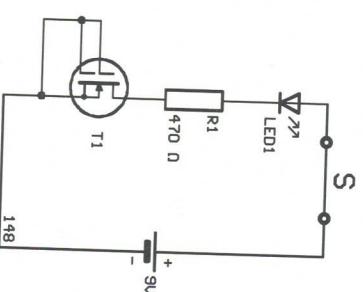


Bild 148. Selbstleitung: Gatevorspannung gleich Null, dennoch leuchtet, wenn auch schwach, die LED.

110

Wir verändern den Aufbau nach Bild 146 ein wenig und schaffen damit klare Verhältnisse (Bild 148). Die Antenne wird entfernt, beide Gates werden direkt mit den Brücken X und Y an den Sourceanschluss gelegt. Es zeigt

sich: LED1 leuchtet, wenn auch bei weitem nicht so hell wie beim Feldversuch mit Antenne. Jedentfalls leitet der Kanal, trotz Null Volt Gate-Source-Spannung. Selbstleitung sozusagen. Beweis geglickt.

Für diese Betriebsart spielt es nun wohl auch keine Rolle, ob LED und Widerstand drainseitig oder sourceseitig angeschlossen sind.

111

Mit der Anordnung nach Bild 149 wollen wir das nachprüfen. Also schnell umstecken: Stimmt.

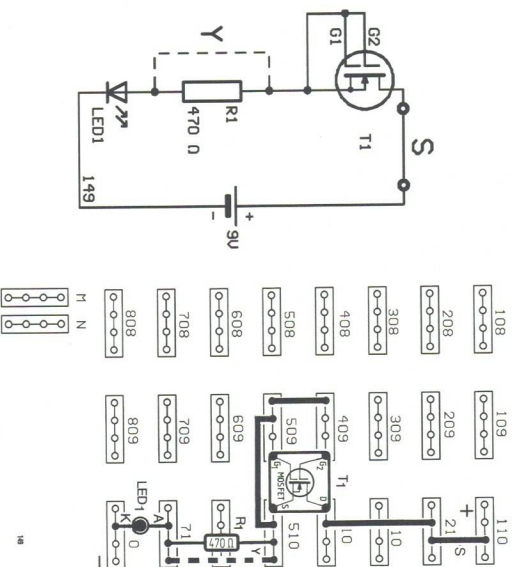


Bild 149. Ob im Drain- oder im Source-Zweig: Bei dieser Gatebeschaltung ist es dem MOSFET egal, wo LED und Widerstand liegen.

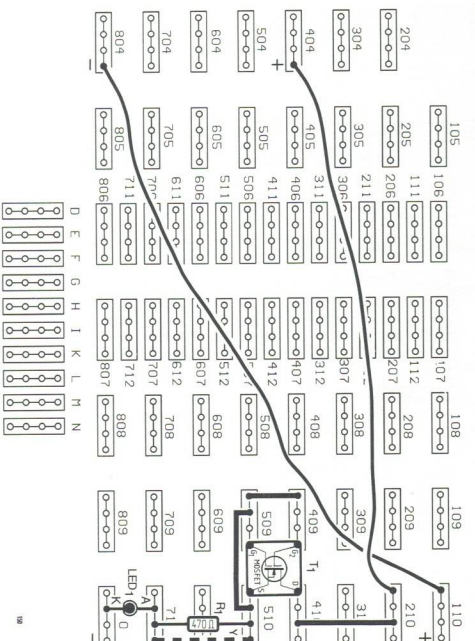
112

Mutig geworden und mit Genehmigung des Herstellers entfernen wir nun R1, stecken dafür Brücke Y ein und lassen damit LED1 scheinbar schutzlos im Stromkreis. Kaum zu glauben – LED1 leuchtet weiterhin so „funzelig“ wie bisher! Um ganz sicher zu sein, fügen wir R1 nochmals ein und schließen ihn zum Vergleich mit der Drahtbrücke Y kurz.

Tatsächlich – es gibt praktisch keinen Unterschied.

Und nun setzen wir noch eins drauf. Mit einer zweiten 9-V-Batterie im linken Pult (oder dem KOSMOS-Netzgerät X) in Reihe zur ersten 9-V-Batterie nach Bild 150, insgesamt also 18 Volt!

Ein wenig heller wird's nun schon, aber der Unterschied ist nicht beunruhigend.



Jedem das Seine

Wenn schon zwei Gates, dann soll auch jedes einzeln zu seinem Recht kommen.

115

Mit der Schaltung nach Bild 154 werden beiden Gates getrennte Spannungen zugeführt. Wir spielen ein wenig an den Knöpfen und beobachten dabei die Leuchtdiode. Dieses Mal soll uns ein einfacher Spannungsteiler genügen, um die Sperrspannung zu gewinnen. Die Verbindungsstelle von R1 und R2 ist Bezugspunkt.

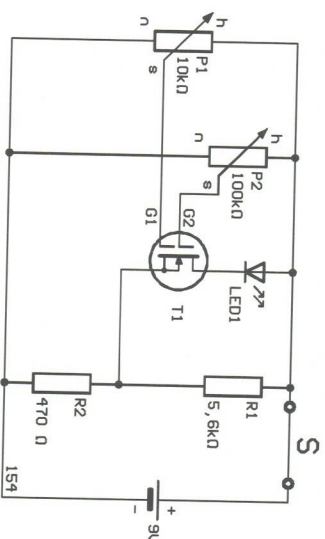


Bild 154.

Doppelsteuerung: An jedem Poti läßt sich die Helligkeit einstellen, doch das jeweils nicht bewegte Poti bestimmt mit der Stellung seines Schleifers den Grenzwert.

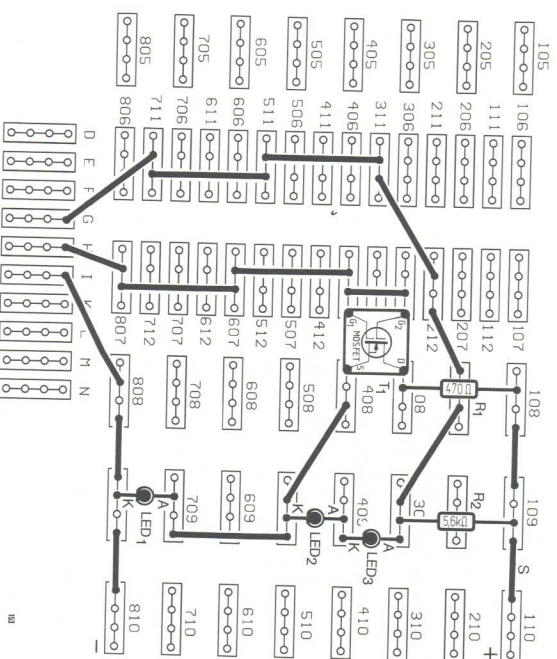


Bild 153. Aufbau zu Bild 152.

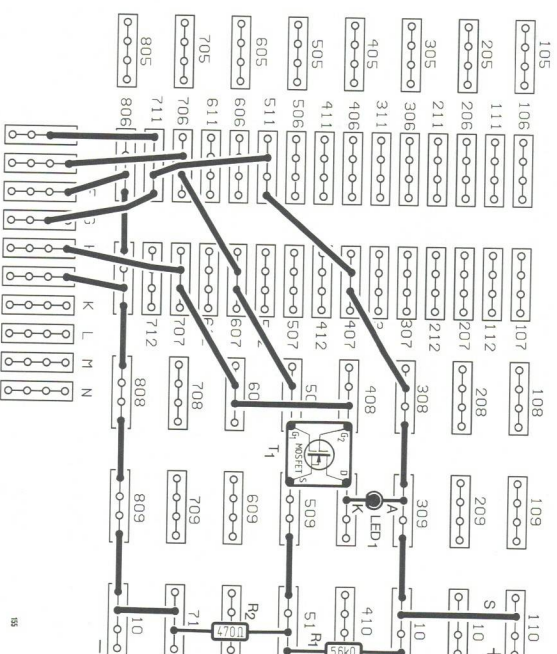


Bild 155. Aufbau zu Bild 154.

Es zeigt sich: Steht P1 oder P2 auf n, kann mit dem jeweils anderen Poti die Helligkeit bis „Null“ verringert werden. Steht jedoch eines von ihnen auf n, hat die Stellung des anderen praktisch keine Wirkung. Höchstens bei gesperrtem G1 wird man P2 hochdrehen. Offensichtlich steuert also G2 wirkungsvoller als G1.

Zwischen den Endzuständen kann mit beiden Potis beliebig gesteuert werden. Allerdings: Der Höchstwert der Helligkeit, die sich mit dem einen Poti einstellen läßt, hängt stets davon ab, wie das andere gerade steht. Es ist wie beim Rasensprengen: Hat man den Haupthahn nicht richtig aufgedreht, kommt vorn weniger Wasser heraus, auch bei dort ganz aufgedrehtem Ventil.

116

Wir bauen die Schaltung wieder ab und stellen den wir wechselweise Ta1 und Ta2 und achten dabei auf die Reaktion von LED1. Es zeigt sich: Beide Male wird die Leuchtdiode weniger hell als bei offenen Tasten. Klar – schließlich „schließen“ wir ja den Kanal deutlich ab, wenn einer der Tasten das jeweilige Gate an 0 V legt. Außerdem beobachten wir, daß – wie schon oben bemerkt – Gate 2 einen größeren Einfluß hat als Gate 1: Bei Druck auf Ta2 geht die Helligkeit stärker zurück als beim Schließen von Ta1.

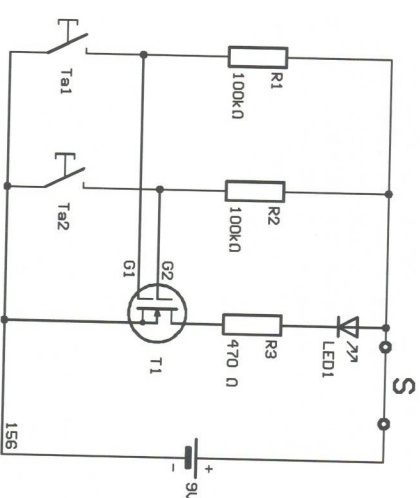


Bild 156.

Gate-Vergleich: Bei gedrücktem Ta2 ist LED1 praktisch dunkel, bei gedrücktem Ta1 leuchtet sie noch ganz schwach. Gate 2 hat also mehr Einfluß als Gate 1.

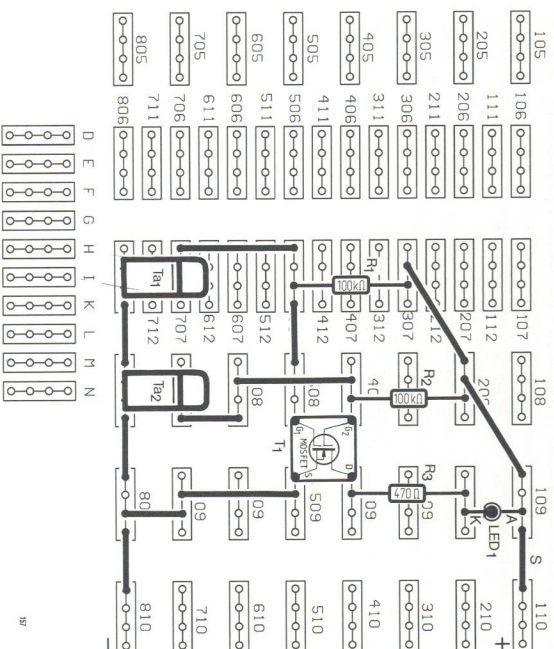


Bild 157. Aufbau zu Bild 156.

MOS-Logik

Wenn sich bipolare Transistoren für Logikschaltungen eignen, warum nicht auch unipolare?

117

MOSFET als Logikgatter: Für die Anwendung nach Bild 158, die wir nun aufbauen, ist der Unter-

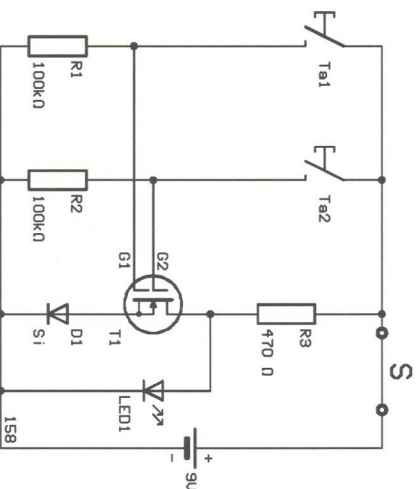


Bild 158. NAND mit nur einem MOSFET: Ja an Gate 1 UND an Gate 2 gibt NICHT-Ja am Ausgang (LED1 verlischt).

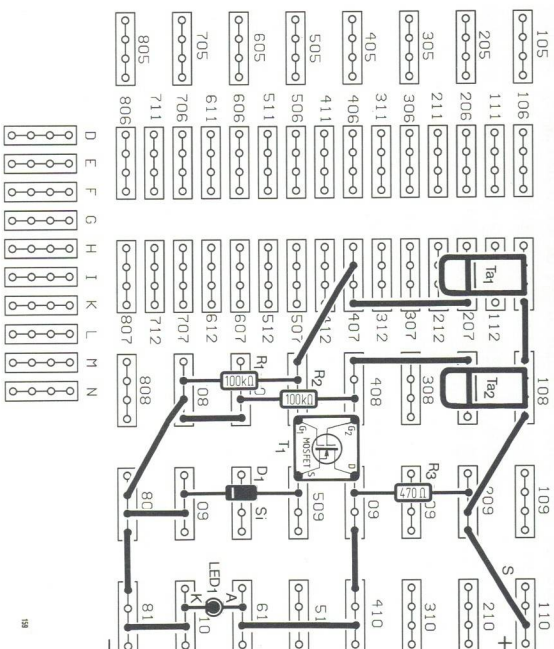


Bild 159. Aufbau zu Bild 158.

schied zwischen beiden Gates ohne Bedeutung. LED1 leuchtet zunächst und signalisiert damit „Ja“ am Ausgang. Es bleibt ohne Wirkung, wenn Ta1 oder Ta2 jeweils allein geschlossen wird. Die Leuchtdiode verlischt erst, wenn wir beide Taster gleichzeitig drücken. Das ist nun endlich unser NAND mit dem MOSFET – einer genügt!

Eine richtig große Bedeutung hat jedoch in der Welt der Computer die folgende Schaltung erlangt.

118

Frischzellen-Merker: Mit der Schaltung nach Bild 160 bauen wir uns eine Computer-Speicherzelle „in starker Vergrößerung“ auf, sozusagen unter dem Mikroskop betrachtet. Den Widerstand $R3$ lassen wir zunächst weg. Durch kurzes Drücken von Ta1 schalten wir LED1 ein. Nach einiger Zeit schauen wir wieder einmal nach und sehen: Es leuchtet noch immer, so die Batterie noch kann. Mit Ta2 erst wandeln wir das Ja zum Nein – LED1 geht aus.

119

C1 wird durch einen Kondensator von $10\ \mu\text{F}$ mit Plus an G1 ersetzt. Parallel dazu kommt nun der Widerstand $R3$ mit $1,5\ \text{M}\Omega$ (Bild 162). Dadurch ergänzen wir das „Mikroskop“ durch eine „Zeitlupe“ Kamera“. Dann drücken wir wieder Ta1, bleiben diesmal aber aufmerksamer Beobachter. Es zeigt sich: Nach wenigen Sekunden ist LED1 deutlich dunkler geworden – Zeit für's Auffrischen! Kurzer Druck auf Ta1: Sofort wird es wieder hell – für eine kleine Weile.

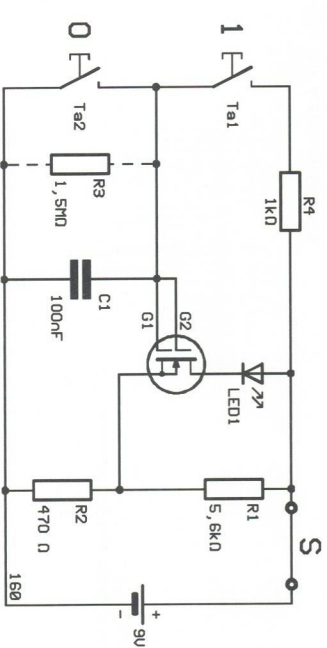


Bild 160. DRAM-Speicherzelle: Ja oder Nein, in einem einzigen MOSFET speicherbar. C1 hält den jeweiligen Wert.

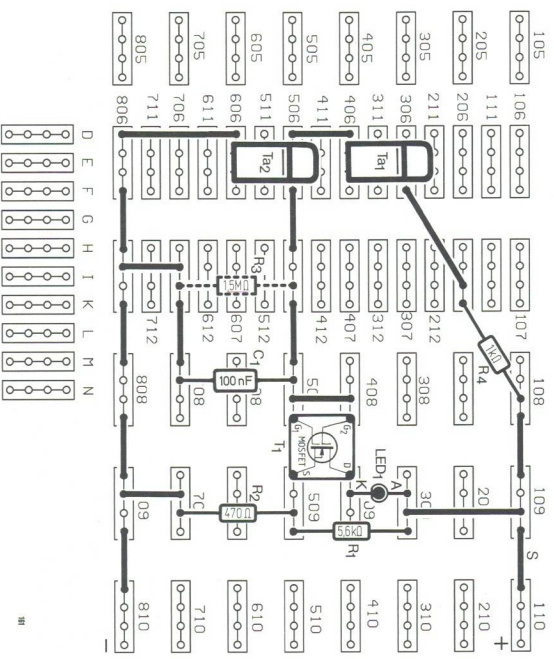


Bild 161. Aufbau zu Bild 160.

Drei Dinge lehren uns die beiden Experimente:

1. Mit einem Kondensator am Gate (oder schon mit dem Gate allein als Kondensator!) läßt sich der MOSFET-Eingang auf Ja oder Nein halten. Diesmal zeigt LED1 durch Leuchten an, wenn Ja am Eingang liegt, denn dann fließt Strom durch den Kanal (also Nein am Ausgang, auf die Spannung bezogen).
2. Würde die Oxidschicht ideal isolieren, könnte das Gate die jeweilige Ladung ewig halten (bzw. bis zum „gewaltsamen“ Eingriff mit Ta2). Das heißt, die Sache ist bistabil, ein Flipflop, also eine Speicherzelle für Ja oder Nein.

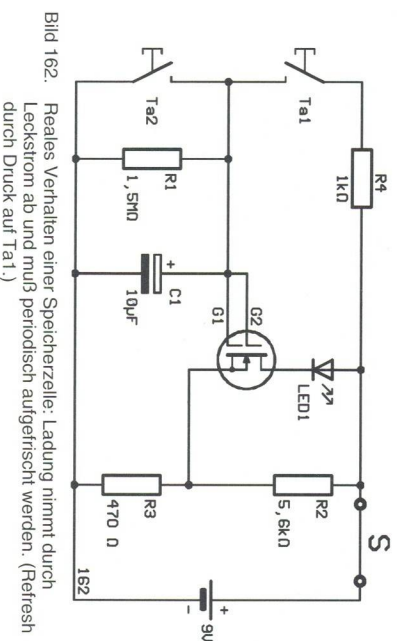


Bild 162. Reales Verhalten einer Speicherzelle: Ladung nimmt durch Leckstrom ab und muß periodisch aufgefrischt werden. (Refresh durch Druck auf Ta1.)

3. In der Realität fließen stets (wenn auch winzige) Leckströme. Das gleicht jedoch der Computer aus: Er frischt die Ladungen periodisch auf. So, wie wir das bei unserer Makrozeile mit Ta1 im Zeitulpentakt getan haben. Neudeutsch spricht man von *Refresh*. Ein dynamischer Vorgang also. Darum auch der Name *DRAM* für solche Speicher (Dynamic Random Access Memory – dynamischer Lesespeicher).

Nebenbei kommt nun auch etwas mehr Licht in unseren Einsteigsversuch: Was die Gatekondensatoren einmal aufgeladen haben, das halten sie, bis von außen eine andere „Ladespannung“ einkoppelt – über den großen „Umweltkondensator“.

Gleitende Übergänge

Als echter Alleskönner beherrscht unser MOSFET Digitales wie Analoges. Das zeigt folgendes Experiment.

120 Der letzte Aufbau wird ein wenig umgesteckt (Bild 164). Danach spielen wir wieder mit den Tastern. Dabei sollte nicht gerade die Sonne auf den Tisch scheinen. Wer alles hübsch langsam beobachten will, tauscht C1 gegen einen 100-μF-Typ aus. Wir sehen, daß bei geschlossenem Ta1 LED1 langsam heller wird, bei Betätigen von Ta2 dagegen allmählich wieder dunkler. Jeder Zwischenzustand ist möglich, wenn der betreffende Taster früher losgelassen wird. Und das bleibt uns ziemlich lange erhalten – eine Art *Analogspeicher* also. Die Helligkeit der LED ist ein Maß für die im Kondensator gespeicherte Ladung.

Schaltungen, mit denen Lampen auf gewünschte Helligkeitswerte eingestellt werden können, heißen *Dimmer*.

121 Nach Entfernen der beiden Taster benutzen wir einfach unsere Fingerspitzen als Übergangswiderstände. Überbrückt man die oberen Elektroden, wird (und

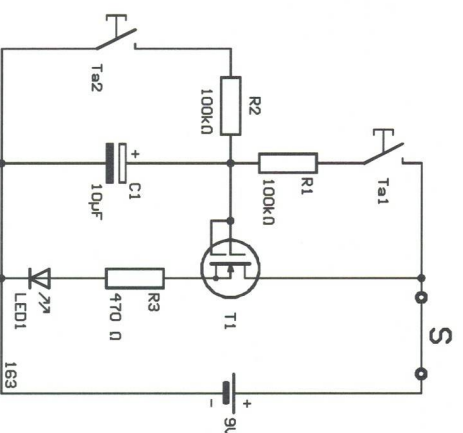


Bild 163. Zwischenzustand für die Helligkeit von LED1. Analogspeicher bzw. Dimmer mit Tasten: C1 hält jeden

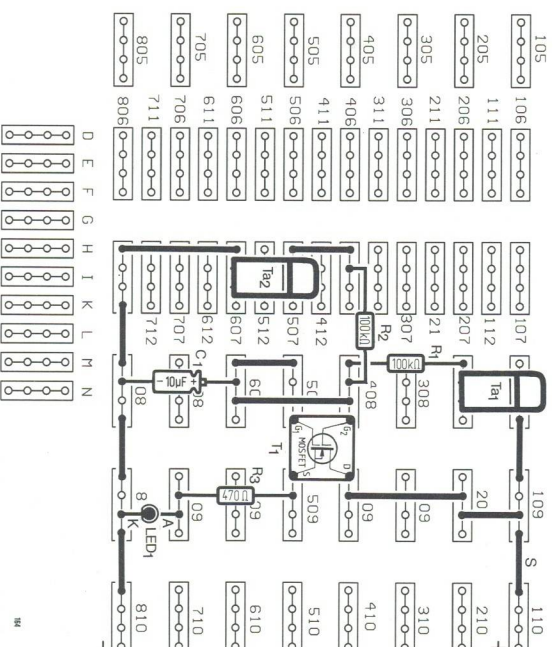


Bild 164. Aufbau zu Bild 163.

bleibt) es hell; schließt man den unteren Stromkreis, wird es schnell dunkel. Der *Sensor-Dimmer* ist entdeckt.

Elkos sind keine idealen Kondensatoren. Etwas (Strom) fließt immer. Zwar nur wenige Mikroampere, aber die Ladung wird

dadurch langsam abgebaut. Folienkondensatoren sind da günstiger, doch haben sie im gleichem Volumen wesentlich weniger Kapazität aufzuweisen. Unser 0,1-μF-Typ läßt beim Dimmen nicht viel Zeit. Am besten, wir tippen immer nur kurz auf die Steckfedern. Die Sache verhält sich gesetzmäßig, schließlich bestimmt ja die Zeitkonstante, das Produkt aus R und C, wie schnell so ein Lade- oder Entladevorgang abläuft.

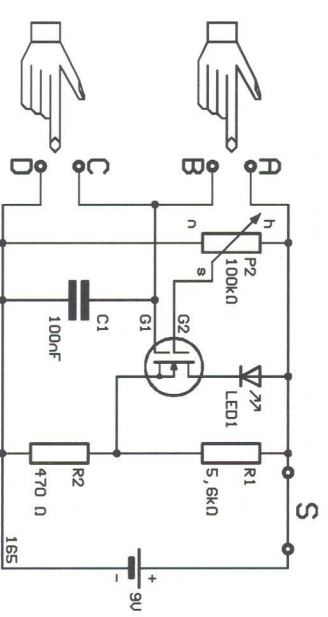


Bild 165. Sensor-Dimmer: Ladungsänderung per Fingerkuppe.

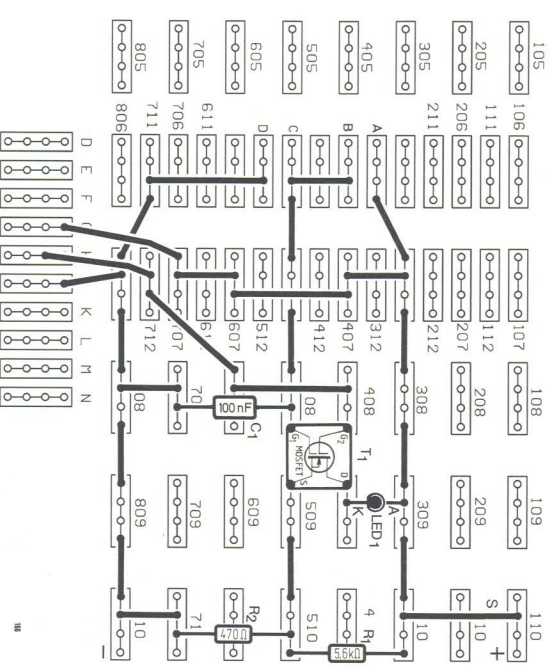


Bild 166. Aufbau zu Bild 165.

122 Wir greifen wieder auf den Spannungsteilrck am Source zurück und bauen den Sensordimmer gemäß Bild 165 auf. Dabei wird endlich wieder Gate 2 getrennt genutzt. Wir überbrücken die beiden oberen Steckfelderkontakte und drehen P2 auf eine gewünschte Maximalhelligkeit unterhalb der höchstens erreichbaren. Mehr kann es nun beim Dimmen nicht werden, so oft wir auch zwischen dunkel und hell variieren. (Wasservergleich: Der Hauptahn ist nicht ganz geöffnet, es wird Wasser gespart!)

Ein Hauch von Feuchte

Da wir gerade bei Wasser sind: Nicht gerade den genauen Wert der relativen Luftfeuchte, aber doch eine Anzeige über den Wassergehalt in der Luft meldet das folgende Experiment.

123 Gemäß Bild 167 bauen wir dazu wieder eine selbstsperrnde MOSFET-Schaltung auf. Neu ist darin der kammförmige Sensor aus dem Experimentierkasten. Unbedingt richtige Lage beachten, sonst leuchtet LED1 ständig! (Die „Zinken“ müssen von Plus zum Gate verlaufen, falsches Einstecken ergibt Brücke zwischen Plus und Gate!). Wenn wir nicht gerade im Regen stehen, bleibt LED1 zunächst dunkel. Nun hauchen wir kräftig auf den Sensor. Beeindruckend ist das Ergebnis zwar nicht, aber immerhin – ein vorübergehendes schwaches Leuchten kann man beobachten.

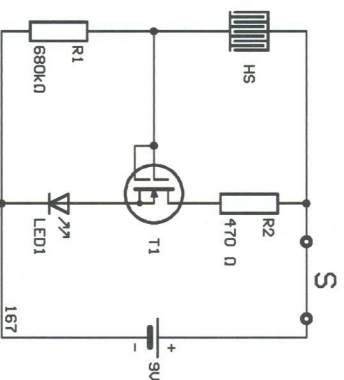


Bild 167. Gut für die Wetterwarte: Luftfeuchte wird in Leuchten umgesetzt. Starke Wirkung mit Kochsalzschicht auf dem Sensor.

124 Ein Teelöffel Kochsalz wird in einem halben Glas mit lauwarmem Wasser aufgelöst. Mit einigen Tropfen dieser Lösung benetzen wir die Sensoroberfläche und lassen sie in waagerechter Lage trocknen. Die entstehende Salzkristallschicht ist ein ausgezeichnete Detektor für Luftfeuchte. Wir haben es mit einem Widerstandsmeßgerät getestet: Mehr als 20 MΩ bei geringer Luftfeuchte, weniger

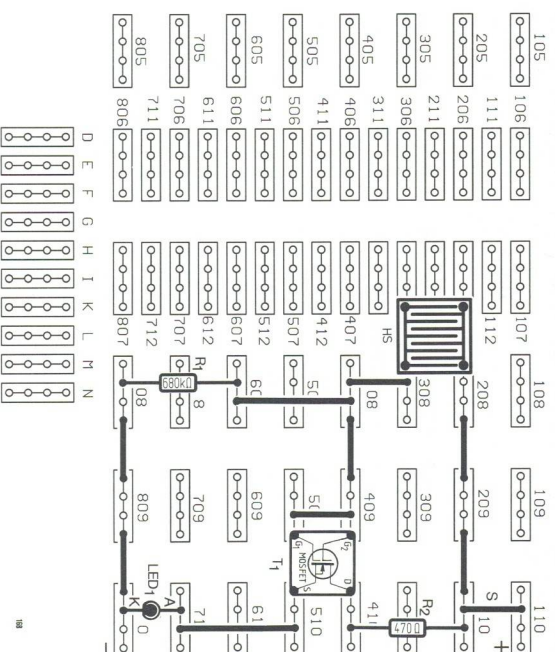


Bild 168. Aufbau zu Bild 167.

als 200 kΩ beim Anhauchen. Jetzt macht der Versuch Freude: Ohne die Oberfläche zu berühren, nähern wir der Schicht eine Fingerringe. Die Leuchtdiode wird bereits in diesem Mikroklima mit hoher lokaler Luftfeuchte hell aufleuchten! Nach Entfernen des Fingers klingt die Anzeige langsam wieder ab. Dieser Sensor ist allerdings nichts für Küchen oder andere Räume mit viel Wasserdampf.

125 Wir ergänzen die Schaltung entsprechend Bild 169 und können nun sogar noch den Ansprechpunkt verändern.

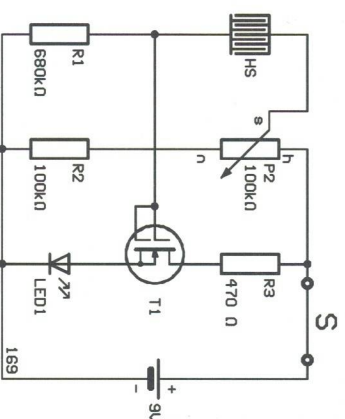


Bild 169. Einstellbare Empfindlichkeit: Schafft Bezugspunkt.

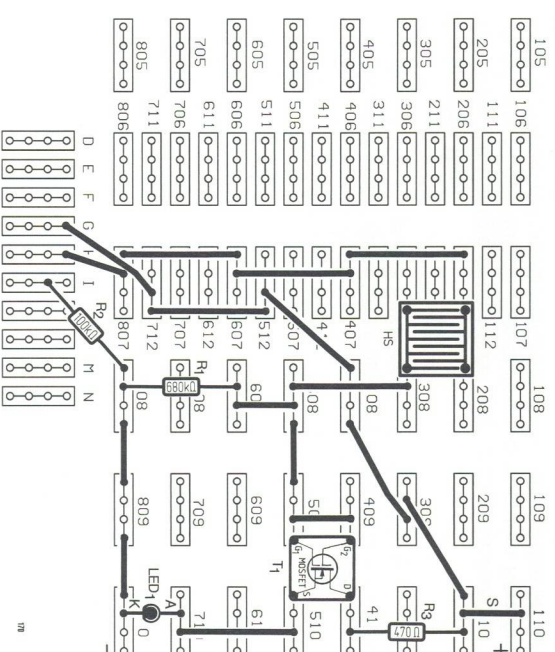


Bild 170. Aufbau zu Bild 169.

15. Mehr als eine Rolle Draht

Bereits in Abschnitt 6 offenbarte uns der Ohrhörer sein Innenleben (Insider-Info 8). Wir lernten dort auch, was ein Wechselstrom ist. Wechselströme mit Frequenzen zwischen rund 20 Hz und 16 kHz kann man über Gebilde wie einen Ohrhörer oder den im Prinzip ähnlich funktionierenden Lautsprecher hörbar machen. Ein Magnetfeld entsteht immer dann, wenn Strom durch die Spule fließt – kreisförmig um den Draht und somit gebündelt im Spulennieren, mit Nord- und Südpol. Wechselströme haben mit Spulen gewisse Schwierigkeiten. Das macht eine geheimnisvolle Größe, die *Selbstinduktion*. Sie möchte gern alles so halten, wie es gerade ist. Wenn wir einen Strom durch die Spule schicken wollen, entsteht durch diesen Strom zunächst eine Gegenspannung, die ihn gern verhindern möchte. Da sie aber nur auftritt, solange sich die Größe des Stromes ändert, schafft sie das nicht. Am Ende fließt soviel Strom durch die Spule, wie das Ohmsche Gesetz zuläßt: anliegende Spannung geteilt durch Gleichstromwiderstand des Drahtes. In der Spule steckt nun magnetische Energie; es hat sich ein Magnetfeld aufgebaut. Direkt ebenso wenig sichtbar wie das elektrische Feld im Kondensator.

Insider-Info 13

Bei Gleichstrom erreicht der Strom durch die Spule am Ende stets den Höchstwert, gegeben durch den ohmschen Widerstand der Wicklung und die anliegende Spannung. Bei Wechselstrom ist das nicht mehr so. Je schneller der Wechsel, um so kleiner die Chance, daß der Strom diesen Endwert erreicht. Das Verhalten ist recht interessant: Liegt eine Wechselspannung gerade mit ihrem Höchstwert an der Spule, ist der Strom gerade Null. Während die Spannung sinkt, steigt der Strom! Gerade dann, wenn die Spannung zu Null wird, hat er seinen höchsten Wert erreicht. Im negativen Scheitelpunkt der Spannung ist der Strom wieder Null und wird anschließend negativ. Insgesamt paßt dem Strom alles um eine Viertelschwingung später. Da man eine vollständige Schwingung mit dem Durchlaufen eines vollen Kreises (360° oder 2π) vergleichen kann, sagt man auch, der Strom eilt in einer Spule der Spannung um 90° nach. Oder anders: Spannung und Strom sind zueinander um 90° oder $\pi/2$ *phasenverschoben*. In Erinnerung an das Strom-Spannungsverhalten des Kondensators läßt sich für jenen genau die umgekehrte Zuordnung folgern. Daraus ergeben sich interessante Wirkungen beim Zusammenschalten von Spulen und Kondensatoren. Man kann sich nun vorstellen: Je schneller der Wechsel von Plus und Minus, je höher also die Frequenz der Wechselspannung, um so kleiner der erreichte Höchststrom in jeder Schwingung. Offenbar wächst der Widerstand der Spule mit der Frequenz. Bei Gleichstrom ist dieser *Wechselstromwiderstand* einfach Null! Er gehorcht der einfachen Beziehung $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$, worin L als Induktivität der Spule bezeichnet wird. Das X dient der Unterscheidung zu Ohmschen, also (auch) bei Gleichspannung wirkenden Widerständen. Während jene elektrische Leistung in Wärme umsetzen, hält sich dieser *induktive Widerstand* vornehm zurück. Da $P = U \cdot I$, jedoch bei ihm U und I gegeneinander verschoben sind, wird durch ihn keine Wärme frei. Die hineingesteckte Energie kommt einfach auf Grund der Wechselwirkung zwischen elektrischer und magnetischer Energie immer wieder zur Quelle zurück. Man sagt darum auch, es handelt sich um einen *Blindwiderstand*.

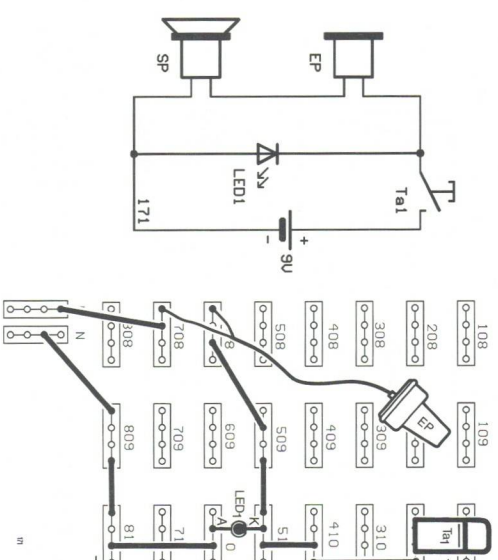


Bild 171. Sichtbare Wirkung der Induktion: Zusammenbrechendes Magnetfeld erzeugt Gegenspannung – LED blitzt kurz auf.

los. Und da erst blitzt es kurz und nicht sehr hell auf, wieder von einem Knacken begleitet. Wir vergleichen durch Austausch, ob nun die rote oder die grüne LED dabei heller ist.

Zwei Dinge lehnt uns der Versuch:

1. Da die LED nur beim Ausschalten leuchtet, muß der Strom seine Richtung geändert haben.
2. Die beim Einschalten in die Spulen von Hörer und Lautsprecher gesteckte magnetische Energie löst sich beim Abschalten nicht einfach in Luft auf, sondern leistet als elektrische Energie noch kurz eine Arbeit – sie läßt die LED aufblitzen.

Nun zur nächsten Stufe der Erkenntnis: Techniker sagen, das Magnetfeld möchte, wenn der Strom abgeschaltet wird, diesen Strom gern weiterfließen lassen – in Größe wie in Richtung. Beim genauen Hinsehen hat uns das der Versuch bewiesen, wie Bild 172 zeigt.

Wenn nun ein „Pfad“ dafür fehlt, schafft sich das zusammenbrechende Magnetfeld rücksichtslos diesen Weg. Die Spannung, die beim Öffnen des Kreises entsteht, kann sehr hoch werden – so hoch, daß sie als kleiner Funken wie beim Gewitter die Luft zwischen den Schalterkontakten durchschlägt. In Schaltungen mit Spulen verwendet man daher – meist eingesetzt wie unsere LED – sogenannte Freilaufdioden. Das vermeidet den Ausfall empfindlicher Bauelemente.

Praktische Schulweisheit

Alles ist berechenbar. Da die Spannung in der Spule bei Stromänderung auftritt – je schneller, um so höher –, hat man folgen-

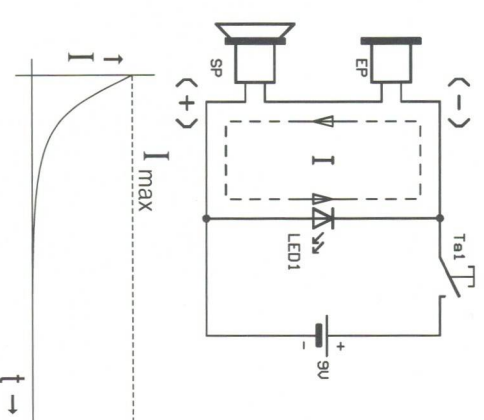
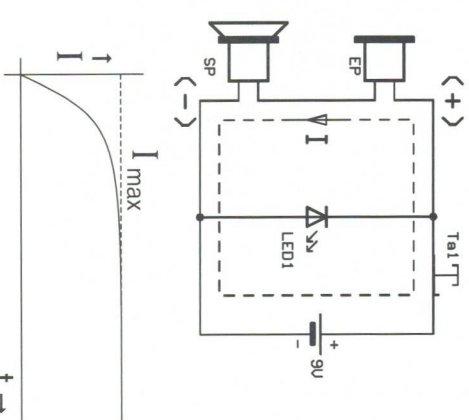


Bild 172. Die Stromrichtungen in Bild 171: „Großer Kreis“ beim Einschalten, „kleiner Kreis“ beim Ausschalten. Für die Leuchtdiode kehrt sich dadurch die Spannung um.

de Beziehung aufgestellt: Ändert sich in einer Spule innerhalb einer Sekunde der Strom um 1 A und entsteht dabei eine Spannung von 1 V, so hat diese Spule eine *Induktivität* L von 1 Henry (H). Also: $1 \text{ H} = 1 \text{ V je A je Sekunde}$ oder $\text{V/A/s} = \text{Vs/A}$.

Ein ideales Paar

Man kann die Energie einer Spule auch anders „auffangen“, als mit einer Leuchtdiode. Beispielsweise in einem Kondensator. Damit richten wir allerdings mehr an, als auf den ersten Blick zu sehen ist.

126

Mit dem Versuch nach Bild 171 machen wir die magnetische Energie sichtbar. Besser gesagt, eine ihrer Wirkungen. Damit es die Leuchtdiode auch ohne Vorwiderstand überlebt, müssen wir sie gegenüber der Batterie in Sperrichtung einsetzen. Das heißt: Abgeflachte Seite und kürzeres Bein gehören diesmal an die Plusseite! Wir drücken nun Ta1 und achten auf die Leuchtdiode. Doch selbst im Dunklen sehen wir – nichts. Nur im Hörer hat es kurz geknack! Enttäuscht lassen wir den Taster (möglichst schnell)

Wir erinnern uns: Am Anfang ist der leere Kondensator. Dann wird er geladen – mit einem elektrischen Strom. Wie in einem Glas, in das Wasser fließt, steigt dabei die Spannung mit der Ladungsmenge. Ein geladener Kondensator führt also eine bestimmte Spannung und in seinem Inneren herrscht ein elektrisches Feld. In einer Spule, durch die Strom fließt, herrscht dagegen ein magnetisches Feld. Während sich beim Kondensator beim Einschalten die Spannung aufbaut, steigt in der Spule nach dem Einschalten der Strom bis zu einem Höchstwert. Fügt man einen geladenen Kondensator und eine Spule zusammen (Bild 173), geht die elektrische Ladung, stromgebremst durch die Wirkung der Selbstinduktion, in die Spule über.

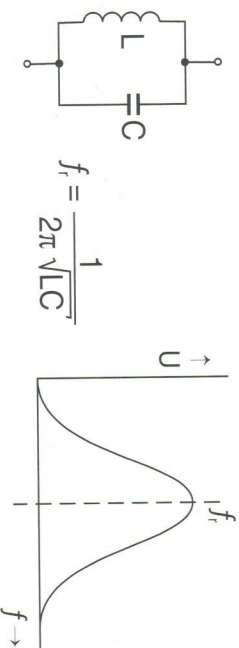


Bild 173. Parallelschwingkreis aus L und C: Energie pendelt zwischen beiden hin und her. Je kleiner die Werte von L und C sind, desto höher ist die (Resonanz-) Frequenz. Die Schwingung gehorcht der im Bild eingetragenen Thomson-Gleichung.

Die Energie des Kondensators steckt nun in der Spule als magnetische Energie und die Spule übernimmt es, den Strom in gleicher Richtung weiterzutreiben. Dabei baut sich die Magnetfeldenergie aber ab und der Strom wird kleiner. Viel wichtiger aber ist, daß der Kondensator in dieser Zeit von der Spule in umgekehrter Richtung aufgeladen wird. Er kann darum kontern: Sobald die magnetische Energie aufgebraucht ist, schickt er in der Gegenrichtung von sich aus wieder Strom in die Spule. Ein periodischer Vorgang also. Auch er läßt sich berechnen. Herr Thomson hat das getan: Resonanzfrequenz f_r gleich Kehrwert des Produktes der Wurzel aus L mal C mit dem Faktor $2 \times \pi$. (Die Formel wurde in Bild 173 eingetragen.)

Verlustgeschäft

Mit der Resonanzfrequenz f_r könnte ein Schwingkreis ewig schwingen, wie ein Pendel etwa oder eine Schaukel das tun würde, wenn die Verluste nicht wären. Dort ist es vor allem die Reibung im Lager. Im Schwingkreis bewirkt hauptsächlich der Drahtwiderstand der Spule, daß jeder Schwingungszug etwas kleiner ist als der vorherige. Man nennt das eine gedämpfte Schwingung. Übrigens Pendel. Lassen wir eine mit feinem Sand gefüllte, unten undichte Spitztüte in Gedanken an einem Faden hin

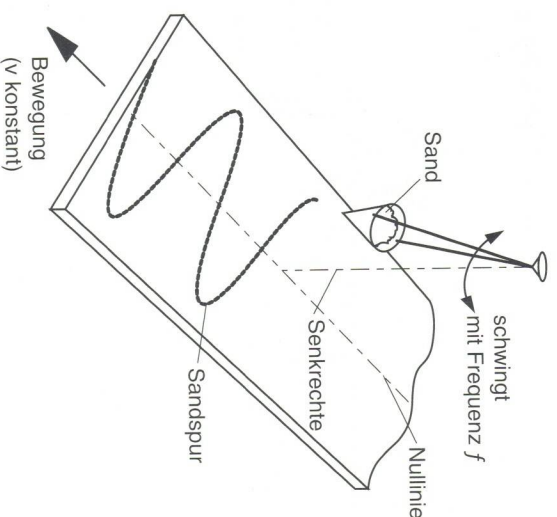


Bild 174. So entsteht eine Sinuslinie.

und herschwingen. Ziehen wir dabei ein Brett gleichmäßig unter dem rieselnden Strahl entlang. Das Ergebnis ist in Bild 174 zu sehen. Man nennt das eine Sinuslinie.

Ein Schwingkreis produziert die gleiche Kurve. Nur sehen wir sie beispielsweise auf einem Oszilloskop. Dort wird die Spannung durch die Höhe eines Leuchtpunktes auf dem Bildschirm dargestellt und der Strahl, der den Punkt erzeugt, wird gleichmäßig schnell über den Schirm „gezogen“ – wie unser Brett.

127

Es wird langsam wieder Zeit für einen richtigen Versuch. Mit der Schaltung nach Bild 175 lassen wir L und C zusammenspielen. Nach Anschluß der Batterie hören wir einen relativ angenehmen Ton, solange die Schaltung Spannung erhält. Wie geht das?

Wir wissen nun schon:

1. Der Hörer hat eine Induktivität L.
2. Die Kupferdrahtspule von L hat einen Ohmschen Widerstand R. Man kann sich ihn in Reihe zu L vorstellen.
3. In R wird Energie in Wärme umgesetzt. Auch die Umwandlung von Wechselstrom in Schall braucht Energie.
4. Die gleichgroßen Kondensatoren C1 und C2 in Reihe (Gesamt-C halb so groß wie Einzel-C) liegen der Spule parallel. Sie bilden mit ihr also einen Parallelschwingkreis. Dieser wird durch R und die Schallabstrahlung im Hörer gedämpft.

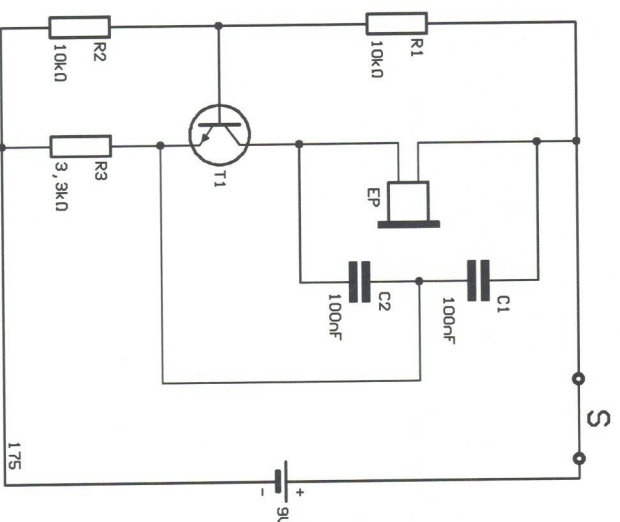


Bild 175. Colpitts-Oszillator: Schwingkreis aus Induktivität des Ohrhörers und zwei in Reihe geschalteten C's; schwingt durch Stromstoß beim Einschalten an, wird durch Rückführen von Energie bei Laune gehalten.

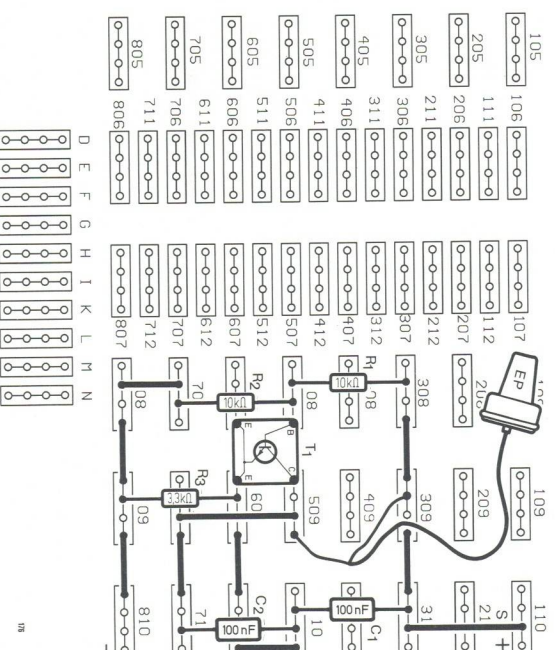


Bild 176. Aufbau zu Bild 175.

5. Damit die Schwingung stabil bleibt, müssen diese Verluste ausgeglichen werden. Dafür sorgt die Schaltung mit dem Transistor.

Die Colpitts'sche Lösung

Bild 175 ist eine der zahlreichen Realisierungen der Aufgabe, Schwingungen zu erzeugen. Sie ist Herrn Colpitts eingefallen und funktioniert so: Ruhepunkt ist die Basis des Transistors. Das ist die dritte mögliche Schaltungsart bipolarer Transistoren – die *Basisschaltung*. Der Schwingkreis liegt im Ausgangskreis, am Kollektor. Eingang dieses Verstärkers ist der Emitter. Die beiden Kondensatoren bilden einen *kapazitiven Spannungsteiler*. Von ihrem Verbindungspunkt wird ein Teil der Schwingkreisenergie auf den Verstärkereingang, also auf den Emitter, zurückgeführt. Der Transistor verstärkt sie in der gerade passenden Weise, so, wie man einer Schaukel immer im richtigen Augenblick einen kleinen Schub gibt, damit sie schön weiterschwingt.

Ergänzende Erläuterungen: Der Transistor wird in dieser Schaltung gesperrt, wenn der Emitter Plus gegen die Basis erhält. Dadurch steigt auch die Spannung am Kollektor nach Plus. Oder anders gesagt: Ja am Eingang gleich Ja am Ausgang. Das erinnert an die Kollektorschaltung. Sind Wechselspannungen im Spiel, sagt man auch, die Spannungen sind *in Phase*.

16. Kleine Radios – selbstgebaut

Schon beim AMP in Abschnitt 13 konnten wir der Versuchung nicht widerstehen. Mit so viel Verstärkung mußte einfach getestet werden, was sich damit so aus dem Reich der Wellenfischen läßt. Das dort Gelebte kommt uns nun zuzustatten.

Der entartete Schwingkreis

Der Vergleich ist uralt: Zieht man in einem Gedankenversuch die beiden Kondensator-„Platten“ eines Parallelschwingkreises ganz weit auseinander, entsteht ein *offener Schwingkreis*. Die Feldlinien des Kondensators greifen durch den freien Raum (Bild 177).

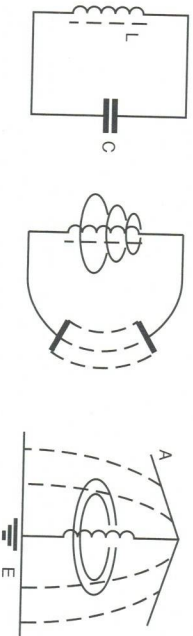


Bild 177. Vom geschlossenen zum offenen Schwingkreis: Die Feldlinien greifen in den Raum!

So etwa sieht es beim Rundfunksender aus, über dessen Funktion schon in Abschnitt 13 berichtet wurde. Wir beschränken uns dabei auf Sender mit Frequenzen zwischen etwa 500 kHz und 1.600 kHz, sogenannte *Mittelwellensender* mit *Amplitudenmodulation*. Sie sind noch am leichtesten zu empfangen – ein unerschöpfliches Feld für Einsteiger. Wir werden dazu im folgenden eine Reihe einfacher Schaltungen kennenlernen. Nach deren Prinzipien abarbeiten schon die ersten Radios. Nur verfügen wir heute über moderne Bauelemente und alles ist viel schöner.

Eine gute Antenne ist der beste Verstärker
Nach diesem Motto wollen wir uns nur zum Teil richten. Warum, wird gleich erklärt. Es kommt nicht allzuviel an Sendenergie beim Empfänger an. Schließlich muß sich die Energie von der kleinen „Halbkugel“, die die ersten Wellen rings um den Sendemast bilden, auf eine immer größer werdende Fläche im Raum verteilen, je weiter die Wellen ins Land hinein schwingen. Man kann von diesen *elektromagnetischen Wellen* die magnetische oder die elektrische Komponente aufnehmen. Die erstgenannte Art kennen wir von den Ferri-

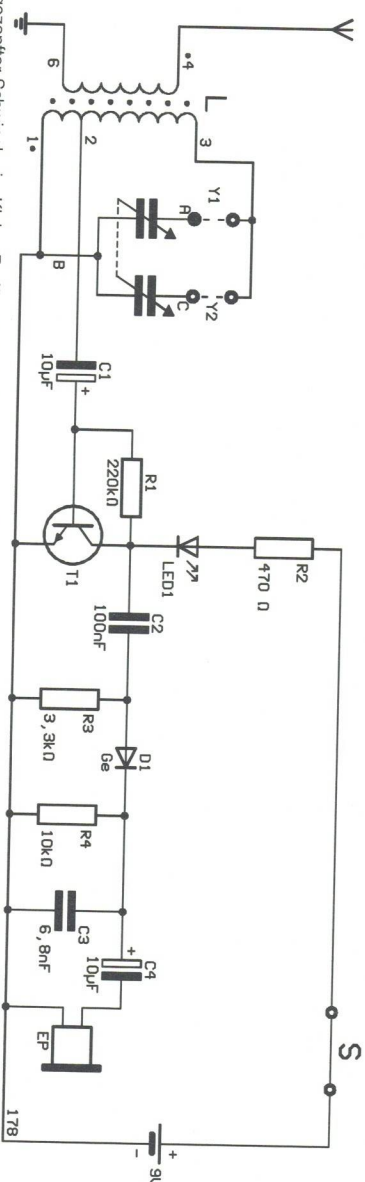


Bild 178. Angezapfter Schwingkreis: Kleine Bedämpfung, jedoch geringe Spannung. HF-Verstärker hebt die HF-Spannung über die Diodeschwelle.

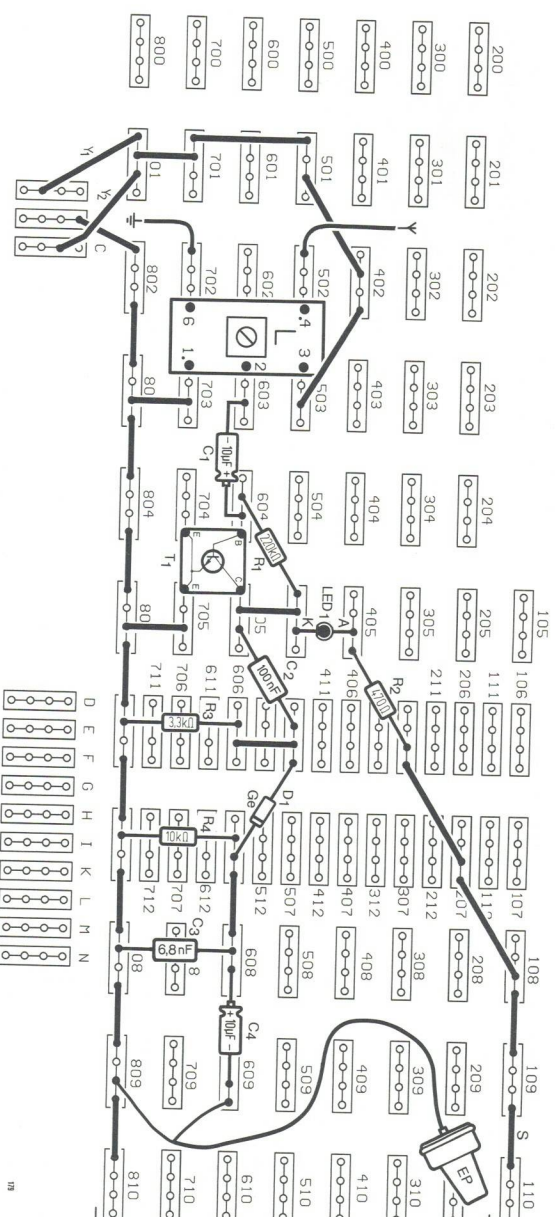


Bild 179. Aufbau zu Bild 178.

Eine Antenne für die elektrische Feldkomponente ist einfach ein Draht, der so hoch wie möglich gespannt wird. Allerdings wird das nur dort nötig, wo weit und breit kein Sender in der Nähe ist. In den großen Städten wird man heute schon über ein kurzes Stücken Draht oft von mehreren Sendern „zuge-schüttelt“. Das sollte bei den folgenden Experimenten stets beachtet werden. Außerdem diese beiden Dinge:

2. In einigen unserer Schaltungen kitzeln wir den Schwingkreis bis zur Grenze des Selbsterschwingens. Solche Schaltungen auf keinen Fall an eine richtige Antenne anschließen, nur ein Stück Draht im Zimmer ist erlaubt. Dadurch schließen wir aus, daß ein solcher ungewollter Sender irgendwo Schaden anrichten kann. Das könnte auf viel höheren Frequenzen passieren, weil ein „wilder Schwinger“ häufig nicht nur die Grundwelle im Mittelwellenbereich produziert. Wer aber kann sicher sein, daß sein Eigenbau nicht etwa den Flugfunk und damit Menschenleben gefährdet?

Aktivantenne

128

The circuit diagram shows a two-channel LED indicator. It features a transformer with a primary winding connected to a 180V AC source and a secondary winding with a 1:1 turns ratio. The secondary winding is connected to a bridge rectifier consisting of two diodes (D1, D2) and two resistors (R1, R2). The output of the rectifier is connected to two LEDs (LED1, LED2) through resistors (R3, R4). The circuit also includes two transistors (T1, T2) and two capacitors (C1, C2). The transformer's primary winding is connected to a 180V AC source. The secondary winding is connected to a bridge rectifier. The output of the rectifier is connected to two LEDs (LED1, LED2) through resistors (R3, R4). The circuit also includes two transistors (T1, T2) and two capacitors (C1, C2).

Nun wenden wir uns dem Schwingkreis zu und stecken C1 von Anschluss 2 auf Anschluss 3. Ergebnis: Falls mindestens zwei Sender zu empfangen sind, lassen sie sich kaum noch voneinander trennen. Der Transistoreingang bedämpft den Schwingkreis ziemlich stark, macht seine Resonanzkurve „breiter“. Ähnliches ergibt sich, wenn wir die Antenne direkt an den Schwingkreis anschließen. Mit Antennenwicklung und

Anzapfung für den Verstärker ist unser Schwingkreis also noch am besten bedient.

129

Bild 181. Aufbau zu Bild 180

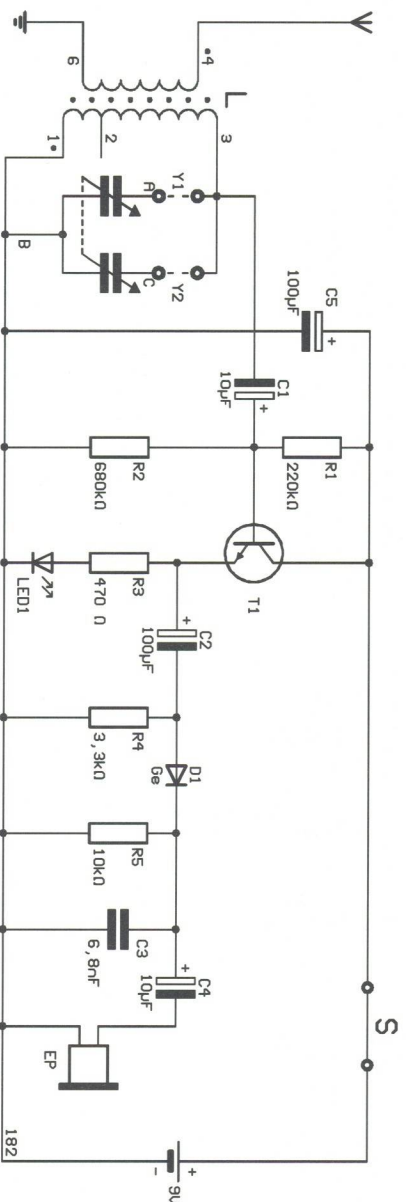


Bild 182. Emitterfolger am gesamten Schwingkreis: Braucht hohe Eingangsspannung, dämpft aber weniger (hoher Eingangswiderstand).

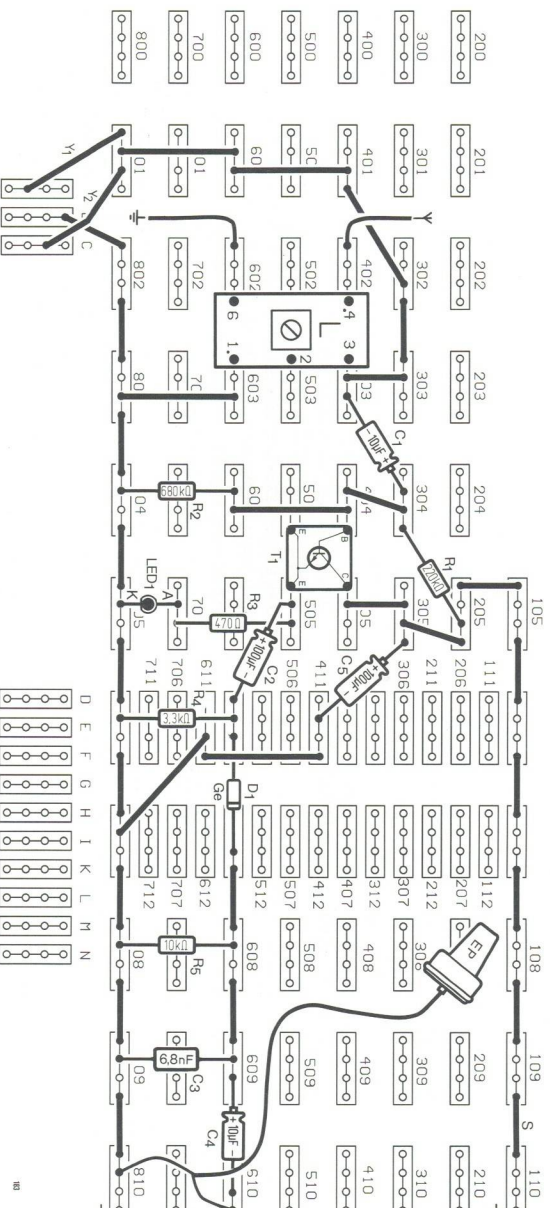


Bild 183. Aufbau zu Bild 182.

(Kondensator sperrt Gleichstrom!). Dadurch wird vermieden, daß der Gleichstromanteil die Membran vorspannt. Das beeinträchtigt die Wiedergabe. In unserer Schaltung ist allerdings der Gleichstrom ziemlich klein.

Insider-Info 14

Die Hochfrequenzspule unseres Moduls hat auf einem speziellen Kern aus Ferrit (das sind „zusammengeklebte“ Eisensteilchen) zwei Wicklungen. Über die Antennenwicklung wird die von der Antenne kommende HF-Energie nach Erde geführt. Die an dieser Wicklung stehende HF-Spannung wird über ihr Magnetfeld in die zum Schwingkreis gehörende zweite Wicklung übertragen. Diese hat eine Anzapfung. Unser Schwingkreis hat bei Resonanzfrequenz einen sehr hohen Widerstand. Bei idealen Bauelementen wäre er unendlich groß. Doch dann würde der Schwingkreis aus dem Senderangebot nur den HF-Träger fischen, während die Modulationsfrequenzen „draußen“ blieben. Ohmsche Widerstände „verbreitern“ die *Resonanzkurve* des Schwingkreises. Der Eingangswiderstand unseres Bipolartransistors hat nur wenige Kiloohm. Das würde den Kreis zu stark bedämpfen. Darum legt man diesen Eingang an die Anzapfung. Wäre sie z. B. bei 1/10 der Gesamtwicklung angebracht, würde hier nun auch nur 1/10 der Spannung zu messen sein. Das hat aber auch nur 1/10 des Stromes zur Folge, der sonst theoretisch fließen könnte. Da Spannung geteilt durch Strom gleich Widerstand, ergibt sich: Ein bei 1/10 angeschlossener Lastwiderstand wirkt wie ein $10 \cdot 10$ mal so großer an der gesamten Wicklung. Man sagt auch: Widerstände werden mit dem Quadrat des Übersetzungsverhältnisses *transformiert* (das in diesem Beispiel gleich 10 ist, so daß sich 1 kΩ auf 100 kΩ hochtransformiert). Ein guter Kompromiß: Zwar nur noch 10 % der Schwingkreisspannung, dafür nur 1 % Dämpfung für den Kreis gegenüber direktem Anschluß. Wer also zwischen mehreren Sendern „trennen“ muß, braucht diese Anzapfung!

130

Durch einen Transistor hinter dem Detektor läßt sich die Schaltung „veredeln“ (Bild 180).

Wir stellen fest:

1. LED2 leuchtet nur hell, wenn ein stärkerer Sender empfangen wird. Sie wirkt also (auch bei zurückgedrehter Lautstärke) als Empfangs- und Feldstärkeanzeige. Früher gab es dafür eine spezielle Röhre mit Leuchtsektoren – das *magische Auge*. Heute kann man es nur noch im Museum bewundern.
2. Die neue Stufe wird außerdem als NF-Verstärker benutzt, also für die hörbare Niederfrequenz. Schwache Sender,

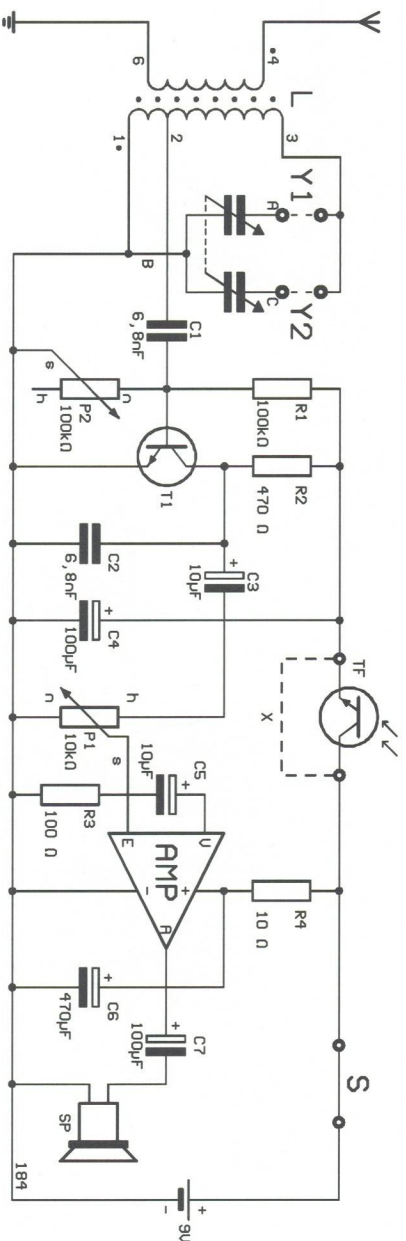


Bild 184. Audionschaltung: Transistor richtet gleich und verstärkt die so gewonnene Tonfrequenz. Mit P2 günstigsten Punkt suchen! Als kleiner Zusatz: Fototransistor statt Brücke X liefert sonnengesteuerte Morgenmusik. Sinnvoll nur mit Netzteil, da AMP ständig Strom „zieht“!

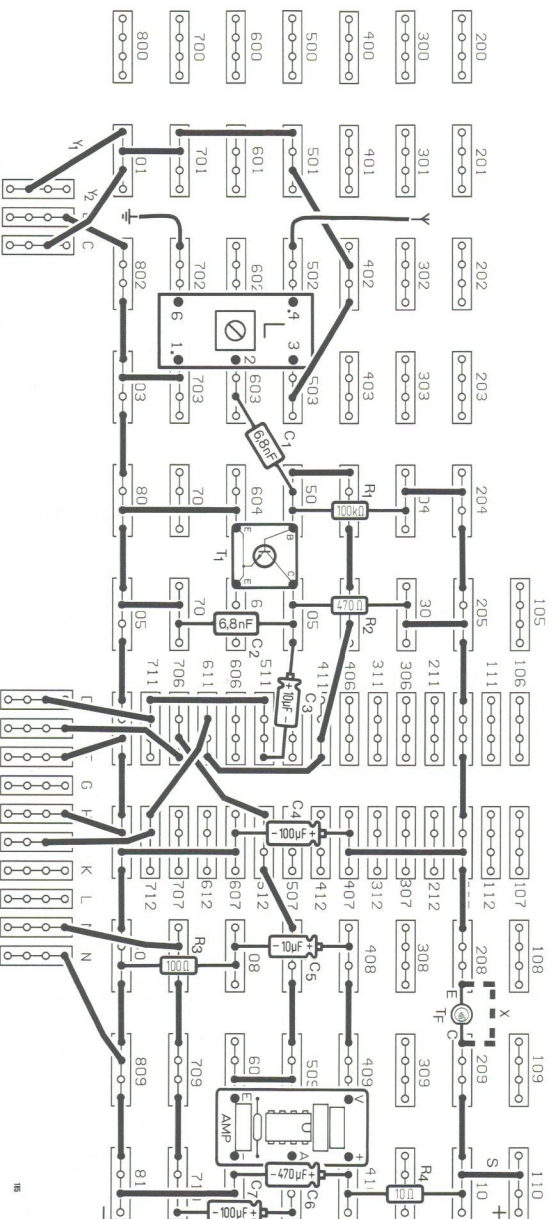


Bild 185. Aufbau zu Bild 184.

- wenn sie nur die Hürde der Diodenschwellenspannung überwinden haben, lassen sich so viel besser hören.
- Mit der Siliziumdiode haben wir die Gleichrichterschaltung verbessert. Sie läßt nur – wie gewünscht – die negativen Halbwellen nach Minus abfließen. Der vorher eingesetzte Widerstand dagegen dämpft auch die positiven.
- Der Transistor hat einen Widerstand in der Emittierleitung. Der wirkt als Gegenkopplung. Die erforderliche Eingangs-

spannung erhöht sich (vergleiche den Schmitt-Trigger in Abschnitt 9). Durch diese Maßnahme wird der Verstärker nicht so schnell übersteuert. Macht die Probe – überbrückt den Widerstand, wenn gerade ein starker Sender empfangen wird!

131 In der Schaltung nach Bild 182 verwenden wir ebenfalls einen Widerstand im Emittierzweig. T1

hat jedoch keinen Kollektorstrom, sondern arbeitet als Emittierfolger. Wir erinnern uns: Kollektorschaltung, das bedeutet hohe erforderliche Eingangsspannung, aber auch hohen Eingangswiderstand. Und auf den setzen wir diesmal, indem wir den oberen Schwingkreisanschluß mit dem Eingang verbinden. Hoher Widerstand = kleine Dämpfung. Gesamter Kreis = hohe Eingangsspannung. Es müßte also zueinander passen. Wer allerdings mit mehreren starken Sendern beglückt wird, kann sie mit dieser Schaltung nicht so gut trennen. Die Selektion ist also schlechter als in den vorangegangenen Experimenten. Doch mit Anschluß 2 wird diesmal nichts. Stecken wir probierhalber C1 auf ihn um! Es wird kaum etwas zu hören sein – die Spannung ist für diese Stufe zu klein.

Audion: Transistor spart Diode

Bisher waren die Aufgaben klar verteilt: Transistoren für die Verstärkung, Dioden für die Gleichrichtung. Aber schließlich hat der Transistor ja eine Basis-Emitter-Diode!

132 Wir stecken die Schaltung nach Bild 184 zusammen, stellen P1 auf Mitte und drehen langsam an P2 von n nach h. Sobald es zu rauschen beginnt, suchen wir mit dem Drehko nach einem empfangswürdigen Sender. Dann wird an P2 auf beste Wiedergabe korrigiert. P1 erlaubt Einstellen der Lautstärke auf das tageszeitlich vernünftige Maß.

Vorbild für diese Kombination aus Gleichrichter und Verstärker in einem Bauelement war das gute alte Röhren-Audion. In der klassischen Sprache der Wissenschaft mag sein Erfinder damals vielleicht „audio!“ gerufen haben, denn das heißt auf Lateinisch „ich höre“. Was man hört, sind die Tonfrequenzen des Senders, abgetrennt durch die Basis-Emitter-Diode von der einen Seite der symmetrischen HF-Trägerschwingung. Sie erscheinen als NF, als niederfrequente Wechselspannung am Kondensator C1. Dessen Gleichspannungsladung ergibt sich aus der HF (auch, wenn sie gerade nicht moduliert ist). T1 verstärkt die NF, C2 leitet die mit herübergekommenen HF-Reste ab, damit sie in der übrigen Schaltung nicht mit verknüpft werden und dann vielleicht stören (unerwünschte Verkopplungen, Arbeitspunktänderungen usw.).

133 Bild 184 enthält noch eine gern genutzte Zugabe: Setzt man statt der Drahtbrücke X den Fototransistor T2 ein, beginnt das Radio von selbst zu spielen, wenn es morgens hell wird. (Achtung bei Batteriebetrieb: Der Verstärker verbraucht auch nachts Strom!)

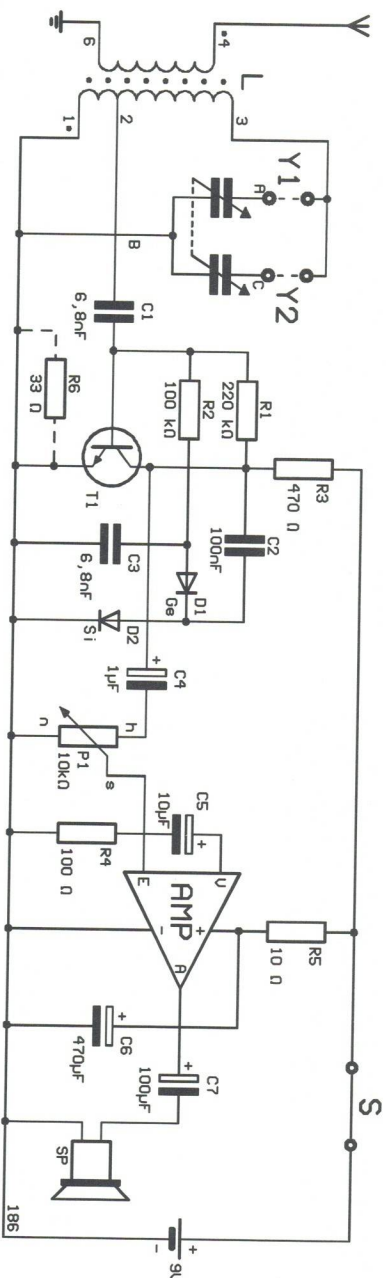


Bild 186. Reflexschaltung: Die von T1 verstärkte HF wird gleichgerichtet; die so entstandene NF durchläuft den Transistor ebenfalls.

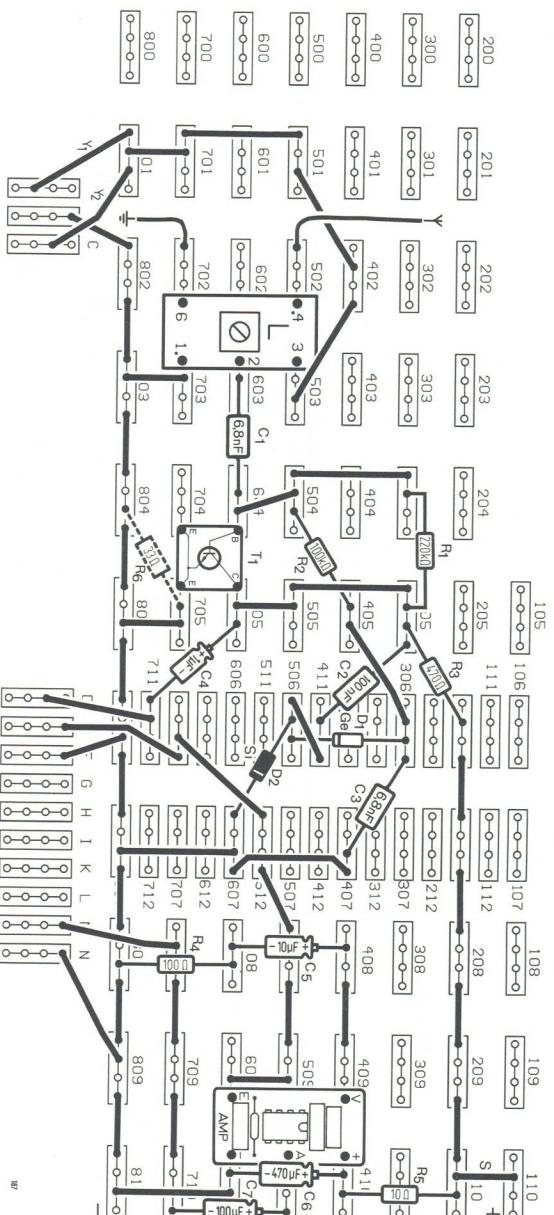


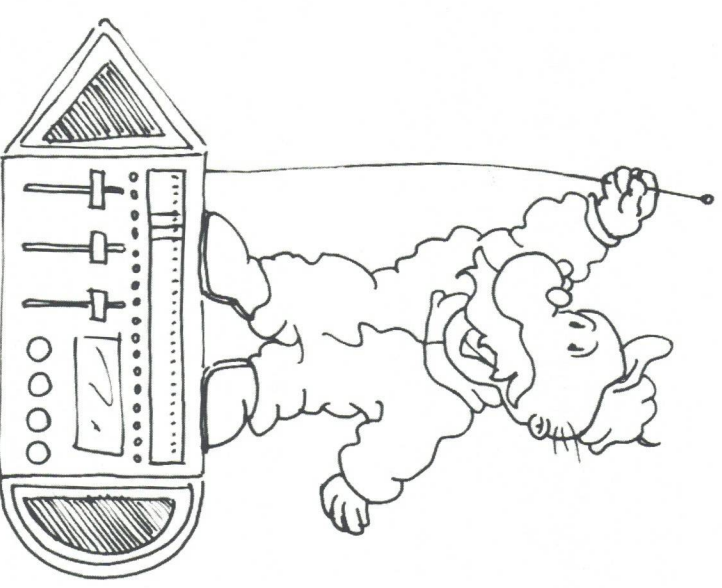
Bild 187. Aufbau zu Bild 186.

Gute Reflexe

Eine andere Art der Doppelnutzung eines Transistors in den sparsamen Schaltungen der ersten Jahre war die *Reflexstufe*. Der Transistor, den wir heute statt einer Röhre dafür verwenden, verstärkt zunächst die HF. Darauf folgt eine normale Diodengleichrichtung. Von dieser wird die entstandene NF nochmals dem gleichen Transistor zugeführt und verstärkt.

134

Wir bauen den Reflexempfänger nach Bild 186 und testen seine Eigenschaften. Es zeigt sich: Die Schaltung hat von allem ein wenig. Sie ist relativ empfindlich, doch stärkere Sender ergeben schon merkliche Verzerrungen. Das läßt sich verbessern, wenn in die Emittierleitung ein Widerstand R6 von 33 Ω eingefügt wird (Brücke 705-805 entfernen).



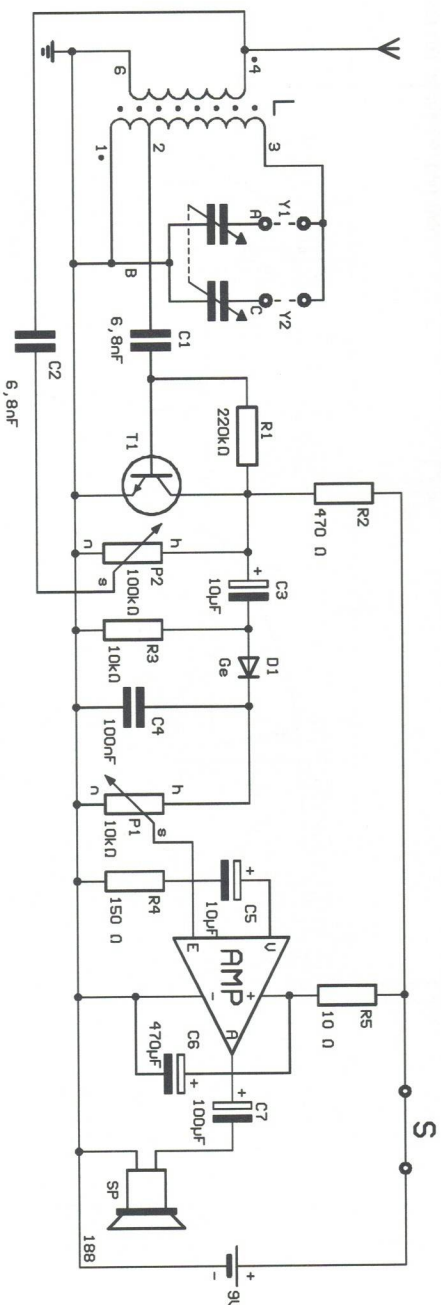


Bild 188. Nimmt es mit manchen Industriemodell auf: Durch Endämpfung (Rückkopplung) wesentliche Verbesserung von Trennschärfe und Empfindlichkeit.

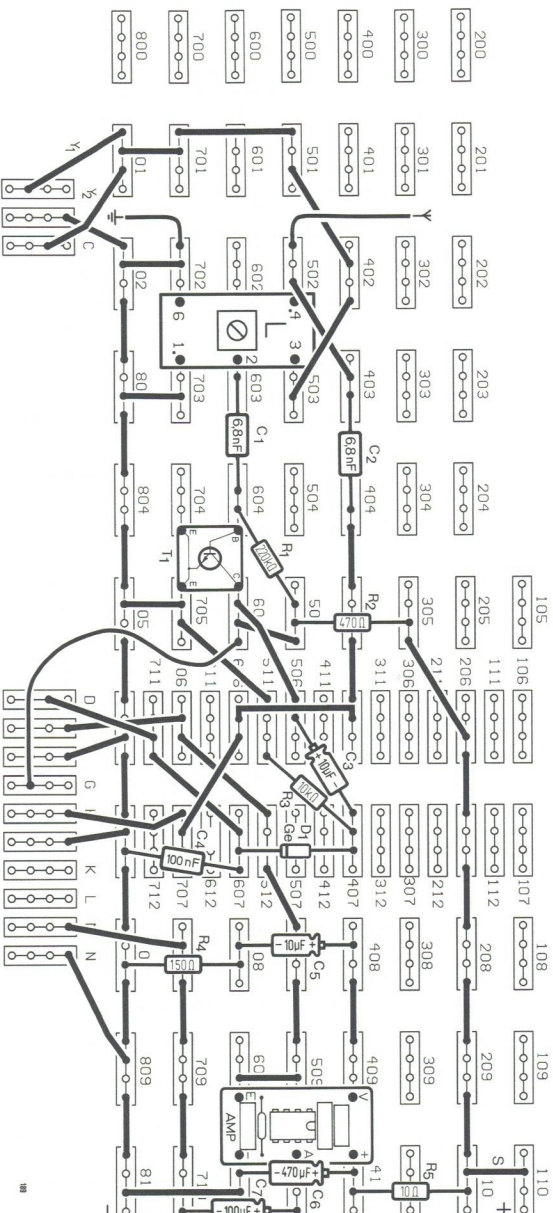


Bild 189. Aufbau zu Bild 188

Fast ein Sender: Empfänger mit Rückkopplung
Erinnern wir uns der Mahnung am Anfang dieses Abschnittes. Die folgenden Experimente dürfen wir nur mit einem kurzen Stückchen Draht als Antenne durchführen.

135

Die Schaltung nach Bild 188, die wir nun aufbauen wollen, unterscheidet sich auf den ersten Blick wenig von vorangegangenen. Diese Meinung ändert sich, wenn wir während der Sendersuche an P2 drehen. Drei Dinge sind zu vermerken:

1. Wird P2 weit genug aufgedreht, „pfeifen“ die Sender ein. Sauberer Empfang erfordert, P2 bis (kurz) vor den Pfeifeinsatz zurückzunehmen – bei starken Sendern wegen der Verzerrungen jedoch wesentlich weiter.
2. Hatten sich vorher vielleicht stärkere Sender gegenseitig überlappt, kann man sie nun ziemlich gut voneinander trennen. Besonders abends, wenn die Empfangsbedingungen auf Mittelwelle besser werden, hört man manche weitere entfernte Station herein.
3. Zu den guten nun die schlechten Nachrichten: Je näher P2 dem Pfeifpunkt kommt, um so dumpfer klingen Sprache und Musik. Der endämpfte Schwingkreis hat für die vom Resonanzpunkt weiter ab liegenden Frequenzen wenig übrig.

Das Geheimnis aller dieser Erscheinungen heißt *Rückkopplung*, besser *Mitkopplung* (wenn man sie von Gegenkopplung unterscheiden will). Das funktioniert prinzipiell wie beim Colpitts-Oszillator nach Abschnitt 15. Dem Schwingkreis wird von der verstärkten HF-Energie ein wenig zurückgeführt, so daß es die Kreisverluste deckt. Kommt mehr als dies zurück, wird ein kleiner Sender daraus, der auf eben dieser Frequenz schwingt. Der meist kleine Unterschied zwischen Resonanz- und Empfangsfrequenz ergibt als Differenzfrequenz das hörbare Pfeifen.

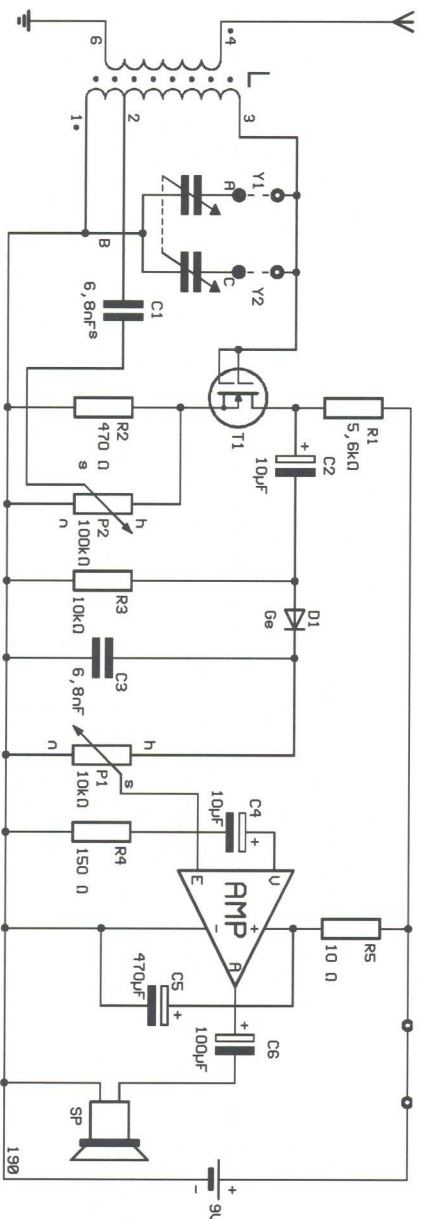


Bild 190. MOSFET in Rückkopplungsschaltung von Source her: Nicht ganz so gut.

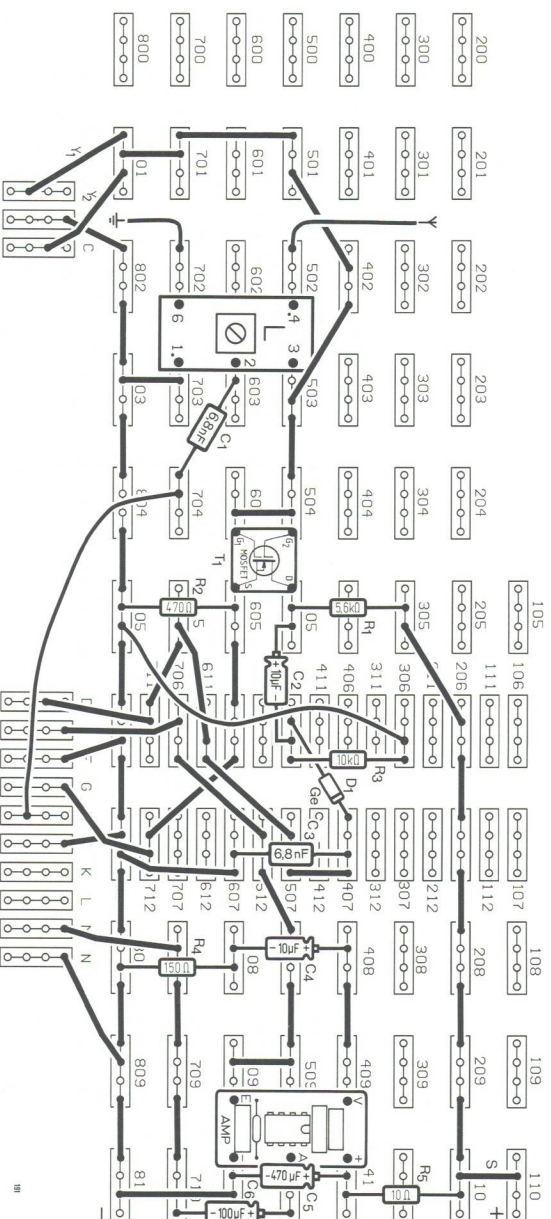


Bild 191. Aufbau zu Bild 190.

In Bild 188 benutzen wir zum Einkoppeln der Energie in den Schwingkreis die Antennenwicklung. Daher auch muß Anschluß 6 mit Anschluß 1 verbunden werden, sonst hängt die Wicklung in der Luft. Die Punkte neben Anschluß 1 und Anschluß 4 sagen, daß dies Punkte gleicher Phase sind. Bei der Herstellung der Spule hat man darauf geachtet, daß dieser Wicklungssinn auch stimmt. Wenn also die Wechselspannung an 4 gerade positiv ist, wird auch 1 positiv sein. Nur durch diese Zuordnung erreichen wir wegen der Emittierstufe in unserer Schaltung Mitkopplung – anders herum würde eine dämpfende Gegenkopplung daraus! Hier die Probe auf's Exempel:

136 Wir tauschen die Anschlüsse 4 und 6 und stellen fest: Nichts ist mehr mit (positiver) Rückkopplung, wenn an P2 gedreht wird!

Im ganzen wird mindestens dem Insider klar: Um einen Schwingkreis zu entdämpfen, muß er eine Wechselspannung seiner Resonanzfrequenz in geeigneter Höhe und Phase erhalten.

Was Bipolaren recht, ist Unipolaren billig

Beim MOSFET fließt, das hat uns Abschnitt 14 gelehrt, kein Eingangsstrom. Sein Eingangswiderstand ist also extrem hoch. Er dürfte den Schwingkreis darum praktisch nicht dämpfen.

137

Mit dem Aufbau nach Bild 191 treten wir den Beweis an – zunächst noch ohne Rückkopplung (C1 rausziehen). Obwohl der Schwingkreis einfach zwischen Gate und Minus liegt, lassen sich die örtlich „empfangbaren“ Sender noch recht gut voneinander trennen. Nun fügen wir C1 wieder hinzu und freuen uns: Es pfeift bei der Sendersuche, die Sender sind noch besser zu trennen – wir haben wieder mit Erfolg eine Entdämpfung zustande gebracht.

Diesmal funktioniert die Mitkopplung ohne „Drehen“ der rückgeführten Spannung, denn Eingangsspannung am Gate und Ausgangsspannung am Source wirken in gleicher Richtung, sind „in Phase“. Dennoch befriedigt die Sache bei schwachen Stationen nicht so ganz. Auch setzt die Rückkopplung etwas hart ein.

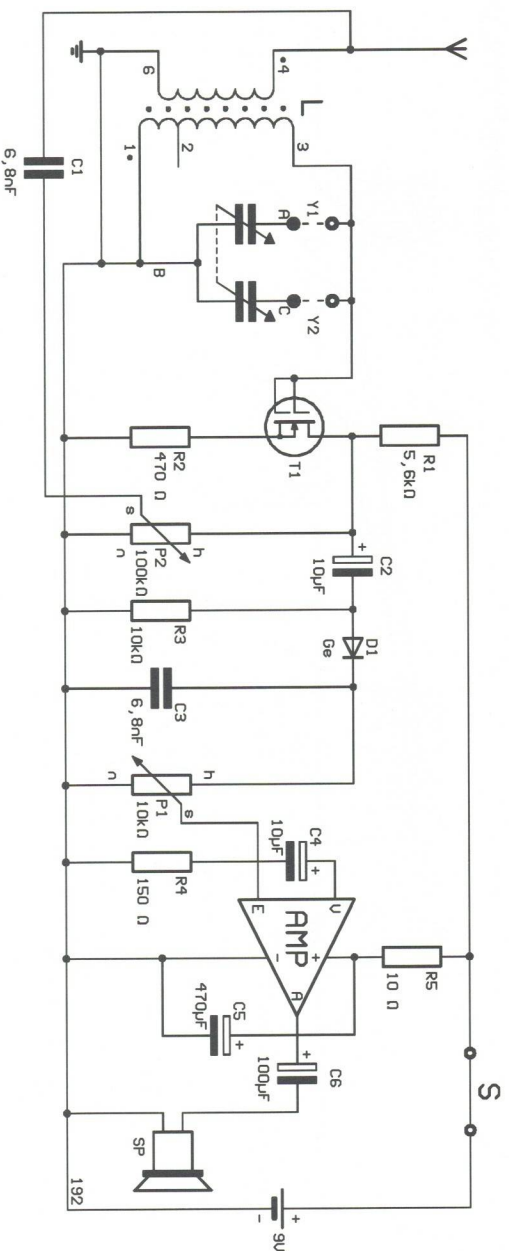


Bild 192. Verbesserte Variante zu Bild 190: Rückkopplung vom Drain auf Antennenwicklung.

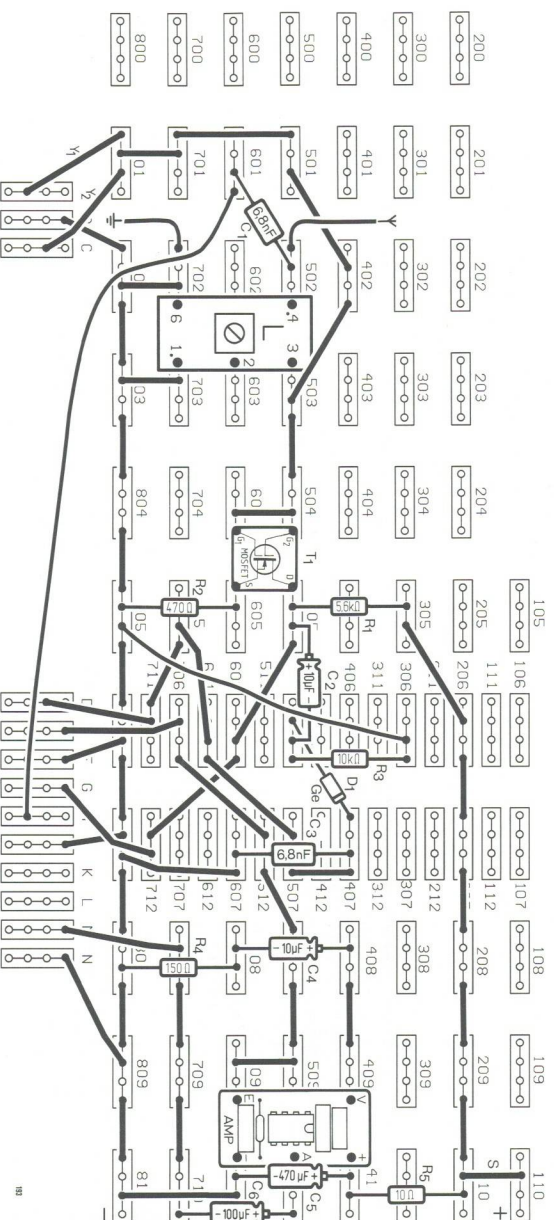


Bild 193. Aufbau zu Bild 192.

138

Wir wenden darum mit Bild 192 die Methode aus dem vorletzten Versuch an: Rückgekoppelt wird über die Antennenwicklung. Die Energie dazu koppeln wir am Drainanschluß aus, dann stimmt auch die Phasenlage wieder. Wir werden bemerken, daß diese Schaltung recht zufriedenstellend funktioniert.



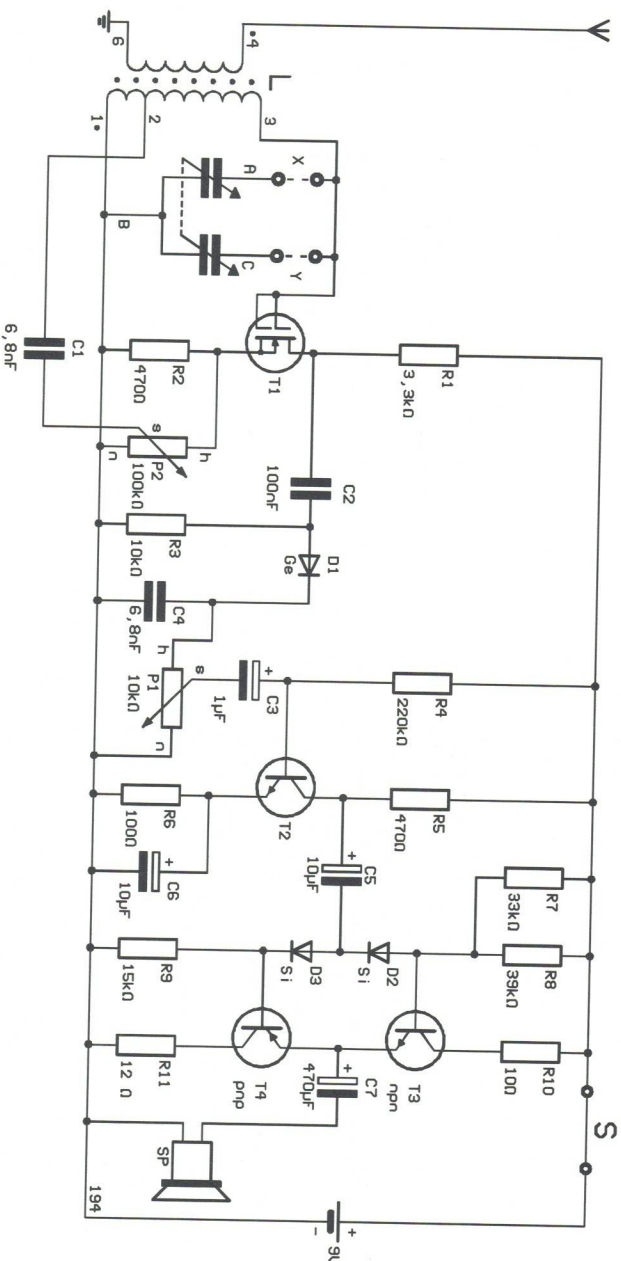


Bild 194. Schaltung ohne Geheimnisse: Transistorradio mit MOSFET-HF-Verstärker, Diodengleichrichter und Endstufe aus Einzeltransistoren, wie sie viele Jahre (als es noch keine integrierten NF-Verstärker gab) zum Standard zählte.

Der „gläserne“ AMP
Ganz selbstverständlich wurde in all diesen Schaltungen der integrierte NF-Verstärker benutzt, um aus der Spannung des Empfängers Leistung für den Lautsprecher zu zaubern. Wie's drinnen aussieht, wissen wir nicht.

139 Wir bauen darum abschließend den Empfänger nach Bild 194 auf. C1 lassen wir zunächst weg. Sein NF-Teil besteht nur aus Transistoren. Sie bilden eine *komplementäre Gegentaktendstufe* mit einem *Treibertransistor*. Ein wenig sieht er unserem AMP im Einsatz schon ähnlich, scheint aber nur einen Eingang zu haben. Doch auch hier können wir, wie bei Eingang V des AMP, Verstärkung verändern. Wir ziehen dazu den Kondensator C6 – schon wird es leiser, klingt dafür aber sauberer. Für gute Wiedergabe sind auch die beiden Dioden im Basiszweig von T3 und T4 zuständig. Mit ihnen wird der „tote Bereich“ in der Nähe der Schwellenspannung der Transistoren vermieden.

140 Ganz zum Schluß spendieren wir dem kleinen Gerät wieder eine Rückkopplung wie nach Bild 190 (C1 jetzt einsetzen). Damit lohnt sich dann ein kleiner Streifzug durch die nächtliche Mittelwelle. Dazu sollten zunächst die beiden Trimmkondensatoren am Drehko ganz herausgedreht werden (kleinstmögliche Kapazität). Man erkennt das durch den Kunststoff daran, daß zwei halbkreisförmige Plättchen sichtbar werden. Der letzte „unten“ erreichbare Sender (Drehkoanschlag links!) findet sich, wenn der Spulenkeim vorsichtig weiter eingedreht wird. Dadurch ändert sich die Induktivität der Spule und damit auch die Resonanzfrequenz des Schwingkreises. Den letzten Sender „oben“ erreicht man, wenn nur die Drehkohälfte mit der Bezeichnung „O“ angeschlossen ist.

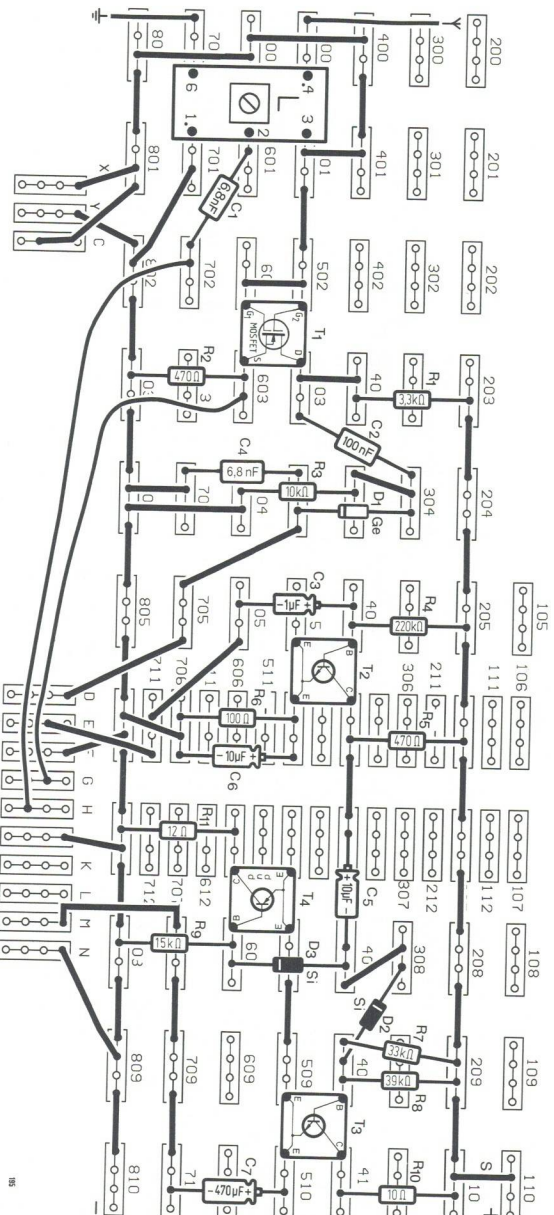


Bild 195. Aufbau zu Bild 194.

17. AMP-Schaltungspraxis

In den letzten Experimenten sorgte unser AMP nur dafür, daß aus schwachen NF-Signalen kräftiger Sound wurde. Er war eben der „Endverstärker“, der Terminator in der Informationskette. Höchste Zeit, ihm wieder eigene Arbeit zu geben.

Tönen und Blinken

Vieles, was sich schon mit zwei Transistoren machen ließ, geht auch mit dem AMP. Nur meist besser, denn er hat genügend Power.

141

Wir stecken die Schaltung nach Bild 196 zusammen. Dann drücken wir den Taster. Klingt das nicht fast wie bei der Geisterbeschwörung?

Tatsächlich – es ist die gleiche Schaltung. Nur ohne den MOSFET-Zauberer in der Minusleitung.

Was passiert da eigentlich? Wir wissen – der AMP hat zwei Eingänge. E und V. An V läßt sich die Verstärkung einstellen. Je mehr Widerstand nach Minus, um so kleiner wird sie. Um so stärker wirkt nämlich innen ein Gegenkopplungswiderstand vom Ausgang auf diesen Eingang. E ist das ganze Gegenteil. Ein Signal vom Ausgang führt an ihm zum *Mikropeln*. Was dabei passiert, hängt von der Situation an V ab. An diesem Eingang liegt in Bild 196 aber ein Kondensator. Und der ist noch leer, wenn wir den Taster drücken. Das bedeutet, V liegt praktisch an Minus, keine Gegenkopplung also. Unser AMP legt mit seiner vollen Verstärkung los (so um 5.000). Das bedeutet, der Ausgang „fährt“ voll an den oberen Anschlag, praktisch bis etwa 1,4 V unter die Batteriespannung. Wir haben dazu im KOSMOS-Labor ein Experiment gemacht – mit einer einstellbaren Spannung an E bei offenem An-

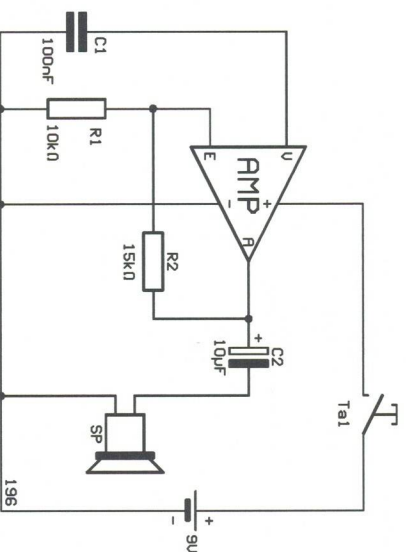


Bild 196. AMV mit AMP. Drei Bauelemente bringen ihn zum Schwingen.

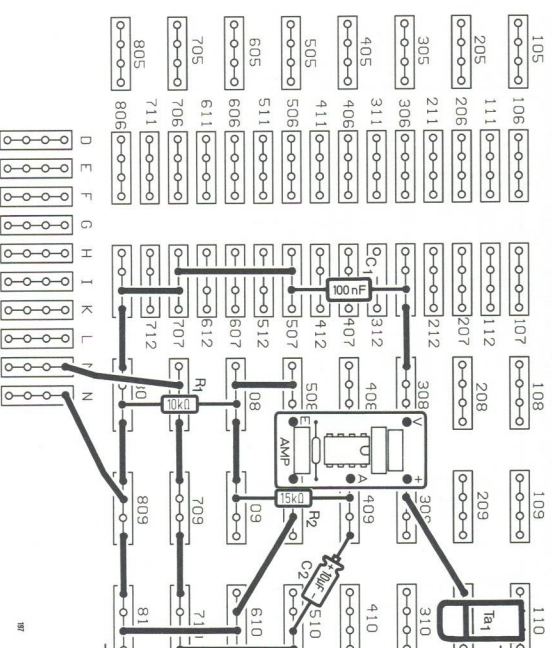


Bild 197. Aufbau zu Bild 196.

schluß V. Dann ist die Verstärkung zwar nur gleich 1, aber man sieht, worauf es ankommt. Der Ausgang hat etwa halbe Batteriespannung (also 4,5 V bei 9-V-Batterie), wenn E an Minus liegt. Bei 1 V an E steigt die Ausgangsspannung ebenfalls um 1 V (Verstärkung ist ja gleich 1). Mit 3,1 V an E ist der Anschlagwert von 7,6 V erreicht. So etwa ist auch der Teiler aus R1 und R2 in Bild 196 eingestellt. Dort müssen wir aber auch noch mit C1 rechnen. Durch einen kleinen Strom aus V heraus wird er geladen. Auch dazu haben wir eine „Zeitpummessung“ gemacht. Übersteigt die Spannung von V die an E um nicht ganz 0,6 V, kann E den Verstärker nicht mehr steuern. Der Ausgang merkt's und läßt sich nun von V führen. Der will aber genau andersherum steuern: je mehr Spannung an V, um so weniger an E. Wir werden diesem Verhalten „pur“ bei den Operationsverstärkern begegnen. Der AMP ist ein spezieller Typ dieser Gattung mit gewissen Eigenheiten. Jedenfalls schaltet der Ausgang bei entsprechender höherer Spannung an V gegenüber E auf fast 0 V herunter. Nun bekommt C1 allerdings keinen Ladestrom mehr – seine Ladung fließt in Richtung V ab. Das hält den Ausgang noch eine kurze Zeit auf 0 V. Schluß ist damit bei etwa 0,6 V an V. Jetzt kommt E wieder zum Zuge. Wie oben festgelegt: 0 V an E bei weniger als 0,6 V an V gibt halbe Batteriespannung am Ausgang. Das Spiel beginnt von vorn. (Siehe auch das noch folgende Bild 206 und den Abschnitt „AMP von innen“!

142

Durch Austausch von R2 gegen 100 k Ω verändern wir die Bedingungen. Wir hören beim Drücken des Tasters jetzt einen viel höheren Ton – es klingt fast schon nach einer Mücke. Wir überlegen kurz: Klar – E erhält einen kleineren Teil der Ausgangsspannung. Dieser Wert wird an C1 schneller erreicht, und die Vorgänge laufen schneller ab vor allem in Laderichtung.

Auf dem Bildschirm eines Oszilloskops haben wir im KOSMOS-Labor die Spannungsverläufe an V und am Ausgang (also auch an E) beobachtet. Es sieht aus, wie es logisch ist: an V eine „verbogene“ *Sägezahn*schwingung (siehe auch Abschnitt 24 – Anstieg erst steil, dann immer flacher, Rücklauf kurzer), denn C1 läßt sich langsamer auf, als er sich entlädt. Der Ausgang und damit E zeigen eine Rechteckschwingung mit breiten hohen Teilen (während der Ladezeiten) und schmalen tiefen (während der Entladungszeiten von C1).

143

Mit 1 μ F statt 100 nF für C1 (richtige Polung beachten – „Kerbsseite“ an V!) gelangen wir wieder in mittlere Tonalagen. Die größere Kapazität braucht natürlich länger, bis das „Rinnsal“ – Strom aus V sie gefüllt hat! Das gleich also die kleinere Umschaltspannung der TeilerEinstellung wieder aus.

144

Mit 10 μ F für C1 können wir fast Motorrad fahren. Jedenfalls klingt es so ähnlich. Nur der Gasgriff fehlt. Also wird R1 durch P1 ersetzt und der Schleifer mit Minus verbunden. Und zum Schluß noch eine ganz sparsame Standgeseinstellung: 100 μ F für C1. Das blubbert gemächlich und die Luft bleibt sauber.

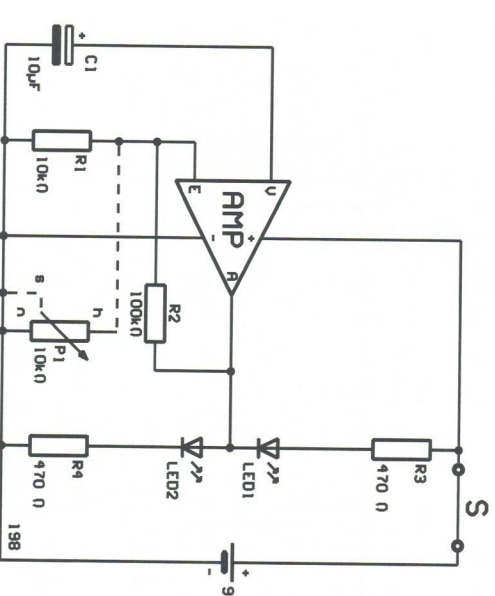


Bild 198. C1 gibt das Tempo vor: AMP als Blinker.

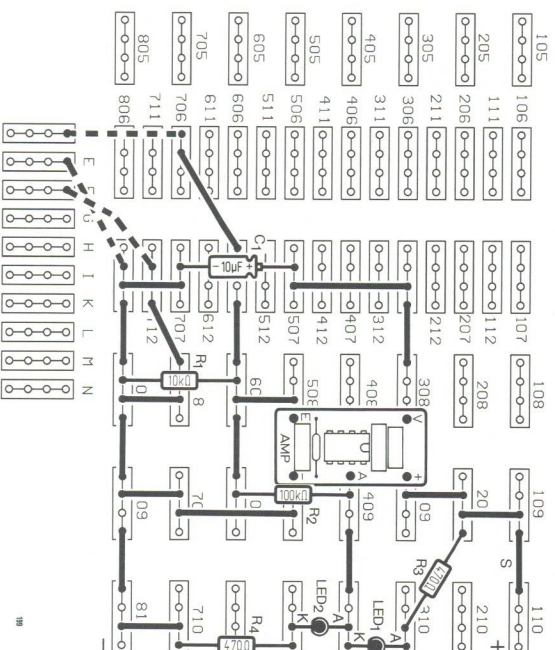


Bild 199. Aufbau zu Bild 198.

145

Wieder einmal gelingt der Umstieg von Ton auf Bild mit der Schaltung nach Bild 198, zunächst noch ohne die gestrichelten Brücken. Je langsamer unser AMP am Ausgang umschaltet, um so schöner läßt sich dieser Wechsel in das Blinken von Leuchtdioden umsetzen. Mit den Werten von Bild 198 sehen wir davon jedoch vorerst nichts. Beide Leuchtdioden scheinen gleichmäßig und dauerhaft zu leuchten. Wir wechseln daher R_2 in 39 k Ω . Aha – jetzt flimmert! Da das aber auch noch kein ordentlicher Blinker ist, erinnern wir uns und vergrößern C_1 auf 100 μF . Jetzt ist die Welt in Ordnung. Es blinkt und wechselt ohne lange Übergänge hin und her. Dafür sorgt schon die hohe AMP-Verstärkung.

146

Statt R_1 setzen wir wieder unser Poti P1 ein, indem wir die gestrichelten Brücken nun einstecken (Schiefer an Minus). Wir drehen langsam nach oben: Der Übergang zwischen erkennbarem Blinken und scheinbarem Dauerleuchten läßt sich gut beobachten, also der Bereich der von der Augentätigkeit bedingten Verschmelzungsfrequenz.

Integrierter Schmitt

Den vorigen Aufbau brauchen wir kaum zu ändern, um den AMP auch als Schwellenschalter zu nutzen. Daß das möglich ist, ließ sich schon bei der Untersuchung der Schwingbedingungen ahnen.

147

Nach Bild 200 setzen wir unser Poti P1 für den Kondensator C_1 ein. Wir können nun die Spannung an V beliebig manipulieren. Drehen wir also an P1 von Plus bis Minus und zurück und beobachten aufmerksam die Leuchtdioden. Zuerst leuchtet LED2. Klar – V an 0 V, also maximale Verstärkung, Rückkopplung von A auf E fährt den Ausgang sofort an den oberen Anschlag. Zustand hält sich selbst, da Ausgangsspannung über den Teiler R_2 , R_1 auf E wirkt. LED2 leuchtet also.

Wir drehen nun P1 langsam hoch. Noch in der ersten Hälfte des Drehbereiches wechselt das Licht plötzlich auf LED1 über. Jetzt heißt es ein ganzes Stück zurückdrehen, bevor wieder LED2 leuchtet. Aha – die Hysteresis! Warum? Nun, wir haben mit P1 die Spannung für V um etwa 0,6 V über die von E gehoben. (Diese Spannung beträgt wegen R_1 , R_2 etwa 3 V.) Das hat den Ausgang von seiner Maximalspannung auf praktisch 0 V gekippt. Jetzt verfügt V über mehr als genug Spannung „darüber“. Also heißt es runterdrehen bis unter 0,6 V, dann übernimmt E: Die kleine Spannung von etwa 50 mV am Ausgang reicht, sobald V nicht mehr „dominiert“, um den Ausgang auf Maximalspannung hochzuschalten. Im Vorgriff auf den nächsten Abschnitt: Die *Differenz* an den Verstärkereingängen wird für den „nicht umkehrenden“ (*nichtinvertierenden*) Eingang E wieder positiv.

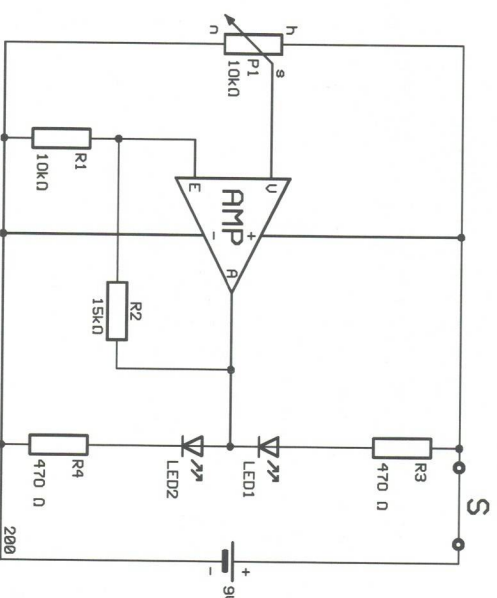


Bild 200. Schwellen-Schalter. Auch im AMP gibt's einen Schmitt!

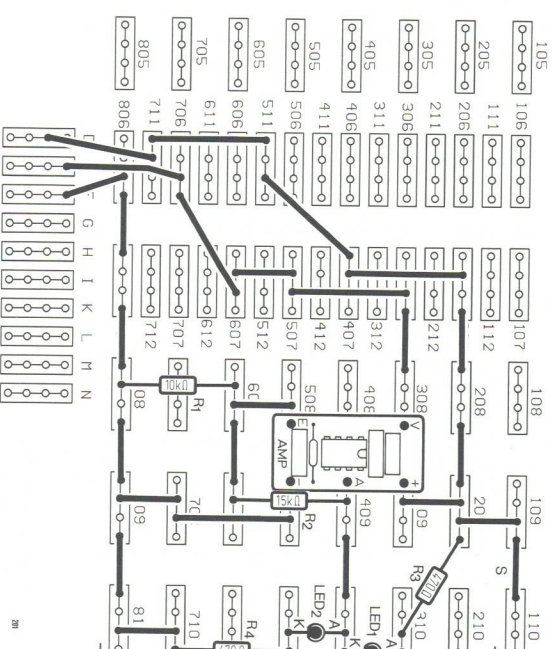


Bild 201. Aufbau zu Bild 200.

Monoflop und Flip-Flop – kein Flop mit AMP!

Selbstverständlich kann er auch das. Die Mechanismen der Spannungen an E und V brauchen nun wohl kaum neu erklärt zu werden.

148

Von der Monoflopfunktion überzeugen wir uns durch Aufbau der Schaltung nach Bild 202.

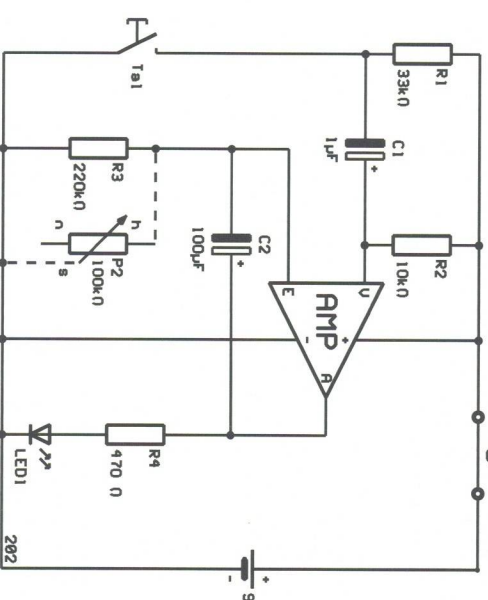


Bild 202. Monoflop mit „Dynastart“. AMP mit Zeitfunktion.

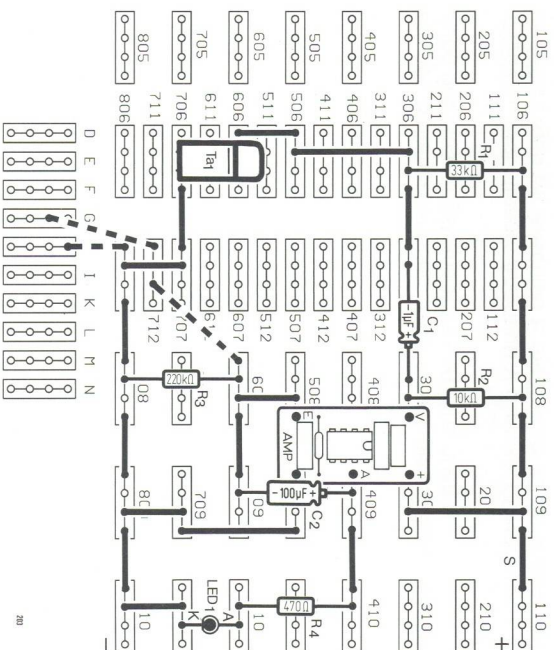


Bild 203. Aufbau zu Bild 202.

Batterie ein – LED1 ist dunkel. Druck auf Ta1 – LED1 beginnt zu leuchten. Nach reichlich 10 s verlöscht sie wieder. Zeitfunktion bewiesen. Kurzes Nachdenken: V ist durch R2 positiv vorgespannt, E liegt über R3 an Minus. Also eine eindeutige Ausgangssituation – Ausgang muß nach Minus durchgeschaltet sein. Daher führt V nur etwa 1,1 V. Druck auf Ta1 schaltet V kurzzeitig (*dynamisch*) an Minus, E beherrscht die Szene, denn „ein wenig Spannung“ ist am durchgeschalteten Ausgang immer da, wird über E verstärkt – A geht auf Maximalspannung. Der Ladestrom für C2 durch R3 hält E auf Spannung, die aber in der Differenz zu V bald die Schwelle von 0,6 V unterschreitet. Nun ist erneut V der Stärkere, der Ausgang schaltet zurück, die Leuchtdiode verlischt. (Bitte den Abschnitt „Amp von innen“ und Bild 206 beachten!)

149 Wir verlängern die Leuchtzeit durch Tausch von C2 gegen 470 µF. Dann schalten wir für R3 P2 ein (gestrichelte Drahtbrücken einsetzen) und legen den Schalter an Minus. Jetzt läßt sich die Leuchtzeit einstellen. Überzeugt euch auch davon!

150 Durch Umbau und Ergänzungen verändern wir Bild 202 zu Bild 204.

Zwei Taster gilt es sinnvoll zu bedienen. Druck auf Ta1: LED1 geht an. Klar – dynamischer Start wie oben. Druck auf Ta2: Die LED verlischt. Jeder Zustand hält beliebig lange an. Es flippt und floppt.

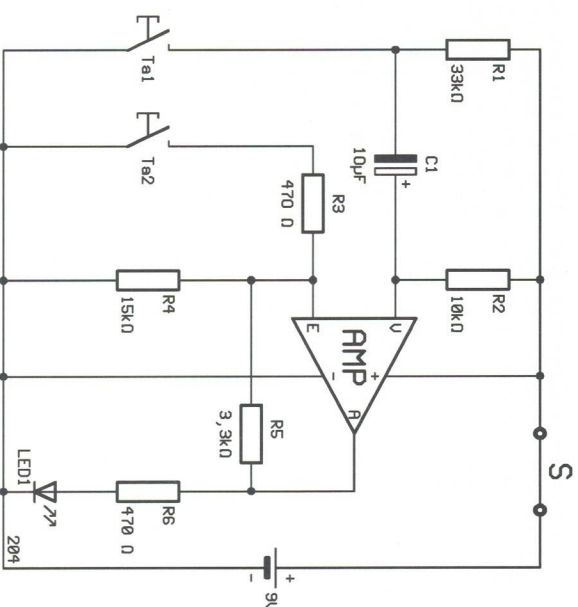


Bild 204. Hält in jeder Lage: Flip-Flop-AMP.

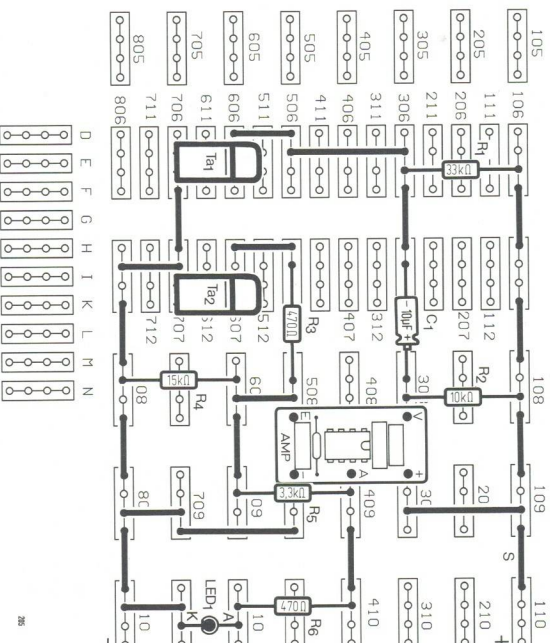


Bild 205. Aufbau zu Bild 204.

AMP von innen

Bild 206 schlägt eine Brücke zwischen den bisher erprobten AMP-Schaltungen und den Kenntnissen, die die noch folgenden Abschnitte zu Operationsverstärkern („OP's“) vermitteln. Ein Leszeichen zum späteren Nachschlagen ist zu empfehlen! Man beachte, daß der AMP mit nur einer Betriebsspannung arbeitet, während die später folgenden OP-Versuche symmetrisch mit zwei 9-V-Batterien versorgt werden. Wie man sieht, folgen daraus in der OP-Betrachtungsweise für den AMP einige Eigenheiten der Innenschaltung, damit er richtig funktioniert. Die Spannungsangaben gelten für 9-V-Versorgung und streuen exemplarabhängig. Natürlich enthält der AMP keine echten Batterien. Aber die Schaltung wirkt letzterendes so, daß durch diese „Potentialverschiebungen“ mit E an Minus etwa die halbe Batteriespannung an A erscheint – gerade recht für eine möglichst große Aussteuerbarkeit nach oben und unten hin.

Der Verstärker am Eingang E ist als „1-Verstärker“ geschaltet, hat also einen hohen Eingangswiderstand. Statt der sonst dafür üblichen Direktverbindung von seinem Ausgang zum invertierenden Eingang sorgt die symbolische Spannungsquelle von 0,6 V dafür, daß der Eingang gegen Minus genügend weit angesteuert werden kann – auch mit RC-Kopplung für Wechselfrequenzen! Für solche Verstärker werden meist 0,2 V Spitzen-Wechselfrequenz vorgegeben. Bis dahin verstärkt er noch schön linear. Die Spannung von rund 0,6 V erscheint am nichtinvertierenden Eingang des nachgeschalteten Verstärkers und bildet sich am Eingang V ab. (Näheres siehe ab Abschnitt 24!) Zusammen mit der Spannung im Gegenkopplungszweig dieses Verstärkers ergibt sich die Ruhe-Ausgangsspannung von (etwa) halber Batteriespannung. Auch dieser Verstärker ist zunächst nur ein „1-Verstärker“ – bis Eingang V mit einem Widerstand nach Minus verbunden wird. Ist er so groß wie der interne (Richtwert 6 kΩ), wird zweifach verstärkt, ist er nur 1/9 von diesem, dann zehnfach usw. – wie bei den OP's noch erläutert wird.

Da es in diesem Abschnitt nicht ohne Vorfälle geht, nehmen wir nun noch Anleihen in den Abschnitten 19 und 27 und greifen zum Meßinstrument unseres Experimentierkastens. Es wurde in Bild 206 bereits mit eingezeichnet. Durch den Vorwiderstand von 100 kΩ wird es zum Voltmeter für 10 V Vollauschlag. Die Anzeige ist dabei nicht allzu fein, aber es geht uns ja nur um's Prinzip.

151 Wir schließen die Batterie an die Schaltung nach Bild 206 an und achten auf das Instrument: Der

Zeiger erreicht die Marke 7. Nun legen wir V mit Brücke Y1 an Minus (also höchste Verstärkung): Es ändert sich praktisch nichts. Folgerung: Bei offenem Anschluß E liegt Ausgang A auf der höchsten möglichen Spannung. Sie bleibt deutlich un-

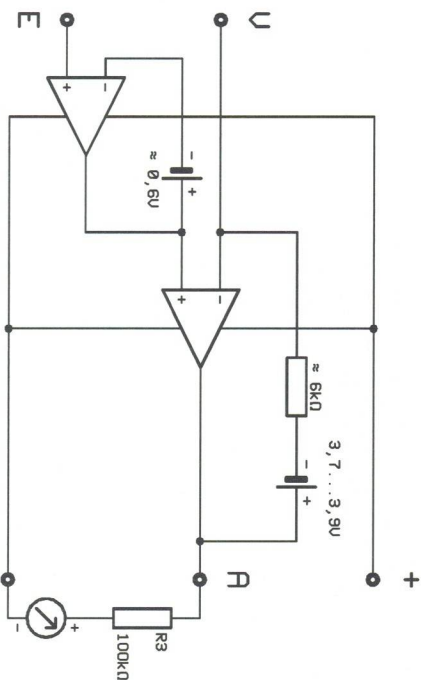
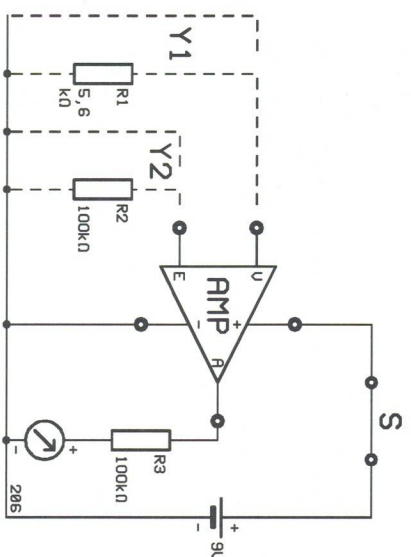


Bild 206. AMP von innen.



– der Ausschlag geht zurück, der Zeiger bleibt etwa bei 4. Das ist etwa halbe Batteriespannung. Nun tauschen wir die Brücke von E nach Minus (Y2) gegen einen Widerstand R2 von 100 kΩ und stellen fest: Am Ausgang ändert sich nichts. Doch an einen so hohen Widerstand läßt sich gut ein Signal anlegen, das verstärkt werden soll!

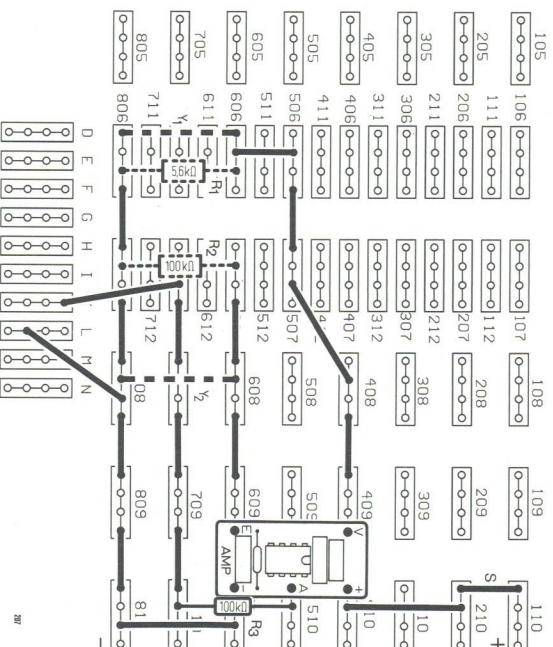


Bild 207. Aufbau zu Bild 206.

ter der Batteriespannung. Das macht die Sättigungsspannung des Ausgangstransistors von Plus nach A.

152

Bei offenem Anschluß V (Brücke Y1 entfernen) legen wir Anschluß E mit Brücke Y2 an Minus. Ahha

153 Bei weiterhin 100 kΩ an E legen wir für R1 5,6 kΩ von V nach Minus. Wir sehen, daß der Ausschlag um gut 0,5 Skalentelle größer wird. Denn: Die Verstärkung ist von 1 (V offen) auf 2 (äußerer Widerstand etwa gleich dem inneren) gewachsen. Also wird die untere „Verschiebung“ von knapp 0,6 V oben zweifach verstärkt. Zur Spannung im oberen Zweig addiert sich also der vorherige Wert zweimal.

154 Wir setzen von V nach Minus für R1 kleinere Widerstandswerte ein, beginnend mit 3,3 kΩ, und bemerken: Bereits bei etwa 1 kΩ hat der Zeiger den Höchstwert (etwa 7) erreicht. Selbst mit V direkt an Minus (mit Brücke Y1) wird's nicht mehr. Klar: 1 kΩ ergibt etwa 7-fache Verstärkung der knapp 0,6 V, also 4,2 V. Zur Spannung im oberen Zweig addiert, erhält man mehr als 8 V. Doch der Ausgang kann nicht über etwa 7,6 V hinaus, wenn 9 V Batteriespannung anliegen. Alles klar.

Ströme im Spiegel

Bereits am Ende von Abschnitt 8 (Bild 87) haben wir gelernt: Transistoren sind, wie alle Halbleiterbauelemente, temperaturempfindlich. Die Basis-Emitter-Spannung sinkt bis zu 3 mV

je Grad Temperaturerhöhung. Hat ein Transistor also z. B. bei 0,60 V eben noch gesperrt, tut er das bei einer um 3 bis 4 Grad höheren Temperatur nur noch bis 0,59 V. Anders gesagt: Der Kollektorstrom steigt, wenn der Transistor wärmer wird. Erwärmt man jedoch zwei gleiche Transistoren gemeinsam (oder kühlt sie ab) und sind sie dabei wie nach Bild 208 verbunden, passiert bestenfalls gar nichts. Da der Strom durch T2 ein „Spiegelbild“ von dem durch T1 ist, heißt eine solche Anordnung auch *Stromspiegel*. Die guten Temperatureigenschaften integrierter Schaltungen sind großenteils auf derartige Schaltungsstelle zurückzuführen.

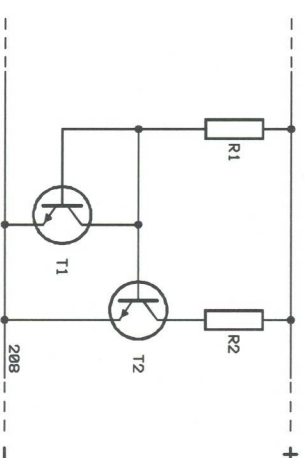


Bild 208. Schaltungsdetail Stromspiegel: Hat die Temperatureffekte im Griff.

Erwärmt man nun jedoch nur z. B. T1, ist es aus mit dem Gleichgewicht. T1 entzieht, da seine Basis-Emitter-Spannung sinkt, T2 Basisstrom, und die Spannung am Kollektor von T2 steigt. Umgekehrt geht's beim Abkühlen.

155

Eine praktische Anwendung lernen wir im Experiment nach Bild 209 kennen. T1 wird als Temperaturfühler außerhalb der Steckplatte benutzt, an einem Ort, wo es heiß werden kann (aber nicht sollte). Zur Verbindung mit der Steckplatte benutzen wir eine zweifache „Klingelleitung“. Die blankgemachten Enden werden zum einen um den Emitter-, zum anderen um Basis- und Kollektorschluß gewickelt. Ein Fön, auf diesen „Thermofühler“ gerichtet, wird nun bereits Brandalarm auslösen. Im „wirklichen Leben“ beginnt es dann aus den Löschwasserdrüsen zu regnen.

Und wie geht das? Bleiben D1 und C1 zunächst draußen, kann man es schrittweise erkennen: E wird von A über R4, R3 auf rund 1/4 der Ausgangsspannung gehalten. Sofern V nicht beschaltet ist, liegt dieser Anschluß um 0,55 bis 0,6 V höher als E, wie inzwischen erkannt. Die Verstärkung ist gleich Eins. Schließt man nun C1 an, schaltet dieser den Eingang V kurzzeitig nach Minus durch, und die Verstärkung steigt auf 5.000. A gelangt in die Sättigung (etwa 7,5 V). C1 läßt sich

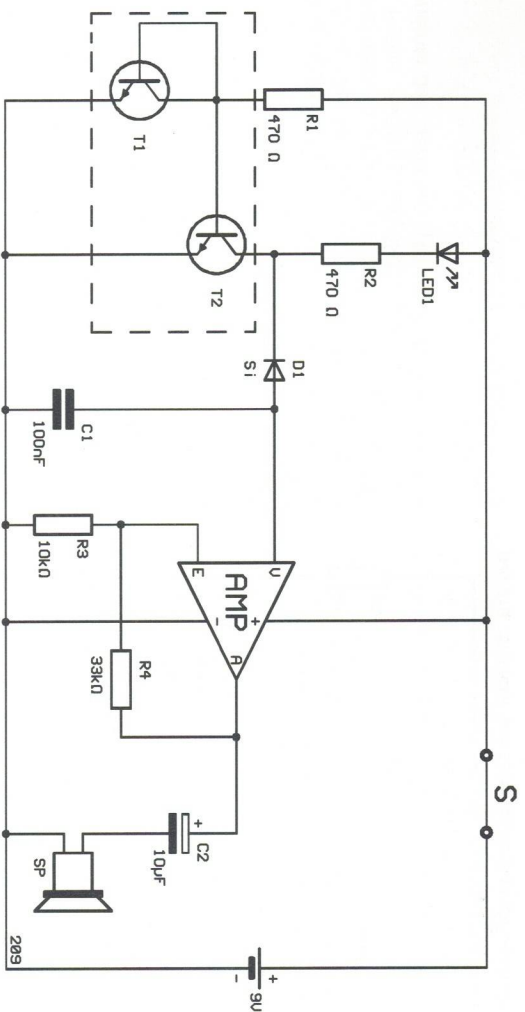


Bild 209. Stromspiegel macht möglich: Akustischer Alarm bei Brandgefahr.

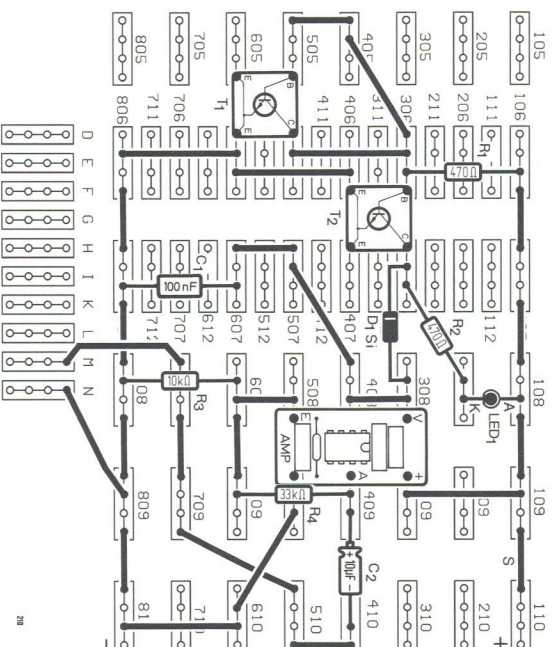


Bild 210. Aufbau zu Bild 209.

nun auf, und der durch Bild 196 bereits bekannte Generatormechanismus läuft ab. Der Lautsprecher läßt es uns als Ton hören. Steckt man jetzt D1 ein und ist T1 noch kühl ge-

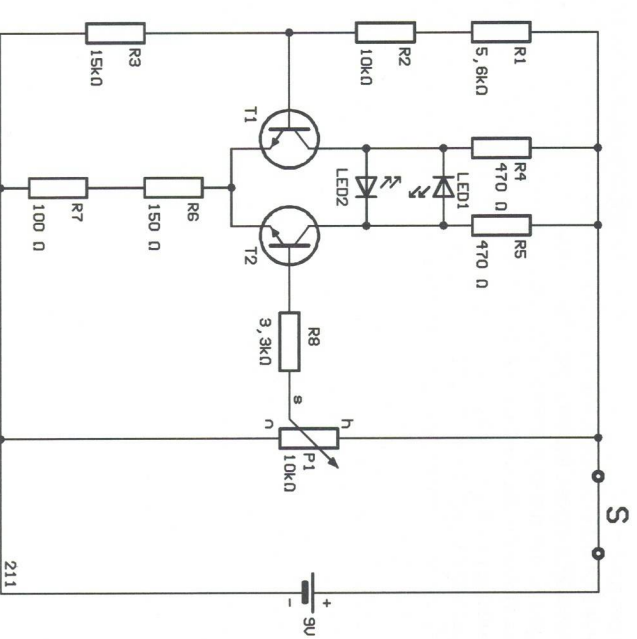


Bild 211. Differenzverstärker – beherrscht das Hexeneinmaleins: Zweimal falsch gleich richtig!

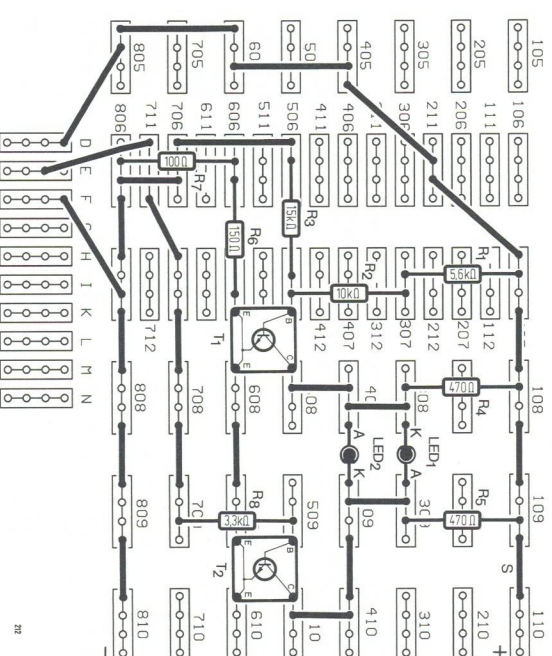


Bild 212. Aufbau zu Bild 211.

nug, setzt der Ton aus. Denn nun „zieht“ T2 Anschluß V auf eine Spannung herab, die der Summe aus Flußspannung von D1 und der (geringen) Sättigungsspannung von T2 entspricht. Der Teiler an E ist so ausgelegt, daß die Spannung an V unter der Summe aus der Spannung an E plus 0,55 bis 0,6 V bleibt. Solange also LED1 wegen des leitenden T2 leuchtet, ist es ruhig. Alarm setzt ein, wenn T1 wärmer wird (Brand!) und dadurch T2 den Basisstrom entzieht. Die Kollektorspannung von T2 steigt stark an, gibt V frei, und der Generator kann schwingen.

18. Konstruktive Differenzen

Der AMP hat es gezeigt: Zwei Eingänge eröffnen viele Wege. Und was am Ausgang passiert, hängt von dem ab, was *zwischen* beiden Eingängen anliegt. Wie kann so etwas innen aussehen?

156

Mit dem Experiment nach Bild 211 werden die Dinge wieder überschaubar. (Fast) alles ist hier doppelt: Transistoren, Leuchtdioden, Eingänge – sogar Ausgänge. Und ein Teiler für jeden Eingang. Der eine einstellbar. Drehen wir am Poti Interessantes tut sich auf dem Wege von n nach h: Zunächst leuchtet LED1. Beim Hochdrehen verlischt sie jedoch wieder. Dafür leuchtet – etwas später – LED2. Warum?

Bild 211 zeigt einen *Differenzverstärker*. Da beide Transistoren vom gleichen Typ sind, haben sie auch weitgehend gleiche Eigenschaften. Es leitet immer der, dessen Basis gegen Minus die höhere Spannung erhält. Da die Basis von T1 an einer festen Spannung liegt (etwa halbe Batteriespannung), haben wir es mit P1 in der Hand, was geschieht.

Ein wenig erinnert die Sache an den Schmitt-Trigger mit Transistoren. Die Spannung über dem gemeinsamen Emittierwiderstand wird von dem Transistor bestimmt, der gerade leitet. Diese Spannung ist um die Basis-Emitter-Spannung kleiner als der Wert am Bauteiler. Das sind in unserem Falle also etwa 4 V. Solange die Spannung an der Basis von T2 unter der von T1 bleibt, hat also T1 das Sagen. Er leitet, und darum leuchtet LED1.

Sobald nun von P1 her genügend Basisspannung an T2 gelangt, also etwas mehr als an die Basis von T1, beginnt T2 zu leiten. Durch Weiterdrehen an P1 können wir bewirken, daß die Spannung am Emittierwiderstand etwas größer wird als vorher. Da muß T1 passen, denn seine Basisspannung wird ja vom linken Teiler festgehalten. Also schließt er seinen Lader und der Strom wird voll von T2 übernommen. LED2 zeigt's an. Zwischen beiden Leuchtbereichen liegt eine Dunkelzone. Schließlich muß die jeweilige Kollektorspannung ja erst um die Flußspannung der LED gegenüber der Batteriespannung gesunken sein.

157 Wir stellen P1 so ein, daß entweder LED1 oder LED2 gerade schwach leuchtet. Beispielsweise LED1. Dann erwärmen wir T1 mit einem Fön (Pappe zwischen T1 und T2 stellen, damit wirklich nur T1 erwärmt wird) und beobachten die Leuchtdiode. Bei günstiger Einstellung läßt sich erkennen: LED1 wird heller. Nun erwärmen wir (nur) T2: LED1 wird dunkler.

Also der übliche Wärmeeffekt. Darum wieder der Griff zum Fön. Beide Transistoren müssen möglichst gleichmäßig erwärmt werden. Nun dürfte LED1 seine Helligkeit trotz steigender Temperatur kaum noch ändern. Das erinnert wieder an das Experiment mit dem Stromspegel. Und es wird klar: Beide Transistoren haben (in etwa) den gleichen Temperatureffekt. Als Verstärker nutzen wir sie gemeinsam. In der Praxis werden sie eng zusammengepackt. Oder sie sitzen eben als Teil einer *Integrierten Schaltung* ohnehin dicht beieinander auf dem Chip. Verstärkt werden soll nur die *Differenz* ihrer Eingangsspannungen. Beide haben den gleichen Temperatureffekt. Der fällt bei der Differenzbildung einfach heraus. Es wird also ein in der Wissenschaft beliebtes Verfahren genutzt: Fehler zweimal auftreten lassen und beide Ergebnisse voneinander abziehen. Resultat: Null Fehler. Null Problem!

Füllstandszeiger für Ladungen

Betrachtet man jede Stufe des Differenzverstärkers für sich, sieht er emittierseitig sehr nach einem Emittierfolger aus. Und der hat ja bekanntlich einen hohen Eingangswiderstand – rund gerechnet Stromverstärkung mal Emittierwiderstand. In unserer Schaltung kommen da etwa 100 k Ω heraus. Das ist hoch genug, um mit Kondensatorladungen ausreichende Beobachtungszeiten zu erreichen.

158 Wir ersetzen unser Poti durch einen „zeitabhängigen Teiler“, 100 k Ω von Plus, 100 μ F nach Minus (Bild 213). Drücken wir Ta1 und warten, bis LED2 leuchtet. Zuerst ist T2 gesperrt. Also leuchtet LED1. Währenddessen lädt sich C1 über R8 auf. Dadurch erreicht die Spannung von C1 nach kurzer Zeit die Teilerspannung von T1: LED1 verlischt. Für LED2 reicht's aber erst, wenn T2 genügend geöffnet ist. Sobald sie zu leuchten beginnt, wissen wir: C1 ist jetzt auf mehr als die halbe Batteriespannung geladen, auf jeden Fall aber auf mehr als die Teilerspannung von T1. Lassen wir Ta1 wieder los, geht LED2 aus. Wenig später leuchtet wieder LED1 und sagt uns damit: Die Ladung von C1 ist jetzt geringer, als der halben Batteriespannung entspricht. Sein Leckstrom wird ihn bald ganz entladen haben.

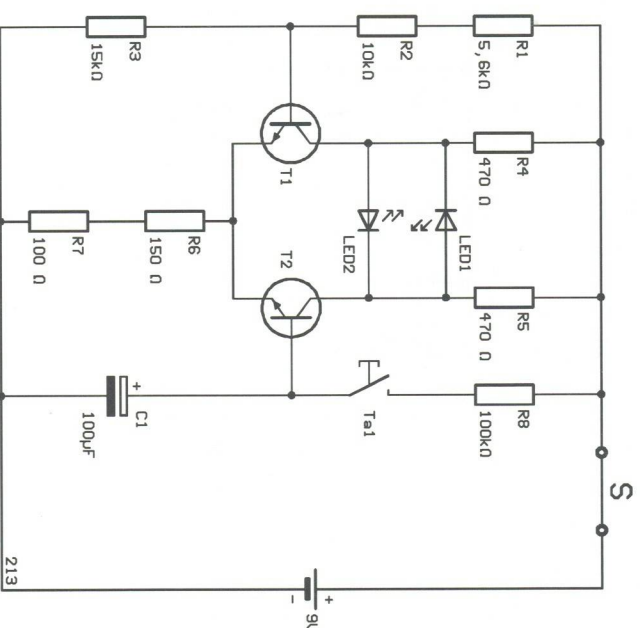


Bild 213. Voll oder leer: Ladungsanzeiger gibt Auskunft.

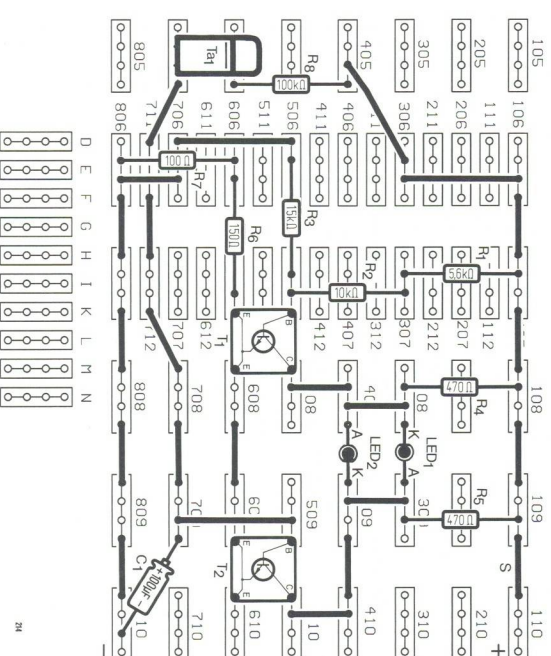


Bild 214. Aufbau zu Bild 213.

Sensible Partnerschaft

Eigentlich ist er für sich allein schon recht empfindlich, unser AMP. Setzen wir noch eins drauf: durch die Kombination mit dem Differenzverstärker. Zwei Ausgänge auf zwei Eingänge – totale Versorgung.

159 Differenzverstärker und AMP werden entsprechend Bild 215 miteinander verbunden. P1 sorgt wieder für Spannung (an der Basis von T2).

Beim Experiment 155 mußten die Transistoren die Ströme für die Ergebnisanzeige gleich noch selbst mit aufbringen. Jetzt überlassen wir das dem AMP. Drehen wir also P1 von n nach h. Es zeigt sich: Die Sache beginnt bei P1 auf n mit leuchten dunkler. Kaum jedoch ist sie verloschen, leuchtet LED 1 bereits hell. Wir haben es gemessen: Die Änderung der Differenzspannung zwischen Basis T1 und Basis T2 zwischen beiden „Hell-Zuständen“ beträgt weniger als 10 mV.

Zum Vergleich: Bei Bild 211 mußte sich die Differenzspannung schon um fast 400 mV ändern, bevor LED2 statt LED1 hell leuchtet. Ein wenig Nachdenken führt zur Erkenntnis (siehe Abschnitt 17): Der AMP braucht kaum 0,6 V zwischen V und E zur Steuerung. Die Leuchtdioden zwischen den Kollektoren dagegen haben fast 2 V Flußspannung, die es zu überwinden gilt.

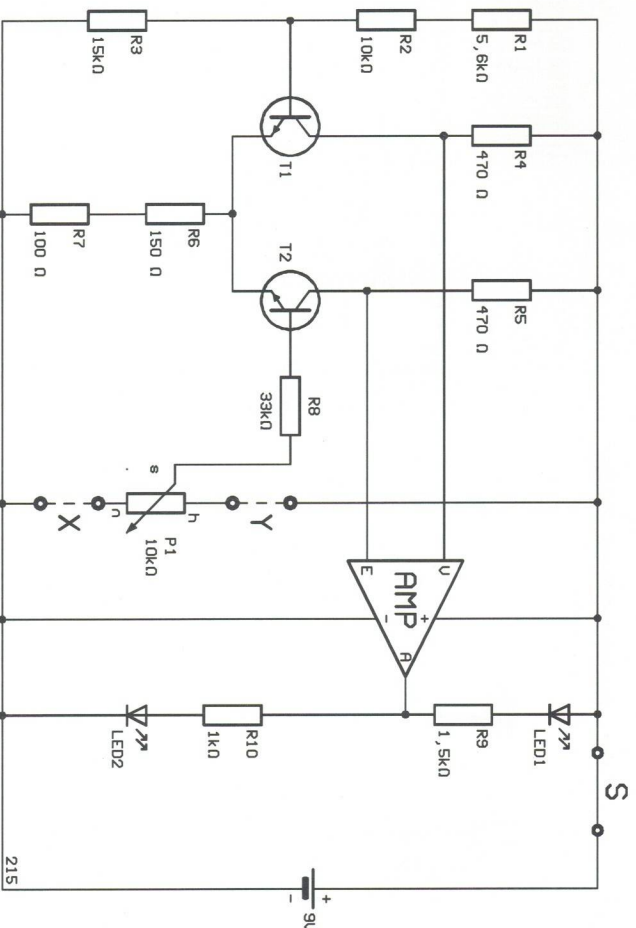


Bild 215. Äußerst sensibel durch Arbeitsteilung: Hochempfindlicher Vergleicher für Temperaturunterschiede.

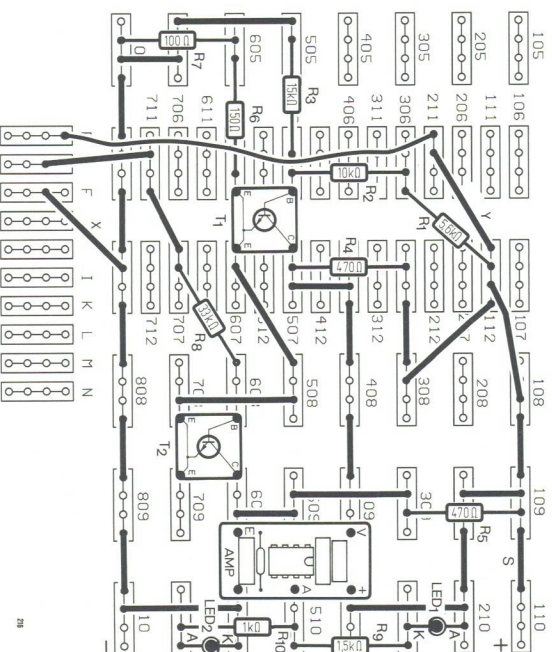


Bild 216. Aufbau zu Bild 215.

fest: Das Gleichgewicht in der Anzeige hat sich geändert, denn die Basis-Emitter-Spannungen beider Transistoren sind nicht völlig gleich. An P1 muß also nachgestellt werden.

Effekte der Stärke

Damit hat der Techniker häufig zu kämpfen: Alles schwingt, was gerade nicht schwingen soll. Und umgekehrt: Bei so viel Verstärkung, wie mit unserer Kombination aus Differenzverstärker und AMP, bleibt das nicht aus. Wir provozieren ein wenig:

162

Wir führen gemäß Bild 217 vom Ausgang A über R8 eine Spannung auf die Basis von T2. C1 sorgt dafür, daß sie „gebremst“ steigt. Für diesen Versuch ist eine nicht mehr ganz frische Batterie gerade richtig. Oder es wird ein Widerstand R11 (gestrichelt) von 10 Ω in die Plusleitung eingefügt. Das gilt auch bei Einsatz des KOSMOS-Netzteils. Ergebnis: Die beiden Leuchtdioden blinken wechselweise. Wir ändern R8 zwischen 10 kΩ und 100 kΩ und dann C1 auf 470 µF und sehen: Die Blinkfrequenz wird kleiner, wenn R oder C vergrößert wird.

163

Nun stecken wir zwischen Basis und Kollektor von T1 einen Kondensator C2 (gestrichelt) von 6,8 nF ein. Jetzt leuchten beide LED, und nichts blinkt mehr! Wir haben also mit einem ganz kleinen David (6,8 nF) die Wirkung des großen Goliath (100 µF) aufgehoben(!?) Nun – ganz stimmt es nicht. In der Mitte liegt die Wahrheit:

160 Nun wird auch unser Temperaturtest „effektiver“. Wir stellen P1 so ein, daß beide Leuchtdioden gleichzeitig (schwach) leuchten. Wieso eigentlich tun sie das? Nun – es gibt in dieser Schaltung sogar einen Punkt, wo der AMP-Ausgang darauf keinen Einfluß hat. Wenn nämlich die Ausgangsspannung genau dem Wert entspricht, den der Teiler LED1 – R9 – R10 – LED2 an der Stelle A ergibt. Wir überzeugen uns und ziehen dazu den AMP einfach aus den Steckern. Bei dieser Einstellung wird einmal T1 und zum anderen Mal T2 zwischen Daumen und Zeigefinger genommen. Wir stellen dabei fest: Erwärmen von T1 – LED2 leuchtet stärker, Erwärmen von T2 – LED1 überwiegt. Abschließender Griff zum Fön: Bei gleichzeitiger, gleichmäßiger Erwärmung beider Transistoren bleibt das Gleichgewicht.

161

Wir fügen in die Potilleitungen nach Plus und Minus anstelle der Brücken X und Y je einen Widerstand von 10 kΩ ein. Dann wird an P1 wieder auf gleiches Leuchten beider Anzeigen eingestellt. Wir bemerken: Jetzt läßt sich viel feiner einstellen als vorher, das Poti wirkt durch die Begrenzungswiderstände wie eine „elektrische Lupe“. Nun tauschen wir T1 und T2 gegeneinander aus und warten eine kurze Zeit wegen des Temperaturausgleichs. Danach stellen wir

Solange C1 leer ist, bleibt T2 gesperrt. Die dadurch hohe Spannung an A lädt über R8 C1, bis an der Basis von T2 die Teilerspannung der Basis von T1 überschritten wird. Jetzt sinkt die Spannung am Kollektor von T2, und der AMP schaltet seinen Ausgang A auf kleine Spannung. C1 beginnt sich zu entladen. Dabei gerät die Schaltung unter den o. g. Randbedingungen (Innenwiderstand der Stromversorgung) in den kritischen Bereich, in dem sich eine höherfrequente Schwingung erregt. Für die LED allerdings bleibt's bei Dauerrlicht. Man kann die HF jedoch auf einem Oszilloskop betrachten. Diese Schwingung vermag aber nicht zu verhindern, daß die Spannung an der Basis von T2 durch diese wiederum „gebremste“ Entladung von C1 kleiner wird. Eingang E erhält nun wieder hohe Spannung und der Ausgang schaltet ebenfalls hoch. Das ist nur ein „kurzer Abriß“ der Vorgänge. Er soll lediglich zeigen, wie solche Schaltungen den Techniker beschäftigen können. Im vorliegenden Falle hilft ihm bereits ein kleiner Kondensator zwischen Basis und Kollektor von T1 – die HF ist weg, aber es blinkt nun eben auch nicht mehr.

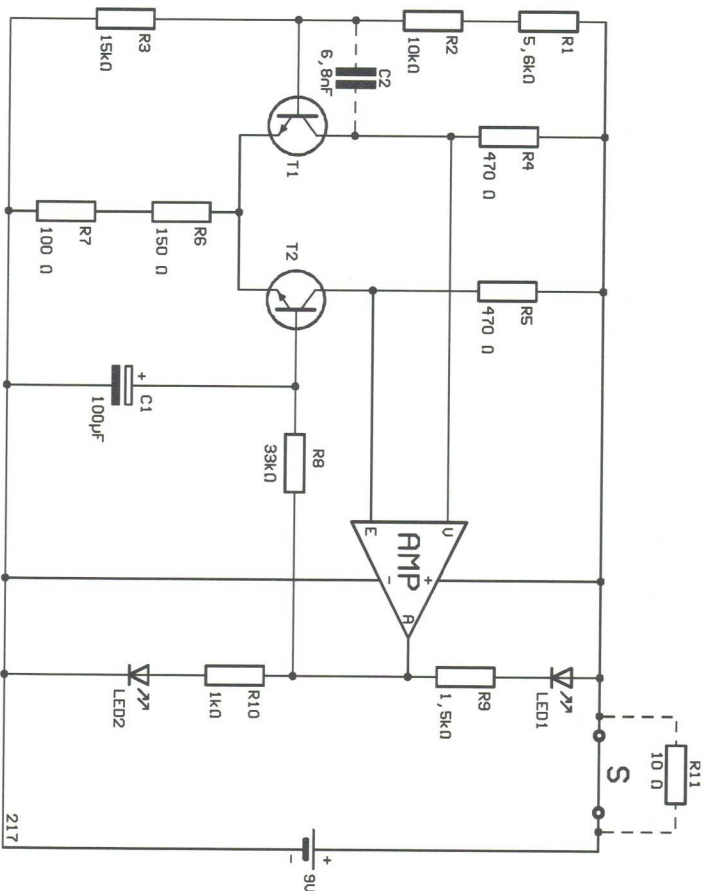


Bild 217. Alptraum des Technikers, sinnvoll genutzt: Alles schwingt ...

Teile eingesetzt, mit denen erst später richtig losgelegt wird. Ein kleiner Vorgeschmack also.

Der Ton, der aus der Kälte kommt

Mit dem Hörer im Ohr gelingt es, ziemlich kleine tonfrequente Wechselspannungen wahrzunehmen. Also auch Differenzspannungen zwischen zwei Punkten einer speziellen Schaltungsart, der *Brückenschaltung*.

164

Nach Bild 219 wird der AMP als Tongenerator beschaltet. In seinen Ausgangskreis fügen wir eine solche Brückenschaltung ein. P1 wird zunächst auf vollen Wert gestellt (s an n). Nach Anschluß der Batterie gibt EP einen Ton ab. Nun wird P1 langsam in Richtung h gestellt. Wir tauschen dem allmählich entschwindenden Ton. Etwa in Mittelestellung ist Ruhe. Beim Weiterdrehen kommt er wieder. Bleiben wir beim *Minimum*. Dann wird T2 zwischen Daumen und Zeigefinger genommen und – der Ton läßt sich wieder zunehmend gut hören. Suchen wir das neue Tonminimum: Es liegt nun bei einem kleineren Wert von P1. Jetzt wird T1 erwärmt. Aha. Das Minimum ist diesmal bei größerem Wert von P1 zu finden. Bis sich beide Transistoren wieder auf die gleiche Temperatur begeben haben, werden wir noch einige Male „nachziehen“ müssen.

Kalibriert man die Potisteilung beim gezielten Erwärmen und Abkühlen eines der Transistoren, entsteht ein *akustisches Thermometer*. Allerdings nur für *Temperaturdifferenzen*. Und wie funktioniert es? Der Tongenerator ist Signalquelle für die Masche aus R3, T1 auf der linken und R4, P1, T2 auf der rechten Seite. Zwischen ihren Verbindungspunkten schlägt der Ohrhörer eine „Brücke“. So nennt man auch das ganze Gebilde. Ergibt sich am Hörer eine Spannungsdifferenz, ist

19. Brücken der Elektronik

Im Grunde geht es weiterhin um „Differenzen“. Darum – mit dem Fön von vorhin in Reichweite – schließen wir die folgenden Experimente gleich an. Bei zwei von ihnen werden neue

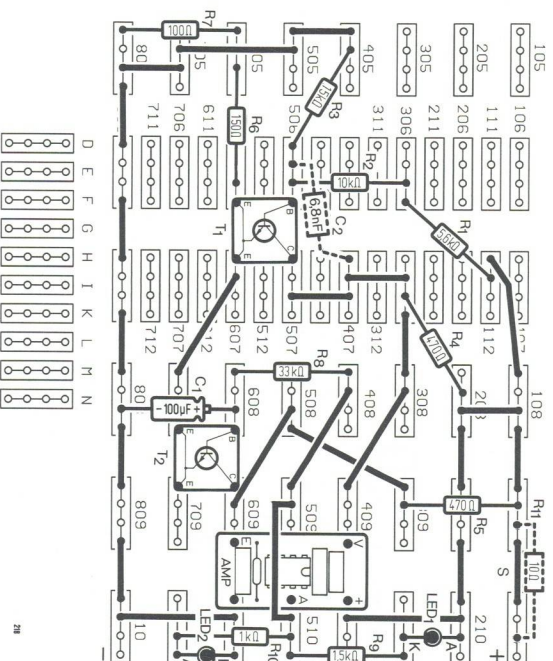


Bild 218. Aufbau zu Bild 217.

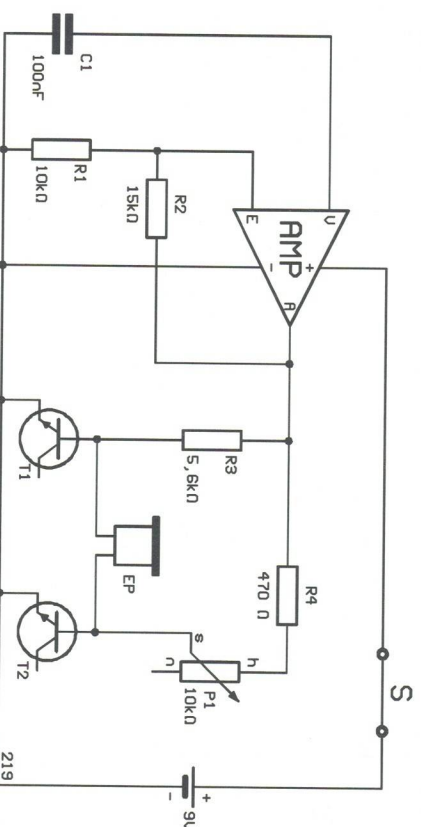


Bild 219. Brücke zwischen den Temperaturen: In der Mitte wird es still!

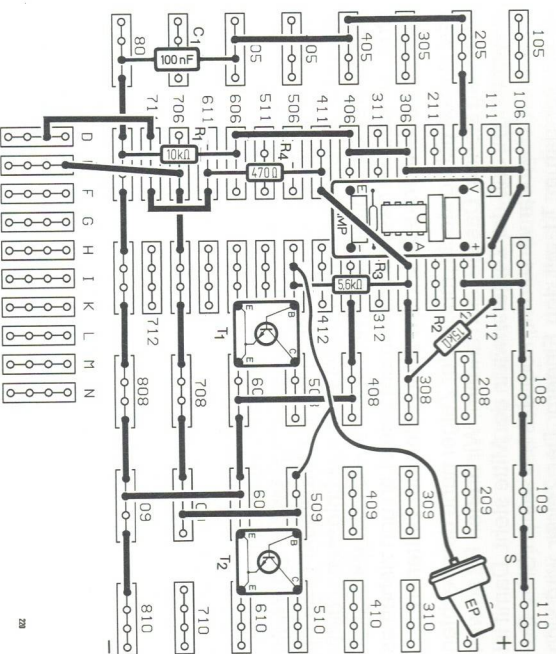


Bild 220. Aufbau zu Bild 219.

die Brücke *verstimmt*. Wir bringen sie ins *Gleichgewicht*, indem der einstellbare, rechte Brückenzweig so verändert wird, daß die Spannung am rechten Ohrhöreranschluß wieder gleich der am linken wird. Die Änderungen kommen von den Basis-Emitter-Dioden von T1 und T2. Je nach ihrer Temperatur ergeben sich über ihnen einige Millivolt mehr oder weniger. Höhere Spannung an T1 (kälter) im linken Zweig gleichen wir durch kleineren P1-Wert im rechten Zweig aus. Übri-gens: R4 ist ein Strombegrenzer für T2 für den Fall, daß P1 bis Anschlag h gedreht wird.

Brücke mit Beleuchtung

Im Vorgriff auf viele interessante Experimente lassen wir nun erstmals einen „echten“ Operationsverstärker (OP) für uns arbeiten. Er wird vorsichtig mit allen Beinen in die leere Fassung des IC-Moduls gesteckt. Dabei muß die Kerbe im Gehäuse der integrierten Schaltung zur Einkerbung in der Fassung zeigen. Von seinen vier gleichen Verstärkern wird diesmal nur einer gebraucht. Allerdings sind zwei Batterien erforderlich. Nur dadurch können OP's ihre schönen Eigen-schaften voll ausspielen, daß alles auf eine gemeinsame Spannung, die „Masse“, bezogen wird. Das ist der waage-rechte Strich am Ende der Leitung, die die beiden Batterien verbindet. Der OP selbst hat keinen eigenen Masseanschluß. Im folgenden Versuch wird der OP als sehr empfindlicher Ver-

gleicher benutzt (Komparator, siehe Abschnitt 24). Er ver-gleicht Spannungen.

165

Beim Aufbau der Schaltung nach Bild 221 müssen wir wegen der Polung der beiden Batterien etwas mehr aufpassen. Die obere sollte zuerst über die Brücke S1 angeschlossen und zuletzt abgetrennt werden. Als untere Batterie wird die im linken Teil des Experimentier-Pults einge-baute verwendet. Sie wird über S2 ein- und ausgeschaltet. Sind beide Batterien angeschlossen, leuchtet entweder LED1 oder LED2. Wir beginnen mit P2 bei Anschlag n und drehen langsam hoch. Im letzten Drittel zwischen s und h ist LED1 mit Leuchten dran. Es dürfte kaum gelingen, den Punkt einzus-tellen, an dem beide Leuchtdioden dunkel sind. Versucht es! Dieser Bereich ist sehr klein. Das liegt an der hohen Verstär-kung des OP, die er ohne verstärkungsmindernde Beschäl-tung aufweist. Da reichen wenige Millivolt zum Umschalten des Ausgangs zwischen Minus und Plus. Da das Poti einen wesentlich größeren Gesamtwiderstand hat als R1, bietet es einen ausreichenden Einstellbereich bei unterschiedlichen Transistortemperaturen.

Wir bleiben bei einer Einstellung, bei der LED1 gerade noch leuchtet, und tippen mit dem Finger auf T1. Diese kleine Tem-peraturänderung genügt! LED1 verlischt, und LED2 leuchtet auf. Je stärker T1 erwärmt wurde, um so länger bleibt es bei diesem Zustand. Darum tippen wir nun T2 an. Jetzt ist wieder

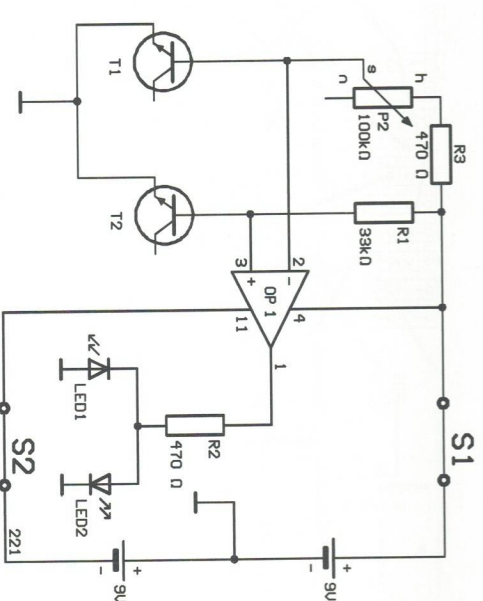


Bild 221. Der Neue auf der Brücke: OP als vergleichender Beobachter.

LED1 an der Reihe. Ein hübsches Spiel, mit dem staunenden Zuschauern schon wieder Geister eingeredet werden können –durch Handauflegen, Anblasen, Antippen mit etwas Rasier-wasser (Verdunstungskälte durch darin enthaltenen Alkohol) usw. Der Abend ist gelaufen.

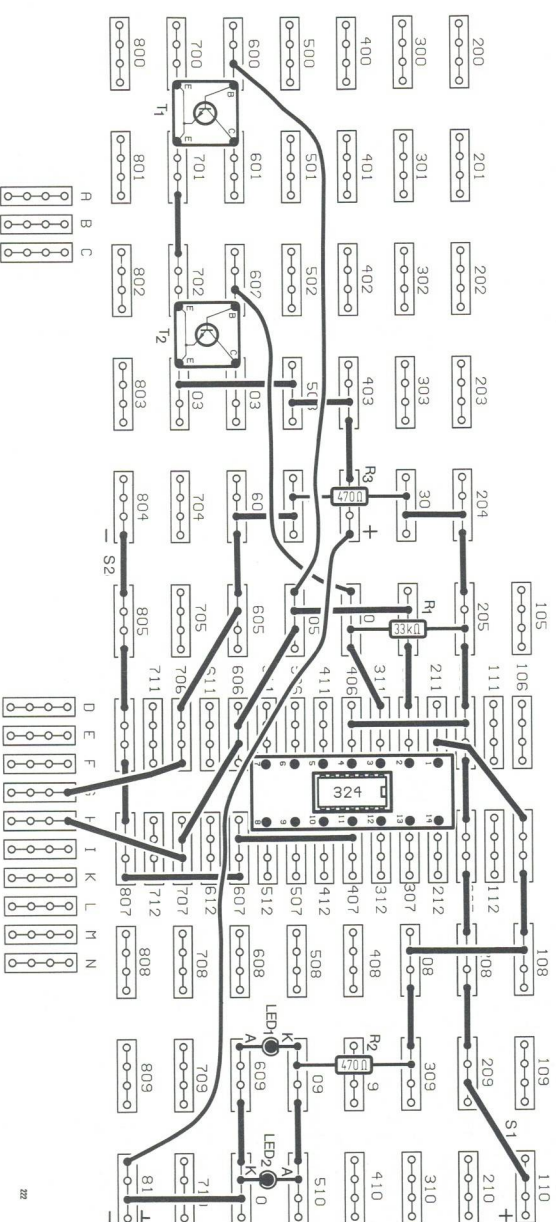


Bild 222. Aufbau zu Bild 221. Hier sind alle Schaltungspunkte miteinander verbunden.

Auch hierzu wieder die Erklärung. Die Brückenschaltung besteht aus R_3 (als Schutz für T1) und P2 sowie der Basis-Emitter-Diode von T1 auf der linken Seite und aus R_1 , T2 (Basis-Emitter-Diode) auf der rechten Seite. Sie wird mit insgesamt 9 V gespeist. P2 ist für den Abgleich da. Für Änderungen sorgen die temperaturempfindlichen Transistoren. Der OP hat die nun schon geläufigen beiden Eingänge, einen, der die Spannung am Ausgang „umdreht“, *invertiert*, der andere, der alles so läßt (der *nichtinvertierende*). Der erste ist mit einem Minus-, der zweite mit einem Plusymbol versehen. Es kommt auf die Polarität der zwischen beiden anliegenden Differenzspannung an, was der Ausgang tut. In dieser Hinsicht gibt es mit dem AMP viel Gemeinsames. Nur bezieht der alles auf den Minuspol einer einzigen Batterie. Und er ist auch innen etwas anders aufgebaut.

Ist die Differenzspannung zwischen den OP-Eingängen am nichtinvertierenden Eingang positiv, führt der Ausgang eine gegen die Masse der Schaltung hohe positive Spannung. LED2 zeigt es mit Leuchten an. Und umgekehrt. Das war bereits die erste Lektion zum OP.

Messen ist Wissen

Auch dies ist ein Abschnitt mit viel Neuland. Vorerst zum „Anfüttern“. Im Wechselspiel einer drehbaren Spule mit Zeiger dran und einem Permanentmagneten passiert in ihm ähnliches wie in Ohrhörer und Lautsprecher: Stromdurchflossene Spule bewegt sich im Magnetfeld. Da der Zeiger nur in einer Richtung Auslauf hat, brauchen wir einen Gleichstrom der richtigen Polung. Nun ging es im vorigen Versuch aber mal so und mal anders herum. Darum waren die Leuchtdioden auch „antiparallel“ geschaltet. An unserer Brücke brauchen wir dennoch nichts zu ändern. Dafür wird mit dem OP ein wenig gezaubert – zuerst mit der Einstellung, dann mit Dioden und Widerständen. Gleich sehen wir, was das bringt.

166

Der Zusammenbau der Schaltung nach Bild 223 erfordert wiederum einige Aufmerksamkeit. Zu achten ist auf richtige Polung der Dioden, des Meßinstruments und der Batterien. Die beiden Dioden kommen aber vorerst noch nicht ins Spiel, sie gehören zum nächsten Versuch. Für D2 wird eine Drahtbrücke eingesteckt. D1 bleibt einfach noch draußen. P2 drehen wir auf Maximum (s an n). Jetzt erst werden die beiden Batterien angeschlossen – diesmal zuerst die untere. Sie wird auch zuletzt abgeschaltet. Oder wir stecken das Meßinstrument zuletzt an und ziehen es zuerst wieder heraus, vor dem Abschalten der Batterien.

Wenn alles richtig steckt, müßte der Zeiger nahe dem rechten Anschlag stehen. Das läßt sich ändern. Wir drehen P2 so weit in Richtung n, daß der Zeiger etwa in der Mitte steht. Damit ist unsere Brücke zwar verstimmt, aber das hat seinen Sinn. Berühren wir darum T1 mit den Fingern: Der Zeiger wird sich

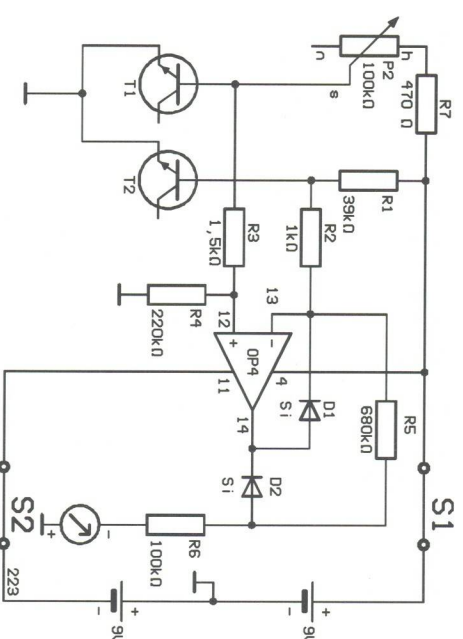


Bild 223. Die richtige Richtung: Präzisionsgleichrichter schützt Meßinstrument.

nach rechts bewegen. Berühren wir nun T2: Der Zeiger wandert nach links. Doch während er rechts noch vor dem Vollauschlag stehenbleibt, möchte er links ganz dringend weiter. Doch da ist ein mechanischer Anschlag. Bevor sich der Zeiger nun um diesen zu wickeln beginnt, tun wir lieber grund-

sätzlich etwas gegen dieses Verhalten.

167

Nun kommen die beiden Dioden ins Spiel. Also: stecken, Drahtbrücke ziehen, D2 einsetzen, Polungen kontrollieren! Batterien wieder anschließen. Jetzt drehen wir P2 so weit nach n, daß sich der Zeiger gerade etwas aus der Nullstellung herausbewegt. Zur Probe P2 deutlich in Richtung n drehen: Das stört den Zeiger nun kaum noch, er hat praktisch jedes Interesse an der „Linken Szene“ verloren. Zu einem Ausschlag (einem „rechten“ dorthin, wo viel Platz auf der Skala ist) führt nun nur noch Erwärmen von T1 oder Abkühlen von T2 (oder P2 nach n).

Wir haben mit D1 und D2 (sowie R5) unsere Schaltung um einen *Einweggleichrichter* ergänzt. Aber nicht um irgendeinen. In dieser Schaltung mit einem OP wirkt er als *idealer Gleichrichter* ohne jede Schwellenspannung. Schon wenige Millivolt in der richtigen Richtung, und am Ausgang kommt die (hier sogar noch verstärkte) „Wirkung“ heraus. „Verantwortlich“ dafür ist D2. Ihre Schwellenspannung wird vom OP-Ausgang kompensiert. (Um diese unterscheidet sich seine Spannung von der des Schaltungsausgangs.) Der Schaltungsausgang befindet sich hinter D2, wo das Meßinstrument angeschlossen ist. D1 bildet lediglich einen Pfad für den Strom, der bei anders gepolter Eingangsspannung in der umgekehrten Richtung aus dem Ausgang herausfließen will, woran ihn sonst D2 hindert. Für das Meßinstrument hätte er ja die fal-

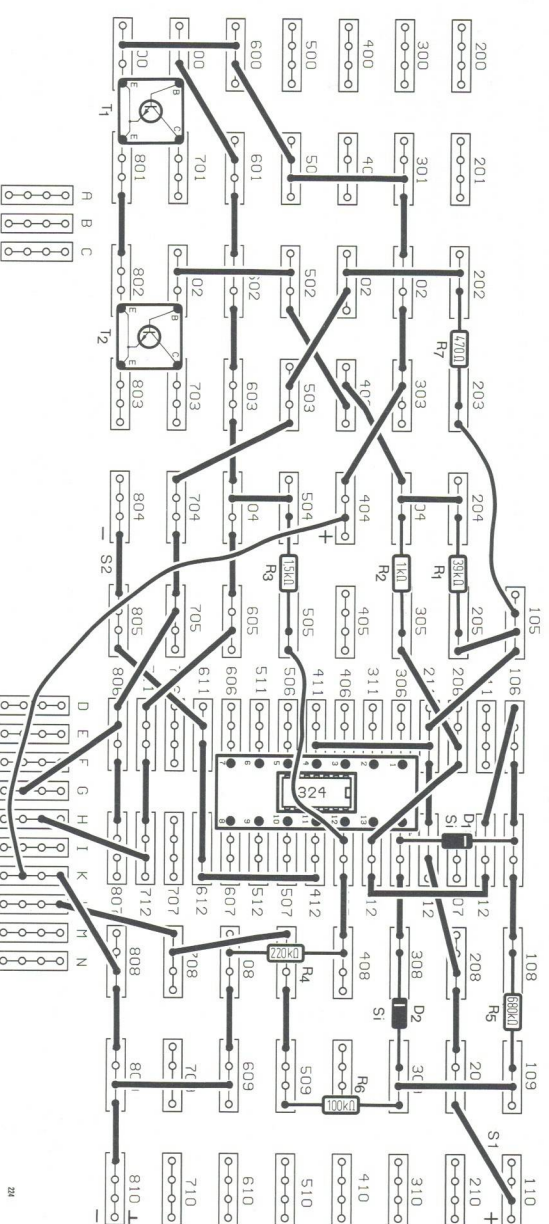


Bild 224. Aufbau zu Bild 223.

sche Richtung. Zu Insidern im Verständnis solcher Vorgänge werdet ihr spätestens, wenn Ihr durch den noch folgenden Abschnitt über OPs durchgestiegen seid.

20. Multitalent NE 555

Er verstärkt, vergleicht, verzögert, schaltet, schwingt – je nachdem, wie man seine Anschlüsse benutzt. Er ist ein rechter Alleskönner. Daß es ihn schon rund zwei Jahrzehnte gibt, merkt man nur an der Fülle der Schaltungen, in denen er vorkommt.

Die glorreichen Fünf

Fünf Funktionsgruppen sind auf dem Chip des 555 miteinander verknüpft: zwei Komparatoren, eingangsseitig mit einem festen Teiler aus drei etwa gleichgroßen Widerständen beschaltet, ausgangsseitig an ein RS-Flip-Flop angeschlossen, dessen invertierender Rücksetzeingang herausgeführt ist; am Ausgang des Flip-Flop zwei Verstärker – einer mit Gegenaktstufe (kann also ebenso Strom liefern wie „ziehen“), der andere mit offenem Kollektor (also nur „stromziehend“, wenn aktiv). Zwischen etwa 4,5 V und 16 V funktioniert er. Die Anschlüsse nennen wir so: OUT = Gegentaktausgang (3), DIS = Entladeausgang (7) („Discharge“, das ist der mit dem offenen Kollektor), R = Rücksetzeingang (4), CTRL = Kontrollspannung (5) (invertierender Eingang des oberen Komparators, auf 2/3 der Batteriespannung gelegt, K1 =

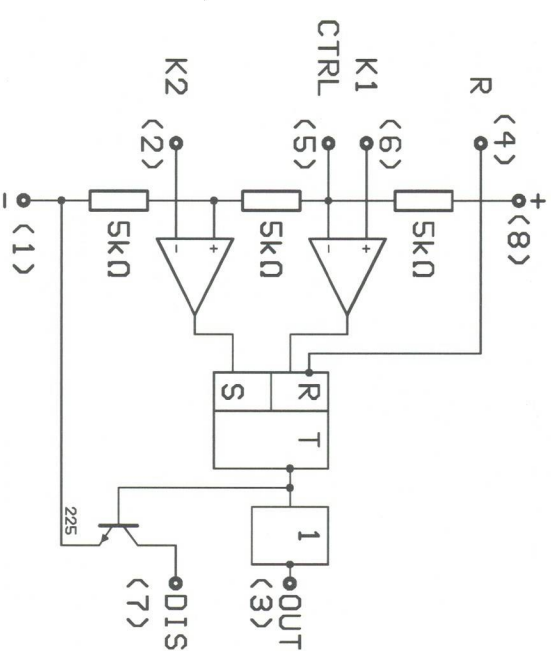


Bild 225. Ein Schaltkreis wird besichtigt: Innenleben des 555.

Schwellenspannungseingang (6) (nichtinvertierender Eingang des oberen Komparators, reagiert also ab 2/3 der Batteriespannung), K2 = Triggereingang (2) (invertierender Eingang des unteren Komparators, dessen nichtinvertierender Eingang intern über Widerstände auf 1/3 der Batteriespannung gelegt ist; reagiert also ab 1/3 der Batteriespannung). Bild 225 zeigt das zugehörige Innenleben. Manches wird dadurch leichter verständlich. Der Teiler aus dreimal 5 kΩ ist übrigens einer der wichtigsten Tricks im 555. Wie die Betriebsspannung auch liegt, stets reagieren die Komparatoren bei 1/3 bzw. 2/3 dieser Spannung. Das macht die meisten Anwendungen weitgehend von der Höhe der Betriebsspannung unabhängig.

Schwellenhopper: 555 als Trigger

Bei zwei Komparatorschwellen liegt es nahe, den 555 als Trigger einzusetzen.

168

Zwei Anschlüsse bleiben dabei in der Schaltung nach Bild 226 unbeschaltet. Wir testen wieder einmal Eingangs-Ausgangs-Reaktionen und stellen, an P2 drehend, fest: Vom unteren Anschlag (n) bis etwa 1/3 vor dem oberen Anschlag (h) leuchtet LED2. Also fließt der Strom aus dem Ausgang heraus. Dann wechselt die Anzeige sprunghaft auf LED1. Jetzt fließt der Strom also in den Ausgang hinein, in Richtung Minus. Rückdrehend erreichen wir erst bei 1/3 vor dem unteren Anschlag die Startsituation: LED2 leuchtet wieder.

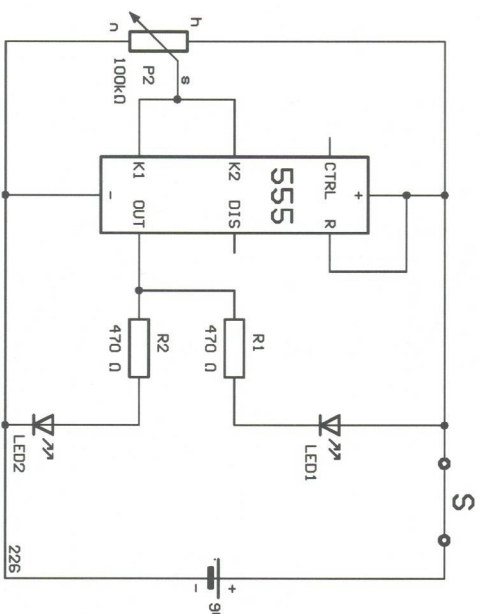


Bild 226. Schaltschwellen mit Poti: Triggert mit testeten Verhältnissen.

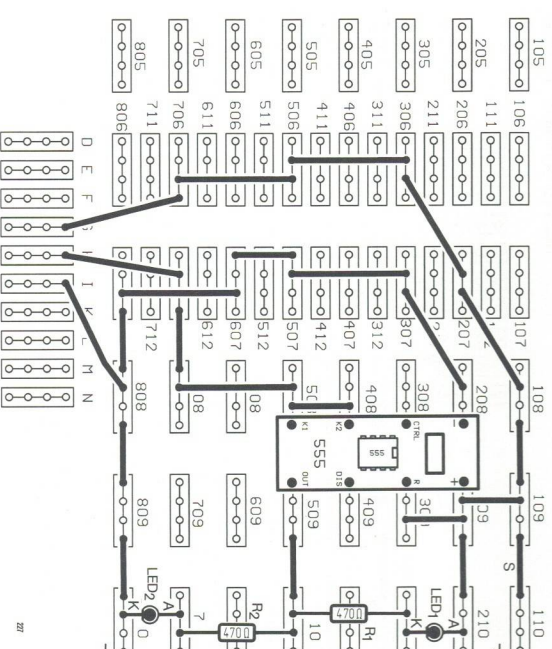


Bild 227. Aufbau zu Bild 226.

Ein hilfreicher Blick in Bild 225 bestätigt uns: Der untere Komparator (K2) ist offensichtlich für den Bereich vom unteren Anschlag an zuständig. Erinnern wir uns an einiges von dem, was wir schon gelernt haben. Die Differenzspannung an den Eingängen von K2 (dem inneren, nichtinvertierenden am Teiler und dem herausgeführten, Anschluß Nr. 2) ist vorerst positiv, also auch sein Ausgang. Und damit ebenfalls der Setzeingang des Flip-Flop. Das Flip-Flop wird gesetzt, am Ausgang OUT erscheint eine hohe Spannung. Sie liegt knapp 1,5 V unter der Betriebsspannung. Daher leuchtet LED2. Steigt die Eingangsspannung über den vom Teiler festgehaltenen Vergleichswert für K2 (1/3 der Batteriespannung), wird S auf Minus gelegt. Da S und R aber nur auf hohe Spannung reagieren („positive Logik“), passiert vorerst nichts. Erst bei Überschreiten der Spannung an K1 (am nichtinvertierenden Eingang) die Vergleichsspannung am zweiten Teilwiderstand, und sein Ausgang schaltet den R-Eingang auf hohe Spannung. R auf hoher Spannung heißt rücksetzen. Ausgang OUT schaltet nach Minus durch, LED1 leuchtet auf. Beim Zurückdrehen kommen wir erst bei U/3 am Komparator 2 an den Punkt, wo dessen Ausgang das Flip-Flop wieder mit hoher Spannung setzt. Weiter siehe oben.

Wir haben es also mit einem Trigger zu tun, dessen Hysterese 1/3 der Betriebsspannung beträgt. Das ist Voraussetzung für den Haupteinsatzfall als *Timer* (Zeitgeber) mit stabilen Ei-

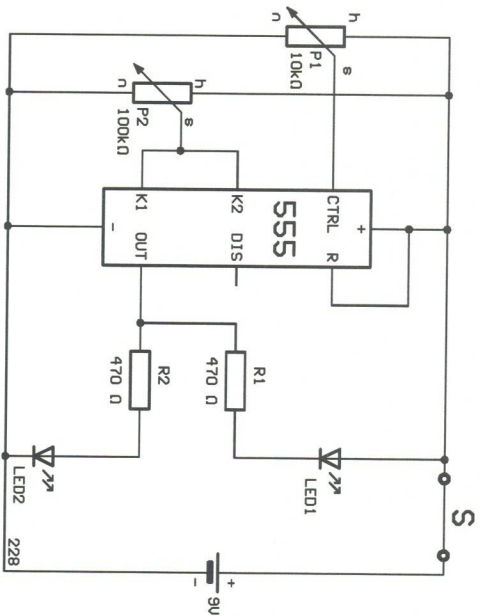


Bild 228. Veraltet die Schwellen: Timer-Control-Tower mit P1.

genschaften. Darauf kommen wir noch. Auch werden wir Schaltungen kennenlernen, in denen die Triggerschwellen und die Hysterese für bestimmte Zwecke geändert werden.

169

Wir schalten nun den Anschluß R von Plus nach Minus und stellen fest: LED1 leuchtet, egal, wohin wir P2 auch drehen. Wir merken uns: Wenn R an Minus gelegt wird, zwingt er damit den Ausgang auf niedrige Spannung, das Flip-Flop wird zurückgesetzt.

170

Wir erweitern unsere Schaltung gemäß Bild 228 um ein zweites Potentiometer (P1). Dieses wird zunächst auf etwa 1/3 gestellt, also in Minusnähe. Dann werden mit P2 wieder die Schaltpunkte gesucht. Es zeigt sich: Sie liegen jetzt tiefer und enger beieinander. Jetzt drehen wir P2 ins obere Drittel (also nahe h). Verändert man nun die Stellung von P1, so zeigt sich: Die Schwellen liegen höher und weiter auseinander.

Wir halten fest: Laut Bild 225 ist der CTRL-Anschluß der Punkt, an dem der Teiler die Batteriespannung auf 2/3 teilt. Auf diesen Punkt bezieht sich K1. Die Hälfte dieser Spannung erscheint an K2 als Bezugsspannung. Wird die Spannung an CTRL von außen zwischen Plus und Minus geändert („kontrolliert“), wirkt sich das auf die Schaltschwellen aus. Der 555 kann also an vier Anschlüssen gesteuert werden. Auch das erklärt die Vielfalt seiner Anwendungen.

171

Mit dem Trigger wird gleich noch etwas Praktisches gebaut (Bild 230). Dazu erinnern wir uns an

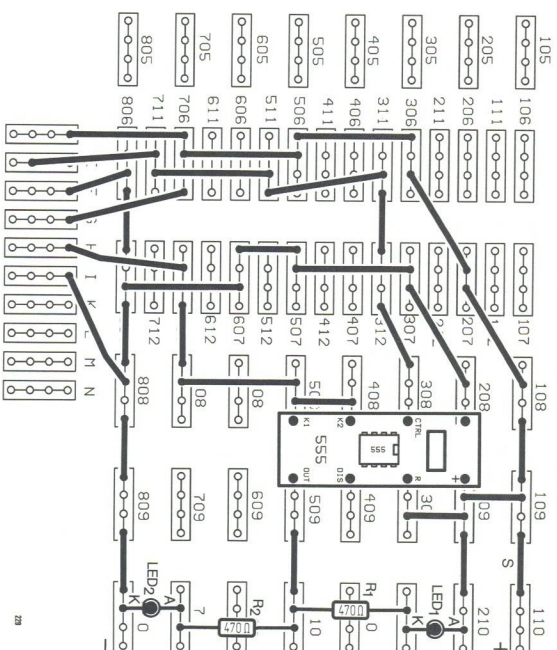


Bild 229. Aufbau zu Bild 228.

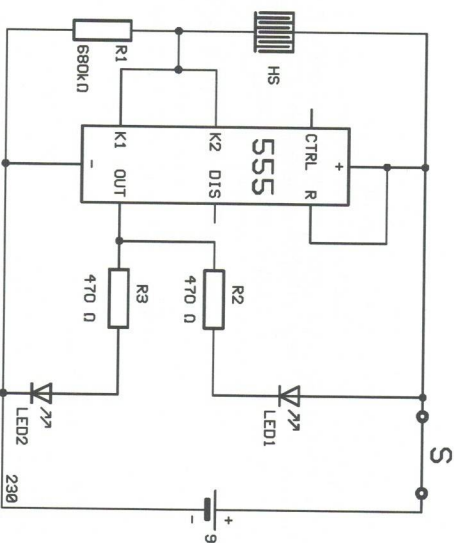


Bild 230. Ein Hauch von Feuchte: Schnitt im Klimatest.

den schon früher mit Kochsalz überzogenen Sensor für Feuchte. Er wird statt des „oberen“ Teilwiderstands von P2 in Bild 226 eingesetzt. Für den „unteren“ kommt R1 mit 680 kΩ in die Schaltung. Bei trockener Luft leuchtet LED2, denn der Sensor ist da sehr hochhohlig. Die Spannung an

K1, K2 liegt unter 1/3 der Batteriespannung. Ein Hauch genügt – LED2 verblöht, LED1 leuchtet. Bis der Sensor wieder trocken geworden ist. Warum das so geht, haben wir schon bei Bild 226 erfahren. Und wozu ist es gut? Nun, z. B. für einen Luftbefeuchter, der mit einem Relais statt der LED ein- und ausgeschaltet wird. Wir empfehlen dafür das KOSMOS Netzschaltgerät X. Weiter hinten folgen dazu noch viele schöne Steuerungsbeispiele!

Flip und Flop im 555

Mit dem folgenden Experiment ziehen wir die Flip-Flop-Funktion aus dem 555 heraus.

172

Die Schaltung nach Bild 232 ist fast Sekunden-schnell zusammengesteckt. Beim Einstecken der Batterie leuchtet meist LED1 auf. Druck auf Ta1 läßt sie verlöschen; mit Ta2 schaltet man sie wieder an. Klarer Fall: Dunkle LED1 heißt: Ausgang ist nach Minus durchgeschaltet. Der Reset ist also wirksam. Der aber wird von K1 gesteuert, sobald dessen Eingang mehr als 2/3 der Batteriespannung erhält. Dafür sorgt Ta1. Mit Ta2 dagegen holen wir K2 „herunter“ und das setzt das Flip-Flop. Also schaltet der Ausgang auf hohe Spannung und LED1 leuchtet.

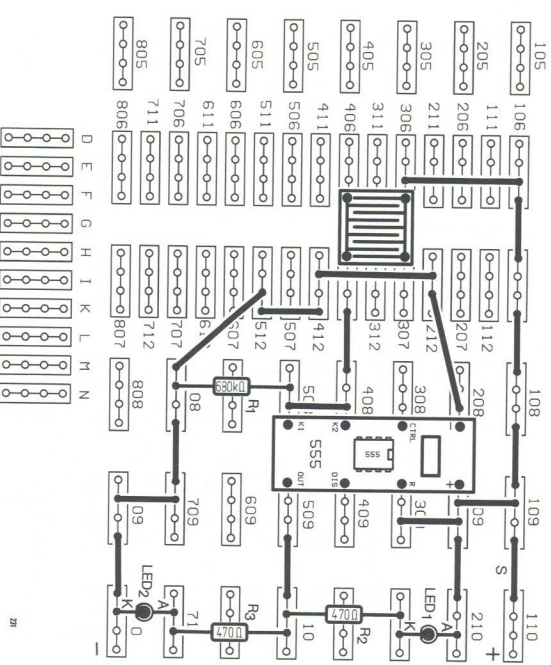


Bild 231. Aufbau zu Bild 230.

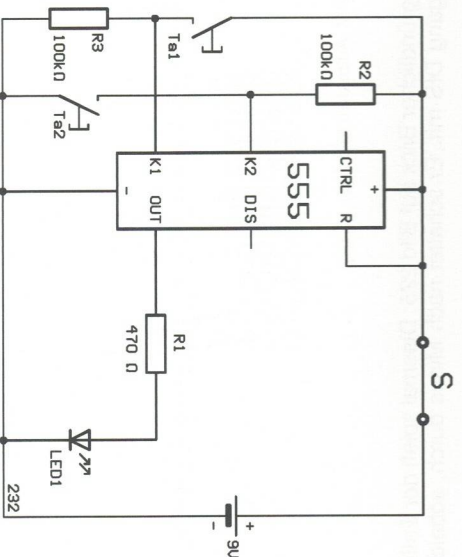


Bild 232. Jeder Schwellen die rechte Spannung: Es flippt und floppt.

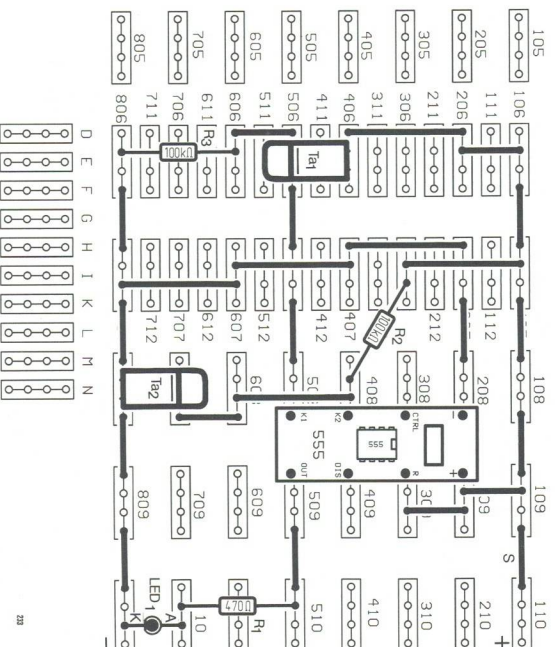


Bild 233. Aufbau zu Bild 232.

Mit den Augen des Digitaltechnikers gesehen stellt sich das so dar: Ta1 – Reset, schaltet mit High (hohe Spannung) Ausgang auf Low (niedrige Spannung). Ta2 – Set „quer“ (mit Querstrich, das bedeutet „invertierend“) schaltet mit Low Ausgang auf High.

173

Lassen wir den letzten Versuch noch einen Moment stehen und drücken wieder Ta2, so daß LED1 leuchtet. Diesmal halten wir diesen Taster aber fest. Wird nun außerdem noch Ta1 gedrückt, geht LED1 nicht aus, sondern erst, wenn wir Ta2 loslassen. Hält man auch weiterhin Ta1 gedrückt, bewirkt Druck auf Ta2 jetzt nur, daß LED1 leuchtet, solange er gedrückt bleibt! Das sagt uns: Der untere Komparator ist gegenüber dem oberen „dominant“, also stärker. Legt Anschluß 2 (K2) fest an Minus, bleibt also der Ausgang auf hoher Spannung (Plus). Hält man dagegen bei auf Minus geschaltetem Ausgang den Anschluß 6 (K1) an Plus, läßt sich der Ausgang nur auf hoher Spannung halten, solange K2 an Minus gelegt wird. Aber immerhin – das schafft er!

174

Gemäß Bild 234 lassen wir K1 frei und steuern über Ta1 und Ta2 den Komparator K2 (der ja für das Setzen zuständig ist) und den Anschluß R (der also zurücksetzt, und zwar invertierend, das heißt mit niedriger Eingangsspannung). Wir stellen fest: LED1 geht an, wenn K2 an Minus gelegt wird (Ta1 drücken), aber sofort aus, wenn man auch (oder nur) R an Minus schaltet (Ta2 drücken). Hier ist also Anschluß R dominant. Beweis: Wir drücken Ta1 (LED1 leuchtet) und halten ihn fest. Dann drücken wir Ta2 zusätzlich. LED1 verlischt, solange Ta2 gedrückt ist. Nun betätigen wir Ta2 (LED1 verlischt) und halten ihn fest. Jetzt bewirkt Ta1 nichts. LED1 bleibt dunkel.

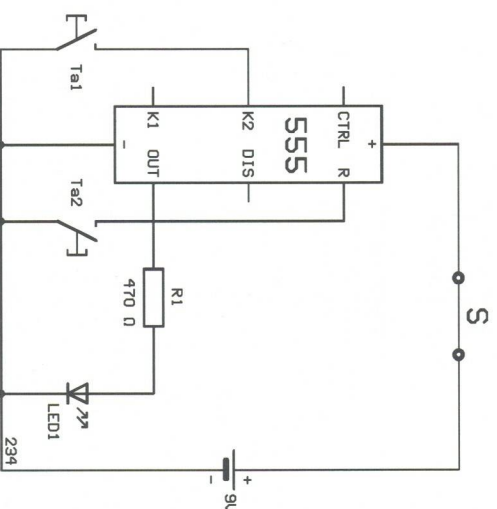


Bild 234. Der andere Flop: R-Eingang macht sich stark.

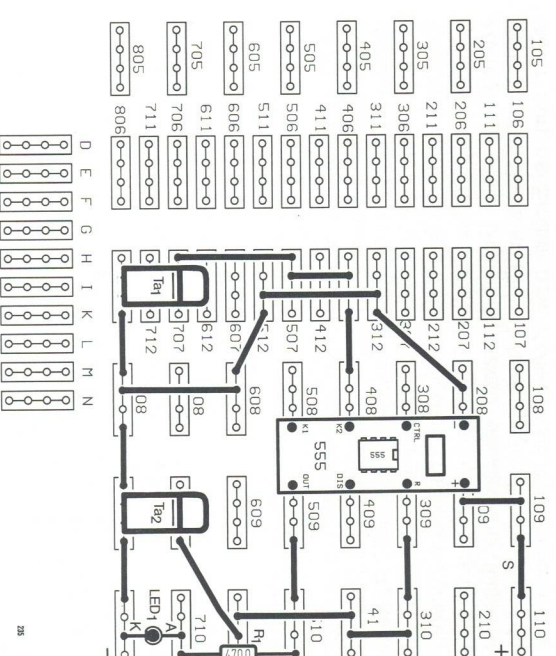


Bild 235. Aufbau zu Bild 234.

Auch mit R an Minus kann also der Ausgang dauerhaft auf Minus gehalten werden. Auch dies wieder aus „digitaler Sicht“: Ta1 – Set „quer“, schaltet mit Low (Ausgang auf High). Ta2 – Reset „quer“, schaltet mit Low Ausgang auf Low. Übrigens: Alle diese Eingänge sind sehr empfindlich. Wundert Euch also nicht, wenn bloßes Berühren oder das einpolige Stecken oder Ziehen eines Drahtstücks bereits eine Umschaltung auslöst!

Takt und Ton

Astabil kann jeder – warum nicht auch der 555. Es macht sogar einen erheblichen Teil seiner Anwendungen aus. Pur, wie auch in Verbindung mit anderen Effekten.

175

Mit der Schaltung nach Bild 236 bauen wir uns den typischen astabilen Multivibrator mit dem 555 auf. Beide Möglichkeiten sind vorgesehen: Niedrige Frequenzen für Blinker und höhere für Töne. Für C1 stecken wir zunächst 6,8 nF ein und benutzen den Lautsprecher. Dann wechseln wir C1 in 10 µF um und beobachten die Leuchtdioden. Sie werden wechselweise blinken. Allerdings sind die Helligkeiten unterschiedlich. Darauf kommen wir noch zurück. Zunächst wieder die berühmte Frage: Wie macht er das? Wer bisher mitgedacht hat, kann es gleich selbst erklären.

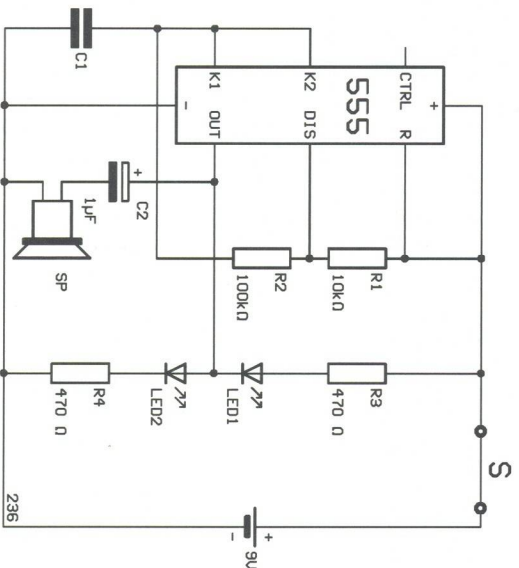


Bild 236. Der Astabile: 555 in einer seiner Hauptrollen. Die Frequenz f kann man in Hz errechnen, wenn man die Kapazität $C1$ in Farad und die Widerstände $R1$ und $R2$ in Ohm in die Gleichung einsetzt:
 $f = 1,433 / C1 (R1 + 2R2)$

Ausgang OUT ebenfalls in diese Richtung schaltet. Das geschieht, wenn die Spannung an K1 auf etwas mehr als 2/3 der Batteriespannung gestiegen ist. Dafür sorgen C1 und (R1 + R2). Das geht bei 6,8 nF und 110 kΩ ziemlich schnell (Zeitkonstante rund 7,5 ms). In DIS hinein entlädt sich nun C1 nur über R2. Diese Zeit ist also kürzer als die Ladezeit. Ist C1 auf 1/3 der Batteriespannung entladen, wirft K2 alles wieder um: DIS sperrt, R1 und R2 laden C1 wieder bis 2/3 der Batteriespannung usw. Da sich das in Millisekundenschnelle periodisch wiederholt, hören wir aus dem Lautsprecher einen Ton. OUT macht's möglich: Bei großer Ausgangsspannung lädt der Strom aus OUT durch SP hindurch C2, nach dem folgenden Durchschalten nach Minus entlädt sich C2 dort hinein, und dieser Strom fließt in umgekehrter Richtung durch SP. Dieses Wechselspiel hören wir. Gemächlicher geht es zu, wenn C1 sehr groß gewählt wird. Dann sind die in Bild 236 ebenfalls eingetragenen Leuchtdioden am Platze.

176

Spannend wird es, wenn statt R1 in Bild 236 ein Sensor eingesetzt wird (HS, Bild 238). Wir greifen dazu auf das schon früher mit Kochsalz überzogene Modul zurück. Bei trockener Luft werden wir vielleicht noch gar nichts hören. Doch schon eine feuchte Fingerruppe dicht über HS ändert das. Anhauchen verstärkt den Effekt. Jetzt wird der Ton, der anfangs noch ziemlich tief war, richtig schrill, bis der Sensor wieder trocknet. Wie das geht? Kein Kommentar, alles erklärt sich nun von selbst – siehe oben!

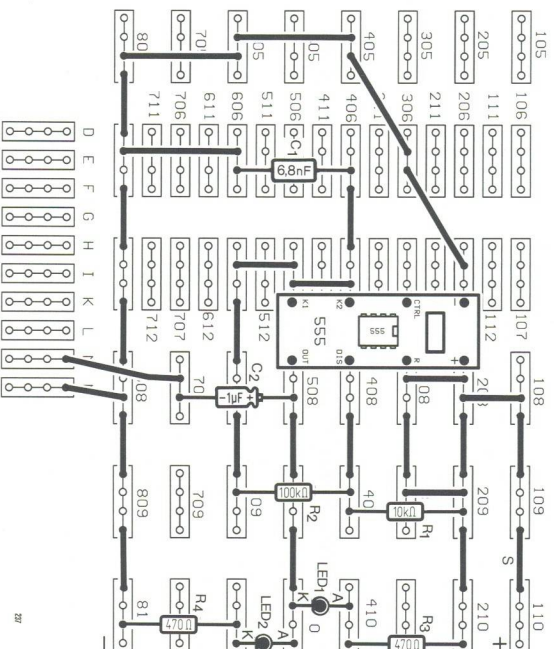


Bild 237. Aufbau zu Bild 236.

Ein gründlicher Blick auf Bild 225: Diesmal spielt der Entladeausgang DIS mit. Er schaltet nach Minus durch, sobald der

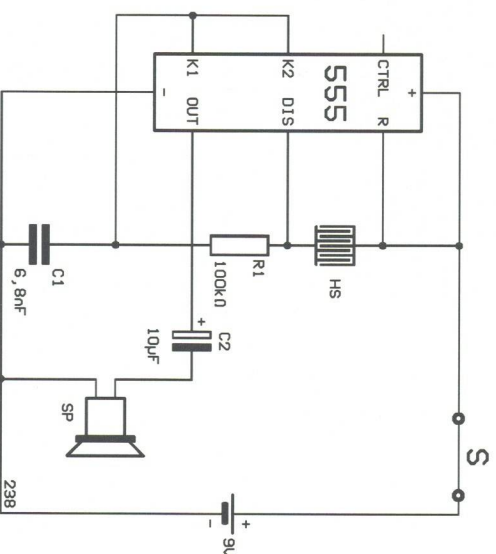


Bild 238. Luftfeuchte ist relativ: Tonhöhe gibt Aufschluß: Je feuchter, desto höher.

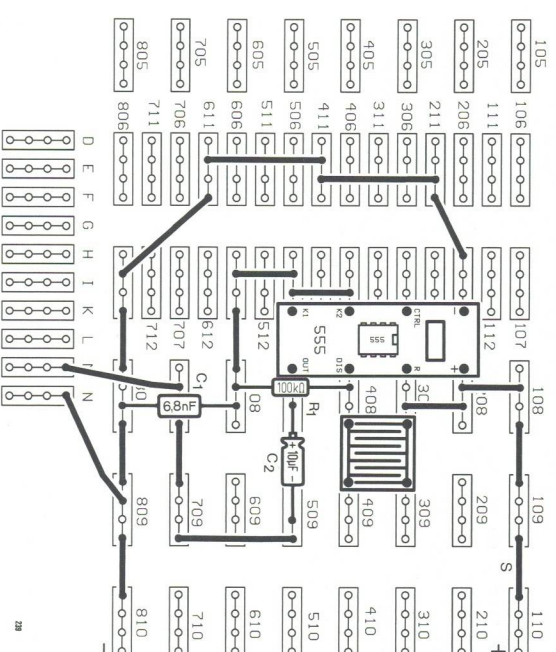


Bild 239. Aufbau zu Bild 238.

177

Für „normales“ und damit auch leitendes Wasser braucht man als Sensor nur zwei blanke Drahtenden. Wir verbinden diese mit Punkt A (Steckfeder 506) und B (Steckfeder 806) der Schaltung nach Bild 240 und lassen die Schaltung wieder schwingen. Den Platz des unruhigen Sensors aus dem vorigen Versuch nimmt wieder der stabile 10-kΩ-Widerstand ein. Das ergibt den schon bekannten aufdringlichen Warnton. Den bringen wir zum Schweigen, indem die beiden Drahtenden in Wasser „ersäuft“ werden. Taucht man sie in das Gefäß schön knapp ein, wird es irgendwann Alarm geben. Das macht die Verdunstung, die den Wasserspiegel senkt und somit den Kurzschluß zwischen den Drahtenden wieder aufhebt. Eine feine Sache für Scheibenwaschanlagen und Hydrotröpfe!

178

Wir bleiben beim „Testen und Prüfen“. Bild 242 zeigt einen nützlichen „Richtungstester“ für Dioden und Transistoren. Wir stecken den Prüfling in die beiden dafür freigehaltenen Federn zwischen Plus Batterie und Plus 555 (Nr. 109 und Nr. 110). Es darf immer nur in einer Richtung piepsen. Hört man den Ton auch nach dem Umdrehen des Prüflings, ist etwas faul. Man kann auch Transistor-Zonenfolgen auf diese Weise feststellen – pnp oder npn, das ist dann keine Frage mehr. Sofern man weiß, wie die Anschlüsse liegen. Ton bei Basis an Plus Batterie gegen Emitter oder Kollektor. npn, bei Emitter bzw. Kollektor an Plus Batterie: pnp.

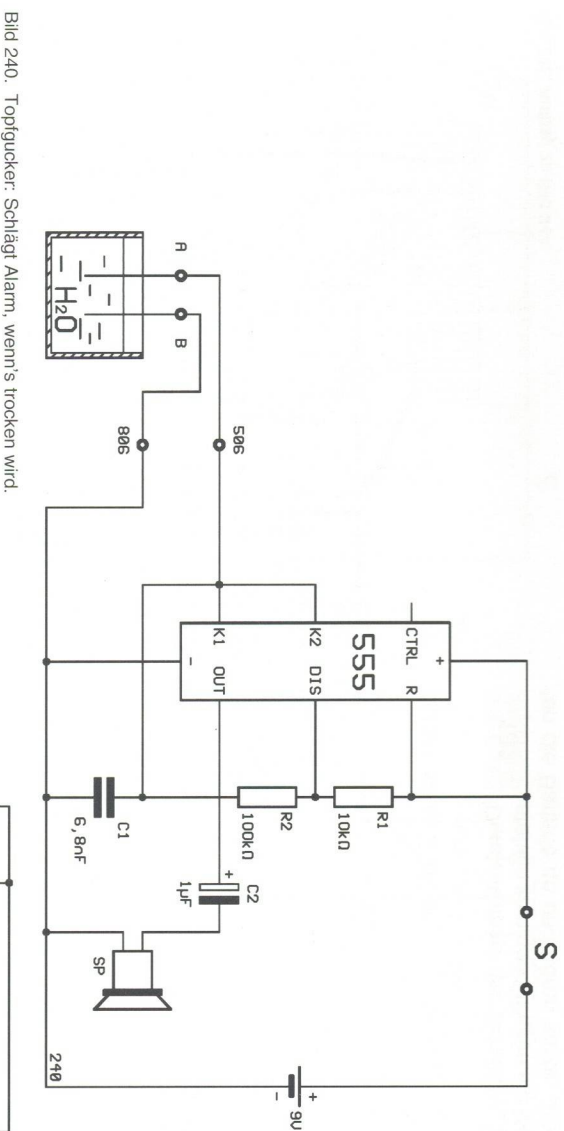


Bild 240. Topfgucker: Schlägt Alarm, wenn's trocken wird.

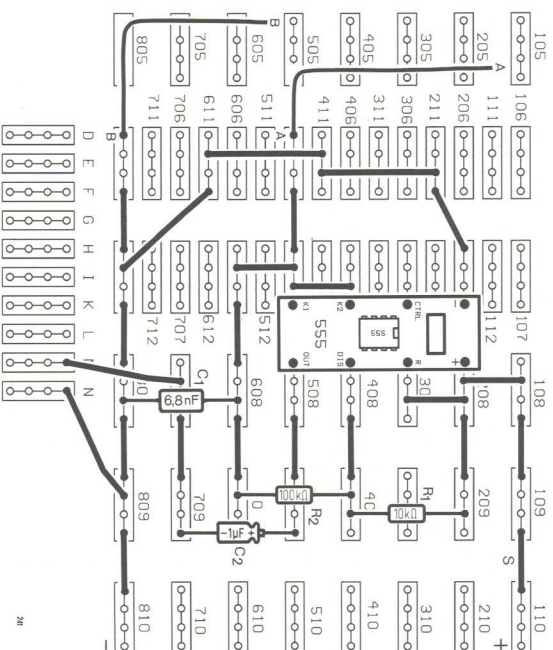


Bild 241. Aufbau zu Bild 240.

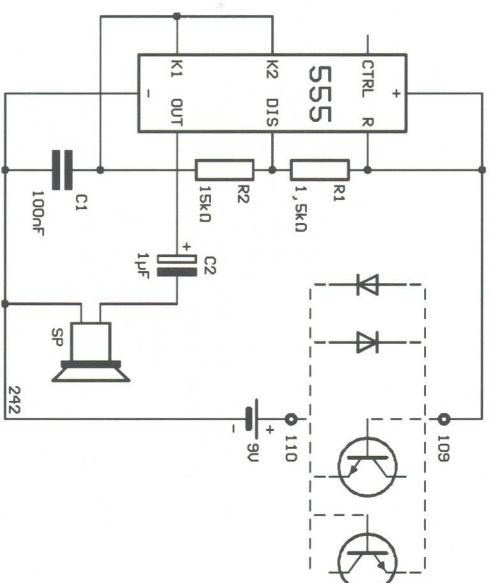


Bild 242. Zeigt, wo's lang geht: Dioden- und Transistorprüfer, aber auch Durchgangsmelder.

179

Es gibt Transistoren, die halten nicht sehr viel Spannung zwischen Emittter und Kollektor aus. Für sie ist diese Methode schonender: 470 Ω in Reihe zum Lautsprecher (damit es nicht so laut ist), Plus Batterie direkt an Plus 555. Es erklingt ein Dauerton. Nun Prüfling zwischen CTRL-Anschluß (5) und Plus legen. Die Tonhöhe ändert sich, wenn der Pfeil des Prüfungssymbols von Plus nach

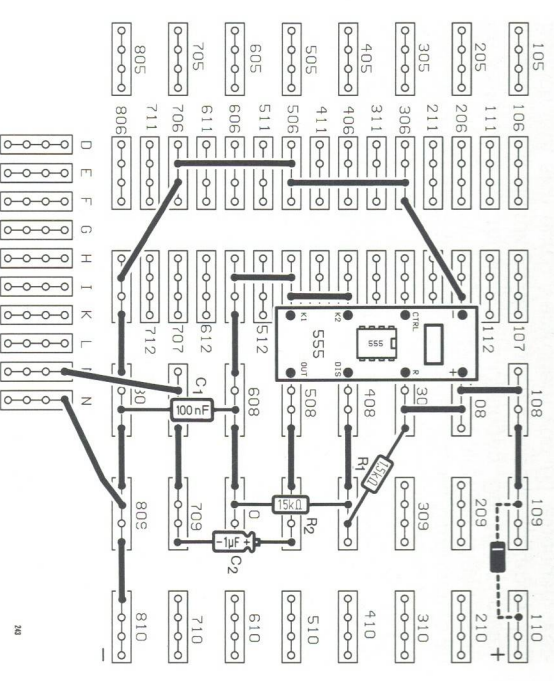


Bild 243. Aufbau zu Bild 242.

CTRL weist. Umgedreht darf sich nichts ändern am Grundton, sonst stimmt's mit dem Kandidaten nicht.

180

Eine Prüfung anderer Art ist die für Amateurfunker. Mit der Schaltung nach Bild 244 lassen sich ausgezeichnet Morsezeichen geben. Der Ton wird nur erzeugt, wenn Eingang R über Ta1 Plus erhält. Zur Abwechslung steuern wir Ladung und Entladung von C1 über den „Hauptausgang“ OUT. Das geht für diese Zwecke ebenso gut wie über DIS und Plus. Mit P1 kann die Tonhöhe dem „persönlichen Geschmack“ angepaßt werden.

181

Morsen geht auch mit dem feuchten Finger. Dazu ein Griff zurück in die Kiste der bereits durchlebten Experimente! Nach Bild 246 gibt die npn-/pnp-Darlingtonstufe den Schaltkreis frei, wenn der Emittterstrom von T1 über R4 am Eingang R Plus erzeugt. Das zeigt LED1 zusätzlich optisch an. Durch T1 fließt immer dann Strom, wenn wir mit dem Finger eine leitende Brücke zwischen Basis von T2 und R6 bilden (A: Steckeder 510 und B: Steckeder 610). Hinweis: Besonders bei Einsatz des Netzgerätes kann es durch hochfrequenten „Brumm“ zu unschönem Zirpen kommen, wenn die Basis zuerst berührt wird. Dagegen hilft ein Kondensator von 6,8 nF zwischen Basis und Kollektor von T2!

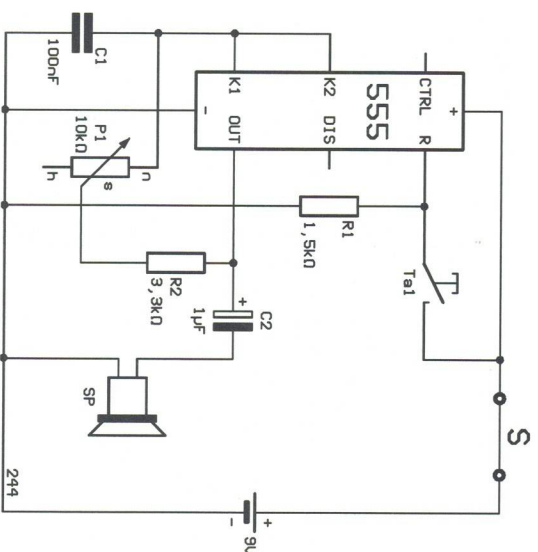


Bild 244. Punkte und Striche: Trainer auf dem Weg zur Sendelezenz.

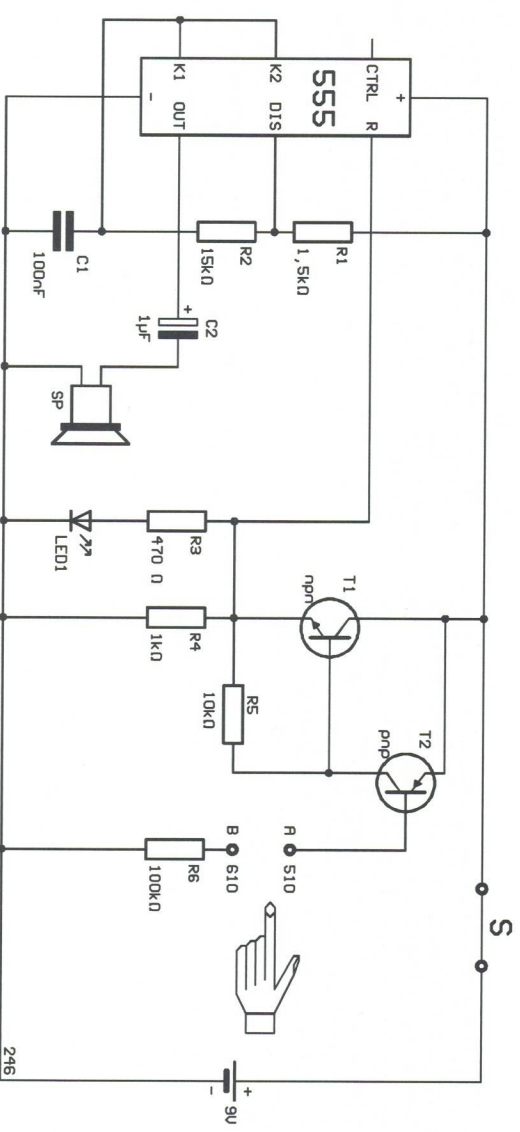


Bild 246. Morsetaste für Feinfühlige: Fingerkuppe im Stromkreis.

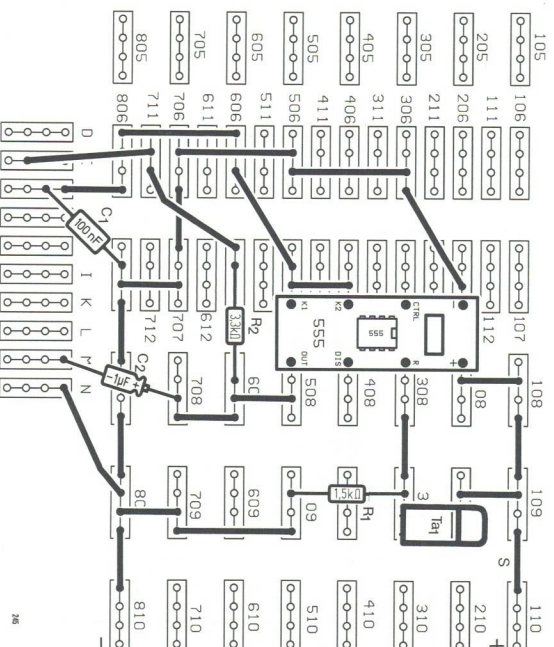


Bild 245. Aufbau zu Bild 244.

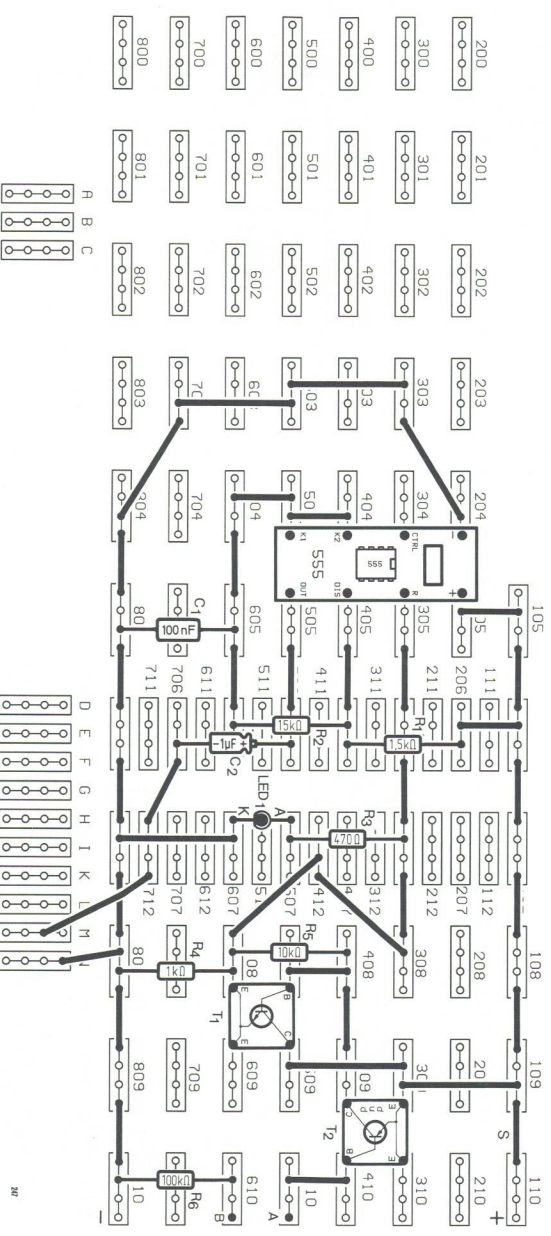


Bild 247. Aufbau zu Bild 246.

182

Durch Aufbau der Schaltung nach Bild 248 entsteht in wenigen Minuten ein Metronom. Wir schalten die Batterie an und hören kurze, „trockene“ Knacktöne.

Fast wie beim mechanischen Original, P2 auf Maximum (s an h) gedreht: Etwa 2 Impulse je Sekunde sind der angemessene Kleinstwert für musikalische Übungen. Bei Minimumstellung kommen allerdings Motorboogeräusche zustande. Der Bereich läßt sich durch Vergrößern von R1 einengen. Ver-

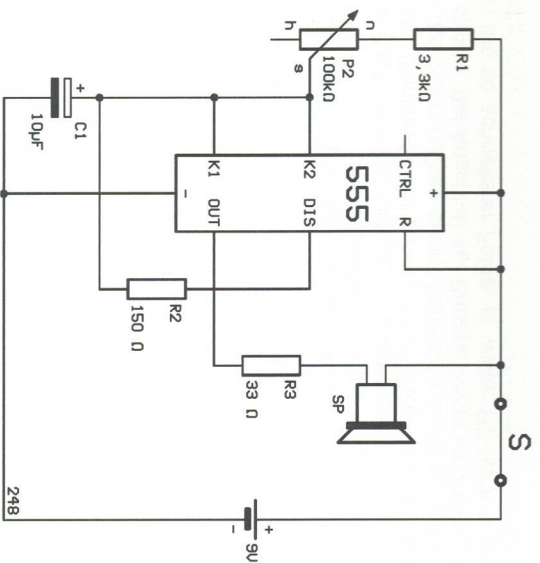


Bild 248. Taktvolle Unterstützung. Ein Muß für jeden Musikschüler.

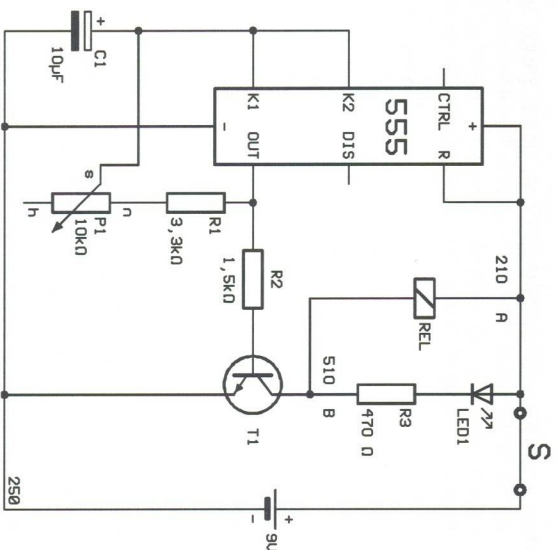


Bild 250. Auf dem Wege zum Leuchtturm: KOSMOS Netzschaltgerät X im Blinkertakt.

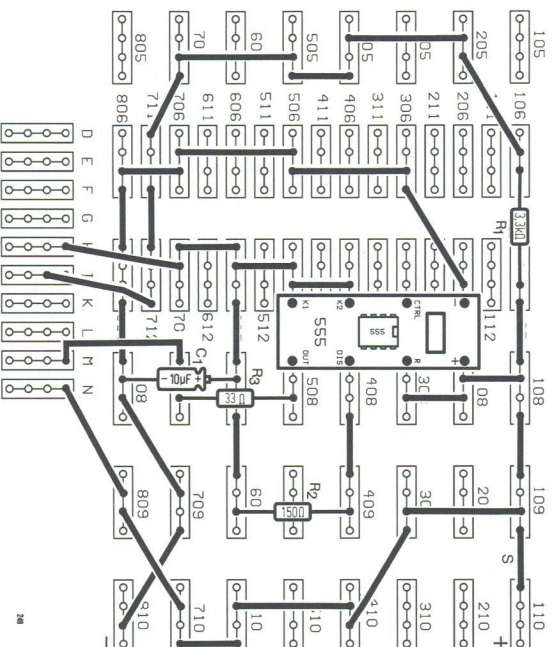


Bild 249. Aufbau zu Bild 248.

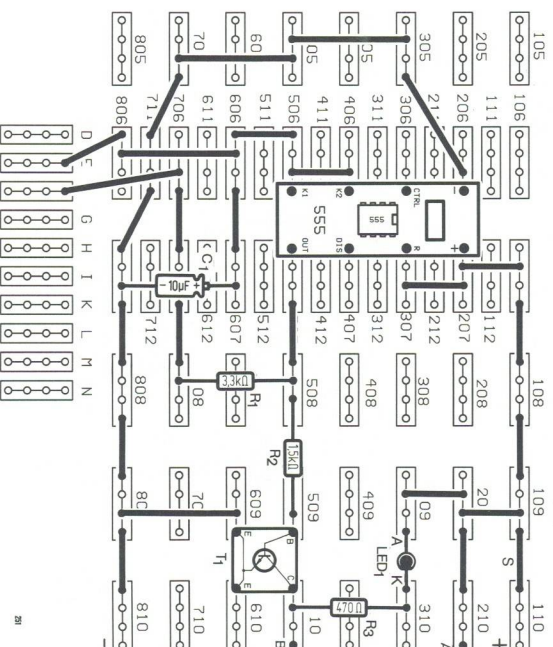


Bild 251. Aufbau zu Bild 250.

183 Durch Anschluß eines Relais, etwa des KOSMOS Netzschaltgerätes X (Steckeder 210: A; Steckeder 510: B.) erhält der 555 einen Kraftarm. Nach Bild 250 bau-

en wir einen Warmlinker. Die LED ist dann nur noch Funktionskontrolle, wenn eine große Lampe über Relais ein- und ausgeschaltet wird. Wir drehen an P1: Es ergibt sich ein Bereich von etwa 3 Hz bis zu schnellem Flimmern. Verdoppeln von C1 bringt für viele Zwecke günstigere Blinkzeiten. Bedingt durch die höhere Stromaufnahme, ist beim Einsatz des Relais zu beachten, daß immer mit frischen Batterien oder dem KOSMOS Netzgerät X gearbeitet wird.

184 In einem großen Bereich kann das Zeitverhältnis von hoher zu niedriger Spannung am Leistungsausgang OUT mit der Schaltung nach Bild 252 verändert werden. Baut die Schaltung auf und dreht dann an P2!

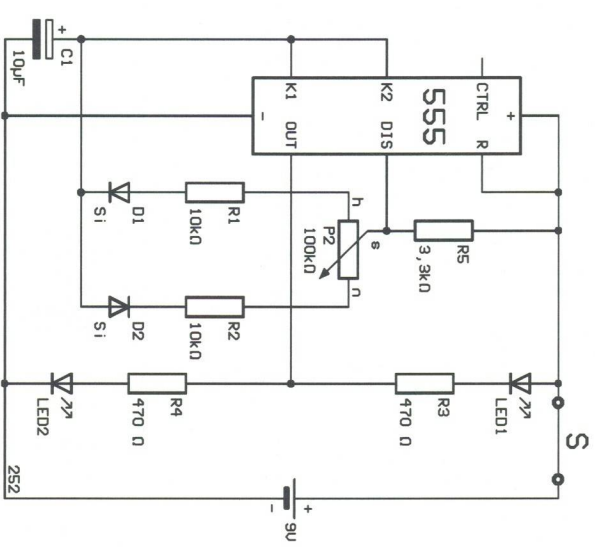


Bild 252. Der Dreh mit der Pulsbreite. Frequenz konstant, Zeiten frei wählbar.

Klarer Fall – Aufladung von C1 über R5, h-s-Teil von P2, R1, D1; Entladung über D2, R2, n-s-Teil von P2. Wo immer der Schleifer von P2 auch steht – für die gesamte Schwingung ist die Summe der Widerstände (abgesehen von R5) konstant. Das heißt aber: Die Frequenz ändert sich (so gut wie) nicht, wir haben es jedoch in der Hand, ob wir der oberen oder der unteren LED die längere Leuchtzeit zuordnen – gut für Blinker mit nur einer Lampe und Energiespareffekt! Wir haben für Euch im KOSMOS-Labor die Schaltung mit C1 = 0,1 μF (meßtechnisch bequemer) näher untersucht. Tatsächlich –

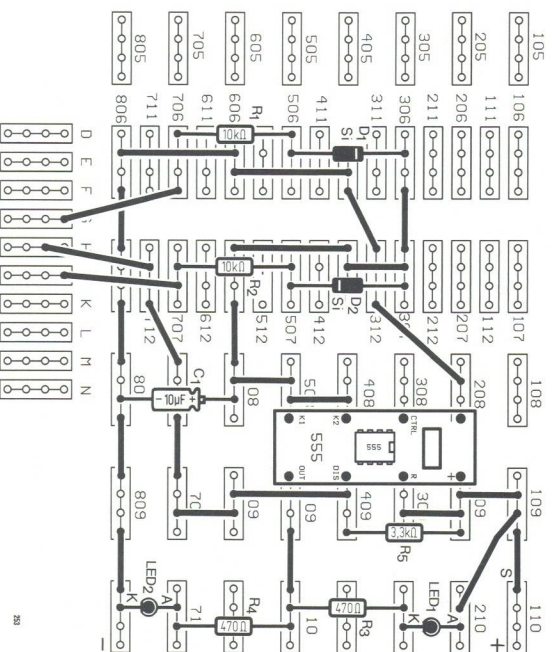


Bild 253. Aufbau zu Bild 252.

die Frequenz ändert sich kaum, aber das Puls-Pause-Verhältnis (also das Verhältnis der Zeiten hoher Spannung an OUT zu denen niedriger Spannung) konnten wir zwischen 100:7 bis 7:100 ändern!

185 Wir legen nun das KOSMOS Netzschaltgerät X aus Bild 250 statt R4, LED2 an die Schaltung nach Bild 252 und drehen an P2. Die Überlegung von eben wird sich bestätigen: kurze, energiesparende Lichtblitze, wenn an das Relais eine Lampe angeschlossen und P2 nach h gedreht wird.

Das große Heulen

Der CTRL-Anschluß des 555 ist gut für manchen Gag (und vieles Nützliche). Die folgenden Versuche beweisen es.

186

Bei den Komplementärschaltungen lernten wir u. a. die Nachbildung eines Unijunction-Transistors (UJT) kennen. Dieses bei bestimmter Spannung „zündende“ Gebilde taucht auf der linken Seite von Bild 254 wieder auf. Nach Aufbau dieser Schaltung ist P2 etwa auf Mitte zu stellen. Bei Anschluß der Batterie ertönt ein Piu-Piu-Piu... – in um so schnellerer Folge, je weiter P2 nach h gedreht wird.

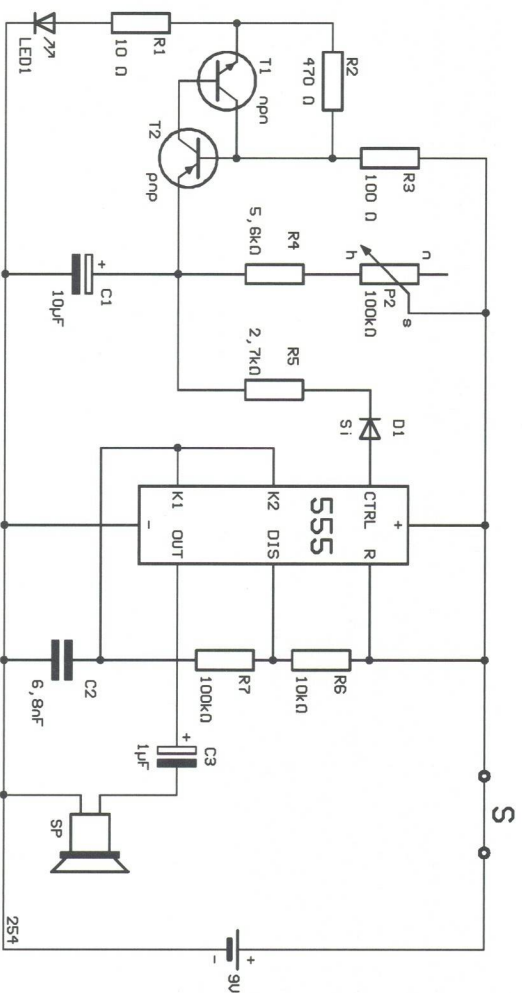


Bild 254. Sägezahn am Schwellensteller: UJT-Nachbildung läßt Timer jaulen.

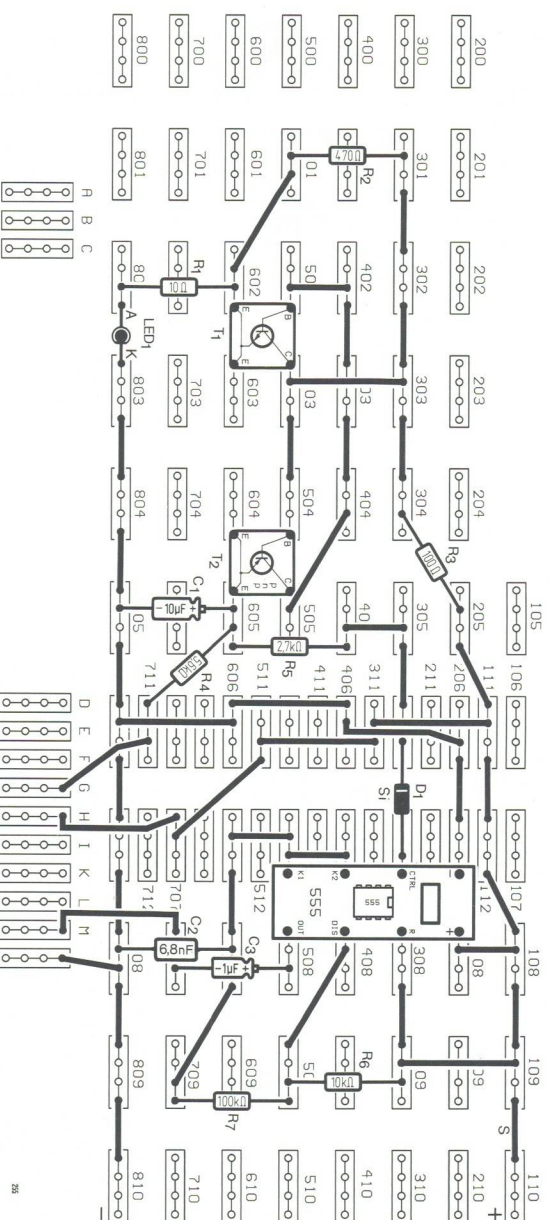


Bild 255. Aufbau zu Bild 254.

Analysieren wir Ursache und Wirkung. Ohne CTRL-Beschaltung ist der Tongeneratorteil klar: R6, R7 lädt C2 bis 2/3 der Batteriespannung (bei 9 V also auf 6 V), dann schaltet DIS nach Minus durch und C2 entlädt sich über R7. Aber nun

kommt CTRL ins Spiel. Wegen D1, R5 kann die Spannung an diesem Anschluß nie höher werden, als die an C1 plus Flußspannung von D1. C1 wiederum lädt sich auf einen Höchstwert, der vom Teiler R3, R2, R1, LED1 und von der Basis-

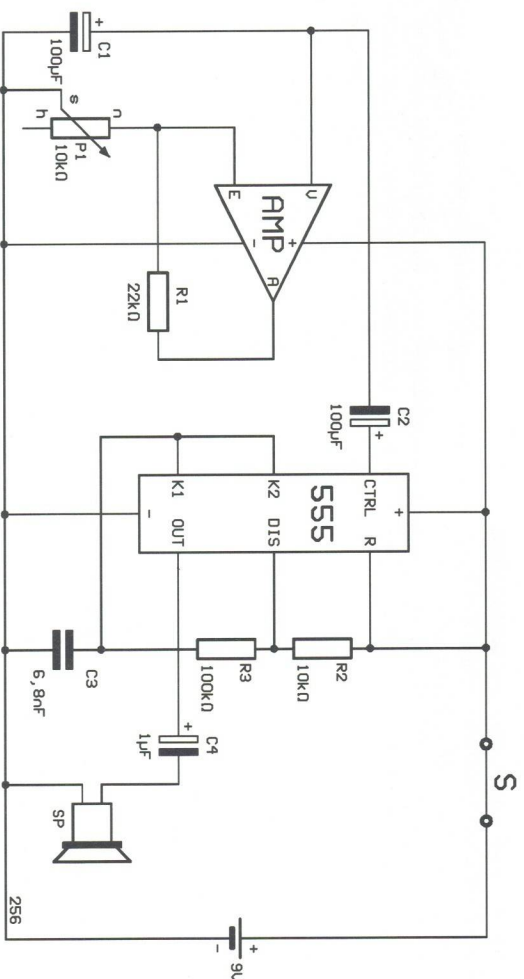


Bild 256. Kojak im AMP: Polizeisirene vom Chip.

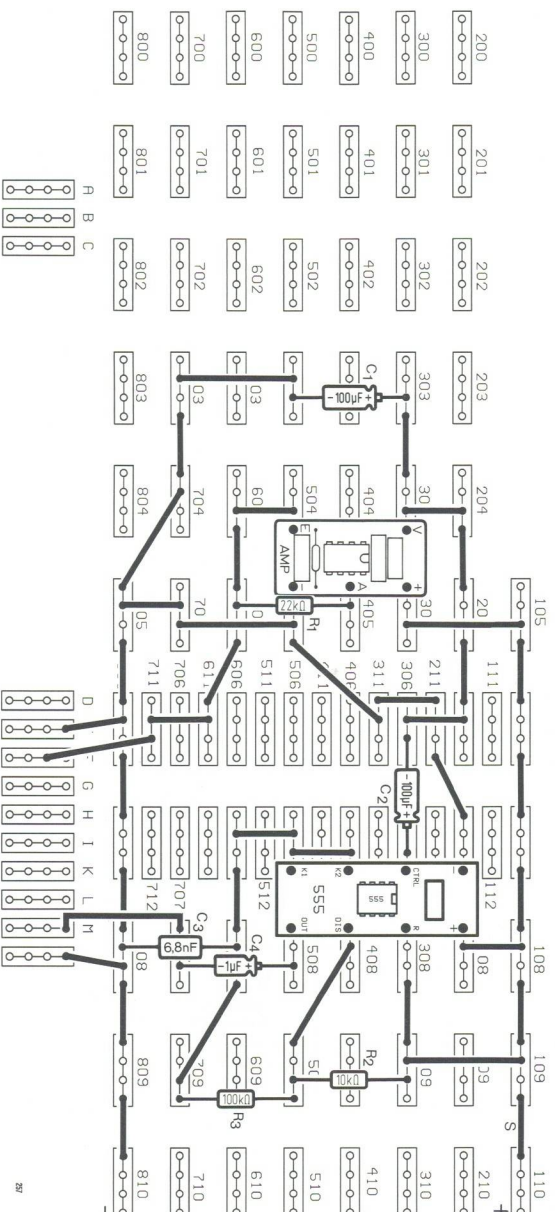


Bild 257. Aufbau zu Bild 256.

Emitterspannung von T2 bestimmt wird. Das sind etwa 8,4 V bei frischer Batterie. Bei dieser Spannung zündet die UJT-Nachbildung. C1 entlädt sich rasch über den „Pseudo-UJT“ gegen den vorübergehenden Bezugspunkt von rund 2 V,

denn das ist die Flußspannung von LED1. In diesem kurzen Zeitbereich wird die Spannung am CTRL-Anschluß über D1, R5 stark abgesenkt. Der Ton ändert seine Höhe entsprechend der aktuellen Spannung an CTRL. C1 ist schnell entla-

den, der UJT sperrt wieder, und C1 lädt sich erneut über P2, R4. Ab etwa 6,6 V Ladespannung schwingt der Tongenerator ohne Einfluß von CTRL her, bis wieder gezündet wird.

187

Eine Kondensator-Ladekurve wie der eben benutzte Spannungsverlauf entsteht auch am V-Eingang des AMP, wenn er als Generator arbeitet. Wir testen das mit dem Aufbau nach Bild 257. Nach Anschluß der Batterie beginnt mit Kojak unser Einsatz in Manhattan. An P1 passen wir diese Polizeisirene dem aus dem Fernsehen bekannten Sound an. Der besondere Charakter ergibt sich durch die kapazitive Kopplung zwischen CTRL und V. Die Kontrollspannung wird dadurch mit einer „weichen“, etwa symmetrischen Sägezahnkurve von rund 0,5 V Amplitude *moduliert*, also etwa um 0,25 V nach oben und unten.

188

Wenn schon C-Kopplung, warum dann nicht gleich vom vollen Hub des AMP-Ausgangs? Nun geht es allerdings um Rechteckimpulse. Steckt einfach die Verbindung des Koppelkondensators (C2) von V auf A. Anhören lohnt sich!

189

Einen bis zwei „Jauler“ pro Sekunde erreicht man mit der Schaltung nach Bild 258. Ihr solltet sie keinesfalls übergehen. Sie klingt richtig angenehm. Kein Wunder – hier wird die Kontrollspannung mit einer sinusförmigen Spannung kleiner Frequenz moduliert. Zum Ton wieder das Bild: Die Heiligkeit von LED1 ändert sich im gleichen Rhythmus.

Interessant, daß ein einziger Transistor ohne Hilfe einer Spule schwingt, wo er doch in Emitterschaltung eigentlich ein Inverter ist! Durch einen Trick wird jedoch erreicht, daß die sonst auf die Basis gegenkoppelnde wirkende Kollektorspannung plötzlich eine Mitkopplung ergibt. Denken wir dazu kurz an unsere Grundlagenversuche zurück!

Wie war das doch? Beim Kondensator gilt: „Am Anfang war der Strom.“ Erst allmählich lädt er sich über den Widerstand auf (an dem allerdings eine Spannung liegen muß). Wird von der Spannung dieses Kondensators wieder über einen Widerstand ein zweiter Kondensator geladen und von dem ein dritter, so kehrt sich am Ende alles um. Zwar ist die Spannung am letzten Kondensator wesentlich kleiner als am Eingang (vor dem ersten Widerstand). Aber – oh Wunder – sie ändert sich genau in der anderen Richtung, verglichen mit der „vorn“ anliegenden. Das ist das Geheimnis. Wenn am Kollektor die Spannung gerade steigt, sinkt sie am Ende der „RC-Kette“. Für die Basis ist das eine *Mitkopplung*. Es trifft nur für eine einzige Frequenz zu, und die wird von den Zeitkonstanten der Kettenglieder bestimmt. Eine solche Schaltung heißt übrigens *Phasenschiebengenerator*. Die Phasenlage der Ausgangs-

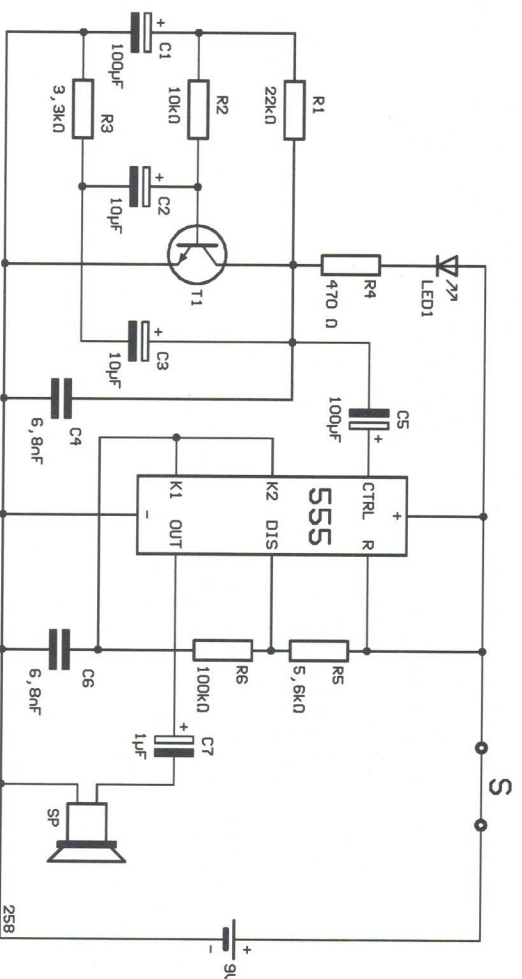


Bild 258. Weiche Welle: Sinusgenerator läßt auch Leuchtsignale schwanken.

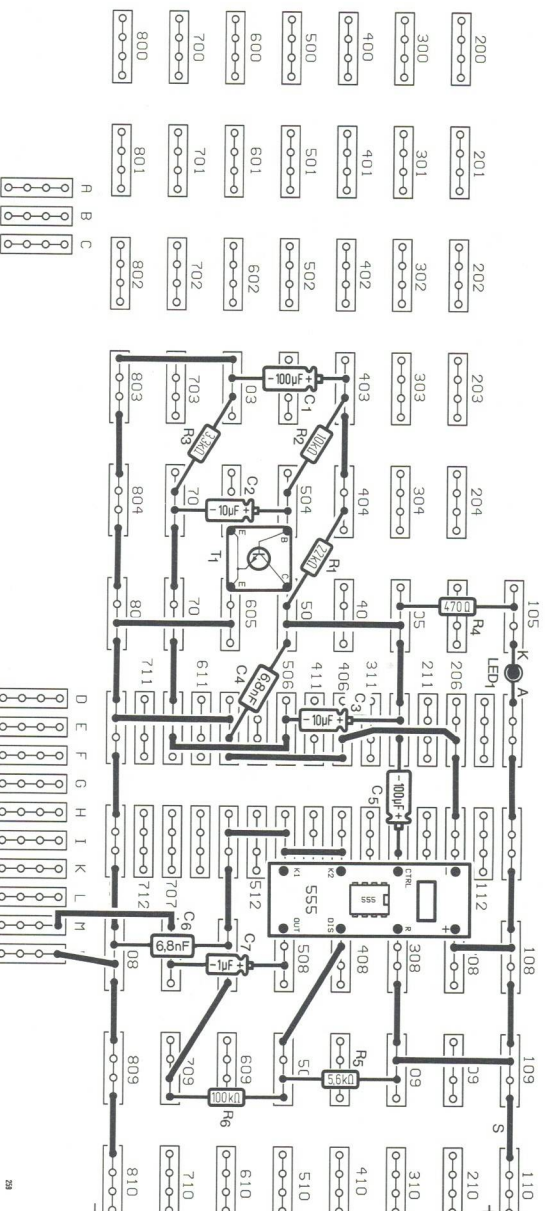


Bild 259. Aufbau zu Bild 258.

Spannung wird durch die *RC*-Glieder so „geschoben“, daß sie am Eingang im richtigen Augenblick die zum Mitschleichen erforderliche Richtung hat.

Zeit im Spiel: Monoflop mit 555

Timer ist die übliche Bezeichnung für den 555. Obwohl „Timer“ seine Fähigkeiten nur zum Teil beschreibt, wie bewiesen wurde. Seine Monoflop-Fähigkeit hat ihm diesen Namen eingebracht.

190

Mit der Schaltung nach Bild 260 begeben wir uns auf eine (Kurz-)Zeitreise. Ein Druck auf den Taster Ta1 startet den Vorgang. LED1 leuchtet auf. Schon nach einer Sekunde verlöscht sie wieder. Wir vergrößern daher C2 auf 100 μF und messen die Leuchtzeit. Sie hat sich verzehnfacht. Nun drücken wir Ta1 erneut und während der Leuchtzeit noch einige Male. Die Zeitmessung sagt: Nichts hat es genutzt. Es bleibt bei zehn Sekunden. Diese Schaltung läßt sich also zwischendurch nicht neu motivieren. *Retriggern* sagt der Techniker. Einzig wirksam ist der erste Start. Den erzeugen wir, wie früher gelernt, *dynamic*. Ta1 könnte also ebenso gut die ganze Aktivzeit über geschlossen bleiben.

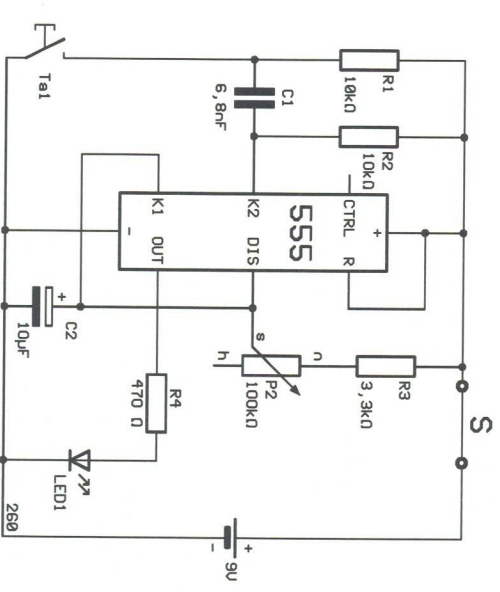


Bild 260. Gut für Eier und Toast: Nicht nachtriggender Zeitgeber mit Charakter.

Die Timerfunktion läßt sich sehr schön berechnen, da der Kondensator einfach von Null bis zu 2/3 der Batteriespannung aufgeladen wird. Komparator 1 spricht dann an und schaltet DIS nach Minus durch. Das entleert den Kondensator und macht ihn für einen neuen Ablauf bereit. Die Berechnung liefert für die Aktivzeit des Ausgangs (also hohe Spannung an OUT, LED1 leuchtet): $T = 1,1 \cdot (R3 + P2) \cdot C2$. T erhält man in Sekunden, wenn man $R3$, $P2$ in Ohm und C2 in Farad einsetzt. Wären nicht die (wenn auch kleinen) Eingangsströme des 555 und der Leckstrom von Elkos, man könnte auf ewige Zeiten kommen. So bleibt im Bereich von 100 pF bis zu einigen 100 μF für sinnvolle C-Werte und von 1 kΩ bis zu einigen MΩ für den Gesamtwiderstand im Zeitglied. Für Eieruhren und ähnliches reicht das auf jeden Fall.

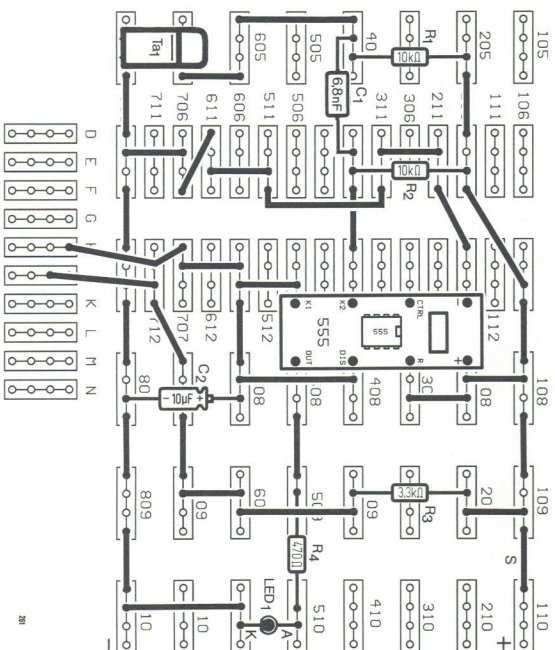


Bild 261. Aufbau zu Bild 260.

191 Wir merken uns die eben eingestellte Aktivzeit und schalten in die Plusleitung eine Leuchtdiode mit Pfeil in Richtung Plusanschluß des 555. Dann starten wir und vergleichen die Zeiten. Ergebnis: Alles wie vorher. Wieso? Die um knapp 2 V kleinere Betriebsspannung ergibt zwar einen entsprechend kleineren Ladestrom. Um den gleichen Faktor ist aber jetzt auch die Vergleichsspannung am inneren Widerstandsteiler des 555 kleiner. Stabile Verhältnisse also. Das machte den 555 als recht zuverlässigen Zeitgeber für mittlere Ansprüche von Anfang an interessant.

192 Fast hätten wir das Treppenhaus als eine Wirkungsstätte des 555 vergessen. Also schnell Schaltung nach Bild 262 aufbauen! Das ist nicht irgendeine Treppenhausautomatik. Achten wir auf LED1. Im Ruhezustand leuchtet sie. Im Dunkeln kann sie also z. B. den Taster markieren. Nun ein Druck auf Ta1: Das „Treppenlicht“ (LED2) geht an, und LED1 verlischt. Aber nur vorerst. Nach etwa einem Drittel der Aktivzeit des Timers beginnt sie zu leuchten und warnt: Achtung – bald geht das Licht wieder aus! Genau darin besteht ja die Heimtücke aller einfachen Treppenlichter – man weiß nie, wann man plötzlich wieder im Dunkeln tappt. So ist man vorgewarnt. Schnell ein Druck auf den Taster und – oh Wunder: Die Helligkeit fängt wieder ganz von vorn an! Diese Schaltung ist also *retriggerbar*. Wir brauchen darum auch

nicht gebannt auf das Rotlicht zu starren und auf den Black-out zu warten.

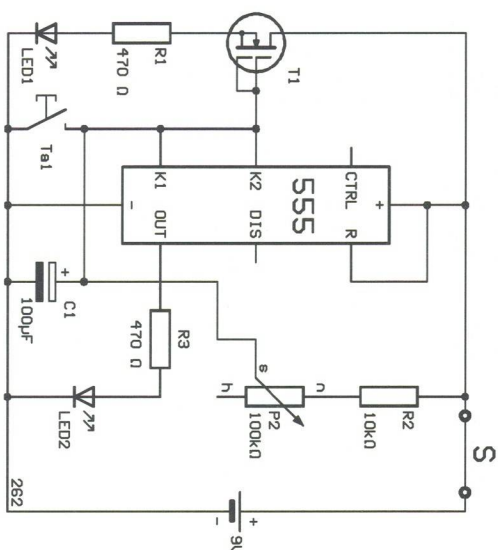


Bild 262. Schützt vor Beinbruch: Treppenlicht mit Ablaufwarner und Aufritschaste.

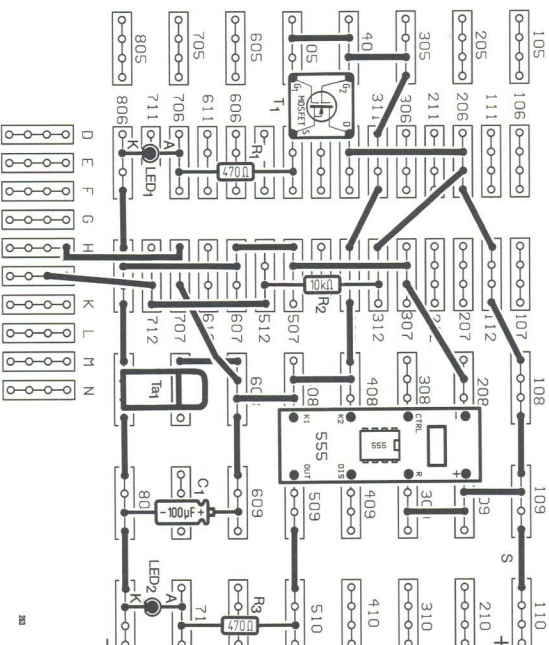


Bild 263. Aufbau zu Bild 262.

Für diesen Test sind 100 μF für C1 angemessen. Im praktischen Einsatz empfiehlt sich ein Ladewiderstand von 1,5 M Ω . Das ergibt die übliche 3-Minuten-Licht-Dimensionierung.

193 Der Timer nach Bild 264 wird in seiner Aktivzeit auf andere Art gesteuert. Nach Anschluß der Batterie drücken wir kurz auf Ta1. LED1 zeigt, daß OUT auf hohe Spannung geschaltet hat, wie sich das gehört, wenn K2 an Minus gelegt wird. Außerdem hat aber das zusätzlich angeschlossene Netzschaltgerät X (Steckdosen 209 und 510) angezogen. Dieser Timer kann also große Lampen schalten. Nach rund 8 s (1,1 $\cdot$ R3 $\cdot$ C1) kippt die Schaltung in die Ruhelage zurück, sofern P2 auf Maximum steht (s an h). Drehen wir nun diesen Schleifer auf etwa die Hälfte herunter und tippen erneut auf Ta1: Die Aktivzeit ist nun deutlich kleiner. Insgesamt läßt sich ein Zeitbereich von etwa 1,5 s bis 8 s überstreichen. Retriggern kann man diesen Timer nicht.

Wir stellen fest: Durch Verändern der Kontrollspannung (P2 bildet mit dem inneren oberen 5-k Ω -Widerstand einen Spannungsteiler) verschiebt sich die Schaltschwelle zu kürzeren Zeiten hin. Damit es auch am Anschlag noch funktioniert, empfiehlt sich der Widerstand R1 von etwa 1 k Ω in Reihe zu P2.



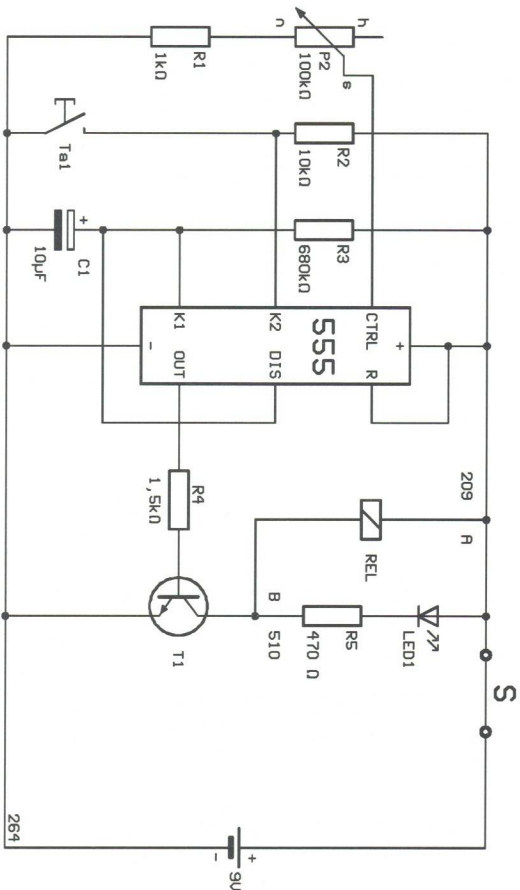


Bild 264. Control-Tower übernimmt: Zeitsteuerung am Anschluß CTRL.

194
Um uns das nochmals zu beweisen, nehmen wir den Aufbau nach Bild 267 zunächst ohne $F1$ und $C1$ in Betrieb. Dabei zeigt sich: Besonders, wenn mit dem Netzgerät X gearbeitet wird (kapazitive Kopplung zum Netz!), kann schon einpoliges Berühren von Anschluß $K2$ den Timer aktivieren. Das ist aber eine unsichere Sache. $K2$ kann auch Schaltimpulse über elektrische Felder aus der Umgebung aufnehmen und darauf reagieren. $C1$ und eben $F1$ schützen davor. Gewollt läßt sich der Timer jedoch bei nicht zu trocke-

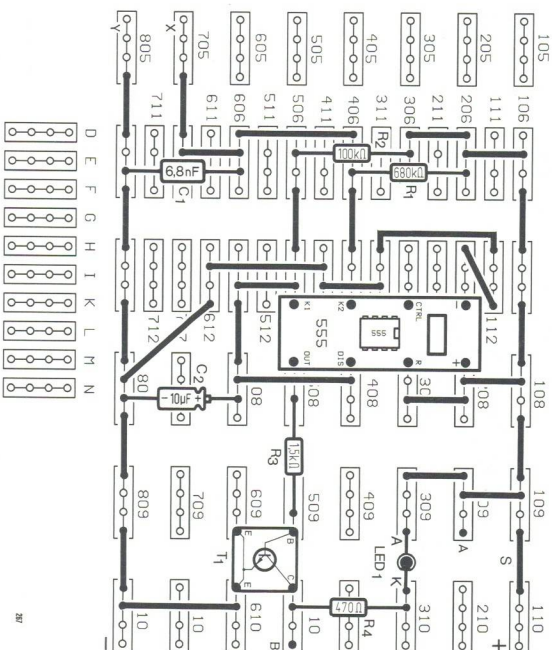


Bild 267. Aufbau zu Bild 266.

ner Fingerkuppe als Brücke über den Kontaktfedern 705 und 805 auslösen. Probiert es aus! Gelingt es, hat die Fingerkuppe sicherlich weniger als etwa 200 $K\Omega$ Hautwiderstand. Und mit diesem sensiblen Schalter können wir über das Relais dann große Lampen schalten!

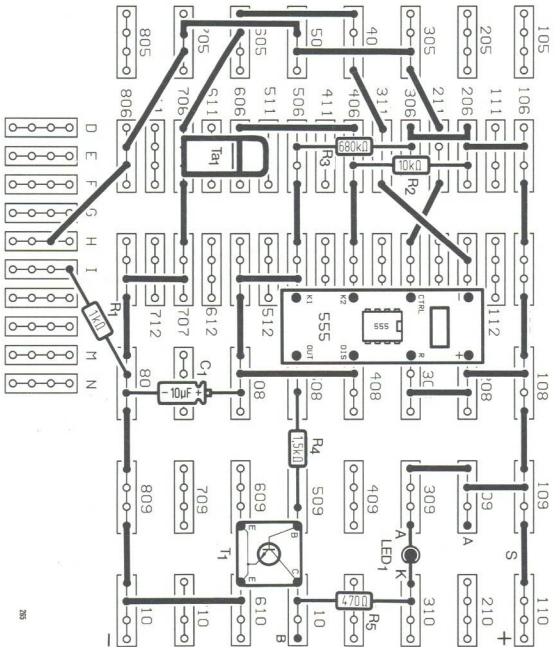


Bild 265. Aufbau zu Bild 264.

Sensor-Tips

Taster ist out – Sensorflächen tun's auch! Bereits im vorigen Versuch hatten wir stillschweigend einen „Pull-up“-Widerstand von $K2$ nach Plus gelegt. Das erhöht die Störfestigkeit dieses ziemlich empfindlichen Eingangs.

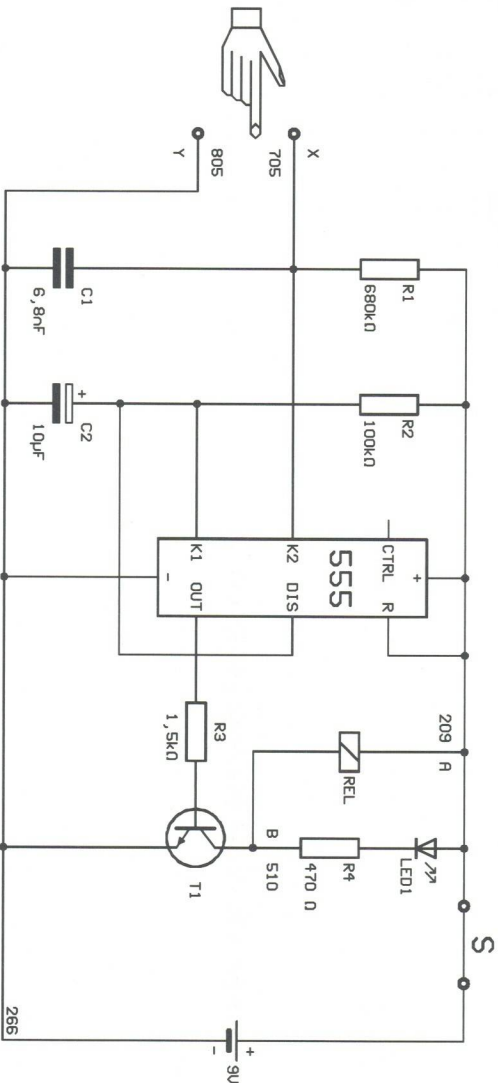


Bild 266. Timerstart über die Haut: Sensortaste statt Blechkontakt.

Was da nach Bild 268 aufgebaut werden kann, gehört eigentlich schon nicht mehr in die Gruppe der Timer. Der Kondensator C2 täuscht. Er hat eine andere Funktion. Findet es heraus! Nun? Über die Sensorflächen (X: Steckfeder 505; Y: Steckfeder 605) werden beide Kompartimente „bedient“. Womit, das hängt vom Ladezustand von C2 ab. Mehrmaliges Antippen mit dem Finger zeigt: Wenn LED1 gerade aus ist, geht sie an. (Ebenso zieht das Relais, Steckedern 209 und 510, an.) Leuchtet sie, knipst man sie mit dem gleichen Finger an gleicher Stelle wieder aus. Das Geheimnis liegt also im aktuellen Zustand von C2: Ist er gerade leer (also Ausgang auf Minus, LED1 aus), läßt sich K2 mit dem Finger an „dieses“ Minus schalten. Darauf reagiert der 555 in der vorliegenden Schaltung flip-flop-gemäß: Solange wir nichts weiter tun als nur kurz anzutippen, leuchtet ab jetzt LED1 und das Relais ist angezogen. In Bruchteilen einer Sekunde hat sich C2 dem angepaßt und sich auf deutlich mehr als 2/3 der Betriebsspannung aufgeladen. Wer jetzt (wieder kurz!) auf die Sensorflächen tippt, beendet damit Eingang K1: Hohe Spannung an diesem Anschluß – der Ausgang schaltet auf Minus. LED1 geht aus, Relais fällt ab. Flip-Flop mit Wechsellaste. Oder Trigger mit selbstgemachten Schwellwerten?

Übrigens: Wer den Finger auf den Kontaktf läßt, setzt damit einen Blinker in Gang! Und noch etwas: Die Fingerkuppe darf diesmal viel trockener sein.

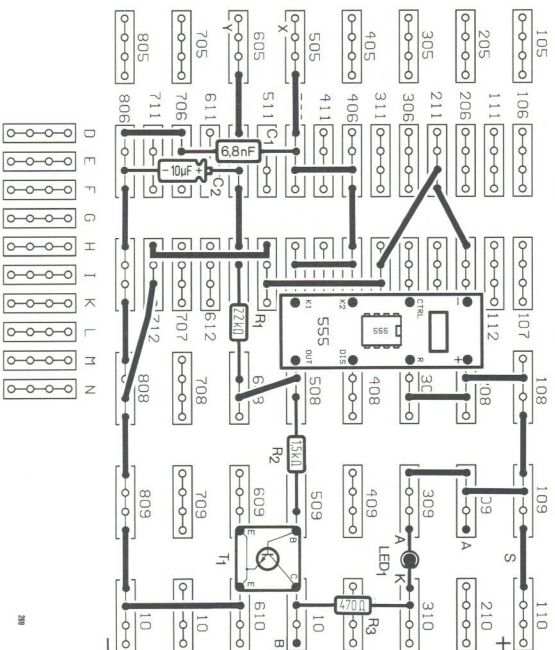


Bild 269. Aufbau zu Bild 268.

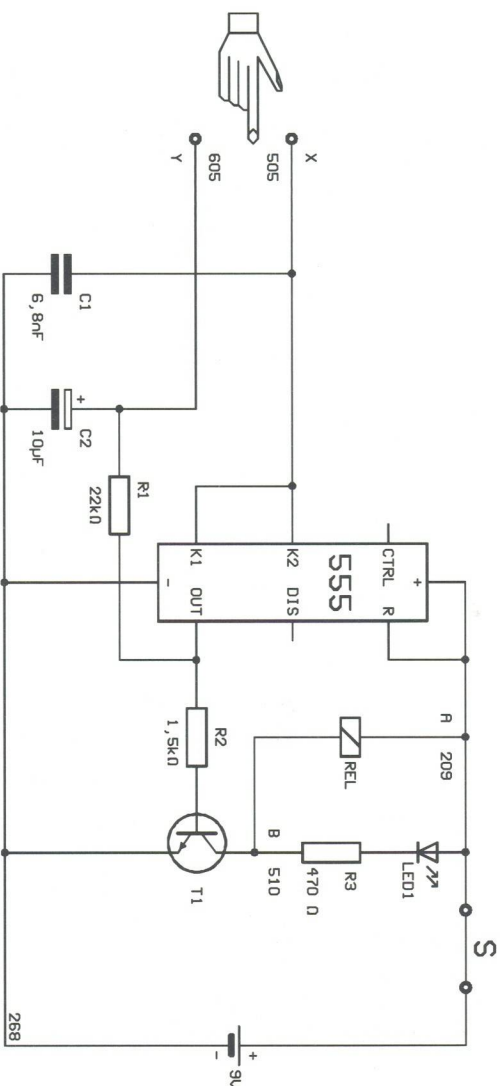
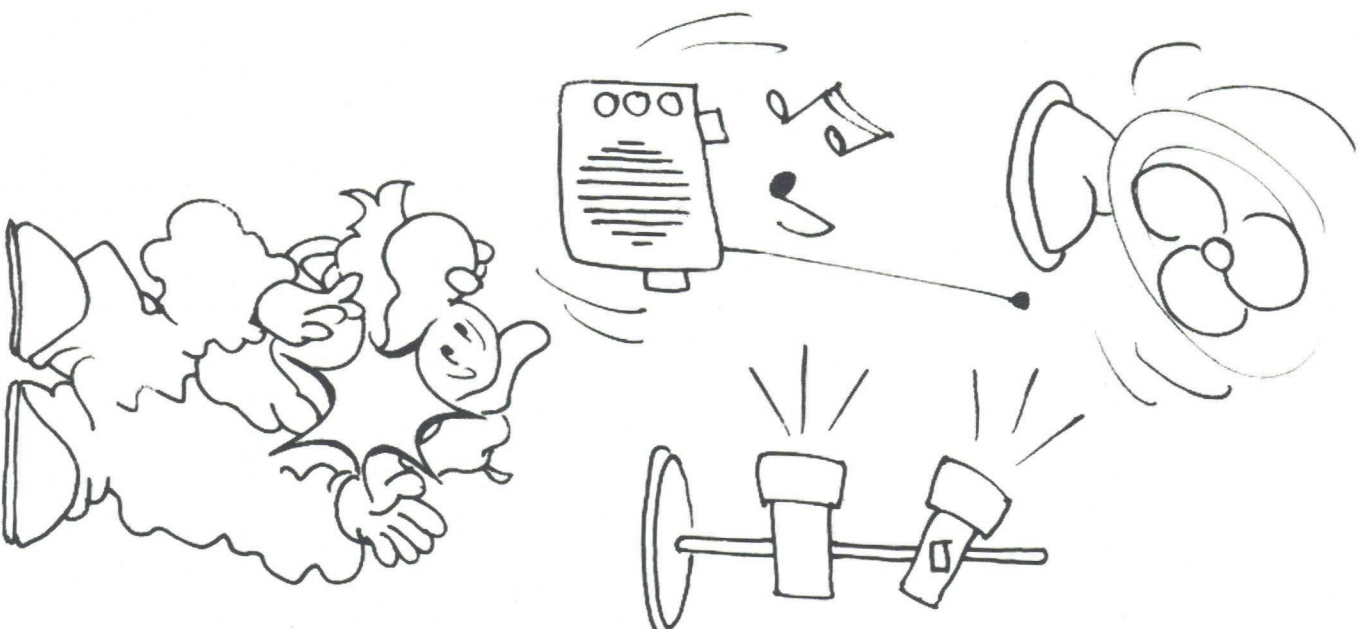


Bild 268. Intelligenter Sensor: Paßt sich der Lage an (Wechselkontakt).



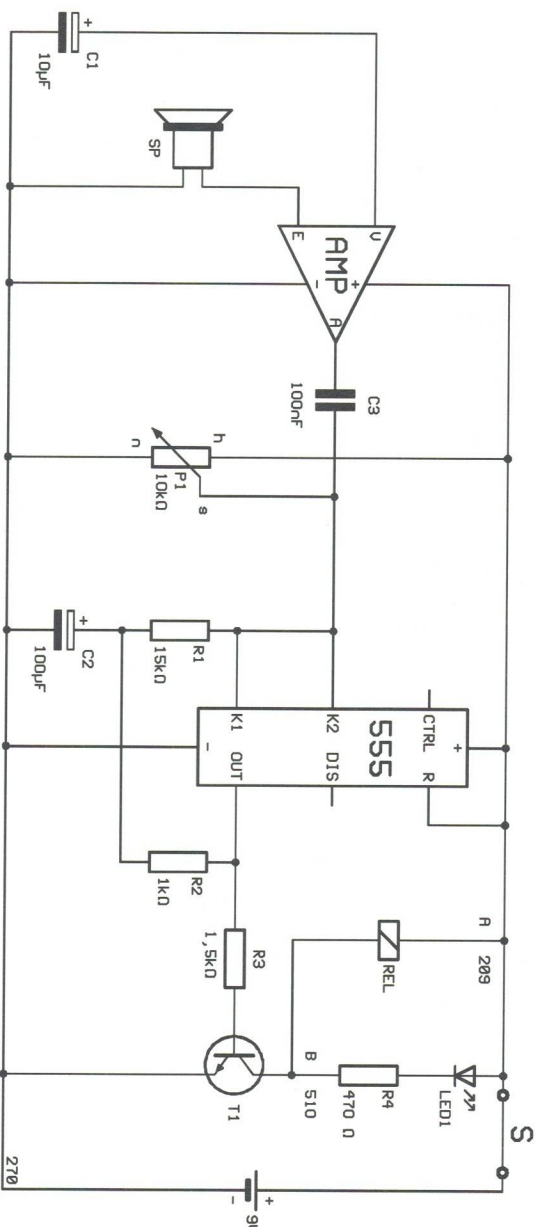


Bild 270. Reagiert auf jeden Klatsch: Sensibler Umschalter, mit Schall ferngesteuert.

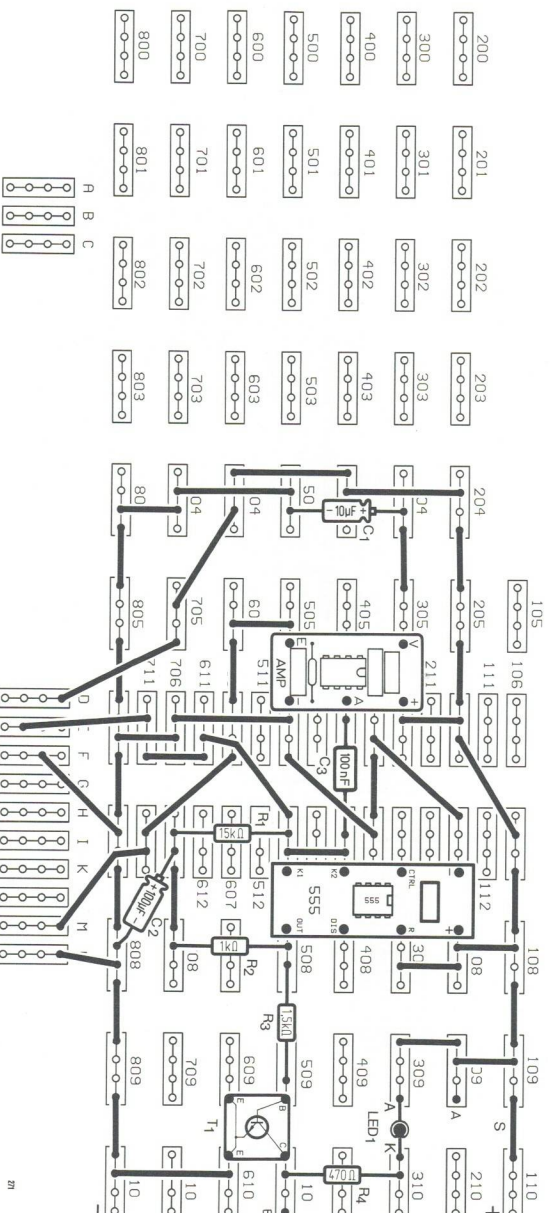


Bild 271. Aufbau zu Bild 270.

Praktische Triggerereien mit dem 555

Wieder einmal schließen wir ein Bündnis mit den Geistern. Zumindest gegenüber jenen, die unsere Tricks noch nicht kennen. Schall und Licht sind unsere Gehilfen. Sie schalten alles, was das KOSMOS Netzschaltgerät X so schafft. Also eine ganze Menge.

196

Den AMP mit Minimalbeschaltung, auf maximale Verstärkung eingestellt, den Lautsprecher (diesmal als Schallaufnehmer), einen Leistungsschaltausgang am 555 – das alles stecken wir nun gemäß Bild 271 zusammen.

P1 wird auf Mitte gestellt. Von da an sollte man Werkzeug auf dem Tisch leise ablegen und nicht mehr in die Hände klatschen. Höchstens zu Testzwecken. Es schaltet dann nämlich ein oder aus – je nach dem vorherigen Stand. Das kann ein abendfüllendes Programm werden. Und ist dabei (jetzt) so einfach zu verstehen: SP nimmt Schall auf. Seine Spule bewegt sich im Magnetfeld und liefert dabei (höchstens) wenige Millivolt mit Schaltfrequenz an den AMP-Eingang E. Der verstärkt sie 5000fach. Dann ist da noch die Rückführung mit R2 und R1, leicht verzögert durch C2. Durch diesen Trick wird es besonders empfindlich. Mittelstellung von P1 heißt dadurch nämlich nicht einfach halbe Batteriespannung am Schleifer. Nein, die aktuelle Ausgangsspannung (etwa 1,4 V unter der Batteriespannung bzw. fast Null, je nach Zustand) verschiebt mit C2 als Speicher den Arbeitspunkt immer in die Nähe der Triggerschwelle, die beim nächsten Schallereignis erreicht werden muß, damit OUT in die jeweils andere Lage kippt. Die kräftig verstärkte NF-Spannung schafft das. K1 bzw. K2 reagiert, der Ausgang schaltet um, C2 zieht nach. Das nächste Schallereignis genügender Stärke kippt alles wieder zurück. Mit der Verschiebung darf man es aber nicht übertreiben, etwa durch kleineren R1. Dann nämlich kann es von selbst kippen!

197

Einen *lichtgesteuerten Einschalter* stellt die Schaltung nach Bild 272 dar. Nach Aufbau wird P2 zunächst in Mittelstellung gebracht. Dann schließt man die Batterie an. Die Leuchtdiode bleibt dunkel, solange der Fototransistor TF nicht beleuchtet wird. Durch Anleuchten von TF mit einer Taschenlampe o. ä. kann LED1 eingeschaltet werden (oder parallel dazu über das KOSMOS Netzschaltgerät X ein beliebiges Gerät). Fällt das Licht aus, fällt auch das Relais ab.

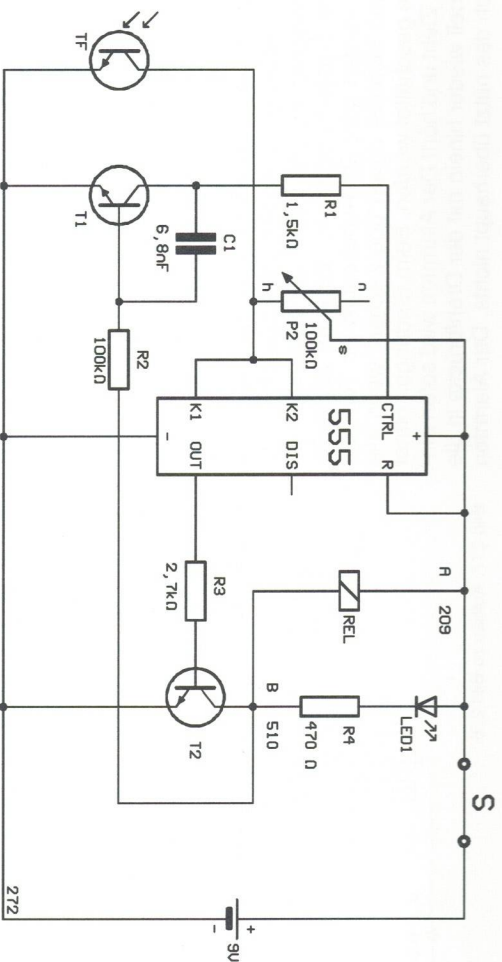


Bild 272. Einschalten bei Licht: Durch große Hysterese ($R1$ zwischen 1,5 k Ω und 10 k Ω) für selbsthaltende Beleuchtungen geeignet.

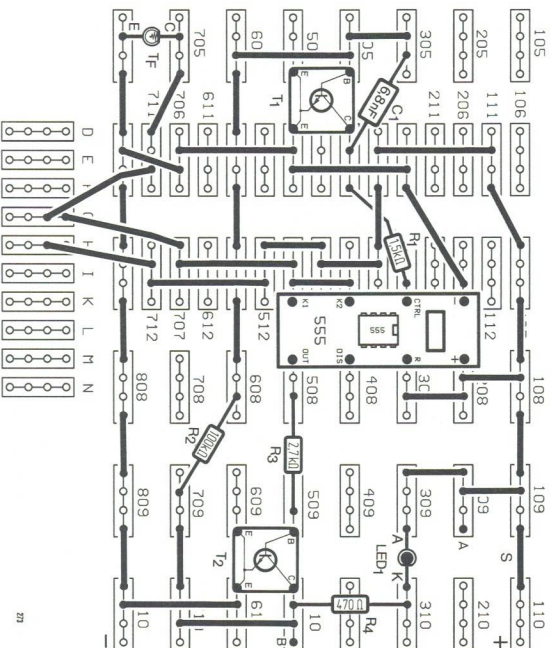


Bild 273. Aufbau zu Bild 272.

Mit T1 kann die Hysterese der Schaltung vergrößert werden. Bei Null am Ausgang OUT ist T1 geöffnet, und es gelten niedrigere Schwellwerte. $R1$ bestimmt ihre Höhe. Sobald der lichtabhängige Kollektorstrom von TF so groß geworden ist, daß

über P2 mehr als 2/3 der Batteriespannung stehen, kippt der 555 auf hohe Ausgangsspannung. Dadurch wird T2 geöffnet und das Relais (Steckfedern 209 und 510) zieht an. Die nun niedrige Kollektorspannung von T2 sperrt jedoch T1, so daß ab jetzt die „normalen“ Triggerschwellen gelten. Das heißt, die Helligkeit muß wesentlich stärker abnehmen, als bis zu dem vorherigen Ansprechwert, bevor der 555 zurückkippt und das Relais abfallen läßt. An P2 kann die Lichtempfindlichkeit

der Schaltung gewählt werden: Je größer der eingestellte Teil, um so geringere Helligkeit führt zum Einschalten.

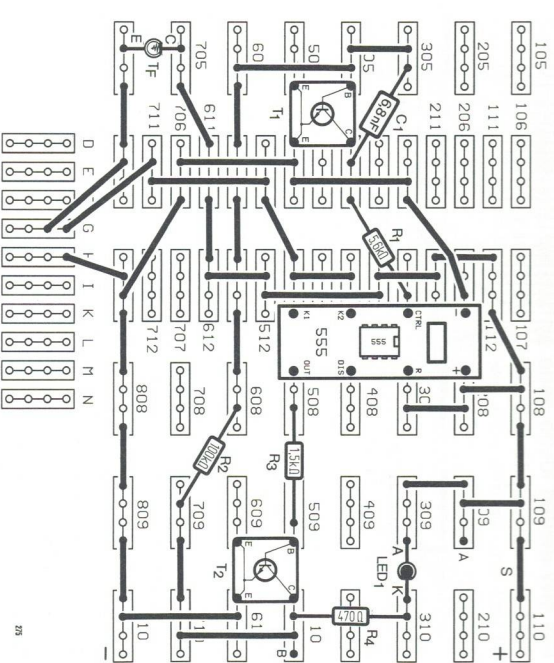


Bild 275. Aufbau zu Bild 274.

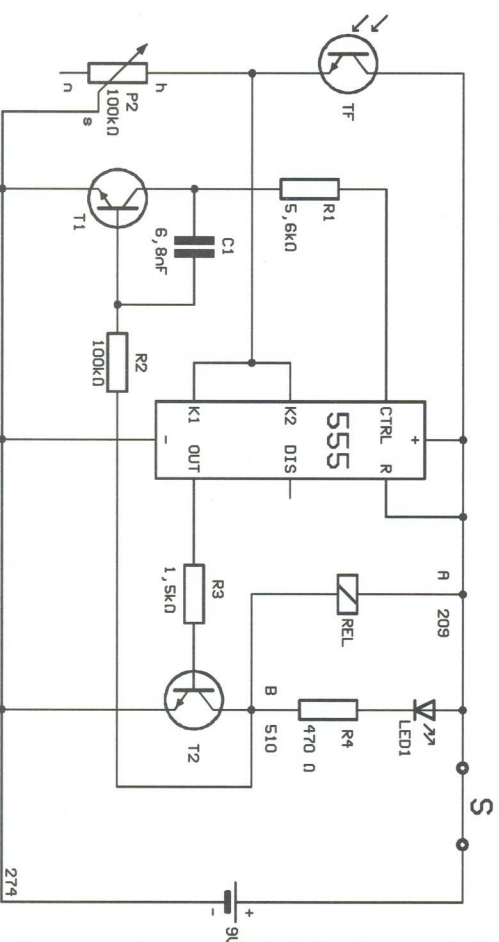


Bild 274. Ausschalten bei Licht: Dämmerungsschalter mit verbreiteter Hysterese.

198 Die Schaltung nach Bild 274 ist das Gegenstück zur soeben erprobten. Das merkt man nach dem Anschalten der Batterie. Es ist auch gar nicht viel umzustecken. P2 steht vorerst wieder auf Mitte. Wegen der Lichtverhältnisse testen wir am besten abends, und zwar die Reaktion auf Taschenlampenlicht. Zunächst wieder ohne den Bereich um T1, d. h., R2 wird vorerst noch nicht eingesteckt. Wir stellen fest: LED1 leuchtet (und das Relais ist angezogen), wenn es am Fototransistor dunkel ist. Lichteinfall schaltet den Ausgang auf niedrige Spannung, die LED verlischt und das Relais fällt ab. Es handelt sich also um einen *Dämmerschalter*.

Wir setzen nun R2 ein und können feststellen, daß die Hysterese wieder größer geworden ist, ganz im Sinne der vorigen Schaltung. Mit R1 von nur 1,5 k Ω wird dies möglich: In einem gewissen Helligkeitsbereich (diffuses Tageslicht) vernag man mit einem Stück Papier durch Lichtreflexion einzuschalten. Mit dem gleichen Papier zwischen Fenster und Fototransistor geht es wieder aus. Fast schon wieder eine Geisterbeschwörung!

199 Ein objektives Bild der Verhältnisse beider Versuche erhält man, wenn das Poi zwischen Plus und Minus geschaltet wird. Den Schleifer legt man an K1, K2. Der Fototransistor bleibt draußen. Durch Einsetzen unterschiedlicher Werte für R1 ermitteln wir die Grenzen sinnvollen Beitrages.

200 Wir schalten R2 statt an den Kollektor von T2 an OUT und ermitteln in der Versuchsschaltung das Verhalten bei unterschiedlichen Werten von R1. Bei 5,6 k Ω beobachten wir eine deutlich kleinere(!) Hysterese. Unterhalb von etwa 3,3 k Ω wird die Leuchtdiode in einem gewissen Bereich „halbheiß“ – die Schaltung schwingt jetzt im Übergangsbereich.

Alarm aus dem Timer
Eine Alarmanlage mit dem 555 – warum nicht?

201 Sieht etwas komplizierter aus, ist aber in wenigen Minuten zusammengesteckt – die Schaltung nach Bild 276. Und sie funktioniert auf Anhieb, ohne Einstellen. Die Drahtbrücke X zwischen R3 und D2 ist die entscheidende Stelle des kleinen Einbrecherschecks. Es kann ein Reißdraht verwendet werden oder ein Ruhekontakt an Tür oder Fenster. Man kann mehrere davon überwachen, wenn alle Kontakte in Reihe geschaltet werden. Beim Eindringen öffnet sich diese Stelle. Zieht und hört! Der Alarmton wird sofort einsetzen. Also schnell wieder hinein mit der Drahtbrücke in die Steckedern! Doch das nützt überhaupt nichts. Der Alarmton

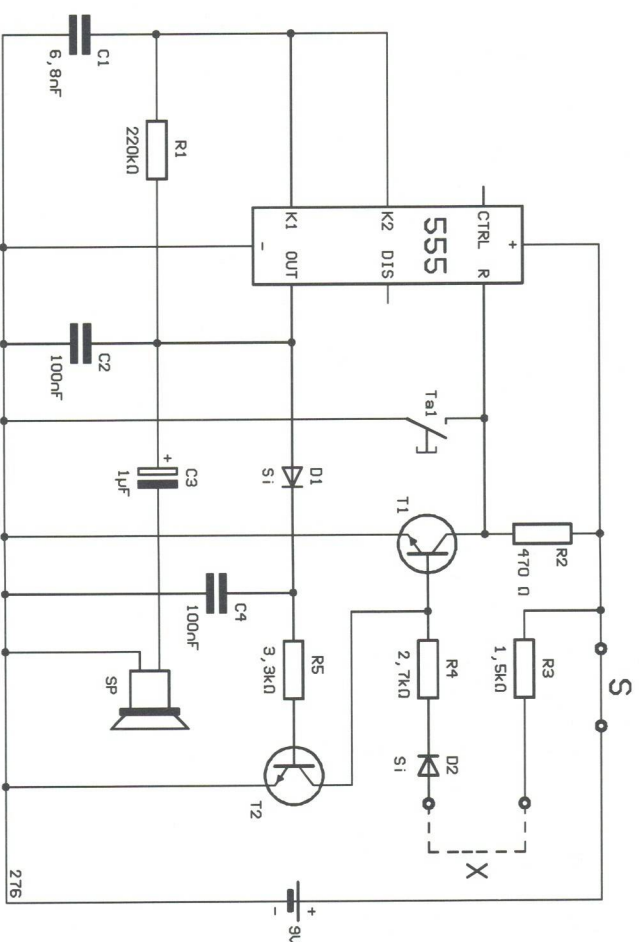


Bild 276. Hinterhalt für „Einsieger“. Alarmanlage mit Selbstschaltung.

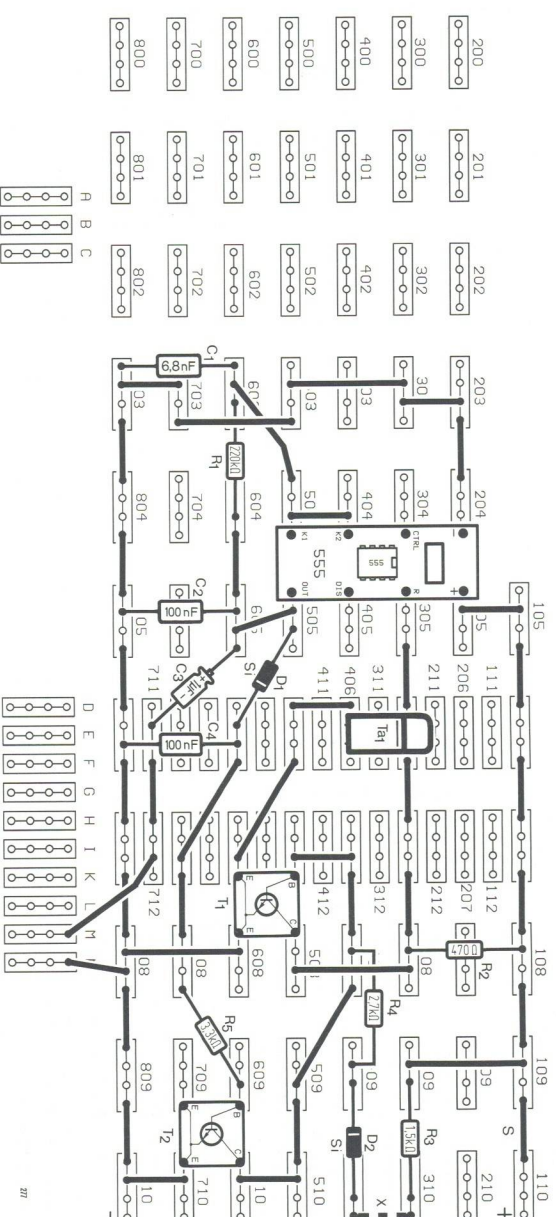


Bild 277. Aufbau zu Bild 276.



Nervenprobe

202

Für Anfänger wird P1 auf Maximum gestellt (s an h). LED1 leuchtet, außer in den Zeiten, in denen T_{at} gedrückt wird. Plötzlich leuchtet (von selbst) LED2 auf, geht aber gleich wieder aus. Nach einigen Sekunden das gleiche Spiel. Wer es schafft, während der Hellzeit von LED2 den Taster zu drücken und festzuhalten, hält damit auch ihr Leuchten fest, bis zum Loslassen. Es kommt also darauf an, innerhalb dieses „Zeitfensters“ zu reagieren.

Und wie funktioniert nun unser Streßprüfer? Am Anfang ist C1 leer, K1, K2 also an Minus, daher OUT auf hoher Spannung. LED2 ist dunkel, DIS gesperrt. LED1 zeigt an, daß T2 aktiv ist

Halbleiter unter sich

Halbleiter brauchen kein Licht. Sie produzieren es selbst. Von der einfachen Leuchtdiode, der LED, bis zum Laser. Übersetzt heißt LED *lichtaussendende Diode* (Light Emitting Diode). Ganz einfach gesagt: Den Atomen wird Energie zugeführt. Am besten elektrische. Das regt Elektronen dazu an, sich auf ein höheres „Niveau“ zu bewegen, energiereichiger zu sein. Dort halten sie sich nicht lange. Sie fallen zurück in ihren alten Zustand. Wohin mit der jetzt überschüssigen Energie? Schnell weg damit – in Form von Lichtquanten. Ohne, daß es erst heiß werden muß wie im Faden einer Glühlampe, einfach so, bei Zimmertemperatur. Dafür gibts immer nur Licht in einer vom Material bestimmten Farbe: blau (wenn auch noch selten), grün, gelb, rot, infrarot. Man kann es auch so sehen, wie nach Bild 280: Das Elektron reißt beim „Aufstieg“ ein Loch. Wenn es dorthin zurückfällt, entweicht dafür ein Lichtquant.



Um „ganz unter sich“ zu sein, verständigen sich optoelektronische Halbleiterbauelemente gern im Infraroten (Tabelle nach Bild 281). Dazu gehören natürlich auch entsprechende Aufnehmer für das, was die Dioden so aussenden. Wenn Ladungsträger Licht aussenden können, warum soll nicht auch Licht in der Lage sein, Ladungsträger freizusetzen? Es geht schließlich immer nur eine Energieform in die andere über. Damit sind wir auf der „anderen Seite“ gelandet: Bei Fotodioden und Fototransistoren, beide gerade im Infraroten ziemlich empfindlich.

Bild 281. Wellenlängenbereich der Infrarotstrahlung

Besonders der Transistor. Wir benutzen einen Typ, dem fehlt der (elektrische) Basisanschluß. Darum sieht er aus wie eine (glasklare) Leuchtdiode. Durch das Gehäuse trifft das Licht wie ein optischer Basisstrom auf und setzt im Basisbereich an den pn-Übergängen Ladungsträger frei (Bild 282).



Spendieren wir dem Fototransistor noch eine Betriebsspannung und einen Arbeitswiderstand, kann Kollektorstrom fließen und die optische Botschaft darin weiterverarbeitet werden.

All das, was sich mit den Paarungen von Lichtsendern und Lichtempfängern anstellen läßt, hat den schönen Namen *Opto-Elektronik*. Einen winzigen Eindruck von deren Möglichkeiten werden wir durch die folgenden Experimente bekommen.

Um ganz sicher zu sein, daß wir das richtige Bauelement für den richtigen Zweck in der richtigen Lage verwenden, sollten wir den Fototransistor (TF) zur Unterscheidung gegenüber der Infrarot-Leuchtdiode (IR-LED) mit etwas Farblack seitlich am Gehäuse kennzeichnen. Wer wer ist, zeigt der folgende Pilotversuch¹⁴.

203

Stecken wir die beiden ungleichen Geschwister nacheinander in den Aufbau nach Bild 283. Kurzes Bein jeweils in Richtung $F1$. Dann wird der Prüfling am besten mit einer Tischlampe aus etwa 50 cm Abstand beleuchtet. Es geht auch mit einer stärkeren Taschenlampe recht gut. Selbst bei dieser hellen Umgebung dürfte das Aufleuchten von LED1 noch gut erkennbar sein. Wer das bewirkt, ist der Fototransistor. Zur Belohnung erhält er einen Farbpunkt auf die Kollektorseite. Kollektor = *kurzener* Anschluß (Eislsbrücke). Das andere unbekannte, ähnlich aussehende Bauelement ist also die IR-LED, und bei ihr ist der kurze Anschluß die Kathode. Die IR-LED arbeitet fast wie eine normale LED, nur, daß unseren Augen ihr Licht verborgen bleibt. Das Sehen in diesem Bereich übernimmt für uns der Fototransistor.



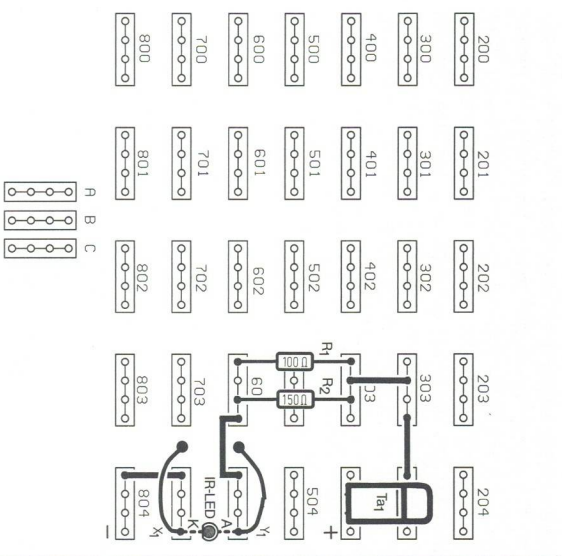


Bild 285. Aufbau zu Bild 284.

204

Im Aufbau nach Bild 285 stehen sich IR-LED und Fototransistor TF auf kurze Entfernung gegenüber. Wir erreichen das durch die Montage von IR-LED und TF im linken bzw. rechten Pult (s. S. 11). In der Aufbauzeichnung wird dies durch gestrichelte Bauteilanschlüsse angezeigt. Die Anschlüsse Y1 und X1 bzw. Y2 und X2 sind lange Drähte, mit denen die Bauteile IR-LED und TF beim seitlichen Einbau in die

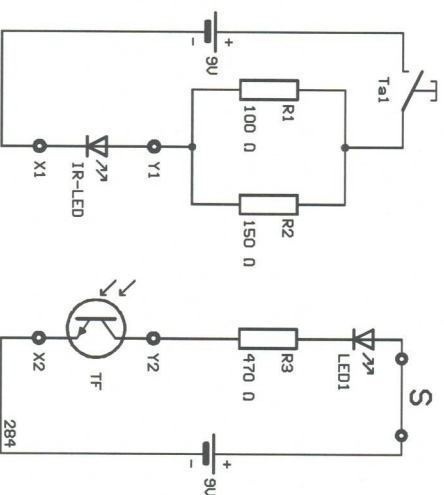


Bild 284. „Lichtwandler“. Infrarotlicht steuert über Fototransistor LED.

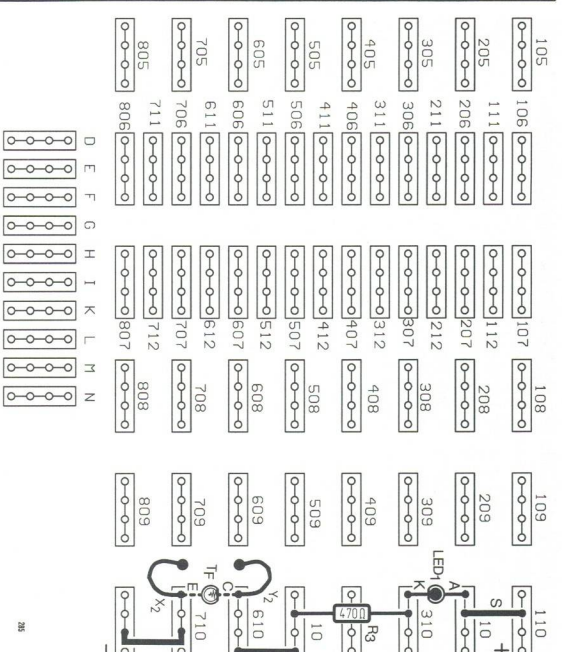


Bild 286. „Lichtverstärker“. Darlingtonschaltung verstärkt die Lichtwirkung (den Strom).

Pulte angeschlossen werden. Die Drähte werden dazu durch die zwischen den Steckdornen vorhandenen Löcher gesteckt.

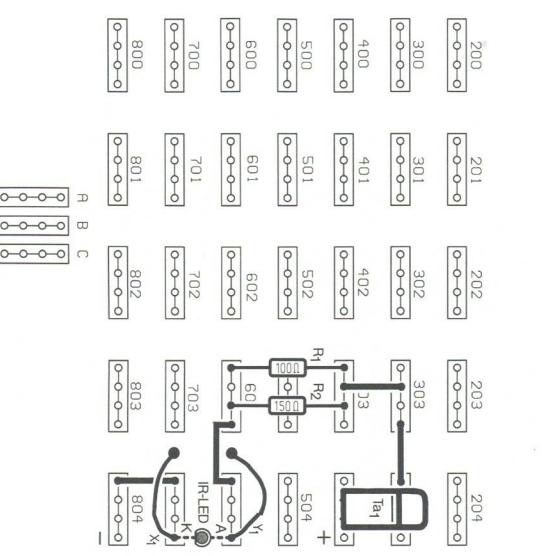
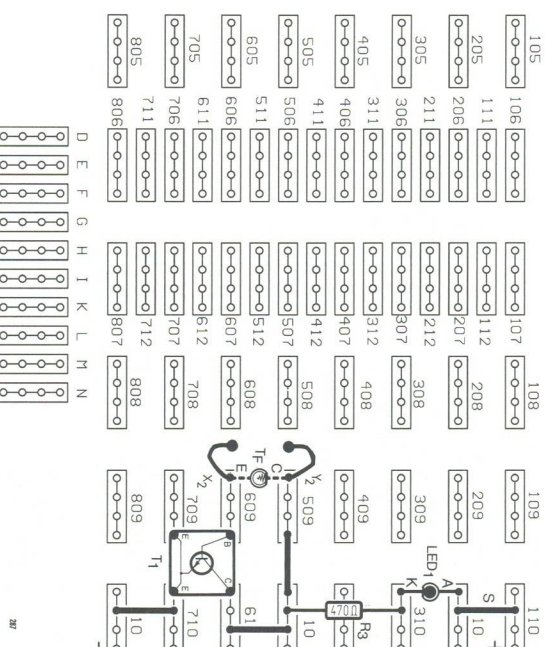


Bild 287. Aufbau zu Bild 286.

Wir drücken Ta1 und bemerken, daß LED1 ziemlich hell aufleuchtet. Zum Beweis, daß es sich tatsächlich um das unsichtbare IR-Licht handelt, das dies bewirkt, sollte man ein Stückchen Pappe in den Strahlengang schieben. Wetten, daß LED1 sofort dunkel wird? Und wenn man den Taster nun noch so fest drückt – die Unsichtbaren sind ausgetrickst.



205

Dem *Fotodarlington* auf der rechten Seite von Bild 286 genügt bereits diffuses Tageslicht, um voll durchzuschalten. Man sieht es an der hell leuchtenden LED1. Verständlich, denn schon 100 μA Emitterstrom aus TF schalten T1 voll durch. Ohne nachgeschalteten T1 hätte dieser Strom LED1 praktisch nicht interessiert. Außenlicht können wir also für diesen Aufbau nicht gebrauchen. Darum hinein in das Pult! Bringt den Sender im zweiten Pult unter und sorgt für Abstand. Dann drückt Ta1. Solange sich Sender und Empfänger noch „sehen“ können, wird LED1 leuchten. IR-LED und TF sollten auf einer gemeinsamen gedachten „optischen Achse“ liegen. Die Gehäuse beider Bauelemente sind stirnseitig als Linsen ausgebildet. Das engt den Blick- bzw. den Strahlungswinkel ein und bündelt dadurch die verfügbare Energie.

206

Elektronik kann sehr schnell reagieren. Nur höchstens auszulösen, genügt oft ein kurzer Impuls, und um den Zustand zu halten, macht man die Empfangsschaltung entsprechend intelligent.

Die Schaltung nach Bild 288 stellt solche kurzen, intensiven Lichtblitze bereit. Ohne Umwege sieht man das im Test am besten mit einer normalen Leuchtdiode. Darum steckt in den Aufbau zunächst LED1 und drückt dann den Taster. Es wird hell aufblitzen, danach aber nur mit kleinerer Helligkeit weiterleuchten. Taster loslassen, etwas warten, wieder drücken: der gleiche Ablauf.

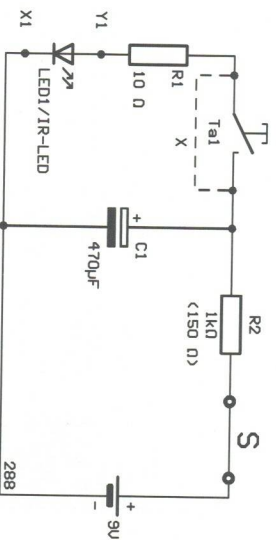


Bild 288. Impulstrick: Kondensatorladung erzeugt „Lichtblitz“.

Bei der Deutung hilft Grundlagenwissen aus den ersten Abschnitten: Der Speicher C1 wird über R2 relativ schnell auf 9 V aufgeladen. Der Taster „transportiert“ diese Ladung über den wesentlich kleineren R1 zur LED1. Die Zeitkonstante der Entladung ist viel kleiner, als die der Ladung. Also blitzt LED1 nur kurz hell auf. Anschließend muß sie sich mit dem geringeren Dauerstrom von R2 her begnügen, bis Ta1 losgelassen wird. Dann kann sich C1 wieder aufladen. Verändert R2 bis herauf zu 15 k Ω und drückt nach jeder Änderung Ta1! Zum einen wird LED1 nach dem Aufblitzen nicht weiterleuchten,

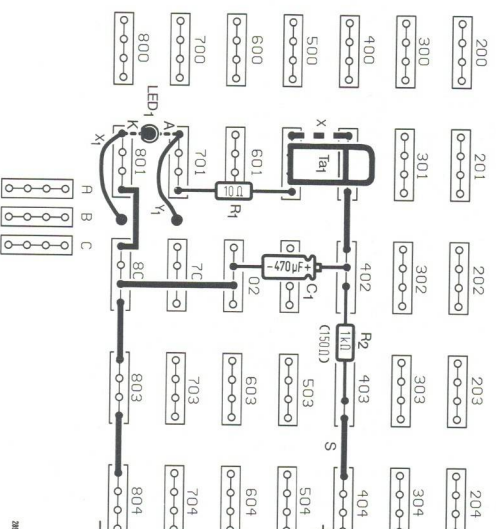


Bild 289. Aufbau zu Bild 288.

wenn Ta1 gedrückt bleibt. Zum anderen dauert es jetzt nach dem Loslassen von Ta1 wesentlich länger, bis wieder ein anständiger Lichtblitz erzielt wird.

Mit der IR-LED bestückt und mit auf 150 Ω verringertem R2 wird dieser Sender schon im nächsten Experiment gebraucht. Dabei wird nun die IR-LED seitlich im linken Pult montiert. 150 Ω sind ein guter Wert, wenn bei den Versuchen ein noch ausreichend starker IR-Strahl gebraucht wird (Taster gedrückt halten oder mit X überbrücken).

Schnitt's Lichtlampe

Im täglichen Leben wird Licht nur sehr selten gemessen. Solange man dabei Zeitungen lesen kann, reicht es eben. Elektronikschaltungen sind da sensibler. Sie bemerken feinere Unterschiede. Das läßt sich nutzen.

207

Baut die Schaltung nach Bild 290 auf und stellt P1 so ein, daß bei der aktuell herrschenden Helligkeit LED1 gerade nicht mehr leuchtet. Der TF wird (wie zuvor die IR-LED) seitlich im Pult montiert. Am besten gelingt das abends bei künstlichem, nicht zu hellem Licht. Gebt nun mit dem Impulssender nach Bild 288 einen kurzen Lichtblitz auf TF. Ziel: LED1 soll dadurch aufleuchten. Gelingt es nicht gleich, Entfernung zwischen Sender und Empfänger verringern. Nach dem „Blitzen“ sollte, wenn richtig eingestellt ist, LED1 weiterleuchten. Wieso kann sie das? Erinert Euch:

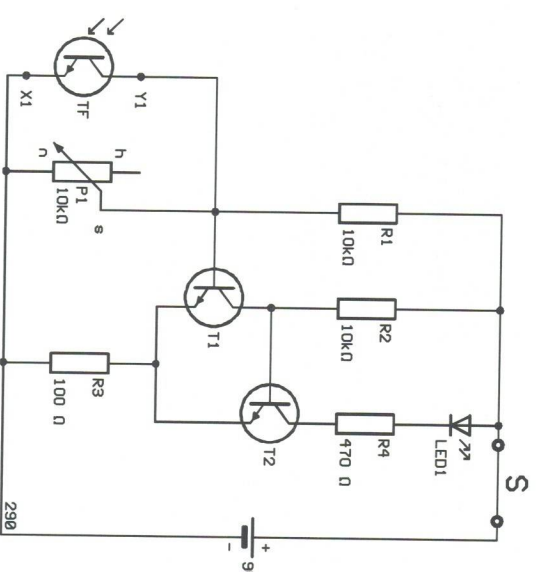


Bild 290. Lichttrigger: Schaltet jede Art Licht.

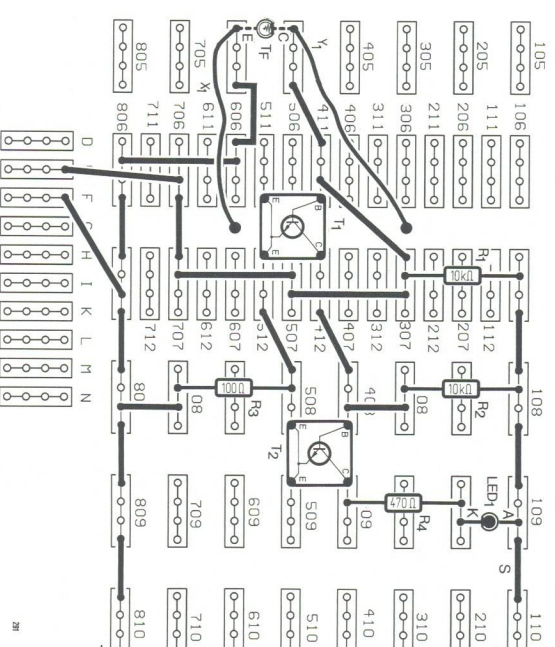


Bild 291. Aufbau zu Bild 290.

Schnitt's Trigger hat eine Hysterese. Stand P1 so, daß LED1 gerade nicht leuchtet, kippt der Lichtblitz den Trigger: T1 sperrt, T2 leitet. Während vorher aber der Strom durch R3

von R2 bestimmt wurde, erhält er jetzt von R4 und LED1 her wesentlich mehr. Der Spannungsabfall über R3 ist deutlich höher, T1 bleibt gesperrt. Zumindest so lange, bis die Helligkeit für den Fototransistor nicht mehr ausreicht, diesen Zustand zu halten.

Licht-Zünder

Wie zündet man eine Leuchtdiode an? Bestimmt nicht mit Streichholz oder Feuerzeug! Selbst dann nicht, wenn man das nötige Alter hat und es tun dürfte. Oder doch?

208

Wer mit seinen Händen oder einem schwarzen Zaubertuch geschickt operiert, ist mit dieser Schaltung im Familienkreis wieder einmal der Größte. Dieses Image festigt sich durch das nächste Experiment. TF und IR-LED sind seitlich in den Pulsen montiert. Für die Schaltung nach Bild 292 werden IR-LED und Fototransistor auf etwas „Distanz“ gehalten, aber so, daß sie sich „sehen“. Zwischen ihnen muß Raum für das Feuerzeug oder das Streichholz bleiben. Hier bietet sich wieder ein toller Zaubertrick. Aber vorher üben! Beim Anschalten der Batterie kann es sein, daß die Sache schon selbst „anspringt“. Durch kurzes Herausziehen von R1 läßt sich das löschen. Man kann aber auch einen 100-µF-Kondensator parallel zur IR-LED legen (Minus Elko an Kathode). Der beim Einschalten kurzzeitig vom AMP kommende

Strom wird dann an der IR-LED vorbeigeleitet, bis der Elko geladen ist. Es kommt dann höchstens noch zu einem kurzen Ausblitzen. Der Zauber ist durch diese Änderung sicherlich wirkungsvoller – leichte Verzögerung beim Zünden eingeschlossen, wenn das brennende Streichholz in den Raum zwischen IR-LED und TF gebracht wird.

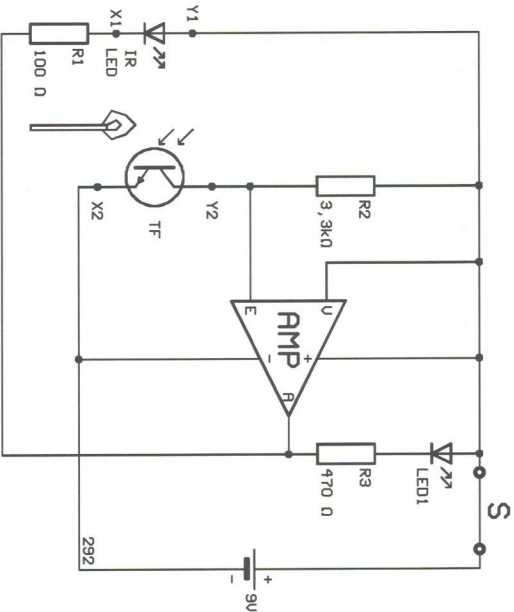


Bild 292. Nur für Belugte: Streichholz zündet Leuchtdiode an.

Leuchtendes Vibrato

Licht als Mittel zur Kopplung – warum nicht auch zur Mikrokopplung? Zu unserem Transistorpraktikum gehörte der AMV mit zwei npn-Transistoren. Sein Prinzip: Wechselweises gegenseitiges Sperren und Freigeben der Basis-Emitter-Strecken mit Zeitkonstanten. Ein Stück Verbindung ersetzen wir nun durch einen IR-Strahl und lassen damit sichtbares Licht blinken.

209

Im Aufbau nach Bild 294 stehen sich IR-Leuchtdiode und Fototransistor nahe gegenüber. Beim Einschalten leuchtet LED1. Dann geht's los. Es blinkt – so wie beim richtigen AMV. Schiebt eine „Sichtsperr“ (ein Stückchen Pappe) in den unsichtbaren Strahlengang: Aus! Besser gesagt: An, denn LED1 leuchtet jetzt ständig. Kein Wunder, denn der Basisstrom für T1 von R3 her wird nun durch kein Hin und Her im Spiel der Zeitkonstanten mehr beeinflusst. Entfernt die Sperre und das Blinken setzt wieder ein. TF empfängt IR-Licht, beginnt zu leiten und zieht den inzwischen über R2 und die Basis-Emitter-Strecke von T1 aufgeladenen C1 plusseitig an Minus. Dadurch wird T1 gesperrt. Das „hebt“ C2 auf der Plusseite an, er wird über LED1, R4 und die IR-LED geladen. Diese versorgt er dadurch mit Strom und TF wird schön durchgeschaltet. Bis C1, von R3 her geladen, die Basis-Emitter-Schwellenspannung von T1 überschreitet. Dann beginnt T1 wieder zu leiten und zwingt dabei über C2 sogar vorübergehend den IR-LED-Strom ab. Alles in allem blinkt es kräftig, solange die optische Kopplung das Wechselspiel aufrechterhält.

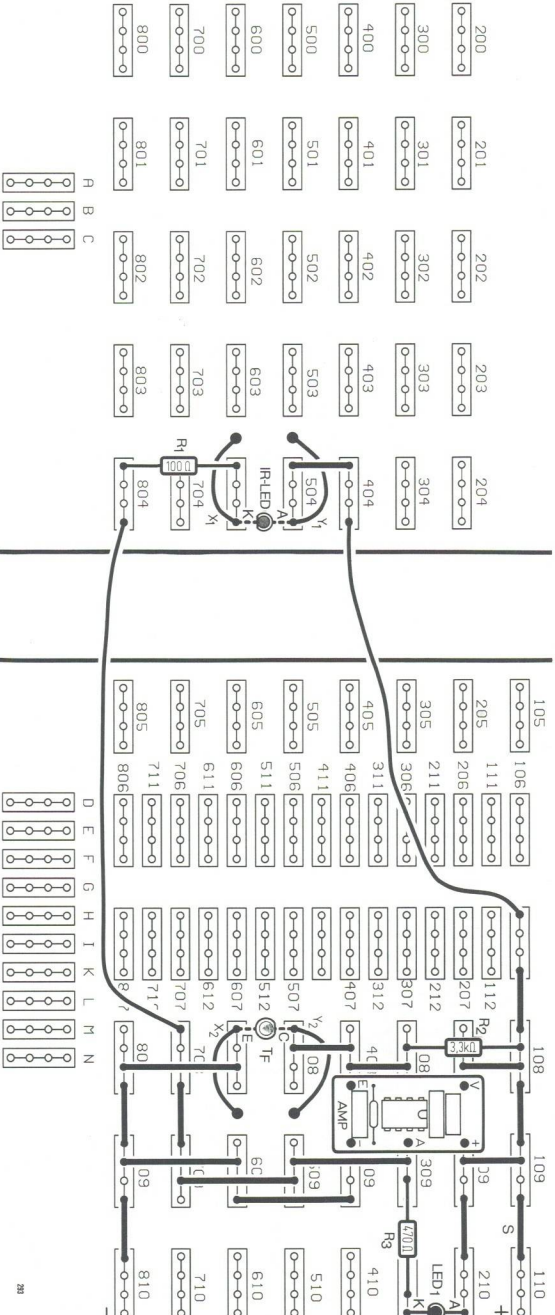


Bild 293. Aufbau zu Bild 292.

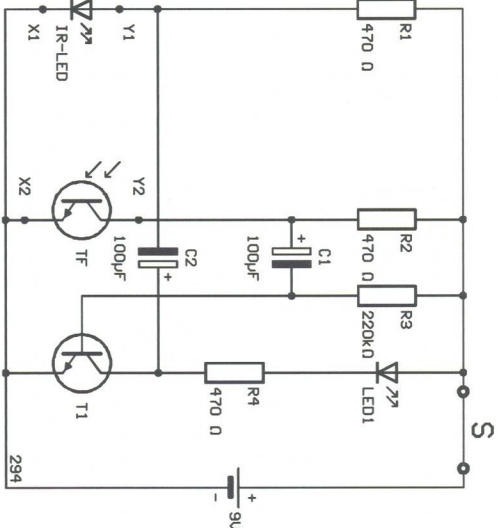


Bild 294. Rückkopplung über Infrarot: Multivibrator mit IR-Hilfe.

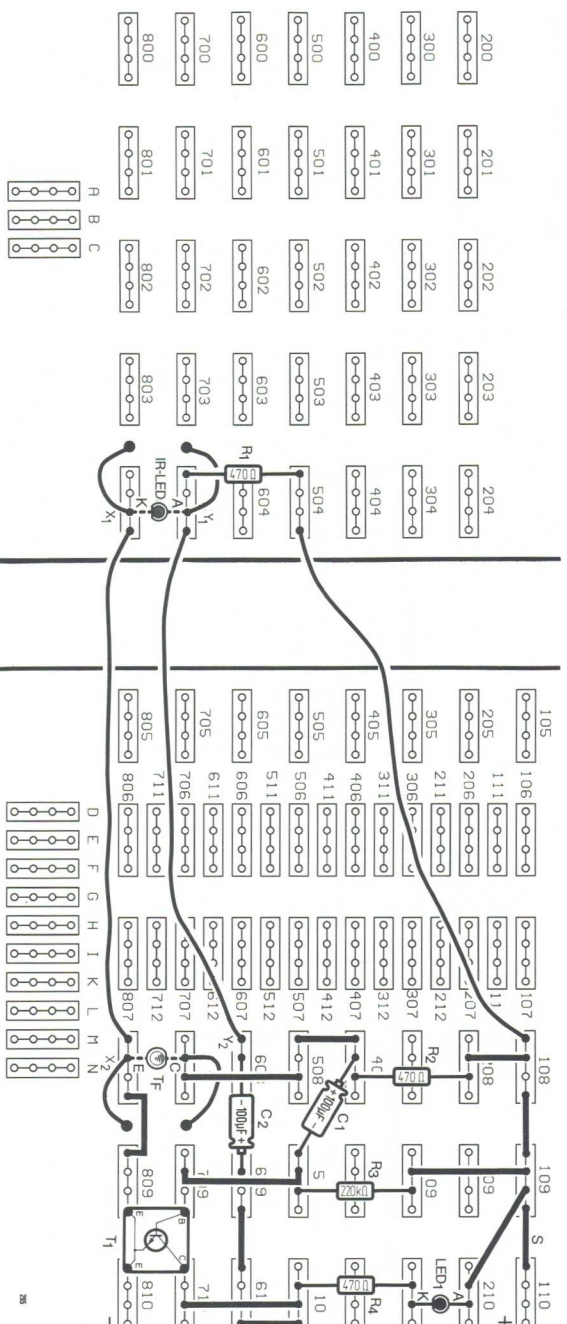


Bild 295. Aufbau zu Bild 294.

Das Prinzip der Kopplung zwischen IR-LED und Fototransistor (bei höheren Frequenzen Fotodiode) ist in der Bauelementefamilie der *Optokoppler* realisiert. Sie sind ideal für alle Fälle, in denen Informationen berührungslos bzw. ohne Verwendung elektrischer Leitungen übertragen werden müssen. Damit lösen sich viele Probleme fast wie von selbst.

555 im neuen Licht

Um den 555 kommt man auch in der Opto-Elektronik nicht herum. Das zeigen die folgenden Experimente.

210

Steckt den Versuch nach Bild 296 zusammen und beobachtet das Verhalten. Der 555 arbeitet hier als Schwellwertschalter. P2 wird zunächst ganz eingeschaltet (s an n). Leuchtet LED1, ist es im Zimmer zu dunkel. Ein wenig mehr Licht also bitte (z. B. Tischlampe anknippen): Jetzt wird von LED1 auf LED2 umgeschaltet. Nun TF zudecken (Hand, Pappe, schwarzes Tuch): LED1 leuchtet auf. Ein richtiger *Dämmerschalters* also. Wo würdet Ihr das Relais anschließen, damit es im Dunkeln eine Lampe anschaltet? Richtig – im oberen Zweig (Steckdosen 109 und 410). Und sollte es erst bei kleinerer Helligkeit einschalten, als wir es möchten? Klar – Widerstand von P2 verkleinern (s in Richtung h drehen). Und die Hysteresis? Die haben wir bereits beim Aufbau durch R1 am CTRL-Anschluß verkleinert. Wie eine solche 555-Schaltung insgesamt arbeitet, wurde ja im vorigen Abschnitt ausgiebig behandelt.

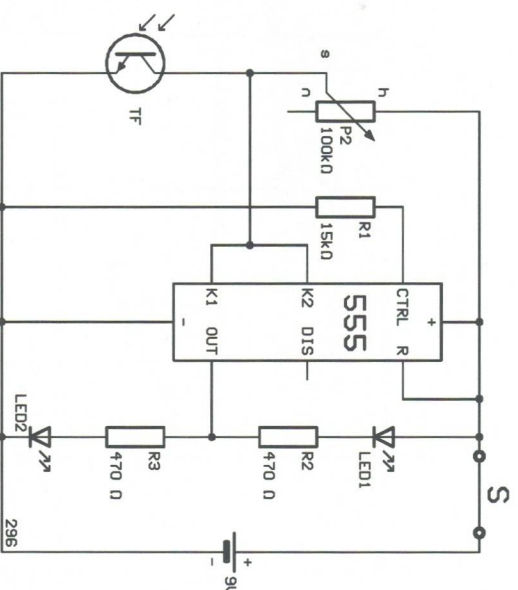


Bild 296. 555 im Zweilicht: Zustand je nach Helligkeit.

Zwei Dinge noch zur „Optik“. Zum einen – Glühlampen am Wechselspannungsnetz werden 100-mal je Sekunde ein- und ausgeschaltet. Das teils auch dem lichtabhängigen Kollektorstrom des Fototransistors mit. Solange die entstehende „Bumm“-Spannung jedoch kleiner ist als der Bereich zwischen

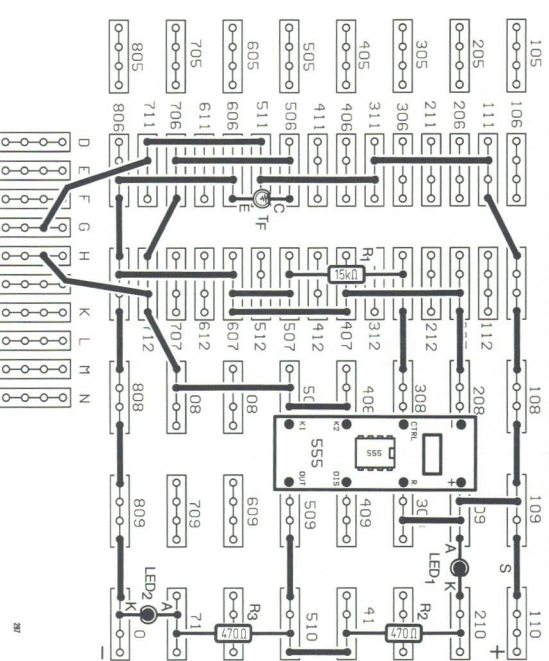


Bild 297. Aufbau zu Bild 296.

den Schwellen, bleibt es beim sauberen Schalten. Zum anderen – wer den Fototransistor dicht an eine starke Lichtquelle hält, sollte P2 nicht bis zum Anschlag h drehen. Es sei denn, man legt einen Schutzwiderstand von z. B. 470 Ω zwischen h und Plus.

211

Fotografieren ist heute ein Kinderspiel. Das liegt an Einrichtungen wie der nach Bild 298. Lichtempfindliches Filmmaterial reagiert bekanntlich auf Lichtmengen: je heller, um so schneller wird es schwarz im Negativ. Daher muß man die Belichtungszeit einstellen können. Das übernimmt eine Zeitsteuerung mit Fototransistor. Baut das Experiment auf und achtet auf LED2. Dort liegt in der Praxis der Elektromagnet für den Kameraverschluss.

Zunächst geschieht gar nichts. Mindestens den Auslöser müssen wir schon drücken – so automatisch ist die Automatik nun auch wieder nicht. Also Finger auf Ta1. LED2 leuchtet auf – der Verschuß ist geöffnet. LED1 wird mehr oder weniger schnell hell, dann gehen beide Leuchtdioden aus. Mehr oder weniger schnell – das ist eine Frage der Beleuchtung von TF. Probier es mit Abdunkeln: Nach dem Auslösen wird es sehr lange dauern, bis LED1 hell leuchtet und der Vorgang beendet ist. Das erfordert eine ruhige Hand an der Kamera. Dage-

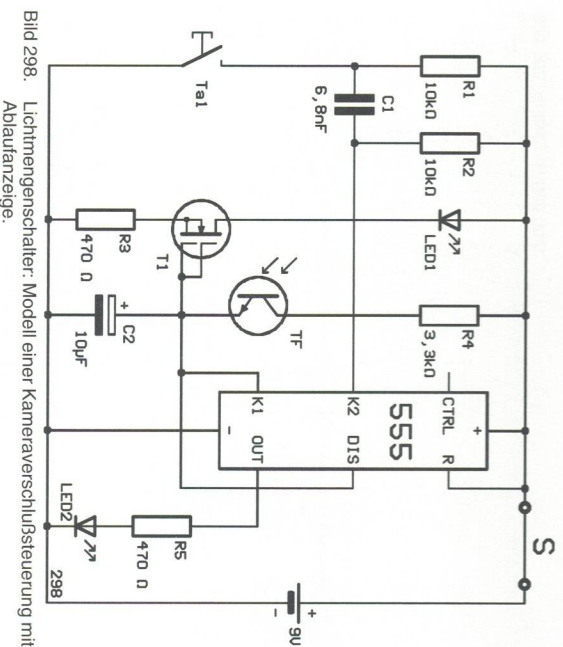


Bild 298. Lichtmengenwechsler: Modell einer Kameraerschlußsteuerung mit Ablaufanzeig.

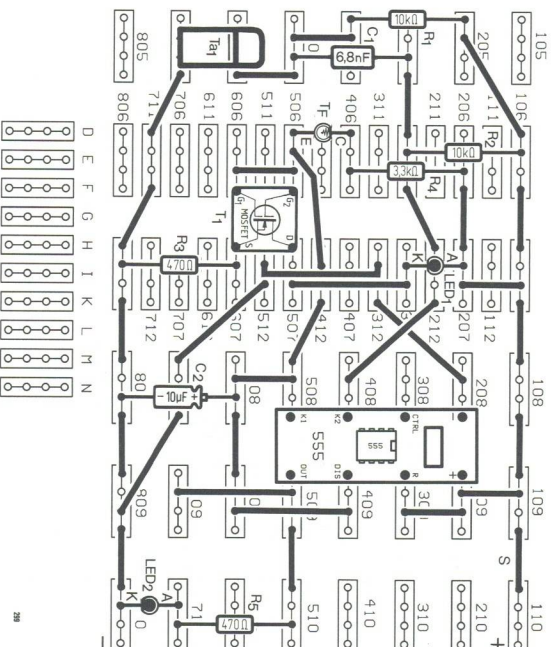


Bild 299. Aufbau zu Bild 298.

gen bei hellem Licht auf TF: Kaum ausgelöst, schon ist das Bild im Kasten. Klick.
Funktionsbeschreibung im Telegrammstil, da alles schon mal da war: K2 auf Plus, K1 auf Minus (C2 noch leer), also OUT und DIS auf Minus. Jetzt der „Dynastart“: K2 über C1 kurz an Minus, OUT geht auf Plus, DIS sperrt. C2 wird über R4 und TF je nach Helligkeit langsamer oder schneller geladen. Zunehmende Spannung öffnet T1, dessen hochomiger Eingang die Spannung an C2 nicht belastet (vernachlässigbarer Steuerstrom). LED1 zeigt mit wachsender Helligkeit, wie die steigende Spannung von C2 zunehmend T1 durchschaltet. Spannung an C2 erreicht 2/3 der Batteriespannung, OUT geht auf Minus, DIS ebenfalls, Schaltung kippt in den Ruhezustand.

212

Eine Lichtsteuerung nicht nur zum Spaß ist die nach Bild 300. Sachkundig, wie wir ja inzwischen sind, sehen wir sofort: Das muß ein Generator sein, und TF steuert die Schnelligkeit der Aufladung von C1. Setzt für ihn vorerst 6,8 nF ein und packt die Schaltung in ein dunkles Zimmer oder in einen Schrank. Am besten in den, an den nicht jeder heimlich ran soll. Alarmton bei Neugierde! Je heller, um so höher. Paßt auch gut in den Kühlschrank und kann wieder für Geistesbeschwörungen verwendet werden. Wie, brauchen wir wohl nicht mehr zu diskutieren. Es dürfte aber auch manche ernsthafte Anwendung für diesen lichtabhängigen „Tö-

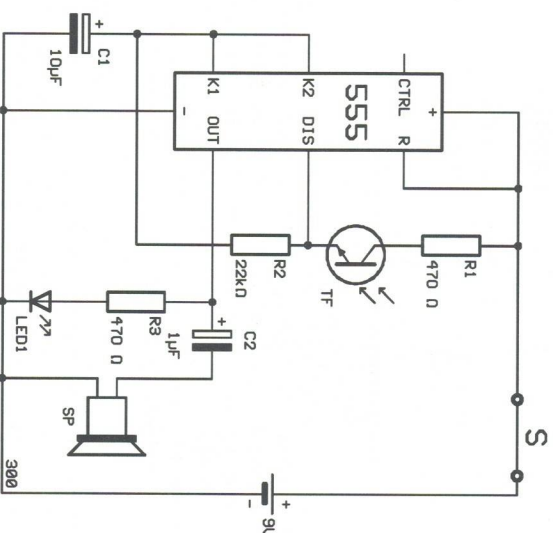


Bild 300. Für Spaß und Ernst: „Lichtvogel“, Schrankalarm, Lux-Meter, lichtgesteuerter Blinker.

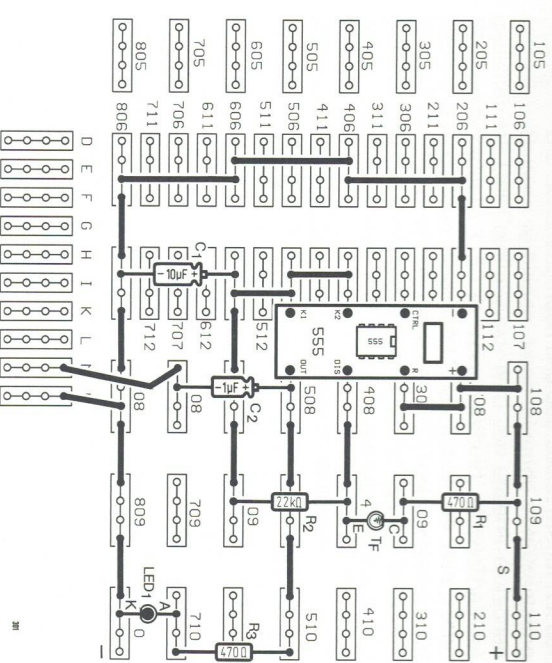


Bild 301. Aufbau zu Bild 300.

ner“ geben. Beispielsweise als *akustisches Lux-Meter*. Die Tonhöhe meldet unbestechlich jede Änderung: knarrendes Geräusch bis zum „Tackern“ – wenig Licht, hohes Pfeifen – sehr hell. Nur in diesem Bereich ist Vergrößern von C1 sinnvoll.

Setzt nun für C1 10 μF ein. Was im Lautsprecher nur mehr oder weniger schnell knackt, kommt besser als Blinkinformation von LED1. Es könnte eine Raumbeleuchtung überwachen: Blinken – alles o. k., lange Leucht- und kurze Dunkelzeiten – Teilausfall (Kronleuchter mit „dunklen Stellen“), Dauerlicht – totaler Blackout. Das Schöne daran: Die Überwachung über LED1 oder Lautsprecher funktioniert auch am Ende einer langen Leitung!

213

In der Wirkung mit dem letzten Experiment vergleichbar, werden diesmal die Schaltschwellen vom Licht gesteuert (Bild 302). Als 555-Profis sehen wir gleich: TF hell beleuchtet – Schwellen niedrig, also auch ihre Abstände zueinander, d. h. kürzere Zeiten, höhere Frequenz. Und umgekehrt.

Experimentierempfehlungen: Bei großer Helligkeit ist in Reihe zu TF ein Widerstand von 3,3 kΩ sinnvoll. Interessante Varianten bringt der Umtausch von R1 mit R2 bzw. (und) von C1 mit C2.

555 als Aktivposten

Richtig schon wird Opto-Elektronik, wenn man mit ihr „schalten und warten“ kann. Daran denken wir schon gar nicht mehr, daß wir damit unsere Heimelektronik seit langem fernzusteuern gewohnt sind. Bisher wurde es höchstens interessant, wenn die Batterie fällig war. Jetzt steigen wir auch hier mitten hinein.

214

Wer nicht nur trivial eine Taschenlampe knipsen oder zumindest eine IR-LED ein- und ausschalten möchte, baut den IR-Sender nach Bild 304 auf. Allerdings kann man ihn für sich allein weder hören noch sehen. Und er zieht ganz schön Strom. Für Experimente ist also das KOS-MOS Netzgerät am Platze. Für Mobilzwecke sollte man einen Taster in der Batterieleitung nicht vergessen.

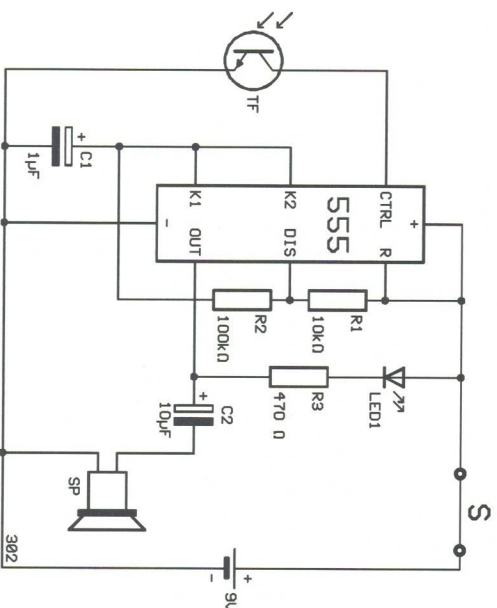


Bild 302. Licht läßt's knattern: Helligkeitsindikator auch für Scherze.

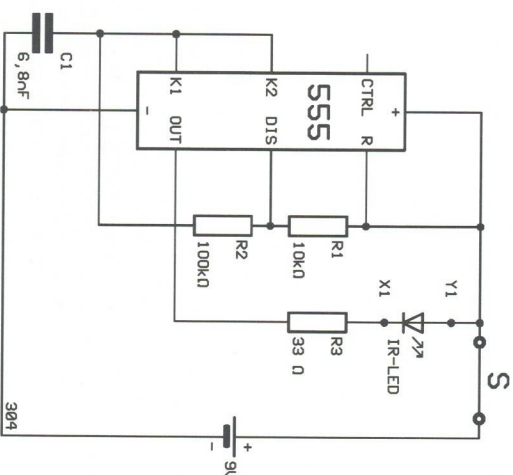


Bild 304. Liefert IR-Lichtimpulse: IR-Strahler mit Tonfrequenz.

215

Der Nachweis für die Aktivitäten unseres Senders nach Bild 304 gelingt mit der folgenden Schaltung (Bild 306). Befindet sich der Sender mit seiner IR-LED in der Nähe des Fototransistors, ist der Ton von etwa 1 kHz gut zu hören; tonfrequente Signale anderer IR-Fernsteuerender (z.B. Fernbedienungen für Radio- oder Fernsehgeräte) auch. Die Reichweite wird nicht nur durch die Senderleistung begrenzt, auch das Licht von stärkeren Glühlampen erweist sich als Störer. Es bewirkt, daß es brummt. Sonnenlicht vermag den Fototransistor zu sättigen. Dann geht nichts mehr. In gewissen Grenzen kommt man diesen Effekten mit Spezialschaltungen bei.

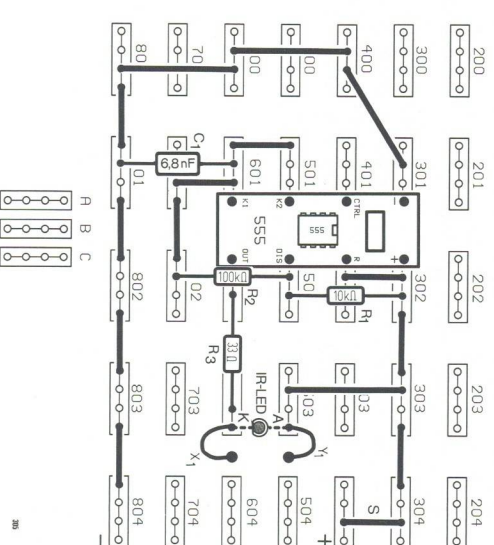


Bild 305. Aufbau zu Bild 304.

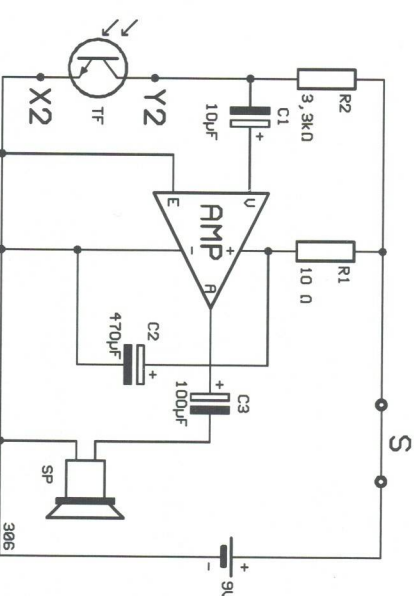


Bild 306. Ohr für Licht: Macht Modulation von IR-Sendern hörbar.

Bild 303. Aufbau zu Bild 302.

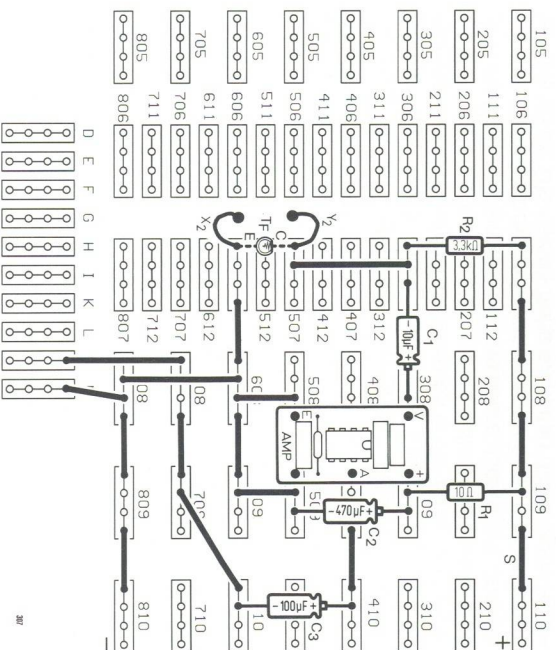


Bild 307. Aufbau zu Bild 306.

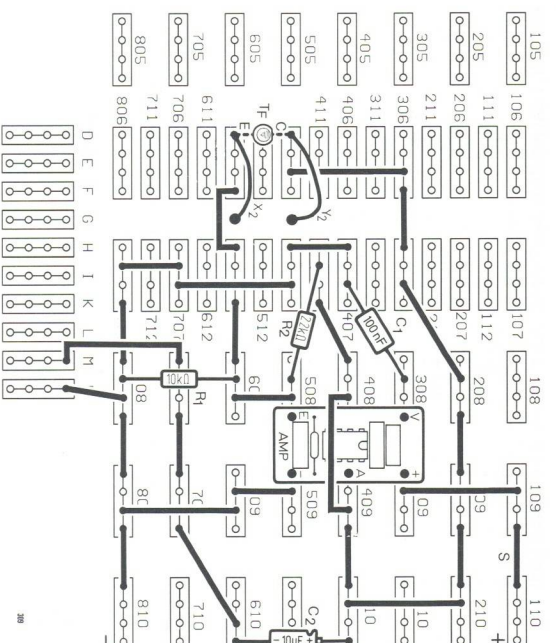


Bild 309. Aufbau zu Bild 308.

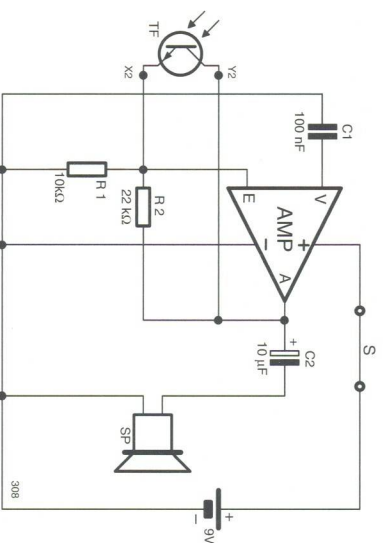


Bild 308. Unsichtbare Schranke: Gibt Alarm, wenn IR-Strahl unterbrochen wird, mit 680 k Ω parallel zu TF auch bei Dunkelheit.

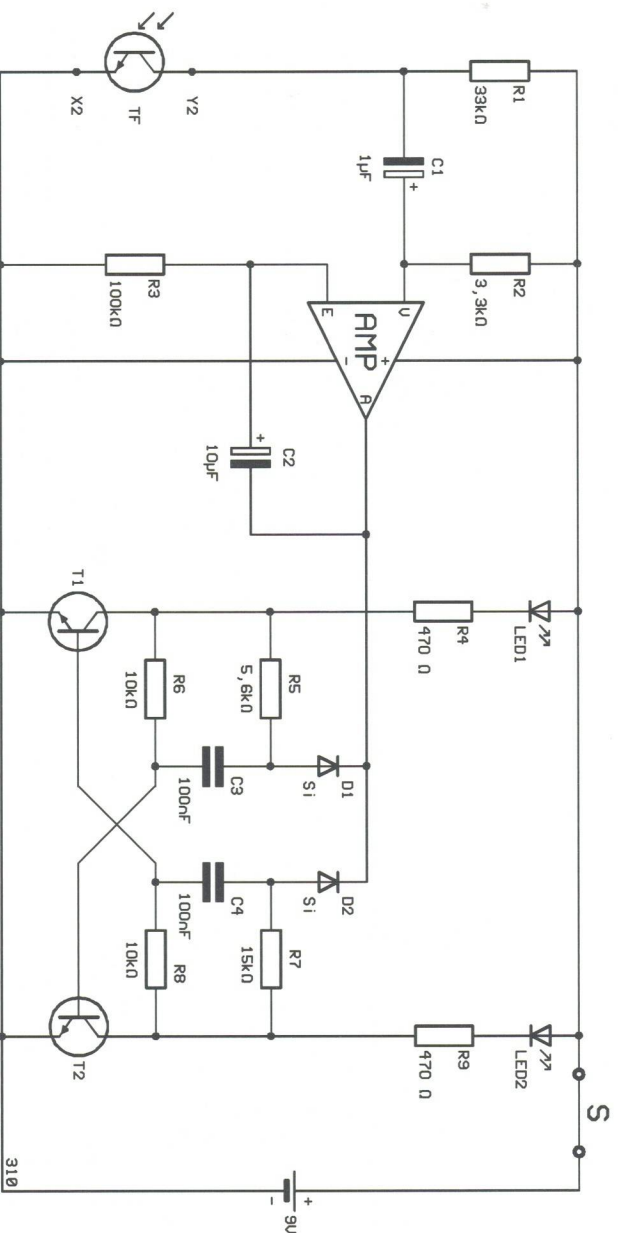


Bild 310. Gutes Fernschaltprinzip: Ein und aus über IR-Strahl.

216

Die Schaltung nach Bild 308 solltet Ihr nur mit der Batterie verbinden, wenn folgende Voraussetzung gesichert ist: Der Fototransistor wird von unserer einfachen IR-Dauerlichtquelle (150 Ω Vorwiderstand, Netzteilerbetrieb) ständig ausreichend beleuchtet. Das sehen wir zwar nicht, aber wir werden es hören, wenn der Strahl unterbrochen wird! Schiebt also mal kurz das berühmte Stückchen Pappe dazwischen. Da wird es laut, daß es kaum auszuhalten ist.

Ein und Aus mit Infrarot

Als IR-Sender für das folgende Experiment können unterschiedliche Varianten verwendet werden, entweder der 555 als Generator, oder einfach Gleichstrom über 150 Ω Vorwiderstand für die IR-LED (Bild 288).

217

Wir bauen für die Empfängerseite des Versuches die Schaltung nach Bild 310 auf. Sie besteht aus zwei alten Bekannten: dem AMP in Monoflop-Beschaltung (Abschnitt 17) und einem dynamischen Flip-Flop aus der Transistor-Experimentierserie. Dynamisch wird auch das AMP-Monoflop gesteuert, aber diesmal von Licht. Es genügt ein kurzer Blitz, der den Fototransistor treffen muß. Starke Fremdlichtquellen sind dabei zu meiden. Betrachten wir die Sache als Experiment ohne den Ehrgeiz, damit größere Strecken überbrücken zu wollen. IR-LED des Senders und Fototransistor des Empfängers sollten sich nahe gegenüber-

stehen. Nach Einschalten der Empfängerbatterie beobachten wir die beiden Leuchtdioden und betätigen Ta1 im Sender. Wir stellen fest, daß bei jedem Tastendruck die gerade leuchtende LED aus- und die andere angeht. Ein Wechselschalter also, von einem einzigen Taster über IR-Strahl betätigt. Das Prinzip ist damit sehr gut für Fernsteuerungen geeignet.

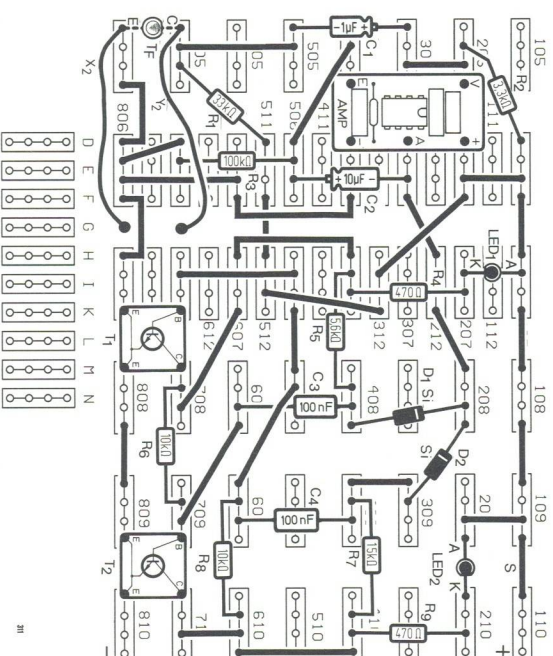


Bild 311. Aufbau zu Bild 310.

Hinweis: Wenn die gerade nicht aktive LED dennoch etwas mitleuchten sollte, dann ist sie einfach sehr empfindlich. Es handelt sich dabei nämlich nicht um den Kollektorstrom des eigenen, sondern um den Basisstrom des anderen Transistors. Bei Bedarf könnt Ihr das gezielt ändern: R6 und R8 von 10 k Ω auf 100 k Ω erhöhen, dafür C3 und C4 je 6,8 nF statt 100 nF. Oder (und) zu den Leuchtdioden wird ein Widerstand von 1 k Ω bis 1,5 k Ω parallelgelegt.

22. Drähte für Licht

Die Telekom wirbt mit „fibre to the home“ – Glasfaser bis ins Wohnzimmer. Kupferdraht ade! Keine elektromagnetischen Störungen mehr. Durch Totalreflexion in der Faser gebündeltes Licht, im Infraroten modifiziert, eine Fülle von Dienstleistungen und Programmen. Der unscheinbare „Lichtdraht“ unseres Experimentiersystems stellt den Anschluß her – zu erproben, wie das so ist. Die beiden Pulte enthalten die nötigen Teile –

Halterungen für (IR-)LED und Fototransistor sowie ein Stück Lichtwellenleiter (LWL) aus Kunststoff und Halter dafür.

218

Wir nehmen diesen LWL zwischen Daumen und Zeigefinger und betrachten eines der Enden. Das andere bewegen wir nach verschiedenen Seiten. Wir sehen: Die Schnittfläche leuchtet, wenn man das andere Ende auf eine Lichtquelle richtet.

Wir halten dieses Ende gegen eine Glühlampe (Tisch- oder auch Taschenlampe) und bewegen das leuchtende Ende nach allen Seiten: Dieses Licht geht sogar „um die Ecke“! Also lassen sich LWL fast wie elektrische Drähte verlegen! Wie kommt das? An der Schnittfläche tritt das Licht in den LWL ein und wandert in ihm entlang. Da sein Material dichter als Luft ist, bleibt das Licht auch drin, wenn sich der LWL in gewissen Grenzen krümmt. Das bewirkt die Tatsache, daß Licht an der Grenzfläche von dichtem zu dünnerem „Medium“ zum dichten hin abgelenkt wird. Unterhalb eines kritischen Winkels bleibt es also drin. Das nennt man Totalreflexion. Starke Krümmungen allerdings sind wie Löcher in einer Mauer: hier tritt Licht aus. Also nie mit Gewalt biegen oder gar knicken!

219

Leitet der LWL auch unsichtbares Infrarot-(IR-) Licht? Wir stecken die IR-LED und den Fototransistor TF nebeneinander in die Halterung. Diese montieren wir zusammen mit dem LWL-Halter seitlich im Pultgehäuse. Beschaltet wird nach Bild 312. In die Halterlöcher führen wir die Enden des LWL ein, so daß sie auf den Fototransistor bzw. IR-LED aufstoßen. Nun ein Druck auf den Taster: Ist alles richtig montiert, sollte das Meßinstrument ausschlagen. Zeigt es auch vorher schon etwas an, gelangt noch zu viel Fremdlicht zu TF. Direkt unter einer Lampe oder im Sonnenlicht sollte man darum nicht arbeiten. Bei Bedarf läßt sich der Ausschlag vergrößern: R1 bis 150 Ω herab ändern, wegen der dann größeren Belastung für die IR-LED Ta1 nur kurz drücken. Der Versuch zeigt: Der LWL transportiert auch IR-Licht. Und auf Wunsch wieder um die Ecke.

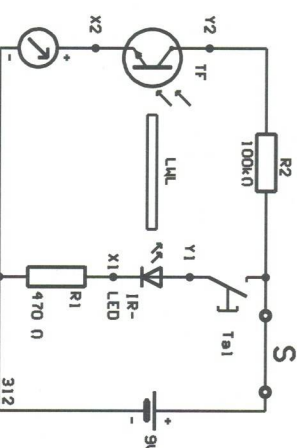


Bild 312. Licht am Ende des Tunnels: Auch wenn's um die Ecke geht!

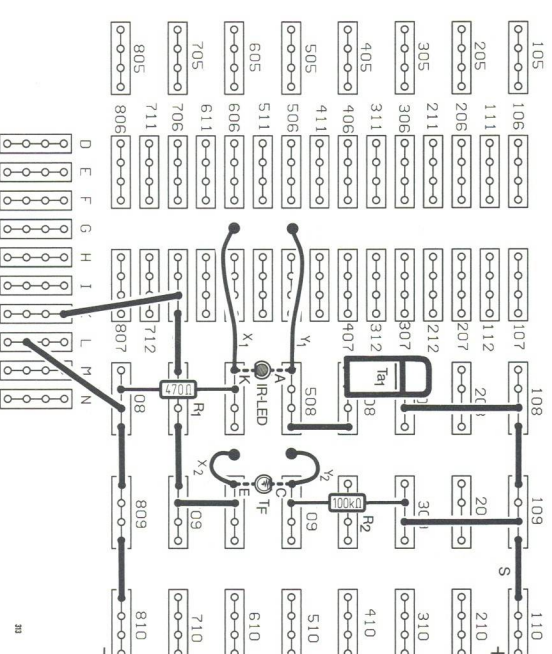


Bild 313. Aufbau zu Bild 312.

220

Wir gehen ganz sicher und entfernen den LWL aus der Halterung beim TF. Wird nun Ta1 betätigt, darf das keine Wirkung zeigen. Führen wir das LWL-Ende jedoch bei festgehaltenem Taster wieder in die IR-LED-Seite ein, muß das Instrument ausschlagen.

Der goldene Schnitt

Wetten, daß sich mehr als eben gemessen aus dem LWL herausholen läßt?

221

Mit Rasierklinge oder scharfem Teppichmesser (nur für Erwachsene!) schneiden wir beide LWL-Enden schön glatt und rechtwinklig ab. Dann stecken wir beide Enden wieder in die Halter und messen erneut wie eben. Jetzt dürfte es fast Vollausschlag geben, auch noch mit 470 Ω für R1.

222

Durch Überbrücken von TF mit einer Drahtbrücke stellen wir fest: Der Ausschlag wird kaum noch größer – für den Strom des Meßinstruments wird der Transistor also bereits voll durchgeschaltet! Wir folgern: Die Übergangsstellen zwischen Licht und Elektronik sind entscheidend für den Wirkungsgrad, also das Verhältnis von übertragener zu hineingesteckter Energie. Glatte Flächen, in die das

Licht senkrecht eintritt, halten die Strahlen schön zusammen. Unsaubere, schräge Schnittflächen nehmen eingangsseitig weniger auf und führen zu ungünstigen Eintritts- und Austrittswinkeln. Durch Schleifen und Polieren lassen sich die Ergebnisse weiter verbessern.

223 Wir ziehen den LWL aus dem Halter auf der IR-LED-Seite. Dann richten wir dieses Ende auf eine Glühlampe (Tischlampe o. ä.). Aber nicht zu nahe gehen, der Ausschlag ist beträchtlich!

224 Wir stecken das LWL-Ende durch ein Stück Papier und bündeln das Licht einer weiter entfernten Lichtquelle mit einer Lupe auf die LWL-Eintrittsfläche. Das Papier hilft beim Auffinden des Brennpunktes. Auch diesmal gibt es einen deutlichen Ausschlag.

Zwei Dinge lehren uns die beiden Experimente. Zum einen: Das im Spektrum für den Fototransistor TF günstige Glühlampenlicht (Rotanteil) wird zu TF am besten dann transportiert, wenn die Stirnfläche des LWL genau auf die Lampe zeigt. Zum anderen: Sammelt man Licht mit einer Lupe auf der Eintrittsfläche, bilden Luft und LWL je einen Teil der gesamten Lichtübertragungslinie. Übrigens sind die Gehäuse unserer „Lichtbauelemente“ ebenfalls linsenförmig ausgebildet. Sie nehmen dadurch bevorzugt senkrecht einfallendes Licht auf bzw. senden es in diesem Bereich aus.

225 Bevor es an die folgenden attraktiven Versuche geht, erfreuen wir uns mit den nun glatten Flächen ein wenig der Wirkungen: Rote, grüne und gelbe LED werden über je 470 Ω gleichzeitig an 9 V gelegt. Wir betrachten das eine Ende, während wir das andere über die Leuchtdioden führen. Die saubere Schnittfläche leuchtet kräftig in der jeweiligen Farbe. Das ist etwas für Modelbauer, wenn in kleinen Modellen Lampen maßstabsgerecht leuchten sollen! Abschließend halten wir das LWL-Ende an eine Glühlampe: Das andere Ende leuchtet hell auf!

Kraft durch Licht
Unser LWL lässt sich in vielen Experimenten des Abschnitts Optoelektronik einsetzen. Power, über Lichttrakt gesteuert. Etwa ein Relais zu schalten ist da kein Problem.

226 Zwischen den Triggerschwellen des 555 in Bild 314 kann mit dem LWL-Stückchen hin- und hergeschaltet werden. Dazu bringen wir sein Ende in die Nähe des Fototransistors bzw. entfernen es wieder. Damit es nicht auf „Tuchfühlung“ ankommt, speisen wir die IR-LED mit größerem Strom. Um sie dadurch nicht zu überlasten, drücken wir immer nur (kurz) den Taster, wenn der LWL auf den Fototran-

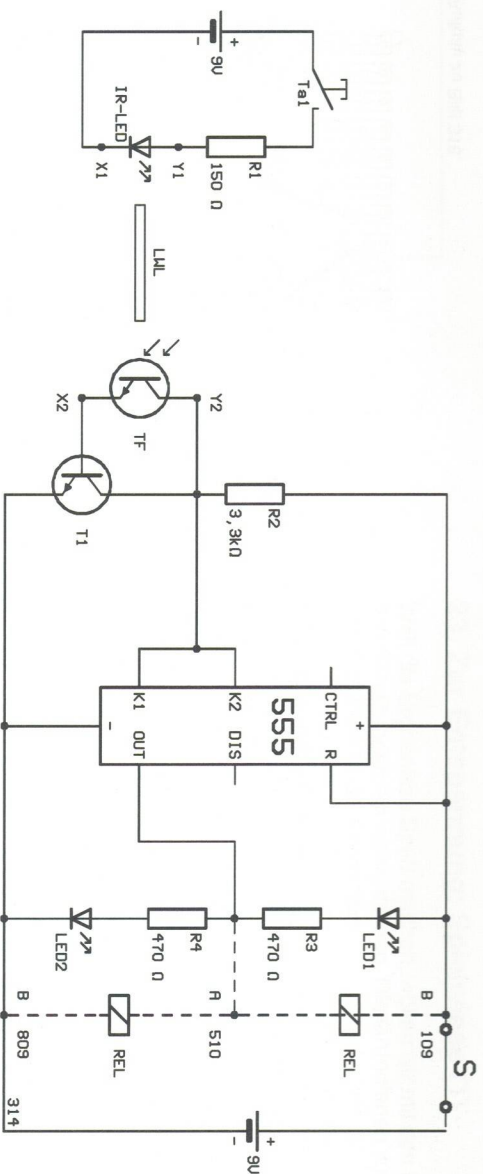


Bild 314. Kraft durch Licht: Relais über LWL geschaltet.

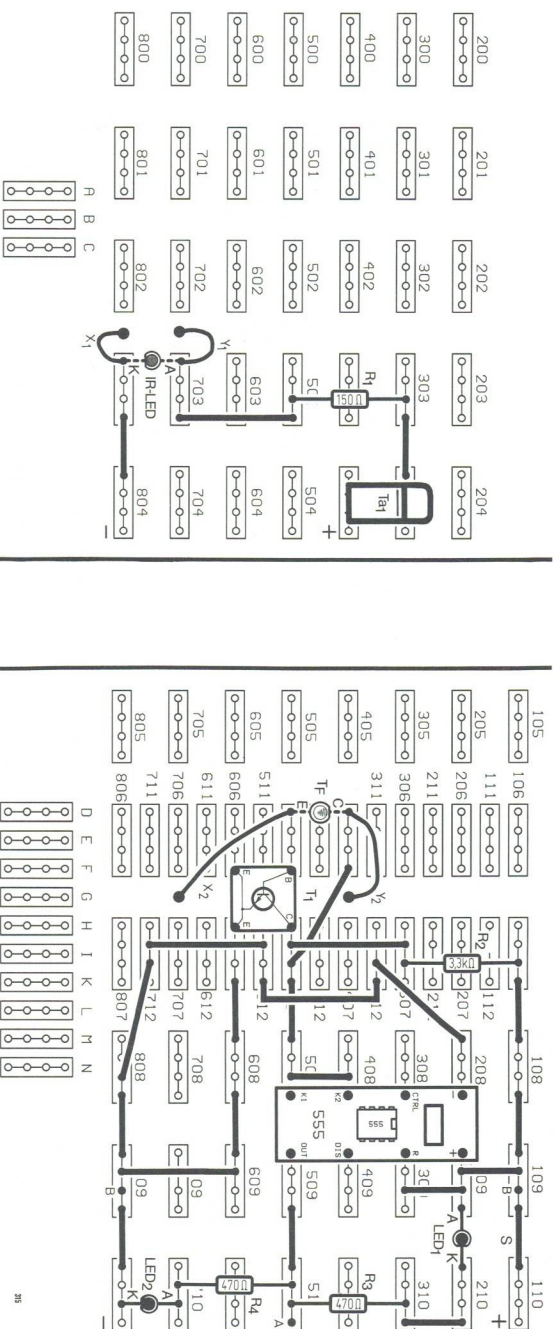


Bild 315. Aufbau zu Bild 314.

sistor zeigt. Eingangsseitig bringt die Darlington-Verknüpfung aus TF und T1 die erforderliche Empfindlichkeit „per Distanz“. Nehmt das LWL-Ende zwischen Daumen und Zeigefinger und führt es an der Eintrittsöffnung des TF bei gedrücktem

Taster vorbei. Beobachtet die Reaktion. Zusätzlich kann ein KOSMOS Netzschaltgerät X wahlweise zwischen OUT (510) und Plus (109) oder Minus (809) angeschlossen werden.

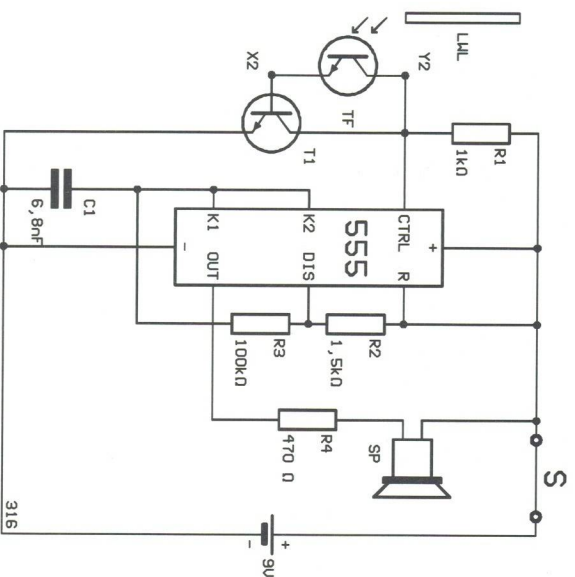


Bild 316. Wirkung im Vorübergehen: Tonhöhe über LWL gesteuert.

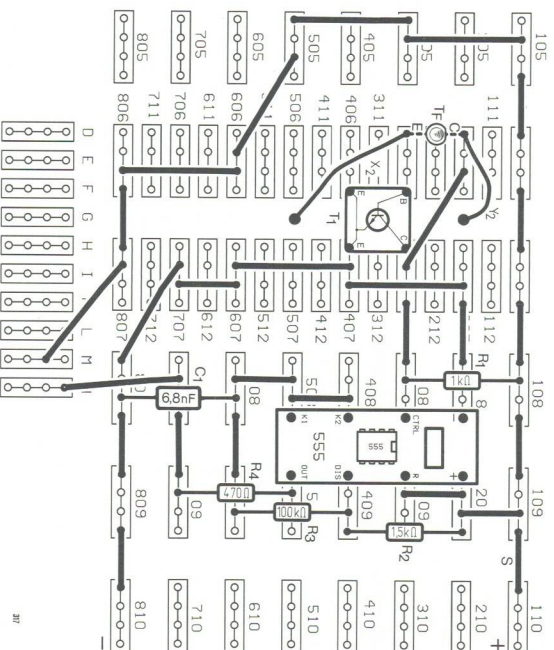


Bild 317. Aufbau zu Bild 316.

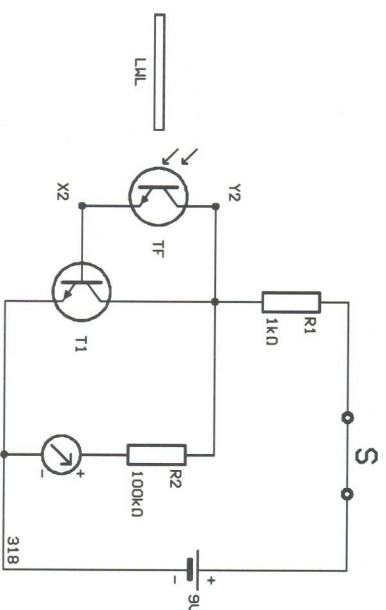


Bild 318. LWL auf dem Prüfstand: Änderungen beim Biegen gemessen.

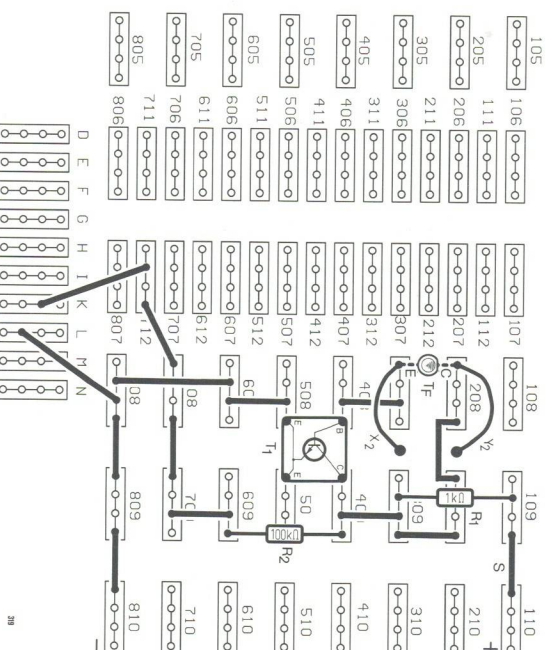


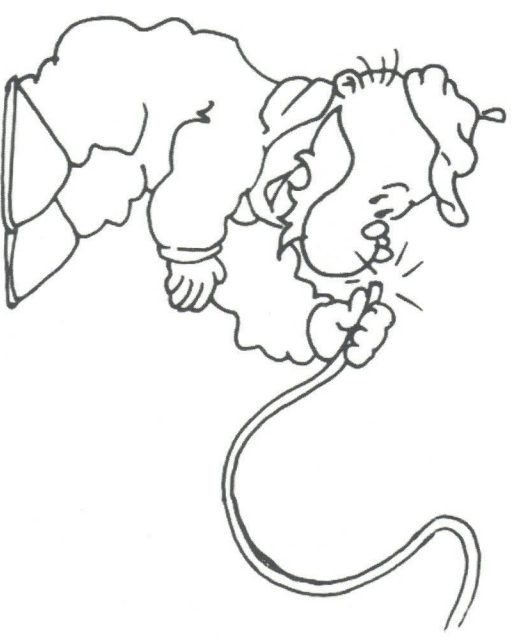
Bild 319. Aufbau zu Bild 318.

228

Mit dem Experiment nach Bild 318 kann man die LWL-Bewegungsspiele „objektivieren“. Das Meßinstrument zeigt jede Änderung an. Mögliche Wirkungen lassen sich so besser voraussagen. Bei all diesen Tests vermeiden man Fremdlicht – es stört nur und fälscht die Ergebnisse.

227

Nochmals mit dem 555 testen wir LWL-Wirkungen anderer Art. Der Tongenerator nach Bild 316 wird über den CTRL-Anschluß gesteuert. Aus dem 555-Abschnitt ist bekannt, daß sich dort die Schwellspannungen verändern lassen. Diesmal tut das unser LWL – entweder im „Vorbeistreichen“ oder auf TF aufgesetzt und durch (vorsichtig) stärkeres Biegen in seiner Dämpfung verändert. Laßt es jaulen!



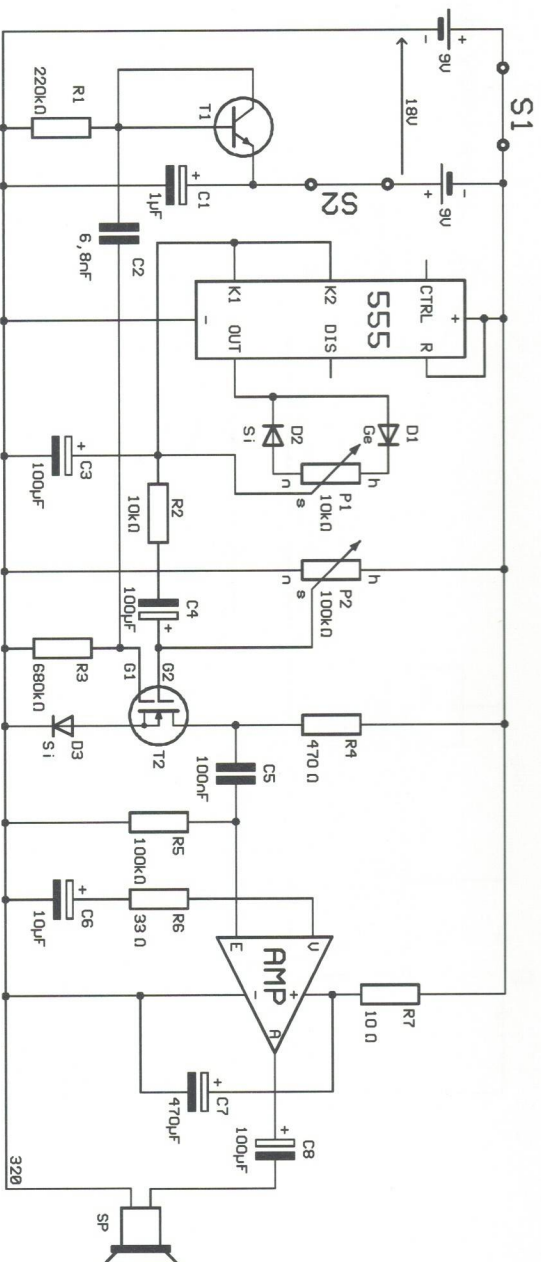


Bild 320. 555 macht Dampf: Geräusche wie bei der Kleinbahn.

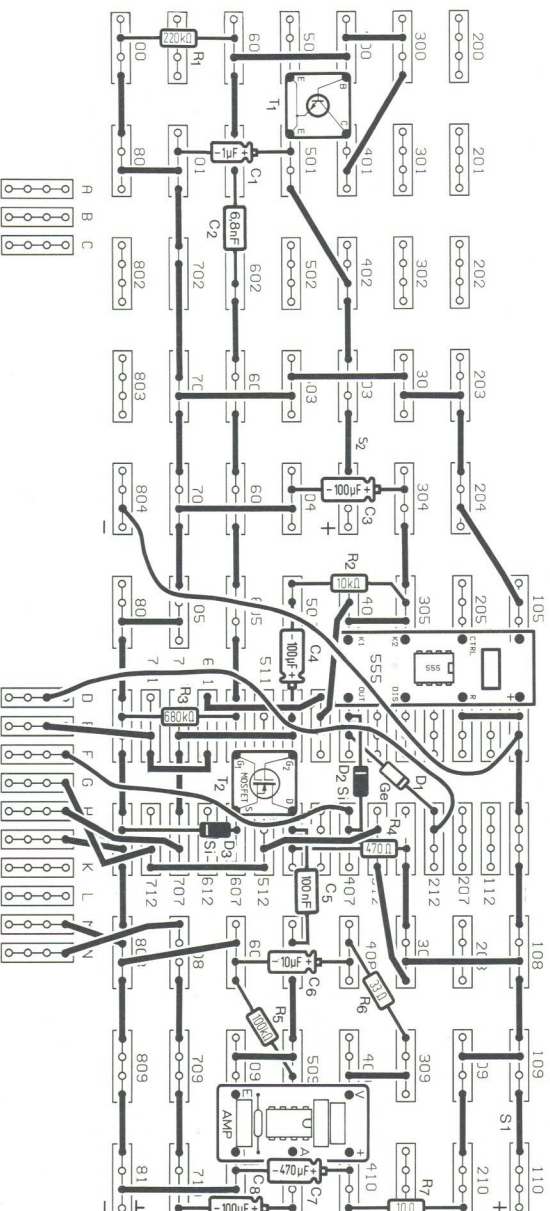


Bild 321. Aufbau zu Bild 320

23. Zur Entspannung: Spielwiese (1)

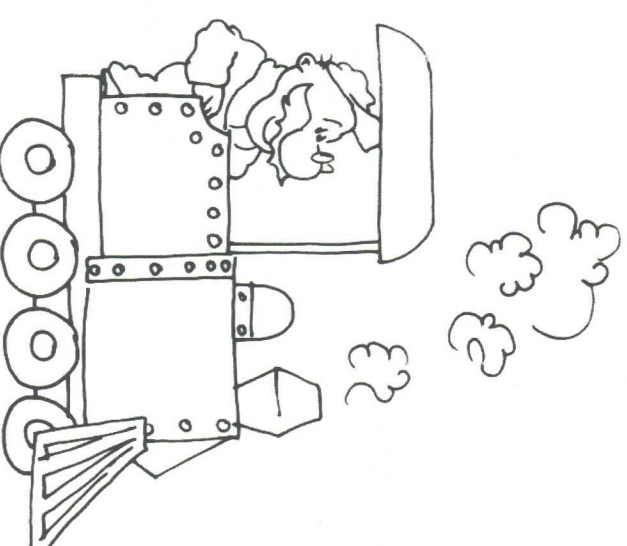
Weil die Ergebnisse Spaß machen, wollen wir mit den folgenden Schaltungen ein wenig spielen. Die Grundlagen zum Verständnis habt ihr ja inzwischen.

Nostalgie auf Schienen

Die Modellbahnanlage ist einer der letzten Orte, wo die „guten alten“ Dampfloks fahren. Leider schnurrt auch da nur ein Elektromotor. Dem läßt sich abhelfen.

229

Mit der Schaltung nach Bild 320 kommt man dem Vorbild nahe. Dreht an den Potis und erlebt die Vielfalt der Geräusche! Die Basis-Emitter-Strecke von T1 wird mit höherer als der dafür gedachten Sperrspannung betrieben. Dadurch bricht sie laufend durch, wobei R1 die Ströme auf ungefährliche Werte begrenzt. Das gibt ein schnelles Rauschen. Diese Rauschspannung wird über G1 von T2 dem AMP zugeführt und über SP als Schall abgestrahlt. Parallel dazu erhält G2 die an C3 auftretende Lade-Entladespannung des 555. Er schwingt als astabiler Multivibrator etwa im Sekundenrhythmus. Viel Spaß!



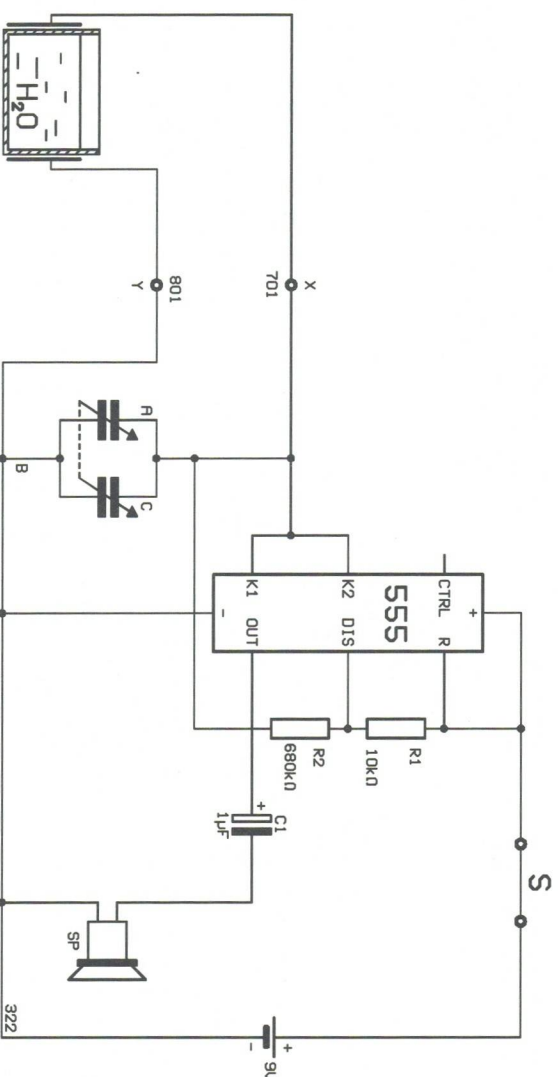


Bild 322. Auch eine „Wassermusik“: Je voller, um so tiefer der Ton.

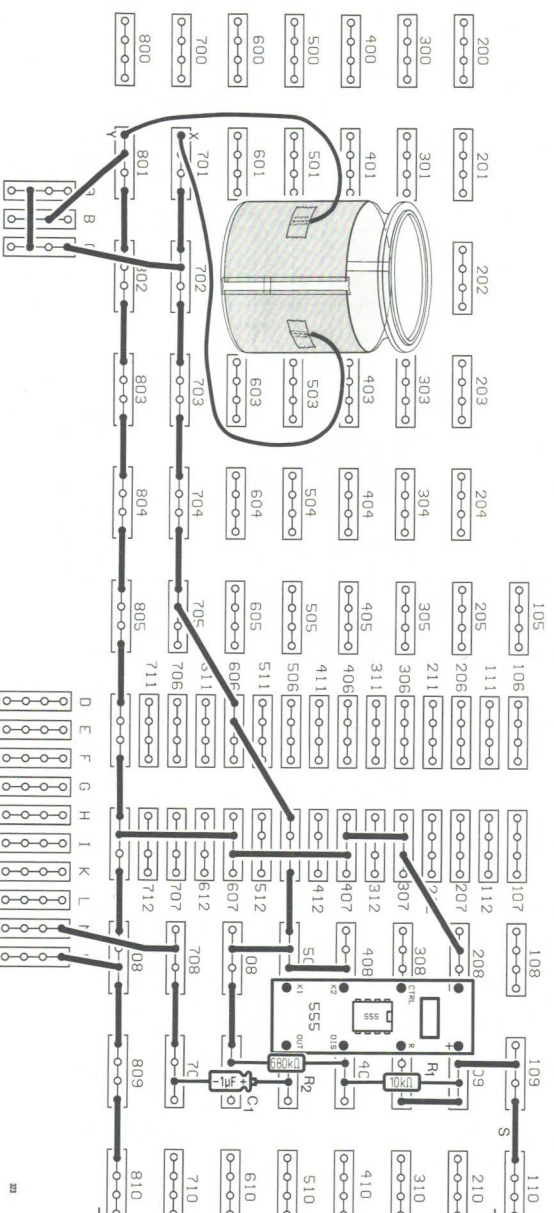


Bild 323. Aufbau zu Bild 322.

Das Maß ist voll!

Noch mit wenigen hundert Pikofarad arbeitet der 555 als astabiler Multivibrator. Da sind dann schon Änderungen im Pikofaradbereich in der Tonhöhe erkennbar.

230

Die Probe darauf ist etwas Praktisches: ein kapazitiver Füllstandsmelder. Die Schaltung nach Bild 322 selbst macht wenig Mühe. Dafür brauchen wir noch ein Einwegglas und etwas Alufolie. Diese wird jeweils halbschief außen mit Klebestreifen am Glas befestigt. Darauf bringen wir die blanken Enden von zwei Zuleitungsdrähten mit Klebestreifen an. Deren Enden werden mit dem Schaltungseingang (X – Y) verbunden. Zu hören ist nun bereits ein hoher Ton. Ihr könnt ihn in der Frequenz mit dem Drehko verändern. Und nun gießt langsam Wasser ins Glas! Je voller es wird, um so tiefer der Ton. Für Insider: Der von Alufolie, Glas und Luft gebildete Kondensator bringt es leer nur auf wenige müde Pikofarad. Durch die Wasserauffüllung kommt man leicht auf mehr als 200 pF und damit in den Kapazitätsbereich des voll eingedrehten Drehkos mit beiden „Paketen“ parallelgeschaltet.

231

Etwas zum Spielen ist auch die Schaltung nach Bild 324. Einschalten und langsam am Poti zwischen Maximum und Minimum drehen heißt es diesmal. Es piepst aus beiden Schallwandlern. Doch hört genauer hin: Da ist beim Durchdrehen ein kleiner Bereich, in dem die Frequenz des 555-Generators der des AMP-Generators nahekommt. Ein Gefühl wie Ohrenzuhalten und periodisch Freigeben ist das. Man nennt den Effekt eine *Schwebung*. Da fast von gleicher Frequenz, verstärken oder schwächen sich die Schallwellen beider Quellen im Ohrbereich. Je frischer die Batterie, um so weicher klingt es. Man kann auch den 470-μF-Kondensator parallel zur Batterie an Plus und Minus anschließen. Überzeugt euch: Ohne diesen Elko und mit 10 Ω in der Plusleitung zwischen Batterie und Schaltung (z. B. anstelle der Brücke S) gibts ein ziemlich hartes „Klingeln“ und andere verrückte Effekte. Beide Generatoren sind jetzt nämlich über den künstlich erhöhten Innenwiderstand der Batterie gekoppelt und beeinflussen gegenseitig ihre Umschaltpunkte. Einer „zieht“ den anderen mit. Beim Durchdrehen wird sich die Frequenz an einigen Stellen plötzlich ändern. Man spricht da auch von *Synchronisation* – der Stärkere sagt dem Schwächeren, wann er umzuschalten hat.

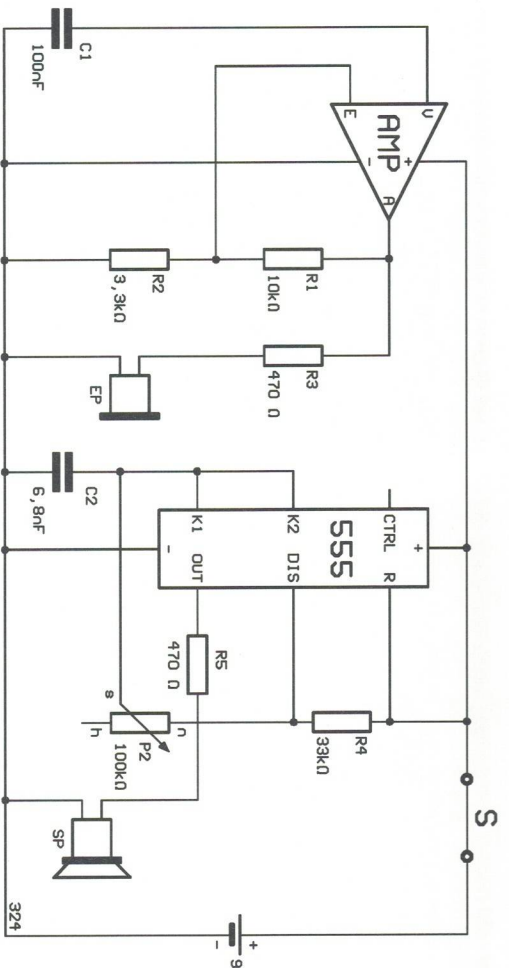
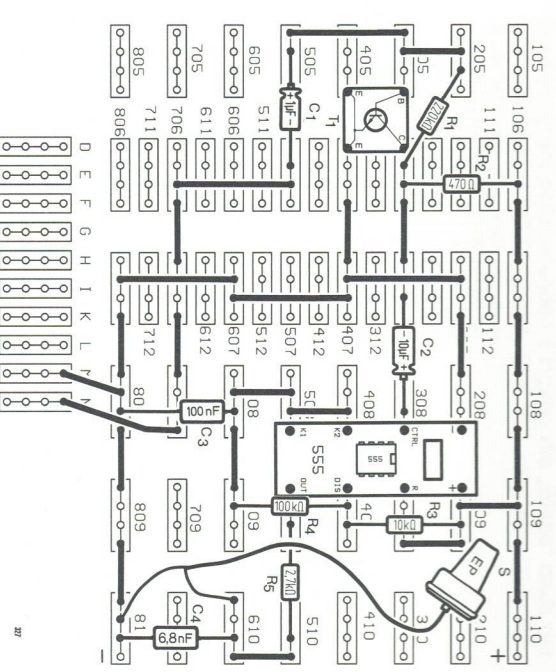


Bild 324. Wenn zwei sich (fast) gleichen: Schwebungen im Ohr.



die kleine Spannung von SP beim Auftreffen von Schall wirken kann. Die Wirkung besteht im Verschieben der Komparator-schwellen im 555. Im Hörer klingt das ziemlich drollig. Er gibt zum einen die Grundfrequenz des 555-Multivibrators wieder (sie liegt im Hörbereich). Außerdem reagiert seine Induktivität als frequenzabhängiger Widerstand auch auf die Änderung

dieser Frequenz durch die Modulation vom Mikrofon her. Sprechen oder singen wir in SP hinein! Als Reaktion jault es im Hörer ganz schön auf. Der relativ hohe Vorwiderstand vor EP

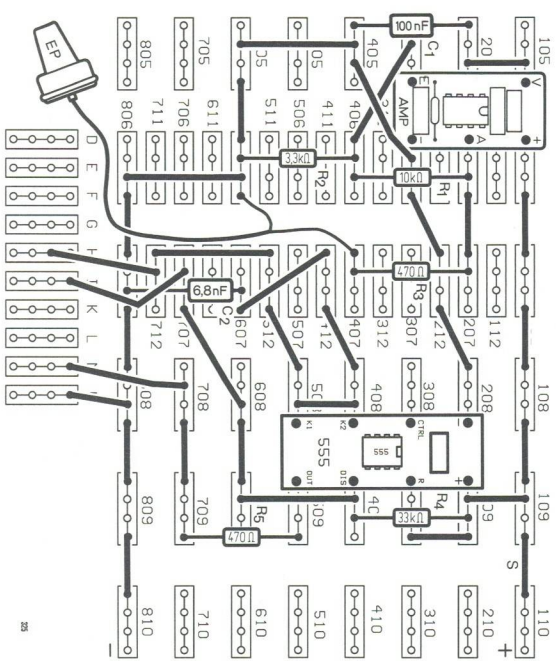


Bild 325. Aufbau zu Bild 324.

232

Das Prinzip der *Frequenzmodulation* stand beim folgenden Spielwiesensexperiment Pate. Die Schaltung nach Bild 326 sollte einfach aus Freude am Spaß gebaut und erprobt werden. T1 liefert die nötige Verstärkung, damit

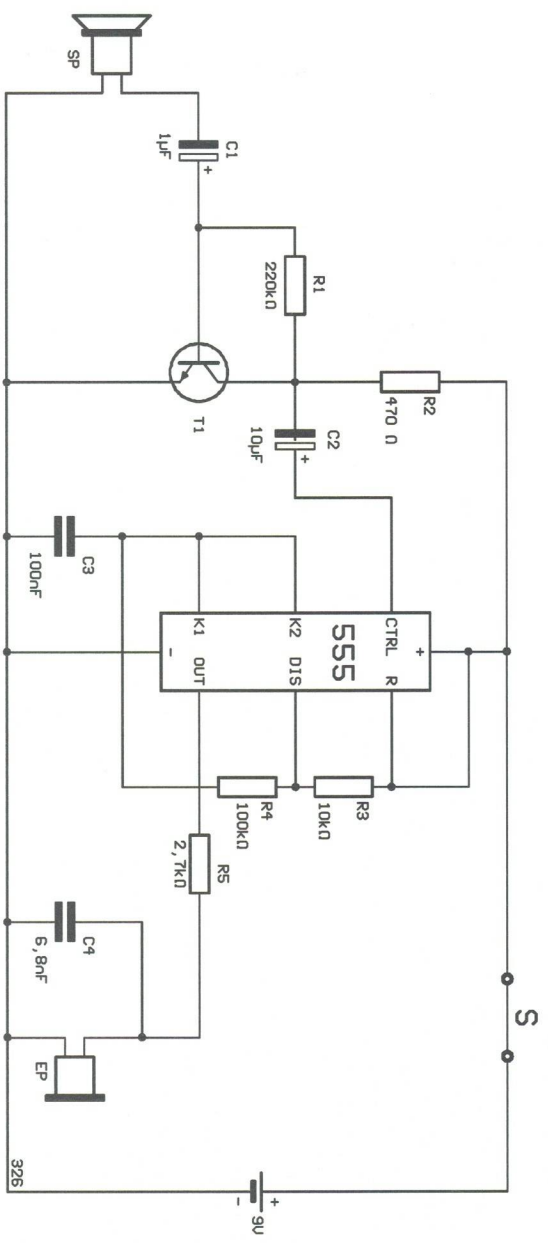


Bild 326. Die Stimme im Ton: Unkonventionelle Frequenzmodulation.

schützt etwas vor Hörschäden. Lange kann man sich das ohnehin nicht anhören. Für Scherzboide zur Umweltbeschallung: AMP dahinterschalten und eine Lautsprecherbox; Signal am Hörer abgreifen (der muß – prinzipbedingt – bleiben).

24. Operationsbasis OP

Bevor es schnelle *Digitalrechner* gab (unsere heutigen Computer), waren *Analogrechner* wichtige Hilfsmittel der Wissenschaft zum Berechnen von Vorgängen in Natur und Technik. Die erforderlichen mathematischen Operationen, wie Addieren, Subtrahieren usw., wurden mit Verstärkern realisiert. Sie mußten hohen Ansprüchen an Verstärkung und Stabilität genügen, auch bei Temperaturänderungen. Mit Einzelbauelementen war ihre Realisierung nicht eben leicht. Integrierte *Operationsverstärker* (OP) brachten endlich die in großen Mengen herstellbare, preisgünstige und dabei auch qualitativ ausgezeichnete Lösung. Aber da war die große Zeit der Analogrechner schon vorbei. Doch das OP-Prinzip erwies sich nun als so vielseitig einsetzbar, daß sein Überleben nicht mehr davon abhing. Auf dem Chip des Typs in unserem Experimentiersystem befinden sich vier Einzel-OP. Sein Innenleben verrät Bild 327a. Damit läßt sich eine Menge anfangen!

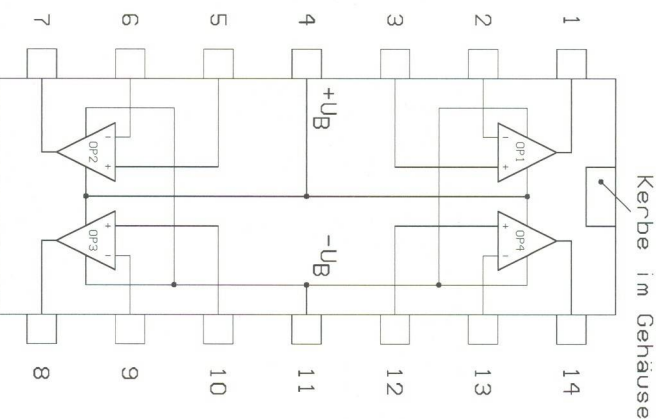


Bild 327a. Innenleben eines Vierfach-Operationsverstärkers vom Typ 324

Vorbild Wasserraege

Die Luftblase in einer Wasserraege zeigt unbestechlich an, wo etwas schief liegt. Kleinste Abweichungen lassen sie aus der Mitte auswandern, und schnell hat sie das höherliegende Ende des Glasrohrs erreicht. Nahezu unmöglich ist es gar,

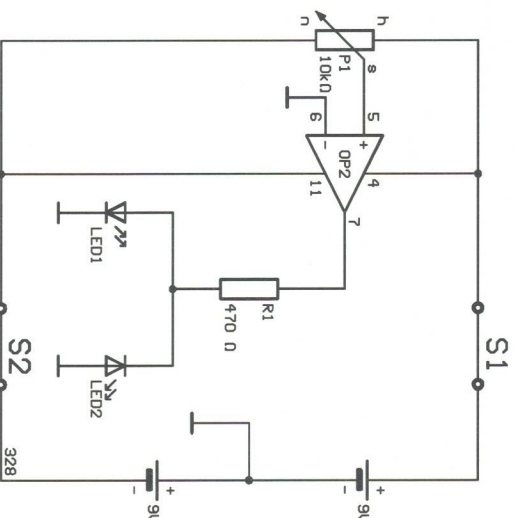


Bild 328. Komparator. Balanceakt zwischen zwei Anschlägen.

auf einer Glasplatte eine Stahlkugel in der Mitte zu halten. „Etwas schräg ist immer“.

233

Mit dem Experiment nach Bild 328 versuchen wir einen solchen Balanceakt auf elektronisch. LED1 und LED2 sind die „Randmarken“, an die die „Kugel“ anstößt. Mit P1 wird die „Platte gekippt“. Wir stellen P1 zunächst etwa auf Mitte. Nach dem Einschalten leuchtet eine der beiden LED. Dreht man P1 nach rechts, leuchtet LED1, dreht man nach links, wird LED2 hell. Nur mit „Fingerspitzen-Einstellung“ läßt sich der Übergangsbereich treffen. Die Leuchtdioden zeigen es mit unruhigem wechselweisen Flackern an.

Die beiden mit (–) und (+) bezeichneten Eingänge führen zu den Basisanschlüssen von zwei pnp-Darlingtonstufen, die zu einem Differenzverstärker verknüpft sind. Vom Ausgang der zum (+)-Eingang gehörenden wird das Signal weitergereicht, das man zwischen (+) und (–)-Eingang anlegt. Aus dem Abschnitt über Differenzverstärker wissen wir, daß sich mit dieser Verstärkerart Störeinflüsse, Temperatureffekte usw. ausgrenzen lassen. Auch die Bezeichnungen für die beiden Eingänge kennen wir: (+) ist der nichtinvertierende, (–) der invertierende Eingang. Hebt man im Wasserraegebeispiel (+) an, wird auch der Ausgang positiv. Hebt man (–) an, erscheint am Ausgang negative Spannung. Das Anheben symbolisiert eine positive Spannung. Rollt im Kugelvergleich die Kugel zum jeweiligen Anschlag, ist das mit der positiven bzw. ne-

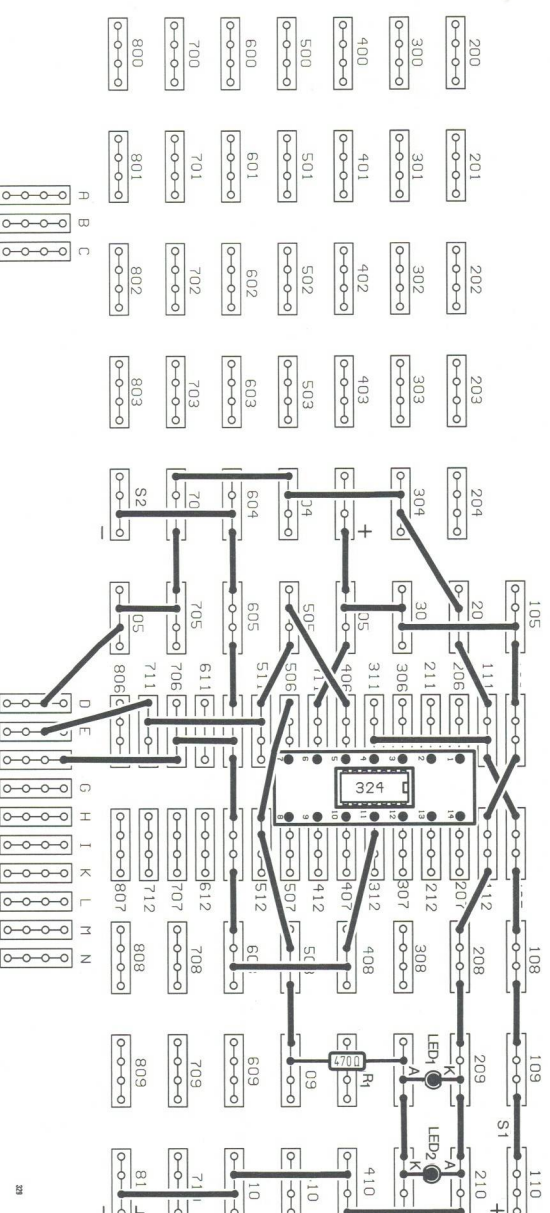


Bild 329. Aufbau zu Bild 328.

gativen Sättigungsspannung des OP-Ausgangs vergleichbar. Dessen Innenleben verhindert, daß dabei die positive oder negative Betriebsspannung erreicht wird. Es fehlen bei unserem Typ etwa 1,5 V – bei Plus etwas mehr, bei Minus etwas weniger.

Den OP macht dieser Power-Überschuß berechenbar. Seine Ideale: unendlich hohe Verstärkung, unendlich hoher Eingangswiderstand und verschwindend kleiner Ausgangswiderstand. Winzige Spannung zwischen den Eingängen für große Ausgangsreaktion – das heißt am Ende, daß wir praktisch gar nicht mehr mit dieser Spannung rechnen müssen. Es sieht für die äußeren Betrachtungen so aus, als ob beide Eingänge auf gleicher Spannung liegen. Der Einstieger muß sich an diese Betrachtungsweise erst gewöhnen. Und für Grenzfälle, wo Kleinigkeiten wichtig werden, sollte man sich merken: Beim bipolaren OP wie unserem Typ gehören – wenn auch winzige – (hier herausfließende) Eingangsströme zur Funktion. Sie brauchen also stets einen Gleichstrompfad – der auch zum Ausgang führen kann. An einem in diesem Weg liegenden Widerstand fällt also eine (meist kleine) Spannung ab. Geringe Unterschiede zwischen den Eingangsströmen ergeben dadurch auch bei gleichen Widerständen eine kleine Spannungsdifferenz, die wie ein Eingangssignal wirkt – wichtig zu wissen in Grenzfällen des Einsatzes.

den invertierenden Eingang eine gegen Masse positive Spannung liefert, heißt das: Unsere „Wasserwaage“ wird so gekippt, daß die „Blase“ (der Ausgang) nach der einen Seite (Minus) wandert. LED2 ist dunkel. Dagegen schiebt negative

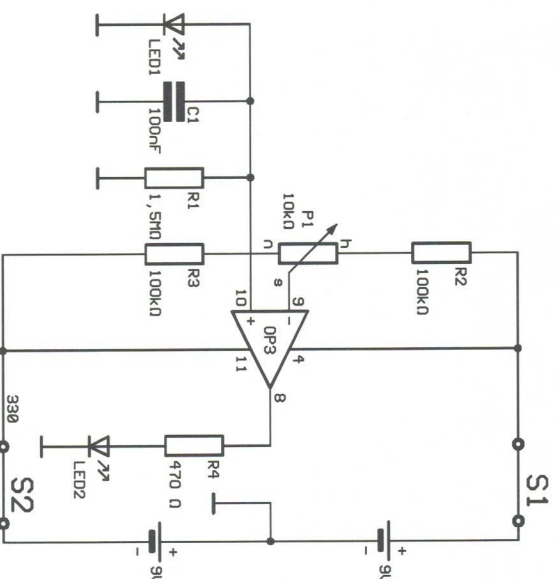


Bild 330. Bündnis: Schwaches Signal an mächtigem Verstärker.

Spannung am invertierenden Eingang die „Blase“ nach der anderen Seite: LED2 leuchtet. Bild 332 zeigt eine zum Einüben beliebige Darstellung dazu.

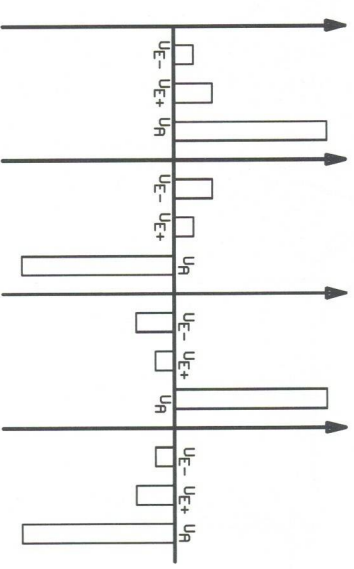


Bild 332. OP-Ausgangsverhalten: Auf die Differenz kommt es an!

235 Was ist aber nun mit LED1? Um das zu begründen, stellen wir (am besten am Abend) bei nicht sehr heller Beleuchtung P1 so ein, daß LED2 gerade noch nicht leuchtet. Dann knipsen wir eine Tischlampe an und richten sie auf LED1. Ist es bei ihr jetzt hell genug, geschieht das

234

Das Experiment nach Bild 330 zeigt, welch kleine Spannungen reichen, damit der OP Wirkung zeigt. Wunders wir uns nicht über LED1, schalten wir einfach ein und suchen den Punkt, wo LED2 zu leuchten beginnt. Dazu muß P1 entsprechend weit nach unten gedreht werden. Denn: Über R1 liegt der nichtinvertierende Eingang an Masse. C1 leitet Brummeinstreuungen u. ä. ab. Solange P1 an

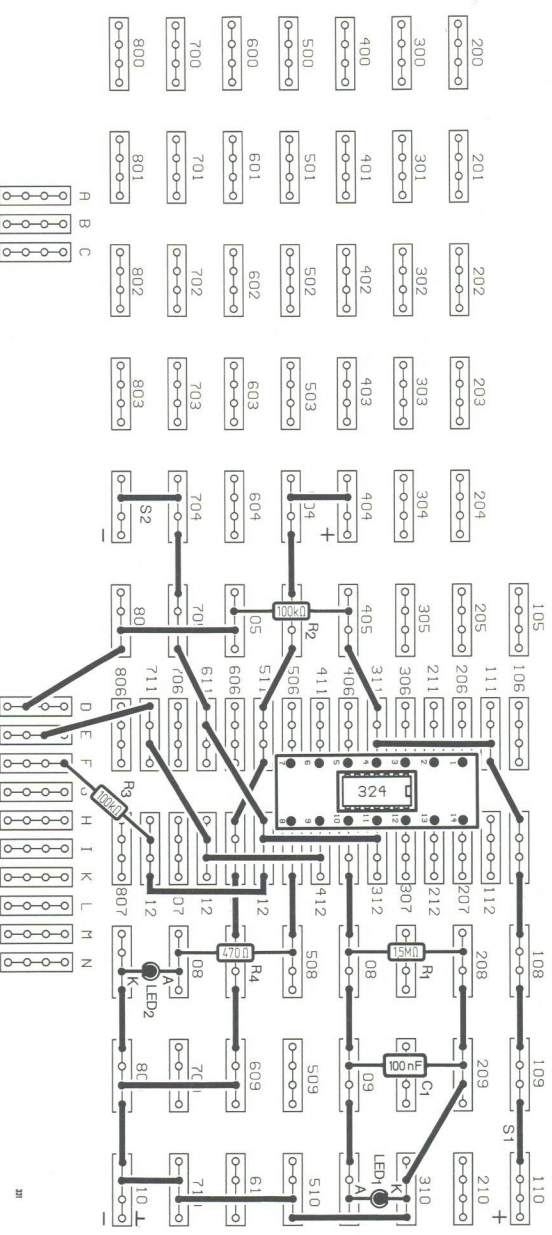


Bild 331. Aufbau zu Bild 330.

„Wunder“: LED2 leuchtet! Licht aus – LED2 aus. Erinnern wir uns an den Abschnitt zur Optoelektronik: pn-Übergänge können elektrische Spannung in Licht umwandeln, und Licht führt an pn-Übergängen zu elektrischer Spannung. Das genau hat LED1 gerade getan. Allerdings ist der Effekt stark von Typ und Exemplar abhängig. Sehr aktiv sind hier bestimmte rote Typen, andere erreichen nicht einmal die Empfindlichkeit ihrer grünen oder gelben Stalgenossen. Als verlässlich und gut erwies sich die IR-LED. Probiert alle Leuchtdioden eures Experimentierkastens durch!

236

Nach Ermittlung der empfindlichsten Diode (hängt auch vom Spektrum des benutzten Lichtes ab) versucht dies: Vergrößert $R1$ durch Reihenschaltung von $1,5\text{ M}\Omega$ mit $1\text{ M}\Omega$ und $680\text{ k}\Omega$. Entfernt $C1$ (damit es schneller reagiert). Dann testet die Grenzttemperaturempfindlichkeit der Schaltung. Dazu mit einer Hand stets Masse berühren, sonst kommt viel Brumm in die Schaltung. Ihr werdet staunen, mit wie wenig Licht LED2 noch reagiert! Immerhin – unser OP hat ungebremst eine Verstärkung von rund 100.000!

237

Die lichtempfindlichste LED (IR-LED) wird wieder in Bild 331 eingesteckt, diesmal jedoch umgedreht gepolt. Dann stellen wir $P1$ bei nicht zu hoher Umgebungshelligkeit so ein, daß LED2 gerade leuchtet. Nun wird die Tischlampe angekriipst und – LED2 geht aus. Was ist das? Richtig – ein Dämmerungsschalter. Nur eben mit einer zweckentfremdeten LED als Lichtsensor.

Komparator-Praxis: Integrator

Den folgenden Schaltungen gemeinsam ist ein OP-Element, dessen nichtinvertierender Eingang an Masse liegt und bei dem zwischen Ausgang und invertierendem Eingang ein Kondensator geschaltet ist. Unkonventionell, wie wir an die Dinge herangehen, beobachten wir die Wirkungen und ergründen dann die Ursachen.

238

Die Schaltung nach Bild 333 wird zunächst ohne $R3$ zusammengesteckt. Darum brauchen wir noch nicht auf das empfindliche Meßinstrument zu achten. Nun wird $Ta2$ einige Male kurz gedrückt. Wir bemerken, daß LED1 zu leuchten beginnt. Bei jedem Druck auf den Taster wird sie heller, bis der Ausgang die Sättigung erreicht hat. Wir können den Taster loslassen – LED1 leuchtet weiter. Die Schaltung hat die Teilwirkungen „gesamtmet“. Man nennt sie *Integrator*. Umkehr bewirkt erst Druck auf $Ta1$. Jetzt wird LED1 dunkler, verlischt, und LED2 beginnt zu leuchten. Doch sie leuchtet danach nicht unbedingt so lange wie zuvor LED1.

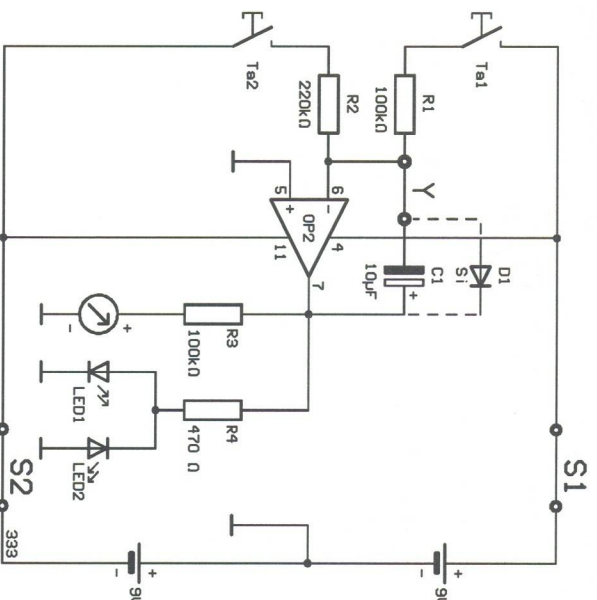


Bild 333. Integrator: Steier Tropfen füllt das C.

239

Wir polen $C1$ um und wiederholen den Versuch. Jetzt bleibt LED1 nicht so lange hell wie LED2. Dieses Verhalten hat mit der Polarität des Elkos zu tun. LED1 zeigt an, daß der Ausgang sich zur positiven Sättigung bewegt. LED2 signalisiert negative Ausgangsspannung. Dafür ist aber $C1$ in Bild 333 falsch gepolt. Er entlädt sich daher schneller als bei richtiger Polung. Für die praktische Anwendung greift man in solchen Fällen zu einem Trick: Zwei gleich große Elkos werden „Rücken an Rücken“, also Minus mit Minus, verbunden. Dazu wird der zweite Elko anstelle der Brücke Y eingesteckt. So liegt immer einer richtig herum, ein „ungepoltter“ Elko sozusagen.

240

Keihen wir zur Grundform nach Bild 333 zurück und stecken $R3$ ein. Das Meßinstrument zeigt nun an, was am Ausgang passiert. Wir drücken $Ta2$ und sehen, wie der Zeiger jedes Mal etwas weiter ausschlägt, bis zur Sättigung. Mit $Ta1$ läßt er sich wieder zurückholen. Aber nicht viel weiter als bis Ausschlag Null gehen, Falschpolung bekommt auch dem Meßinstrument nicht.

241

Parallel zu $C1$ legen wir eine Si-Diode mit Kathode an Ausgang OP. Dann drücken wir wieder $Ta1$. Keine Angst – jetzt gibt es nur einen kleinen Ausschlag in falscher Richtung! Auch LED2 leuchtet nicht. Damit ist das Meßinstrument geschützt, doch die Schaltung arbeitet nur noch im

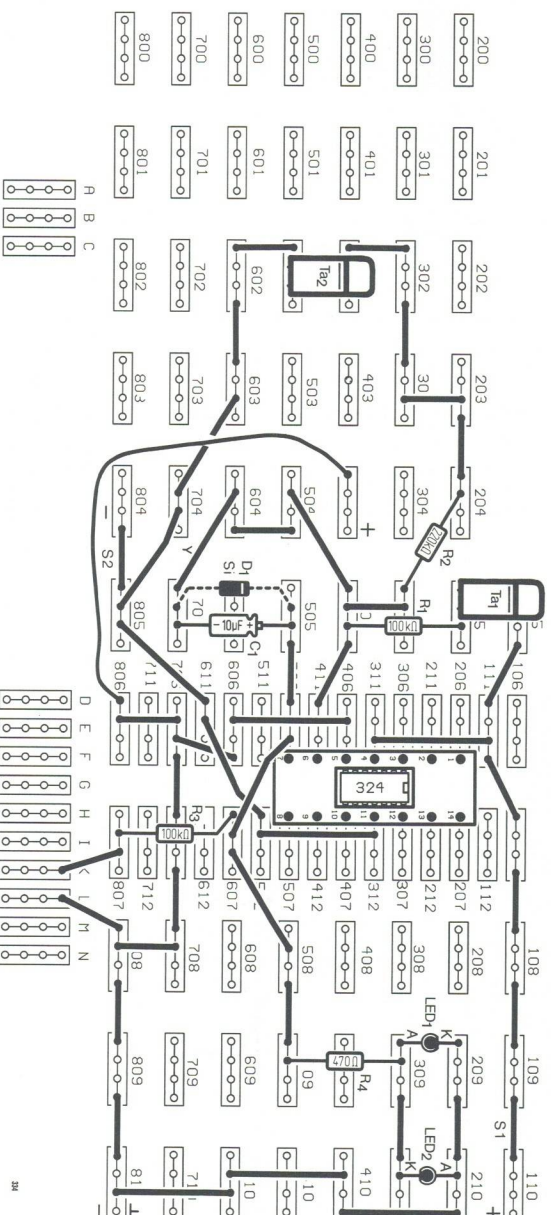


Bild 334. Aufbau zu Bild 333.

Positiven. Überlegt andere Schutzmöglichkeiten, denkt an Abschnitt 19!

Zum Verständnis des Integrators müssen wir etwas vorgehen auf Erkenntnisse des nächsten Abschnitts. Es geht um den Begriff der *virtuellen Masse* (das heißt, sie ist nicht wirklich, aber „der Wirkung nach“ vorhanden.) Solange nämlich der OP noch nicht gesättigt ist, den Eingangssignalen also noch folgen kann, bewirkt seine hohe Verstärkung dies: Der invertierende Eingang führt fast die gleiche Spannung wie der nichtinvertierende. Und da wir diesen an Masse gelegt haben, liegt auch der invertierende praktisch auf 0 V, ohne selbst mit Masse verbunden zu sein. Dafür sorgt der OP automatisch. Mit jedem Druck auf Ta1 oder Ta2 wird an R1 oder R2 die jeweilige Betriebsspannung gelegt. Das bewirkt einen Strom: $I = U_B/R1$ (bzw. $R2$). Bei negativer U_B fließt er vom invertierenden Eingang weg, der „so gut wie“ auf 0 V liegt. Aus dem Eingang heraus kommt aber (praktisch) nichts. Also hilft C2 aus. Dieser – zunächst ohne Ladung (also auch Ausgangsspannung 0 V) – wird bei jedem Druck auf den Taster etwas weiter aufgeladen (nämlich vom Ausgang in Richtung der virtuellen Masse). Dazu wird am Ausgang eine immer größere Spannung erforderlich. Ab Sättigung geht das nicht mehr. Erst jetzt wird es am Eingang „untypisch“ – am invertierenden Eingang tritt eine merkliche Spannung auf. Bis dahin jedenfalls ist der invertierende Eingang ein auf 0 V liegender Knoten, in den der Eingangsstrom hinein- und der gleichgroße Ausgangsstrom (über C1) herausfließt – in den von der winzigen Eingangs-Differenzspannung gesteuerten Ausgang.

Integrierte Zeit

Die Schaltung nach Bild 335 bietet einen einstellbaren Zeitschalter und neue Einsichten.

242

Beim Aufbau dieser Schaltung Polung des Meßinstruments beachten – Plus an Masse! P2 wird vorerst auf Mitte gestellt. Nach dem Einschalten wird im Ruhezustand LED2 leuchten. Drückt kurz auf Ta1: Statt LED2 leuchtet nun LED3. Doch nicht lange, dann kippt es wieder in den Ruhezustand. LED1 leuchtet ständig. Sie wird nur als relativ stabile Spannungsquelle benutzt (Flußspannung, rund 2 V). Drückt nochmals Ta1 und schaut auf das Instrument! Der Zeiger bewegt sich bis in die Nähe des rechten Anschlags. Dann jedoch – während LED3 verlischt – fällt er ruckartig in seine Anfangslage zurück. Dreht P2 auf Maximum (s an h) und schaltet nochmals: Alles wie vorher, nur dauert es doppelt so lang. Wir haben es mit einem einstellbaren Zeitschalter zu tun.

Nun zur Funktion: T1 sei zunächst gesperrt. (Das bewirkt der Druck auf Ta1.) Über P2 fließt von LED1 her (Flußspannung U_F) ein Strom in den Knoten am invertierenden

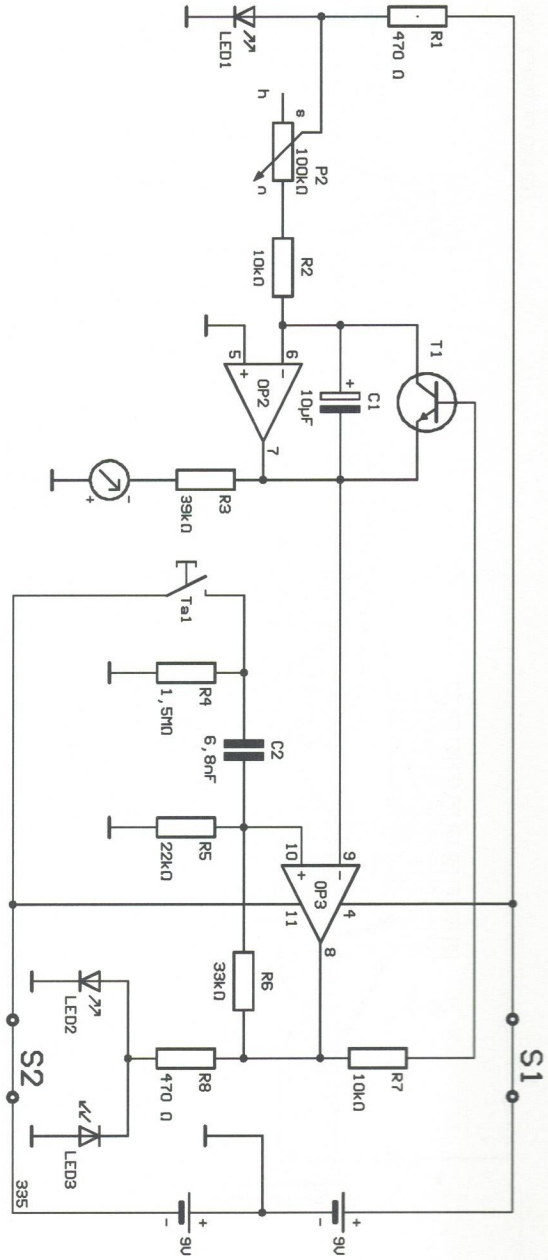


Bild 335. Integrator mit Piff: Zeitschalter.

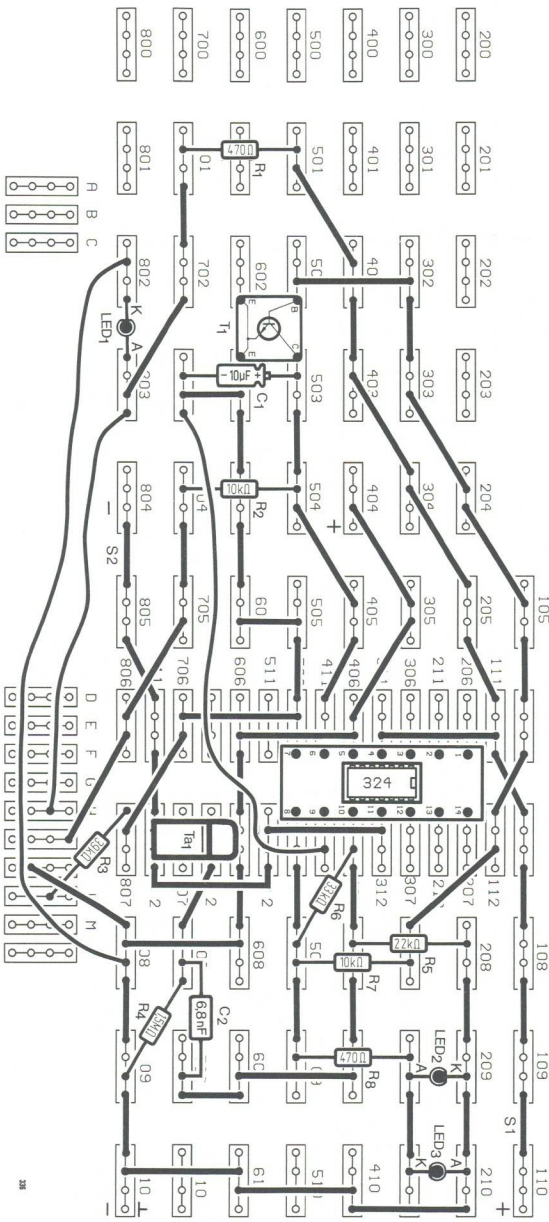


Bild 336. Aufbau zu Bild 335.

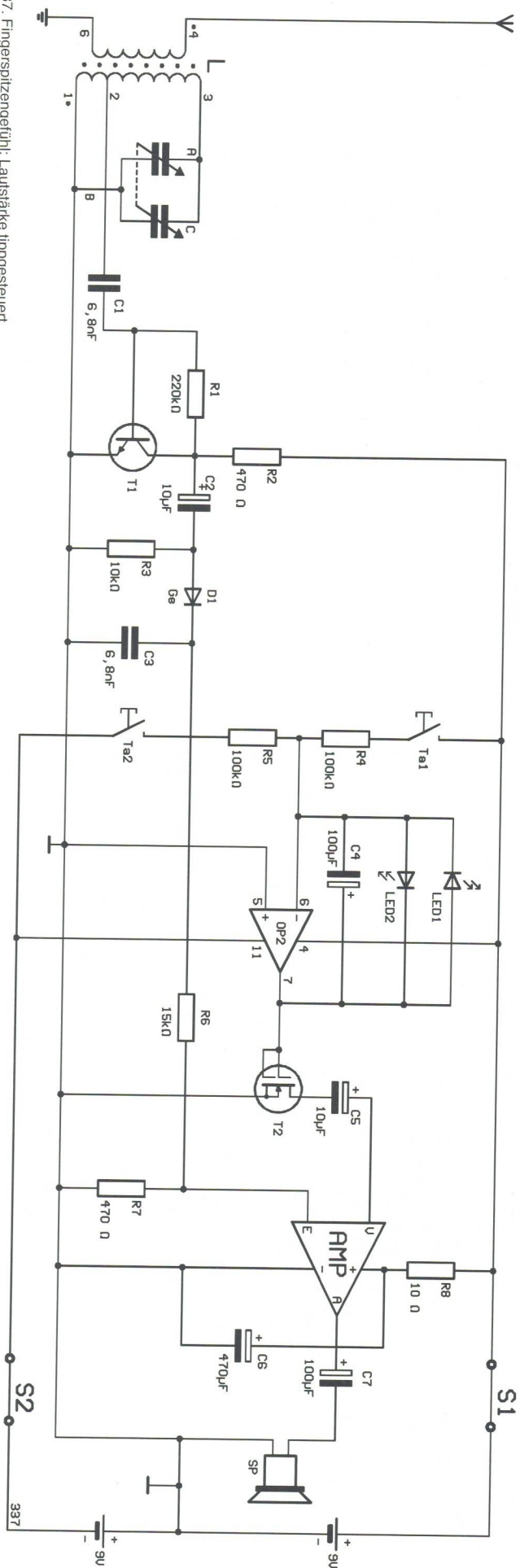


Bild 337. Fingerspitzengefühl: Lautstärke tippgesteuert.

Eingang des ersten OP. Wie schon bekannt, lädt sich $C1$ dadurch auf. Entsprechend dem „Integral“ des Eingangsstroms über der Zeit steigt die Ausgangsspannung in negativer Richtung an. Diesmal wird jedoch dank $T1$ die Sättigung nicht erreicht. Das bewirkt der zweite OP. Den haben wir beim Start mit $Ta1$ nämlich mit einem negativen Impuls am nichtinvertierenden Eingang auf Minus am Ausgang gekippt. Der Teiler $R6/R5$ hält diesen Zustand, bis die Ausgangsspannung des Integrators die Spannung am Teilerpunkt erreicht hat. Dann kippt der zweite OP nach echter Komparatorart in die positive Sättigung und versorgt $T1$ mit Basisstrom. Der entlädt schnell $C1$. Der Ausgang führt wieder 0 V , der des zweiten OP bleibt in der positiven Sättigung, $T1$ leitet. Bis zum nächsten Druck auf $Ta1$. Aus der Funktion kann man sich leicht die Zeit errechnen, die an $P2$ über den Strom I eingestellt werden kann: $I = U_F / (R1 + P2)$, bis Teilerspannung $(-)/U_F$ erreicht ist. In dieser Zeit t fließt die Ladung $Q = I \cdot t$ in $C1$. Also $U_F = Q/C = I \cdot t/C$, das heißt $t = U_F \cdot C/I$. Dabei daran denken, daß $C1$ bis 50% über Nennwert liegen kann! Mit $470\text{ }\mu\text{F}$ kommt man auf mehr als 10 Minuten Aktivzeit – was immer man damit steuert, vom Treppenlicht bis zur zeitbegrenzten Frischluftzufuhr.

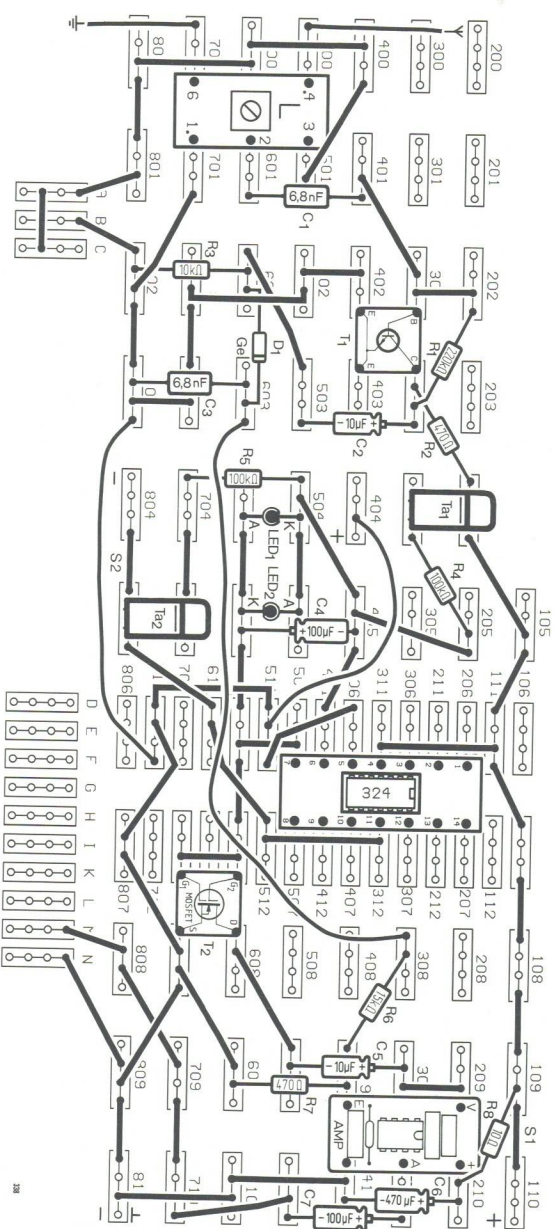


Bild 338. Aufbau zu Bild 337.

Im folgenden Experiment spielen viele bereits bekannte Ein-
zelschaltungen zusammen.

243

Für die Kernschaltung in Bild 337 lassen sich auch andere Tonsignalquellen verwenden. Es muß also nicht der Empfänger sein, dessen Ausgangssignal über R6 eingespeist wird. Wie laut es hinten aus SP herauskommt, bestimmen wir mit den beiden Tipplasten: Druck auf Ta1 – Ausgang des OP geht ins Negative, Widerstand von T2 und damit die Gegenkopplung des AMP wächst, Lautstärke sinkt. Umgekehrtes wird mit Ta2 erreicht. Und alles schön portio- niert – je kürzer der Taster angeklippt wird, um so kleiner die Änderung. Nach Loslassen bleibt die jeweilige Einstellung „gespeichert“. Sollte sich C4 bei falscher Polarität der Span- nung zu schnell entladen, Tip von weiter vorn einsetzen („un- gepolter Elko“ durch Antiseriellschalten eines weiteren 100- μ F-Elkos). Allerdings wird hier durch LED1 und LED2 die Lade- spannung in beiden Richtungen auf etwa 2 V begrenzt. Das kommt auch dem sinnvollen Steuerbereich des MOSFET ent- gegen.

Mit wenigen Bauelementen aktivieren wir im folgenden Experiment viele interessante Effekte, nämlich Kurvenformen.

244 Nach Aufbau der Schaltung gemäß Bild 339 (nächst im ersten Drittel stehen (s. Richtung n). Bei 10 μF für C1 beobachten wir die Leuchtdioden, wenn an P2 gedreht wird – nach links bis Anschlag, nach rechts höchstens bis Mitte. Die Reaktionen des Ausgangs beobachten wir mit dem dritten OP als „Monitor“. Er entkoppelt die Ausgangs-„Lasten“ von den gegen Belastung empfindlichen Punkten. Sein nichtinvertierender Eingang wird dazu wechselweise an jeden Ausgang der beiden anderen gelegt.

Monitor an ersten OP: LED-Lichtwechsel mit „weichen“ Über-
gängen. Die gerade aktive wird zunehmend heller, dann wie-
der dunkler, dann übernimmt die andere usw.

Monitor an zweiten OP: „Hartes“ Wechselblinken.

245 Wir setzen für C1 in Bild 339 statt 10 μF nun 6,8 nF ein. Diesmal interessiert der Ton. Er klingt „weich“ (und leiser) am ersten, aber „hart“ (und lauter) am zweiten OP.

Die LED-Tests haben gezeigt, daß der Ausgang des ersten OP eine *Dreieckschwingung* liefert und der des zweiten eine *Rechteckschwingung*. In ihrer Schreithöhe ist die Dreieckschwingung von der Potisteilung abhängig, denn damit wird der Umschaltpunkt gewählt. Der Ton wird um so höher, je

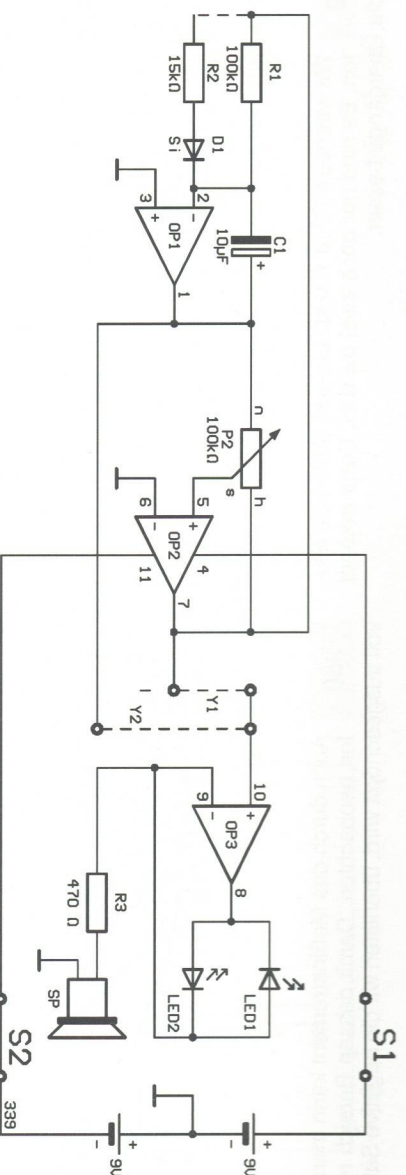


Bild 339. Geometrie: Dreieck-Rechteck-Generator mit „Monitor“.

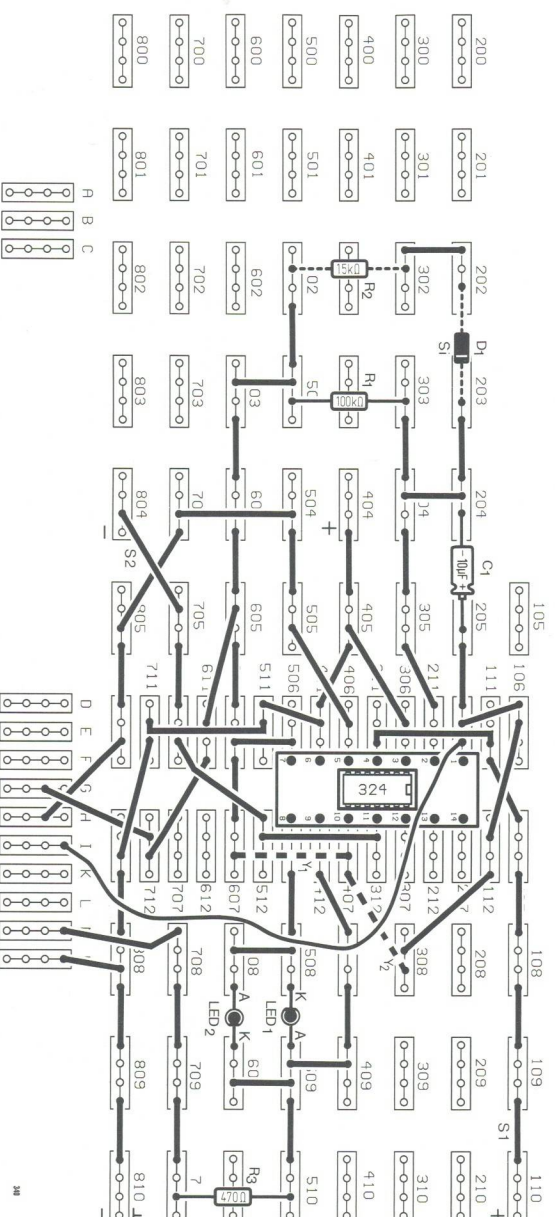


Bild 340. Aufbau zu Bild 339.

weiter links der Schleifer steht. Am Anschlag ist selbstverständlich Schluß.

246 Durch Hinzufügen einer Diode und eines 15-k Ω -Widerstandes R_2 entsteht ein weiterer Generatortyp. Der kleinere R_2 bewirkt, daß in positiver Richtung schneller geladen wird. Darum ergeben sich am Ausgang des

zweiten OP in positiver Richtung auch nur noch schmale Impulse. Interessant sieht es am Ausgang des ersten aus: Langsamer Anstieg mit R_1 , schneller Abfall wegen R_2 . Wir testen Takt und Ton wie in den beiden vorangegangenen Experimenten, also mit 10 μF bzw. 6,8 nF für C_1 , und beobachten über den „Monitor“, P_2 in Richtung h wieder höchstens bis Mitte drehen, sonst bleibt der Generator stecken.

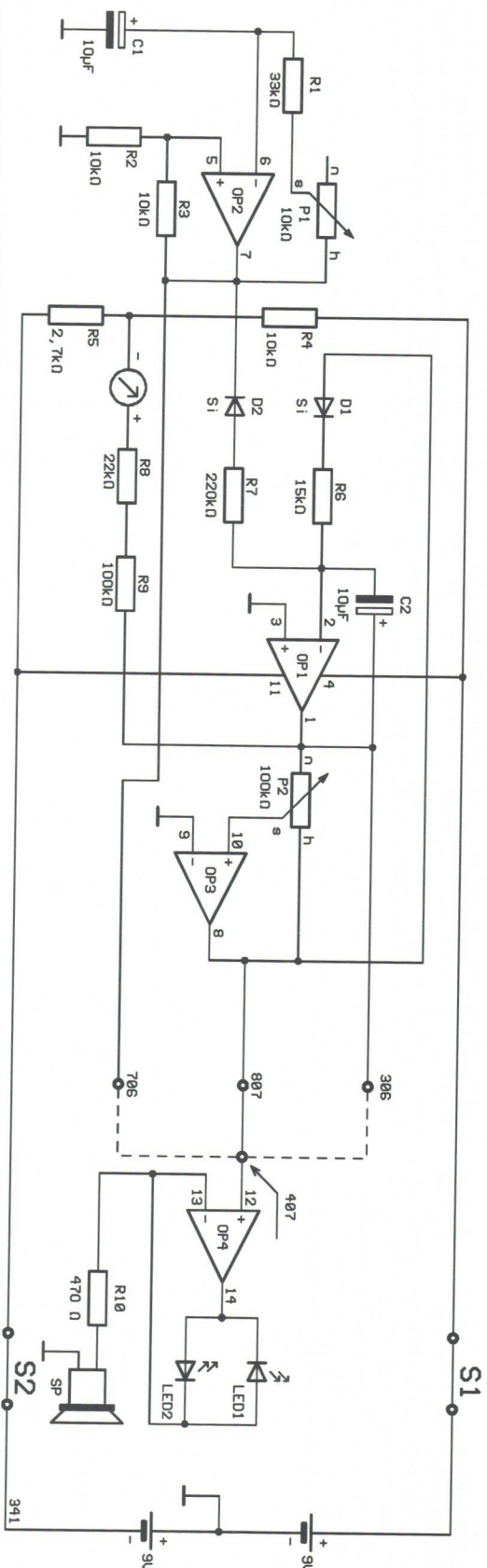


Bild 341. Treppenspannungsgenerator: Schritt für Schritt nach oben.

Step by step – eine Treppe nach oben

Mit der Schaltung nach Bild 341 lernen wir eine weitere Schaltung aus der Welt der „Funktionsgeneratoren“ kennen. Wir erzeugen eine *Treppenspannung*. Man nutzt sie in Messtechnik und Musikelektronik. Wer nachdenkt, findet sicherlich noch mehr Anwendungsmöglichkeiten!

247

Das Experiment von eben wird hauptsächlich durch einen Rechteckgenerator ergänzt (erster OP, im Bild „OP2“). Wir setzen zunächst für C1 statt 10 µF nur 0,1 µF ein und für C2 sogar nur 6,8 nF. P1 und P2 werden auf etwa 1/3 über n gestellt. Von P1 wirken also rund 6 kΩ, solange R1 nicht im Spiel ist. Der Ton aus dem Lautsprecher wirkt rau. Dreht man an P2, ändert sich die Tonhöhe – aber mit Sprüngen! Je kleiner der eingestellte Wert von P1, um so mehr Tonstufen lassen sich mit P2 zaubern. Es erinnert etwas an die Kinderdrehergel mit Blechzungen.

248

Durch Einsetzen von je 10 µF für C1 und C2, wie im Bild gezeigt, kommen die Leuchtdioden ins Spiel. Außerdem kann P1 durch einen Festwiderstand von 33 kΩ ersetzt werden. Dadurch haben wir mehr Zeit zum Beobachten. LED1 und LED2 blinken nämlich wechselweise, aber auf besondere Art – mit gestufter Helligkeit. Bei sehr hellen Leuchtdioden erkennt man das besser, wenn R10 auf 1 kΩ erhöht wird. LED1 beginnt ganz hell und wird in etwa fünf Stufen dunkler. Dann übernimmt LED2, die in ebensovielen Stufen heller wird. Anschließend übergibt sie wieder an LED1 usw.

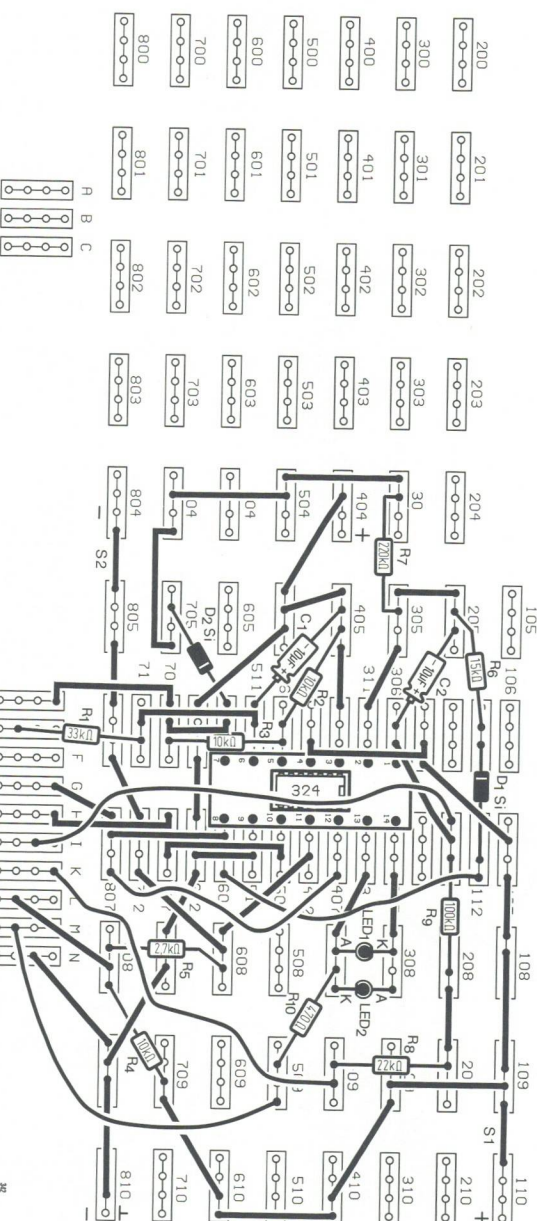


Bild 342. Aufbau zu Bild 341.

249

Wir wechseln R7 in 100 kΩ um und zählen die Stufen: Es sind nur noch zwei bis drei. Dafür erkennt man die Übergänge besser.

250

Auch durch das Meßinstrument kann man die Stufen beobachten. Damit dessen Bereich möglichst voll ausgeschöpft wird, überlisten wir die negative Sättigungs-

spannung. Wir legen das Instrument mit seinem Minusanschluß nicht direkt an die negative Spannung, sondern an einen Spannungsteiler. Der legt den Minuspunkt entsprechend höher.

Nun noch zum Know how dieser Versuche. Der Rechteckgenerator mit C1 und P1 bzw. R1 ist eine der zahlreichen „eleganten“ OP-Schaltungslösungen. Ob der Ausgang gerade auf positiver oder negativer Sättigung steht – stets wird der nichtinvertierende Eingang durch den Teiler R3, R2 auf einem Bruchteil davon gehalten. Bis zu diesem Wert lädt sich C1 über P1 (und R1) auf, dann kippt alles in die andere Sättigung und beginnt von neuem. Mit der negativen Sättigungsspannung wird der Integrator gespeist, also in immer wieder unterbrochenen Schritten. Ist der an P2 wählbare Punkt erreicht, zu dem am Schleifer von P2 0 V erscheinen, schaltet der Ausgang des als Komparator arbeitenden dritten OP kurz in die positive Sättigung. (Sonst liegt er in der negativen.) Damit wird C2 umgeladen – in einer von R6 und C2 bestimmten Zeit. Dadurch schaltet der Integratorausgang von positiver in negative Sättigung. Die Treppe beginnt an diesem Punkt von neuem, wie die Leuchtdioden zeigen.

Sinus – die sanften Übergänge

Selbst die verrückteste Kurvenform kann in einzelne Sinusschwingungen zerlegt werden. Das hat Herr *Fourier* einst entdeckt. Von vornherein nur eine Sinusschwingung für sich allein zu erzeugen ist mit Aufwand verbunden. Gegenkopplung kommt ins Spiel – weg mit allem, was den sanften Verlauf stört!

251

Nach Bau der Schaltung gemäß Bild 343 gibt EP einen angenehmen Ton ab. Zieht man R2, wird es lauter, aber klingt häßlich. Wird R7 überbrückt, ähnelt der Ton dem eines Moßas. Der Ton ist weg, wenn R4 oder R5 überbrückt wird. Die Schaltung nimmt also leicht übel. Alles muß zueinander passen. Es kann sogar sein, daß sie gar nicht anschwimmt. Dann muß man C2 gegen C3 tauschen. Beide sind zwar im Exemplanwerte vom Nennwert) sind immer vorhanden. Der Echtwert von C3 sollte größer als der von C2 sein. Kondensatoren leiten bekanntlich um so mehr, je höher die Frequenz f . Das ist der Trick der Reihenschaltung aus C3 mit R7 und der Parallelschaltung aus C2 und R3. Steigt f , kommt mehr Spannung an die Parallelschaltung, doch bei dieser sinkt der Wechselstromwiderstand mit wachsendem f . Und auch die schon beim früher gebauten Phasenschieberegulator so bedeutsame Phasenlage der Spannung zwischen Ausgang und Eingang ändert sich laufend. Nur für *einen* Punkt ist alles optimal. Für gleiche Werte von R und C in beiden Teilerzweigen ist das der Fall bei $f_1 = 1/(2\pi RC)$. Dabei kommt von der Ausgangsspannung nur noch $1/3$ auf den

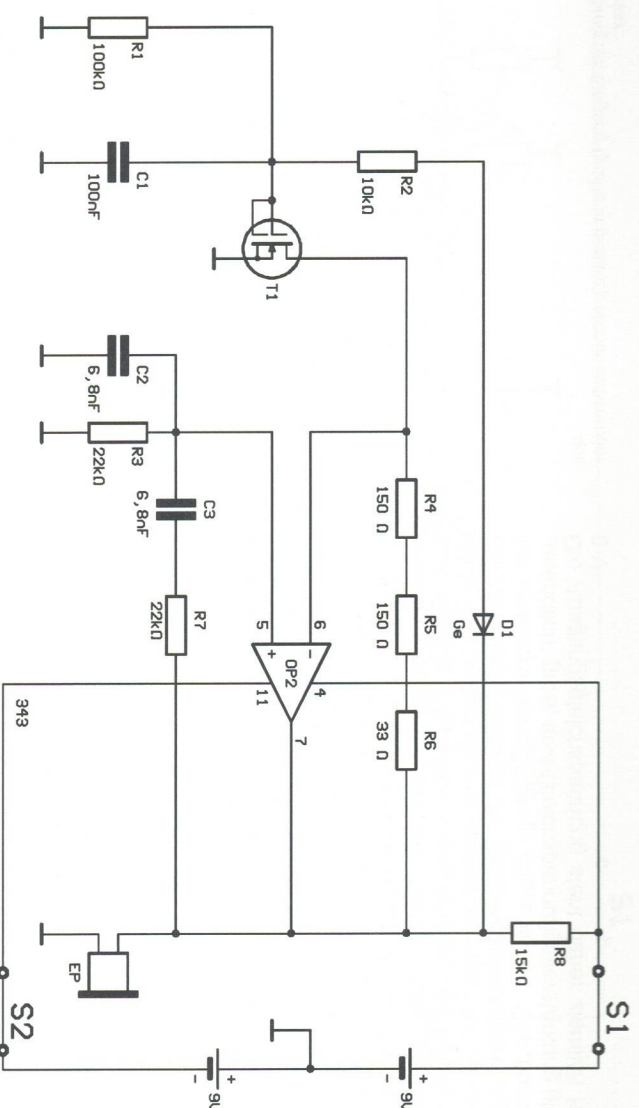


Bild 343. Weiche Welle: Sinusgenerator mit Wien-Glied.

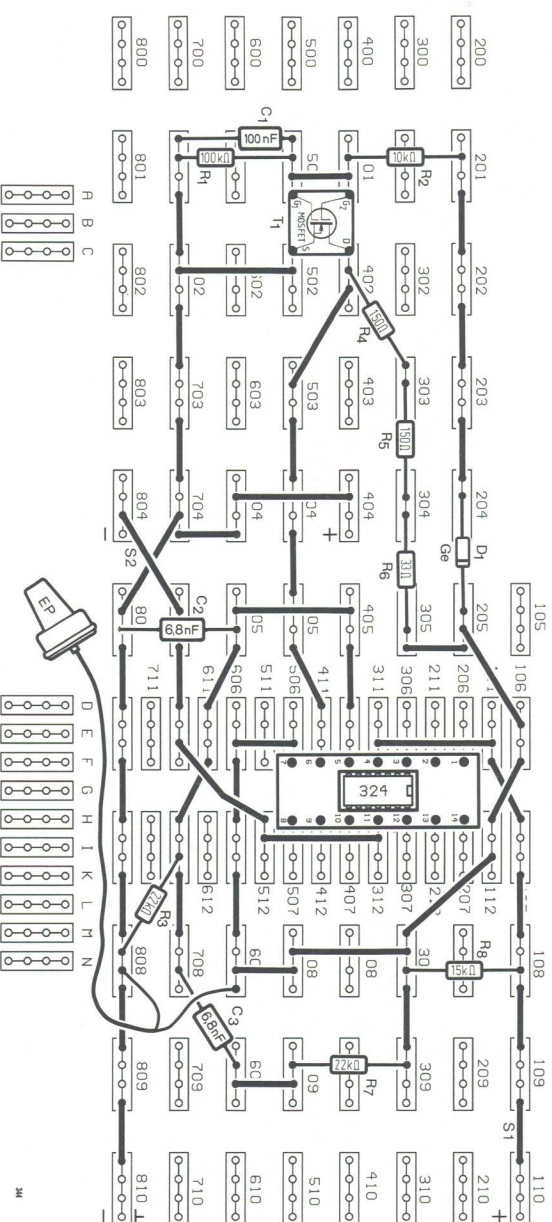


Bild 344. Aufbau zu Bild 343.

nichtinvertierenden Eingang. Bei einer Verstärkung von 3 wird also nur diese Frequenz erzeugt und „gerade richtig“ verstärkt. Über die richtige Verstärkung wird am invertierenden Eingang gewacht – mit MOSFET als steuerbarem Widerstand und der Ge-Diode (kleine Flußspannung) als Gleichrichter für die zum Vergleich benutzten negativen Halbwellen der Schwingung. Die Schaltung sorgt damit für sich selbst – es wird immer nur so viel verstärkt, wie eine stabile Sinusschwingung der Resonanzfrequenz braucht. Herr Wien hat diese schöne Eigenschaft dieser RC-Kombination entdeckt. Daher spricht man von Wien-Glied bzw. auch von Wien-Generator. (Ein Herr Robinson hatte übrigens auch Anteil daran.)

25. Verstärkung nach Maß

Die Kugel auf der nie ganz waagerechten Platte – unser Symbol für die gewaltige Verstärkung des ungebremsen OP. 100.000fach – das heißt, für 10 V „Bewegung“ am Ausgang reicht „Anheben“ (also eine Eingangsspannung) von ganzen 100 μ V (Mikrovolt, als Millionstel Volt!). Zwischen den beiden Eingängen bleibt das so. Für die äußere Schaltung, die mit meist wesentlich größeren Spannungen arbeitet, liegen beide Eingänge praktisch auf gleicher Spannung. Doch mit nur zwei Widerständen läßt sich der OP willig lenken.

Die Feder an der Kugel

Man kann eine Kugel mit zwei Federn in der Mittellage halten. Beim Neigen der Platte zieht die Schwerkraft zwar wieder nach unten, doch die Federn „halten gegen“. Die eine zieht, die andere drückt. So begrenzen sie den Weg der Kugel, je nach Neigung der Platte und Steifigkeit der Federn.

Invertierender Eingang mit zwei Jobs

Auf elektronisch sind die beiden Federn zwei Widerstände: $R1$ legen wir zwischen die Spannung, die verstärkt werden soll, und den invertierenden Eingang. $R2$ kommt zwischen diesen Eingang und den Ausgang (Bild 345). Über $R2$ wirkt der Ausgang „bremsend“ auf den Eingang zurück. Eine Gegenkopplung also. Wir haben das schon bei den Transistoren kennengelernt. Und im vorigen Abschnitt ließ es sich nicht umgehen, schon einiges zu solchen Beschaltungen zu bemerken.

$R1$ ist – genauer gesehen – die Summe aller zwischen der Quellenspannung und dem Eingangsknoten wirkenden Widerstände. Dazu gehört also auch der Innenwiderstand der Signalequelle. Kennt man alle Widerstände, kann die Schaltung leicht berechnet werden. Wir wissen alles über den Eingangsknoten: Es fließt so viel Strom hinein wie heraus; $I1 = I2 = I$. „Vorübergehend“ nehmen wir die winzige Differenzspannung U_d zwischen den Eingängen mit in die Be-

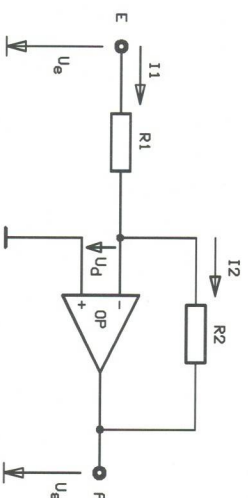


Bild 345. Leicht zu berechnen: Invertierender Verstärker.

trachtungen auf und betrachten die Maschen:

Masche (1) = Masse – Eingang – Knoten – Masse;
Masche (2) = Masse – Ausgang – Knoten – Masse.

$$(1): -U_e + I1 \cdot R1 + U_d = 0$$

$$(2): -U_a - I2 \cdot R2 + U_d = 0.$$

Nachdem wir wissen, wo U_d einzuordnen ist, können wir sie wieder weglassen, da die anderen Spannungen viel größer sind. In den verbleibenden Gleichungs-„Resten“ wird die Knotengleichung berücksichtigt:

$-U_e + I \cdot R1 = 0 = -U_a - I \cdot R2$. Für die Verstärkung des Eingangssignals U_e zum (invertierten) Ausgangssignal U_a gilt damit für diesen *invertierenden Verstärker*:

$$V = -U_a/U_e = R2/R1.$$

Interessantes Detail: Für $R2 = 0$ wird $V = 0$!

Der invertierende Eingang hat also bei dieser Verstärkerart zwei Funktionen: Seine Beschaltung bestimmt die Verstärkung, und der eingangsseitige Widerstand ist der Eingang der Schaltung.

Gewaltenteilung

So geht's auch: Der nichtinvertierende Eingang übernimmt die Verstärkung. Dafür sorgt der invertierende Eingang wieder (aber diesmal nur noch) für die genaue Kontrolle dieser Funktion. Das tut er eben mit $R1$ und $R2$.

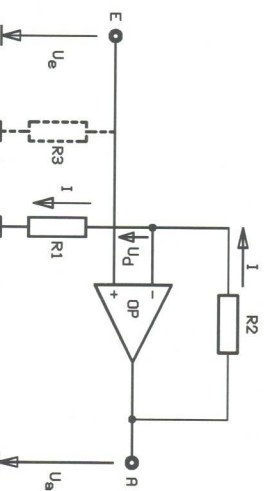


Bild 346. Hochohmig am Eingang (große Impedanz): Nichtinvertierender Verstärker.

Doch beim Berechnen macht man eine interessante Entdeckung (Bild 346): Zunächst kann wieder der Knotenpunkt geklärt werden. Dabei muß aber an den winzigen Eingangstrom gedacht werden, der funktionell notwendig ist. Daher wurde vorsorglich $R3$ eingezeichnet – falls die Quelle keinen Gleichstromweg hat! Entspricht der Wert von $R3$ gerade dem der Parallelschaltung von $R1$ und $R2$, erzeugen gleiche Ströme auch gleiche Spannungen. Wie das ein Differenzverstärker so an sich hat – diese unerwünschten Eingangsspannungen heben sich gegenseitig auf, werden wirkungslos. Wie schön. Doch zurück zur Verstärkung. Da beide Eingänge im normalen Betriebsfall fast gleiche Spannung führen, muß der Strom I vom Ausgang her über $R1$ die Spannung U_e erzeugen: $U_e = I \cdot R1$. Die Ausgangsspannung treibt I durch $R2$ und $R1$, also $U_a = I \cdot (R1 + R2)$. Logisch, daß damit die Spannung am nichtinvertierenden Eingang (ohne Vorzeichenänderung) so verstärkt wird:

$$V = U_a/U_e = (R1 + R2)/R1 = 1 + R2/R1.$$

Folgerung: Selbst dann, wenn $R2$ zu Null wird, also der invertierende Eingang direkt mit dem Ausgang verbunden wird, verstärkt dieser *nichtinvertierende Verstärker* noch mit dem Faktor 1. Und noch etwas fällt auf. Während beim invertierenden Verstärker der (meist nicht sehr große) $R1$ als Eingangswiderstand rechnet, könnte man beim nichtinvertierenden Verstärker zunächst einen extrem hohen Eingangswiderstand erwarten. Doch da ist die schon begründete Notwendigkeit von $R3$, und alles wird wieder realistischer.

Die Praxis ruft

Die „Praxis“ ist im folgenden ein Baby im Kinderzimmer. Man sollte sein Geschrei schon hören können, auch in anderen Räumen.

252

Mit dem Wissen um das Warum der Widerstände bauen wir die Schaltung nach Bild 347 auf und lauschen ab da dem Babyruf mit der ungeheueren Gesamtverstärkung von 85.000. SP ist das Ohr im Kinderzimmer, EP der Schallwandler bei uns im Ohr.

Daß der invertierende Verstärker von Stufe 2 (OP 4) zehnfach und der von Stufe 4 (OP 2) 70-fach verstärkt, ist sonnenklar. Aber was ist mit den nichtinvertierenden Stufen 1 (OP 3) und 3 (OP 1)? Alles läßt sich erklären. $C1$ und $C4$ sind im Wechselstromwiderstand gegen das Geschrei klein gegenüber $R1$ bzw. $R7$. Die Wechselspannung wird also mit Faktor 11 verstärkt. Die Kondensatoren sperren dagegen für Gleichstrom. Dadurch liegt praktisch die Ausgangsgleichspannung auch am invertierenden Eingang, $R1_{ges}$ ist bei Gleichspannung „unendlich“ groß, also Gleichspannungsverstärkung gleich 1. Die Ausgangsgleichspannung steht daher ziemlich fest bei 0 V.

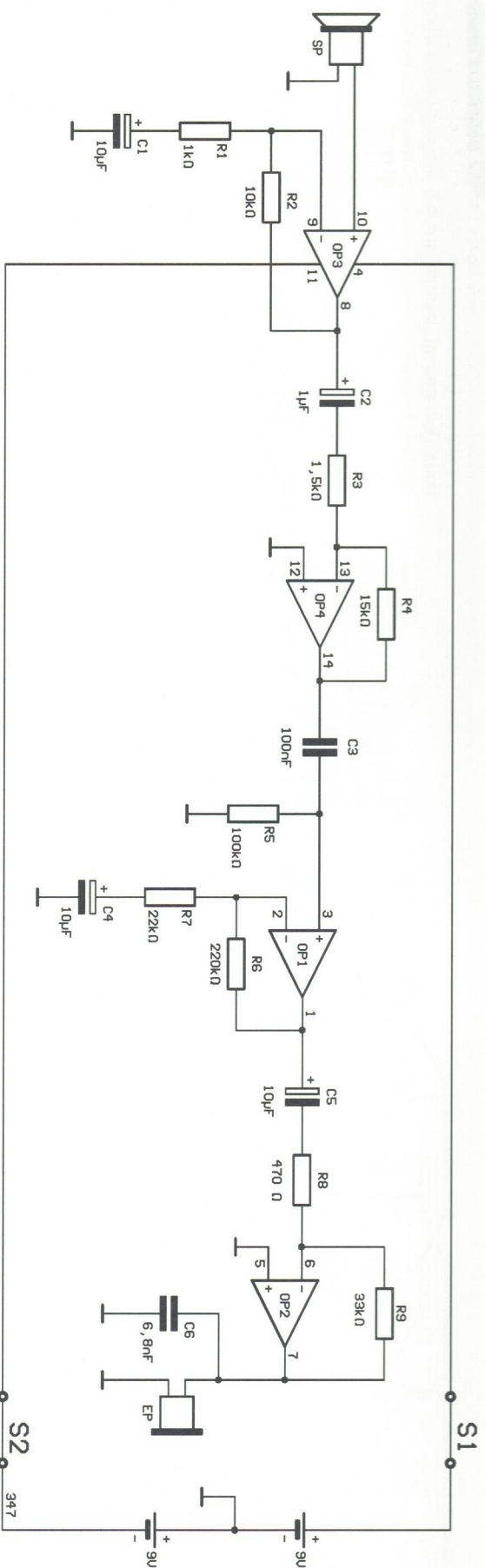


Bild 347. Ohr am Körbchen: Mehr als 85.000fach verstärkt.

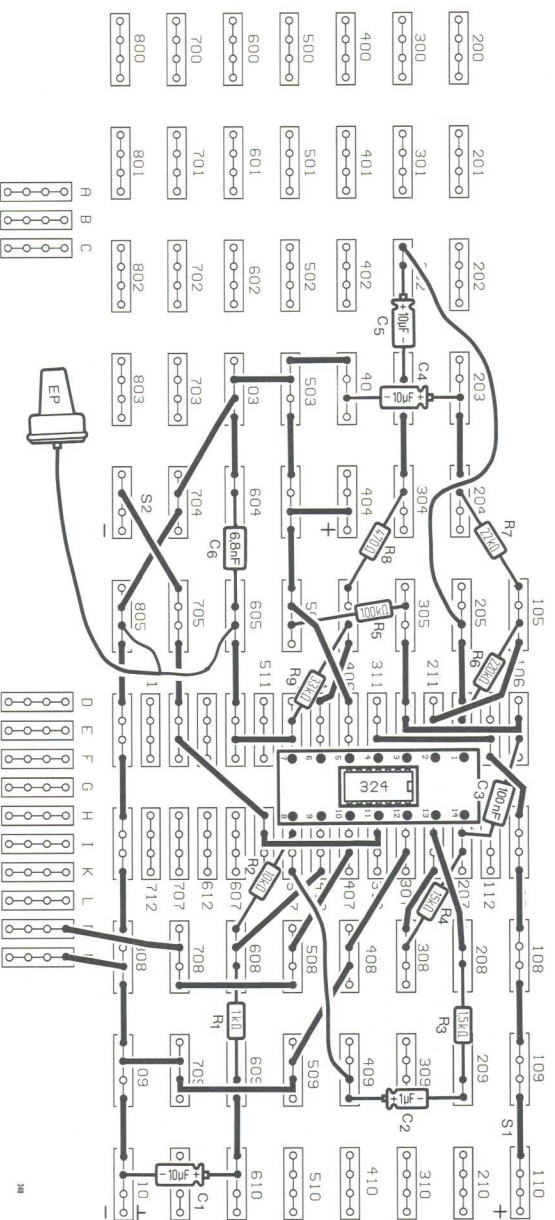


Bild 348. Aufbau zu Bild 347.



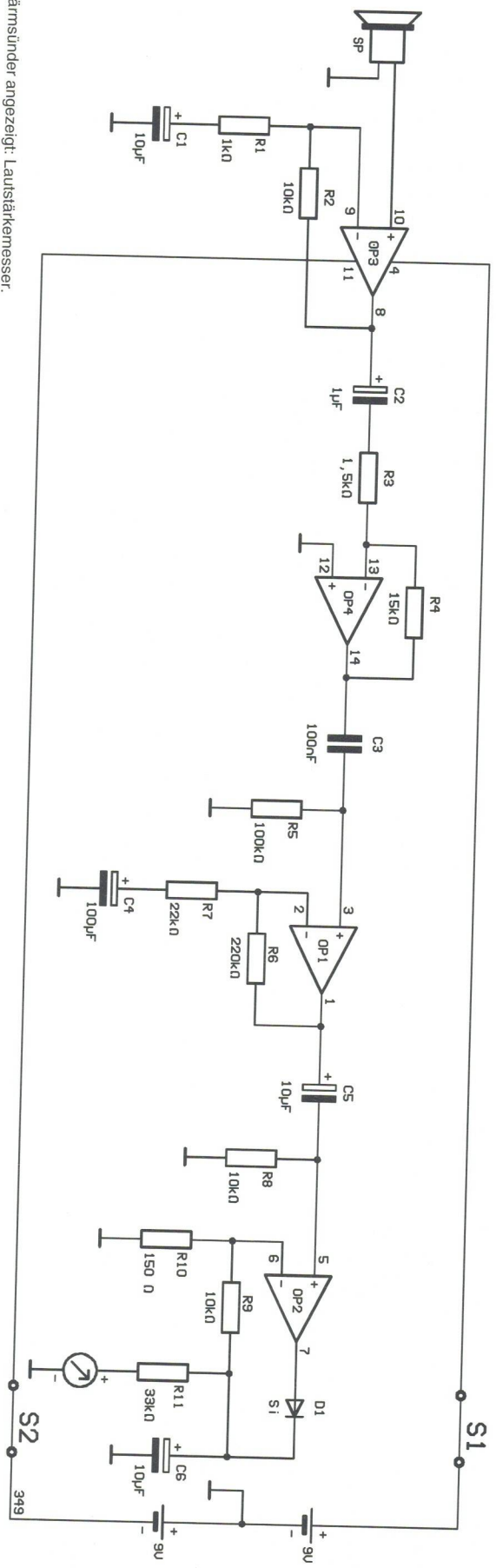


Bild 349. Lärmsünder angezeigt: Lautstärkemesser.

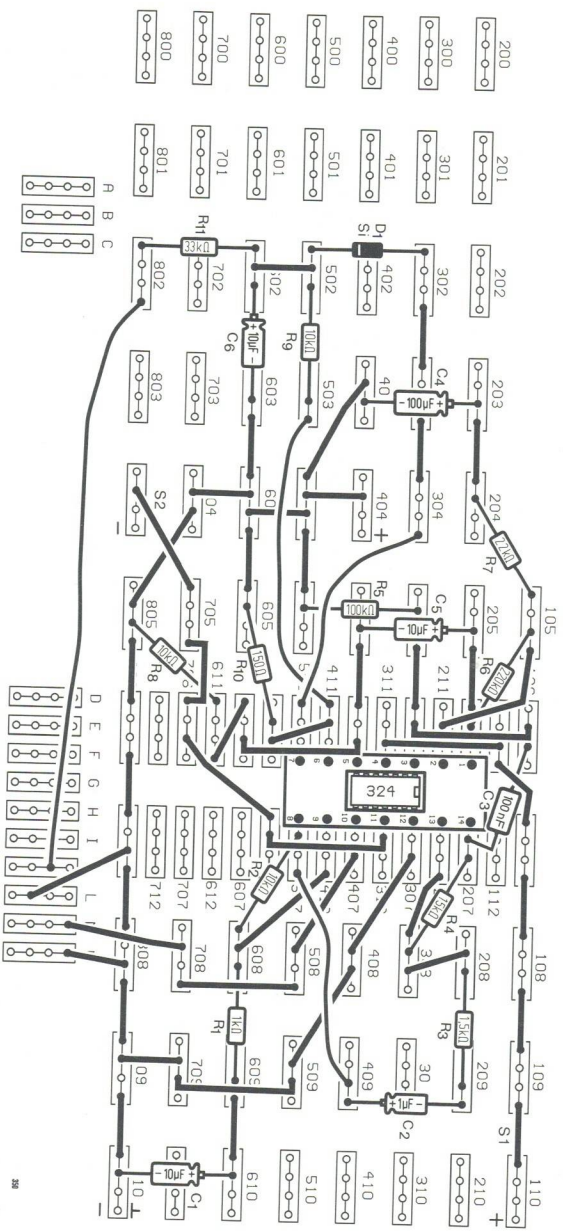


Bild 350. Aufbau zu Bild 349.

Dem Lärm auf der Spur

Babygeschrei gehört zum Leben. Lärm dagegen schädigt die Gesundheit. Ursachen lassen sich leichter bekämpfen, wenn man sie messen und vergleichen kann. Rüsten wir den Babysitter darauf um!

253

Mit der Schaltung nach Bild 349 erhalten wir im Handumdrehen einen *Lautstärkemesser*. Er besteht aus inzwischen lauter Bekanntem – von den berechenbaren Verstärkerstufen bis zum Einweg-Präzisionsgleichrichter. Also können wir uns voll auf's Messen konzentrieren und Lärmsünder mit Meßdaten überführen.

Übrigens: Sollte der Zeiger ohne Schallsignal rhythmisch ausschlagen, liegt das nicht an unserer Schaltung – die ist gut –, sondern ein stärkerer Störer in der Nähe „spuckt“ in die Schaltung. Bei uns war es z. B. eine Thyristorregelung in einem Gerät in der Nähe. Nach Abschalten des Störers war alles o. k.

26. Schaltzentrale OP

Alle Standardschaltungen, die wir kennen, lassen sich auch in OP-Technik aufbauen.

OP(A) Schmitt

Der Komparator ist eine gute Basis für Schmitt-Trigger-Eigenschaften. Für die Hysterese sorgen wir gleich.

254

Baut die Schaltung nach Bild 351 auf und dreht am Poti. LED1 und LED2 werden wechselweise leuchten. Haben wir das bei einer geschafft, muß ganz schön weit in die andere Richtung gedreht werden, damit die andere aufleuchtet – und umgekehrt. Die beiden Widerstände $R1$ und $R2$ legen die Vergleichspunkte für das Umschalten fest. Gleichgroße Werte ergeben Schalten jeweils bei der Hälfte der positiven oder negativen Sättigungsspannung. Verändert $R2$ nach kleineren Werten (z. B. $5,6\text{ k}\Omega$, $1\text{ k}\Omega$): Die Hysterese wird kleiner, erhöht ihn (z. B. $33\text{ k}\Omega$, $100\text{ k}\Omega$): Sie wird größer.

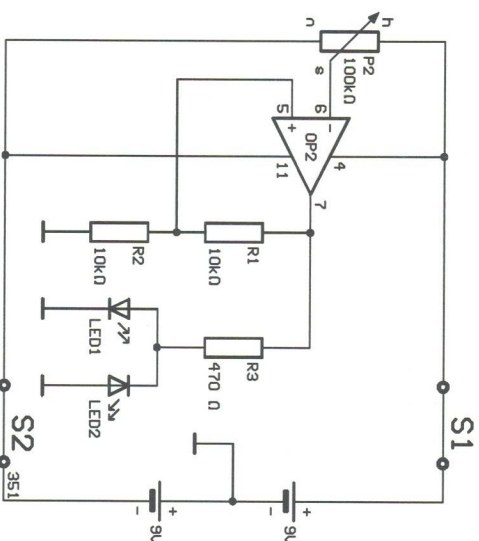


Bild 351. Auf Wunsch mit großer Hysterese: Schmitt-OP.

255

Beim Bau der Schaltung nach Bild 353 wird ein zweiter OP des Schaltkreises als Eins-Verstärker zur Trennung von Signalspannung und Schalterpunkt benutzt. Die Steuerspannung wird in den nichtinvertierenden Eingang des Triggers eingespeist. Die an P1 eingestellte Spannung ist also praktisch die Ausgangsspannung des ersten OP. Sie wird vom zweiten OP mit 0 V verglichen, denn dessen invertierender Eingang liegt an Masse. Wir stellen P2 zunächst auf Anschlag n, also Widerstand gleich Null. Gegenüber Mittellaage muß dann P1 nur wenig nach rechts oder links verstellt

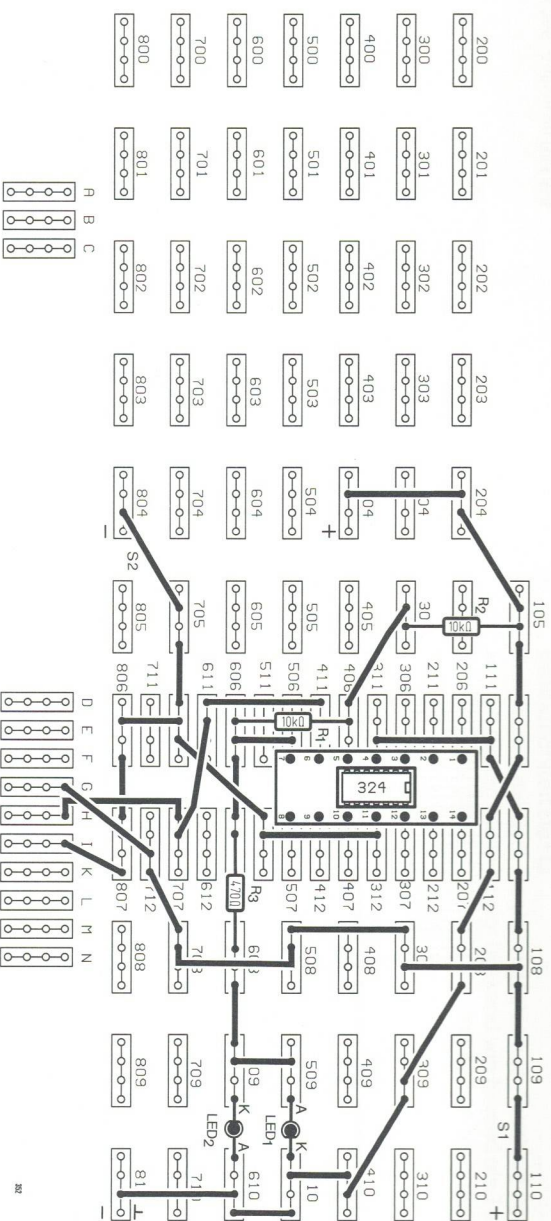


Bild 352. Aufbau zu Bild 351.

werden, damit der Ausgang des zweiten OP zwischen seinen Sättigungspunkten hin- und herschaltet, angezeigt durch die Leuchtdioden.

256

Stellt nun s von P2 auf etwa 90% (s nahe an h)! Der Umschaltpunkt, also 0 V am nichtinvertierenden Eingang des zweiten OP, wird nun nur erreicht, wenn der Ausgang des ersten eine gleichgroße, aber entgegengesetzt gepolte Spannung führt. (Die Hysterese ist jetzt also sehr groß; Zwischenwerte mit kleiner gestelltem P2.) Die eben genannte Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung erkennt Ihr an der Stellung von P1 für das Umschalten. Da sich die Sättigungsspannungen für Plus und Minus etwas unterscheiden, darf P2 nicht ganz aufgedreht werden, sonst reicht die Ausgangsspannung des ersten OP nicht mehr für beide Richtungen!

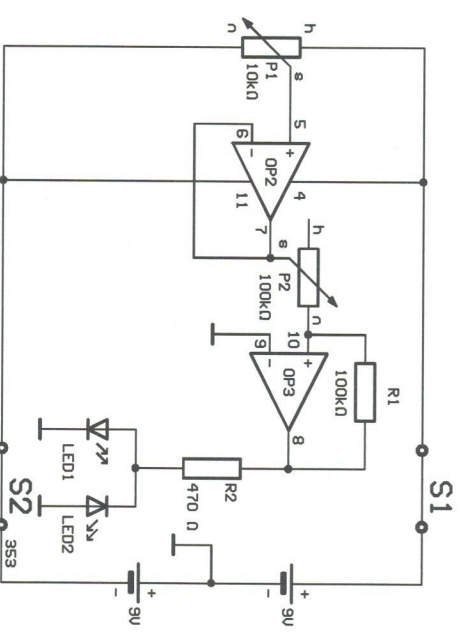


Bild 353. Trennt Ursache und Wirkung: Schmitt mit Impedanzwandler.

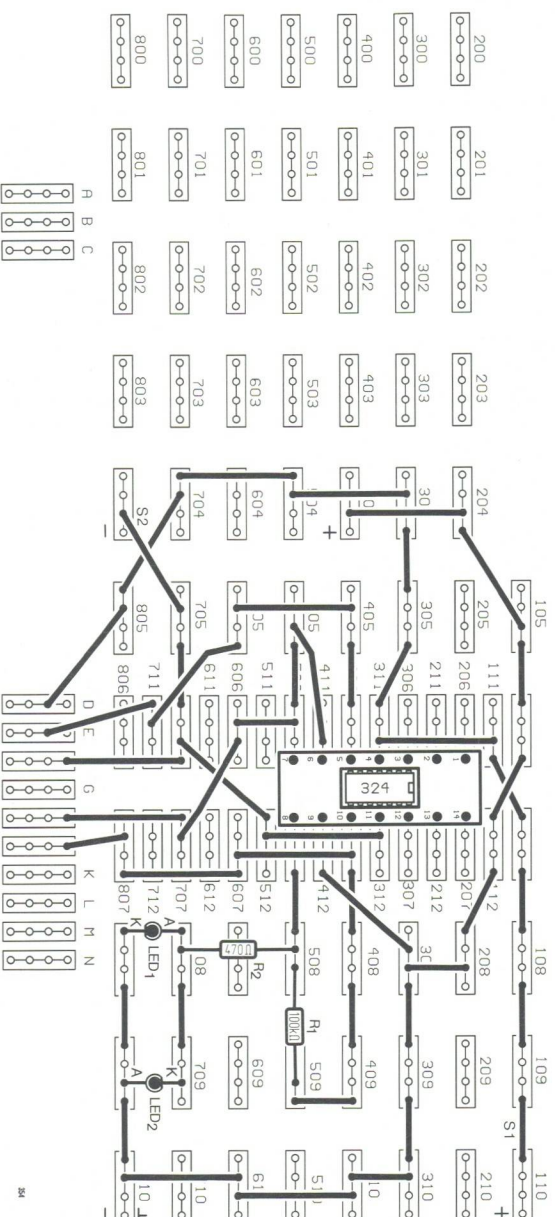


Bild 354. Aufbau zu Bild 353.

Handbetriebener AMV

Wir greifen auf Bild 351 zurück und ändern die Eingangsbildungen.

257

Nach Bild 355 wird C1 über Ta1 bzw. Ta2 mit einer Zeitkonstanten von etwa 1 s aufgeladen (100 k Ω , 10 μ F). Sobald an C1 jeweils die halbe Sättigungsspannung erreicht ist, schaltet der Ausgang in die andere Grenzlage. Weiteres Aufladen von C1 hat keinen Sinn. Also Taster loslassen. Der Elko entlädt sich danach auf Grund seines Leckstroms mehr oder weniger schnell. Aber höchstens bis 0 V, und da hat der OP noch keine Ursache zum Umschalten. Damit bleibt der Zustand erhalten. Das ändert sich erst mit dem anderen Taster. Leuchtet LED1, muß man also Ta1 drücken; bei heller LED2 zeigt nur Ta2 Wirkung, wenn etwa 2 s gedrückt wird. Über die Fragen bezüglich verpolt betriebener Elkos haben wir bereits weiter vorn nachgedacht. Also ruhig bleiben.

258

Nach Änderung im Sinne von Bild 357 können wir es der Schaltung überlassen, C1 zu laden. Wie schnell das gehen soll, wird an P2 vorgegeben. Im Interesse kleiner Elkospannung in Gegenrichtung nehmen wir das Teilerverhältnis 1:1 nur für diesen ersten Lauf. Wir stellen P2 auf Höchstwert (s an n). Die Leuchtdioden blinken nun uner-

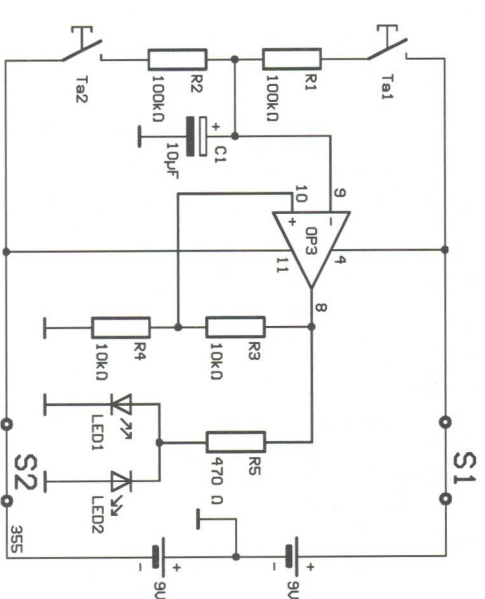


Bild 355. Handbetrieb: Auf dem Wege zum Astabilen.

müdlisch wechselweise, das übliche Verhalten eines astabilen Multivibrators. Der Lautsprecher knackt nur leise vor sich hin. Wir brauchen ihn gleich.

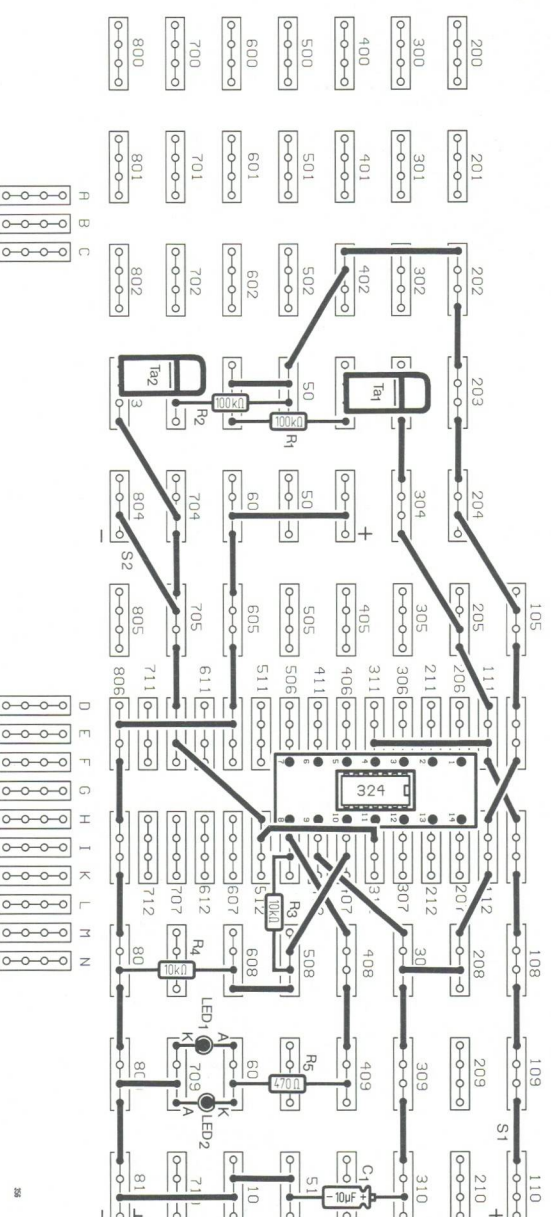


Bild 356. Aufbau zu Bild 355.

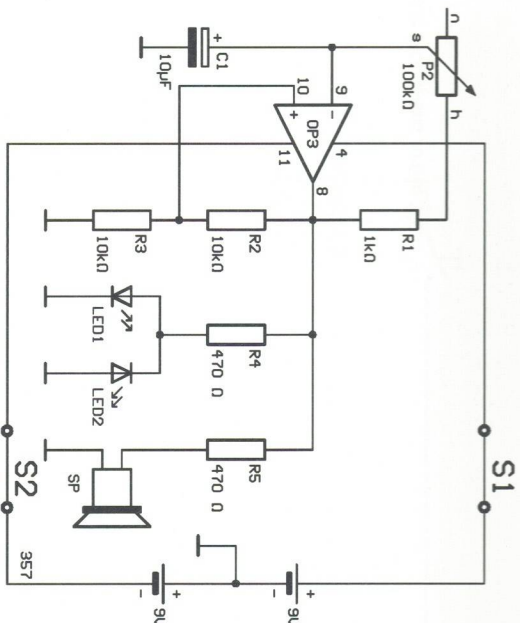
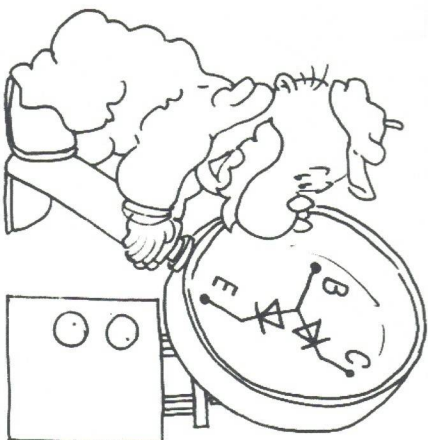


Bild 357. Aus eigener Kraft: Astabil zwischen den Sättigungspunkten.



Befindlichkeitstests

Zusammen mit dem Reaktionstester aus Abschnitt 20 benutzen wir diesen Multivibrator blinkend wie tönend als Teil einer Fitness-TUV-Station. Wichtig für Schule wie für Straßenverkehr.

259

Wir verändern in der Schaltung nach Bild 357 C1 in 100 nF und R1 in 100 kΩ. In einem nicht zu heißen Zimmer beobachten wir die Leuchtdioden und stellen P2 so ein, daß sie gerade beide ständig zu leuchten scheinen. Das tritt bei der *Flimmerverschmelzungsfrequenz* ein. Markiert den Wert am Poti nach einer ausgerufenen Nacht. Wiederholt den Test nach dem Streß des Tages. Wahrscheinlich wird P2 jetzt deutlich weiter nach n gedreht werden müssen.

260

Erneuter Wechsel: C1 wird 6,8 nF und R1 wieder 1 kΩ. Für R2 setzt ihr 22 kΩ und für R3 150 Ω ein. Dreht nun P2 von n aus so weit nach h, daß der Ton aus dem Lautsprecher gerade nicht mehr zu hören ist. Hunde und Vögel werden da anderer Meinung sein. Opa dagegen wird schon ziemlich früh nichts mehr hören. Wer ein sehr gutes Gehör hat, wird vielleicht sogar nochmals 6,8 nF zu C1 in Reihe schalten müssen. Das ist besser, als P2 bis Anschlag zu drehen, denn da könnten die Schwingungen aussetzen.

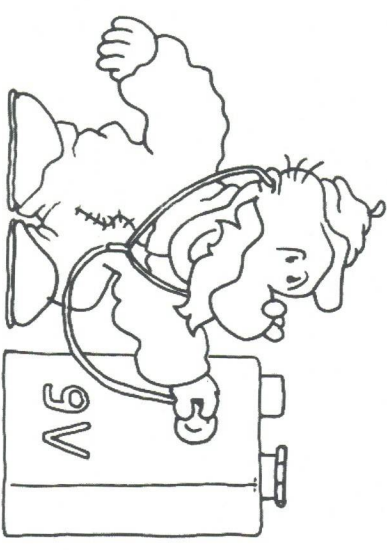
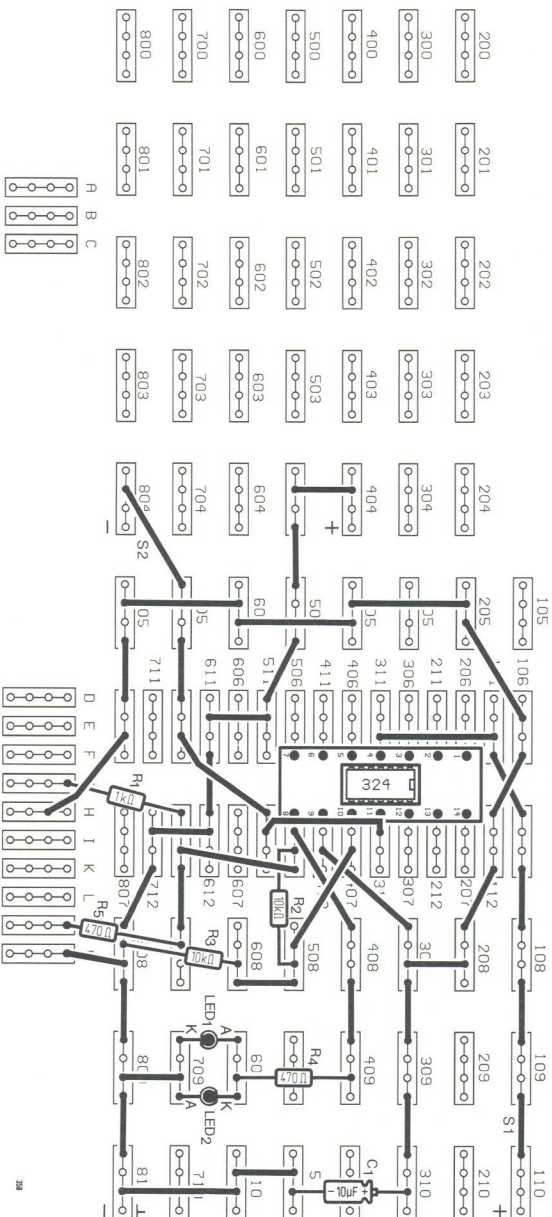


Bild 358. Aufbau zu Bild 357.

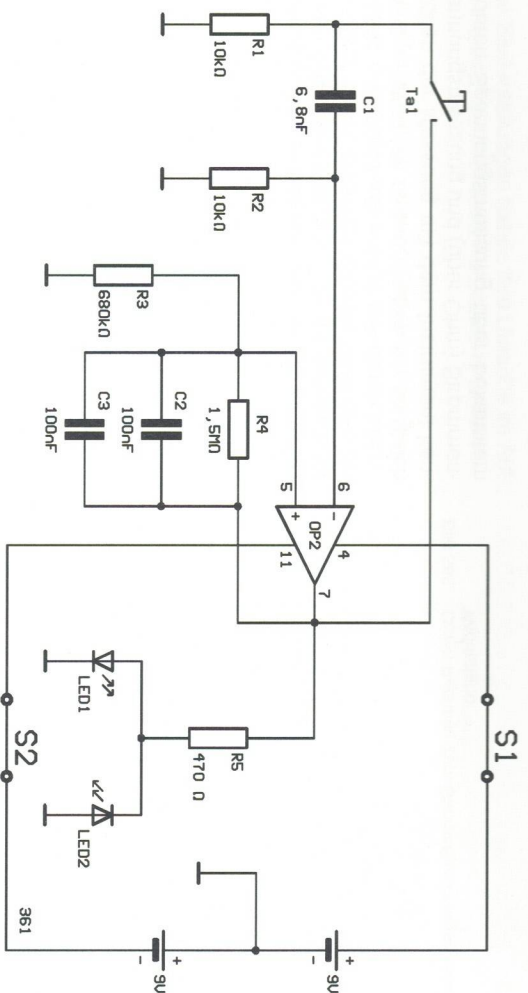


Bild 361. Einer für alles: Bistabil, von nur einem Taster gesteuert.

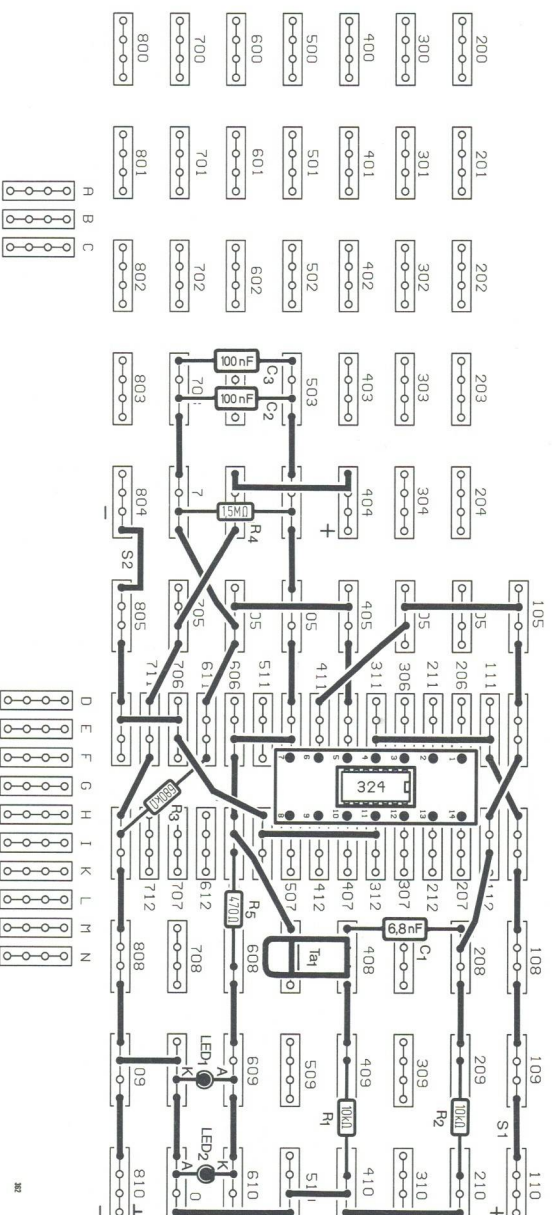


Bild 362. Aufbau zu Bild 361.

263

Fast ohne Kommentar verstehen wir nun auch das, was sich mit Bild 363 feststellen läßt: Umschalten kann man nur über den jeweils zutreffenden Taster. Leuchtet LED1, also positive Sättigung, dann Ta1 drücken, und es kippt ins Negative. Und umgekehrt. Setzen und Rücksetzen – das bekannte RS-Flip-Flop.

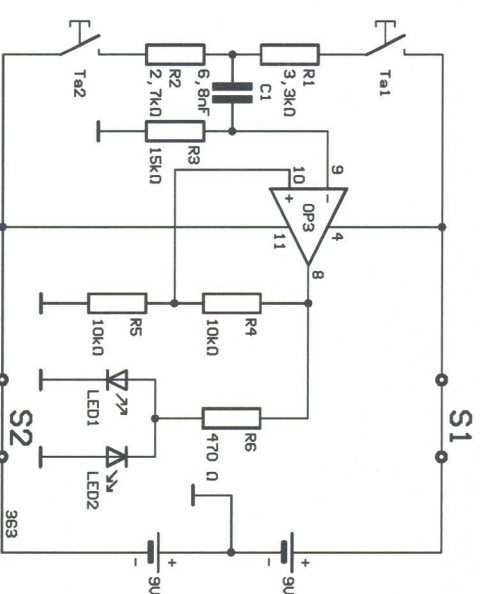


Bild 363. Arbeitsteilung: Flip-Flop mit Taster für Rücksetzen und Taster für Setzen.

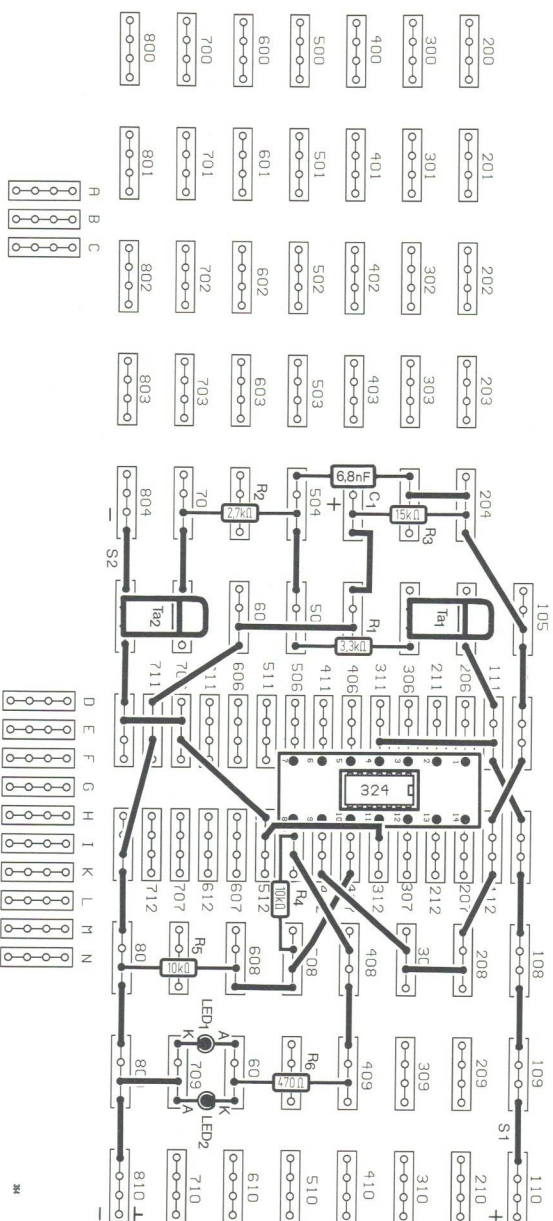


Bild 364. Aufbau zu Bild 363.

27. Die Macht des Messens

Die besten Formeln nützen wenig, wenn man sie nicht anwenden und kontrollieren kann. Darum laßt uns messen!

264

Die einfache Schaltung nach Bild 365 wird zum ersten Meßobjekt. Aber Vorsicht – unser Meßinstrument ist etwas Empfindliches. Empfindlich im Meß- wie im Belastbarkeitssinn. Daher braucht es im allgemeinen – wie die Leuchtdiode – einen Vorwiderstand. Seine Größe hängt von der Spannung ab, die zu messen ist. In Bild 365 ist das ein Widerstand R_v von 100 k Ω . Für 9-V-Betrieb ist der gerade richtig. Der Vollausschlag bedeutet dann eine Spannung von 10 V. Außerdem muß das Instrument in richtiger Polung angeschlossen werden: Plus gehört an Plus. Man sollte, wo immer es geht, mit einem Taster arbeiten, der nur bei der Messung geschlossen wird – siehe Bild 365. Dort werden wir über R_1 7 V messen. Nach dem Ohmschen Gesetz fließt also ein Strom von $I = U/R_1 = 7\text{ V}/0,47\text{ k}\Omega = 14,9\text{ mA}$ durch LED1. Das ist ein zulässiger Wert. Im Grunde haben wir so gleich beide Möglichkeiten der Messung und (über Ohm) Strommessung, indirekt durch Spannungsmessung über bekanntem Widerstand.

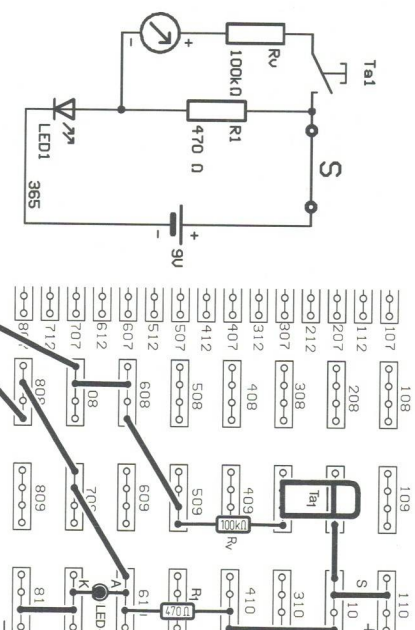


Bild 365. Durch Rechnen zum Strom: Spannungsmessung an bekanntem Widerstand.

Strom-Linien

Wo elektrischer Strom fließt, ist auch ein magnetisches Feld. Das weiß man schon seit Jahrhunderten. Die Kompaßnadel mit der Drahtspule um sie herum war wohl das Urbild der elektrischen Meßinstrumente. Heute sind sie meist umgekehrt aufgebaut, wie Bild 366 zeigt: feststehender Magnet als Kern in einer drehbar gelagerten Spule.

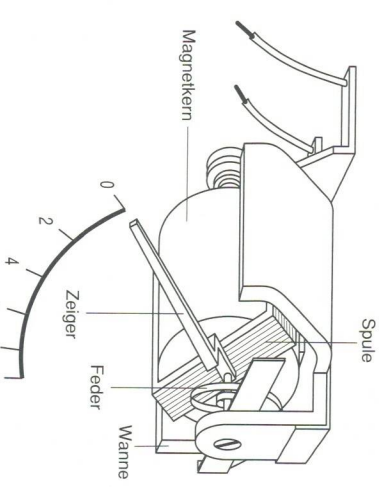


Bild 366. Drehspulmeßwerk: Magnetkern ruht, Spule bewegt sich (bei Strom).

Mit Rückstellfeder, damit etwas Meßbares aus dem Ausschlag wird: Magnetkraft gegen Federkraft. Letztlich ist es immer der beim Messen durch die Spule fließende Strom, der den Zeiger bewegt. Sein Magnetfeld tritt in Wechselwirkung mit dem des Magneten in der Spule: Gleiche Magnetpole stoßen sich ab, ungleiche ziehen sich an. Darum auch die Polungsabhängigkeit. In falscher Richtung stoppt ein Anschlag die falsche Bewegung. Bild 367 zeigt Einzelheiten.

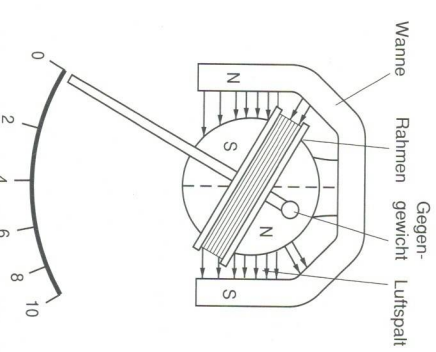


Bild 367. Wechselwirkung: Dichtes Feld – große Kraft.

Ungleichmäßige Skalenteilungen haben ihre Ursache im Aufbau. Man kann sie unterschiedlichen Aufgaben anpassen.

Maß-Stäbe

Der *Strom I für Vollausschlag* ist die wichtigste Kenngröße solcher Meßwerke. Durch die Drahtwicklung ergibt sich ein bestimmter *Innenwiderstand* R_i . Unser Meßwerk bringt es auf 1.200 Ω . Da es mit 100 μA voll ausschlägt, hat es einen *Eingangspannungsbedarf* von 120 mV. Ohne weitere Beschaltung haben wir also wahlweise ein *Amperemeter* mit 100 μA Vollausschlag und 120 mV Eigenspannungsbedarf vor uns oder ein *Voltmeter* für 120 mV, das für Vollausschlag 100 μA benötigt. Diesen Strom entnimmt es den Punkten, an denen es die Spannung mißt. Bei großen Widerständen in der gemessenen Schaltung verändert es also die Verhältnisse merklich. Über diese Meßfehler werden wir noch nachdenken. Techniker rechnen oft mit dem Quotienten aus Innenwiderstand und Spannung für Vollausschlag. Bei uns kommen 1,2 $k\Omega/0,12 V = 10 k\Omega/V$ heraus. Das erleichtert die Berechnung von Vorwiderständen für Spannungsmessbereiche (Bild 368): Für 10 V muß das „Gerät“ mit $10 V \cdot 10 k\Omega/V = 100 k\Omega$ versehen werden. Für Genauigkeistanalysen sind das genau 98,8 $k\Omega$ Vorwiderstand, denn 1,2 $k\Omega$ hat das Meßwerk selbst. Den Unterschied zu 100 $k\Omega$ merkt jedoch kein Mensch.

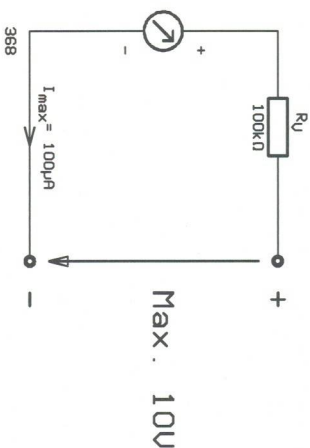


Bild 368. Anpassung: Strombedarf bestimmt den Vorwiderstand des Voltmeters.

265

Mit 1,2 Ω parallel zum Meßwerk bauen wir uns einen Strommesser und setzen ihn in der Schaltung nach Bild 369 ein. Angelsachsen nennen den Parallelwiderstand *Shunt*. Er leitet im Stromkreis alles am Instrument vorbei, was dieses nicht aufnehmen kann. 120 mV für Vollausschlag kommen zustande, wenn 100 mA durch den Shunt fließen:

$$1,2 \Omega \cdot 100 \text{ mA} = 120 \text{ mV}.$$

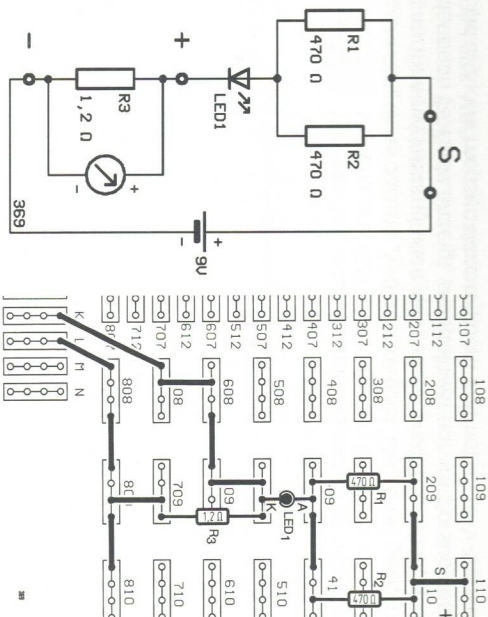


Bild 369. Umleitung: Shunt – Entlastungsstraße für überschüssigen Strom beim Amperemeter.

Wir stellen fest: Kennt man Innenwiderstand und Strom für Vollausschlag, läßt sich das Instrument allen Aufgaben anpassen, sowohl Spannungs- wie Strommessungen. Darauf beziehen sich die folgenden praktischen Anwendungen.

266

Mit 15 $k\Omega$ und 22 $k\Omega$ parallel (Bild 370) erhält man ein Voltmeter mit 1 V Vollausschlag. Die in Bild 370 enthaltene praktische Anwendung besteht im Messen

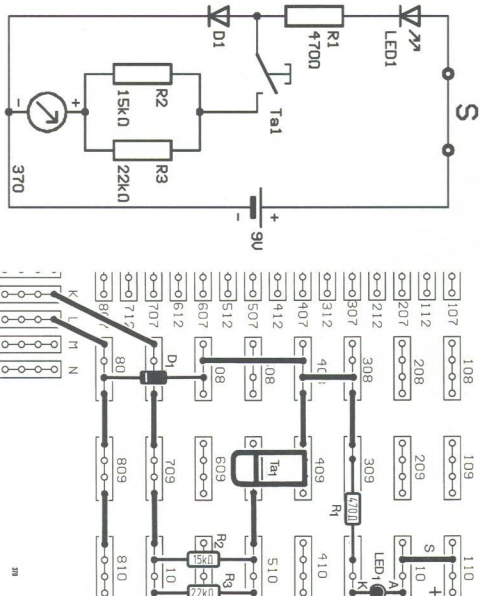


Bild 370. Spannungsmessung für Diodenkennlinien: Voltmeter für 1 V Vollausschlag; für R_1 Werte von 470 Ω bis 10 $k\Omega$ einsetzen.

der Flußspannungen von Ge- und Si-Dioden. **Taster stets erst drücken, wenn Diode richtig herum in den Federn steckt!** LED1 zeigt uns das an – bei Werten für R_1 über 3,3 $k\Omega$ allerdings relativ schwach.

267

Wir setzen für R_1 größere Werte ein (1 $k\Omega$, 1,5 $k\Omega$, 2,7 $k\Omega$, 3,3 $k\Omega$ und 5,6 $k\Omega$) und notieren die Ausschläge. Sie werden mit wachsendem R_1 deutlich kleiner!

268

Gemäß Bild 371 rüsten wir auf Strommessung um. Bei $R_1 = 470 \Omega$ brauchen wir $R_2 = 1,2 \Omega$ als Shunt (Bereich 100 mA), ab 1 $k\Omega$ für R_1 wird's besser ablesbar mit 12 Ω statt 1,2 Ω (Bereich 10 mA; R_2 ziehen, Brücken X_1 und X_2 stecken). Zieht man Brücke X_2 , ergibt sich der Bereich 1 mA, günstig für die ganz kleinen Stromwerte.

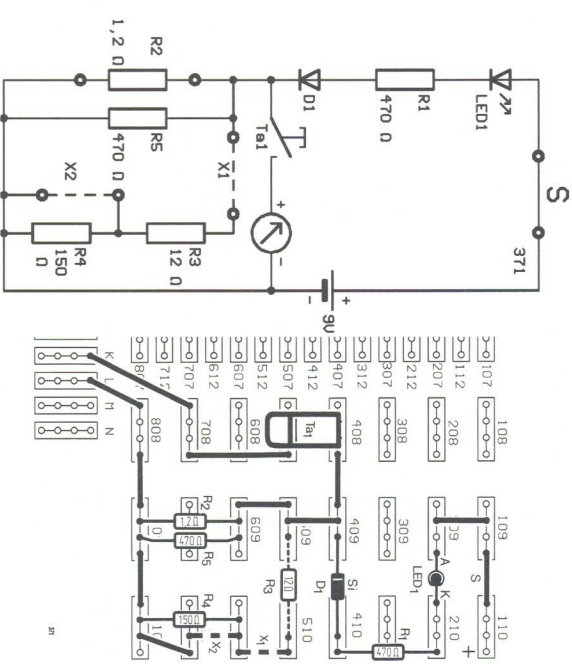


Bild 371. Der Strom zur Spannung: Kennlinienmessung Teil 2. R_1 wie bei Bild 370, Meßwiderstand nach Strom wählen (Startwert $R_2 = 1,2 \Omega$ für Vollausschlag 100 mA).

Wir können die so ermittelten Wertepaare auf Karopapier in ein Koordinatennetz eintragen, Strom über Spannung. Das Ergebnis der Mühen für Ge- und Si-Diode zeigt Bild 372. Das sind *Kennlinien* der beiden Diodentypen in Flußrichtung.

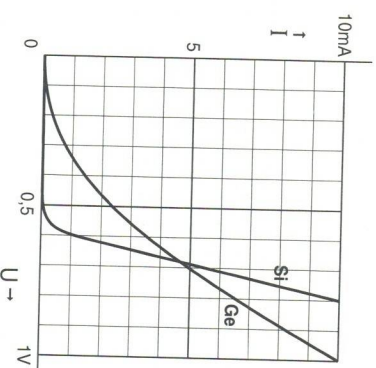


Bild 372. Macht Dioden „durchsichtig“: Strom-Spannungs-Kennlinien in Durchlaßrichtung für Ge- und Si-Dioden.

Solche Darstellungen sind neben den *Datenblättern* wichtige Hilfsmittel für den Techniker. Es gibt sie für alle Bauelemente.

269

Mit der Meßschaltung nach Bild 373 werden wir nun endlich ermitteln, mit welchen Flußspannungen unsere Leuchtdioden und die IR-LED aufwarten. Auch dafür könnte man Kennlinien aufnehmen. Doch schon „Einkpunkt-Messungen“ bei einem üblichen Einstrom sagen im Vergleich genügend aus. Große Unterschiede zwischen den drei Farben werden wir wohl nicht feststellen. Es gibt allerdings rote Typen mit deutlich kleinerer Flußspannung.

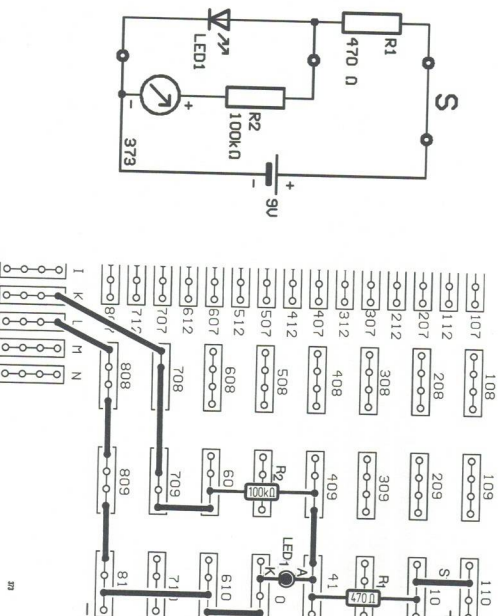


Bild 373. Leuchtdioden brauchen mehr Spannung: Messung der farbabhängigen Flußspannung (Vollausschlag 10V).

Ziemlich tief liegt auch die Infrarot-Leuchtdiode. Den Wert verraten wir diesmal nicht – meßt selbst!

Eigenbedarf unerwünscht

Oberflächlich gesehen ist das folgende Experiment klar. Doch es hat Probleme.

270

Nach Bild 374 wollen wir eine ganz einfache Messung ausführen. Da wir die Widerstandswerte kennen, wissen wir, welche Spannungen über den Widerständen R_1 und R_2 abfallen: $U_1 = 6,2 \text{ V}$ bzw. $U_2 = 2,8 \text{ V}$. Nicht aber, wenn wir sie messen wollen! Wir messen über R_1 , wir messen über R_2 (Brücken X_1 und X_2 jeweils eine Reihe tiefer einstecken) – jedesmal kommt zu wenig heraus. Das ist die rauhe Praxis. Das Meßinstrument verursacht nämlich eine nicht zu vernachlässigende Belastung. Da die Teilwiderstände mit $220 \text{ k}\Omega$ bzw. $100 \text{ k}\Omega$ in der Größenordnung des Innenwiderstandes ($100 \text{ k}\Omega$) des Voltmeters liegen, werden sie bei der Messung (durch den parallelgeschalteten Innenwiderstand) stark reduziert. Dadurch ist die gemessene Spannung auch geringer als die berechnete.

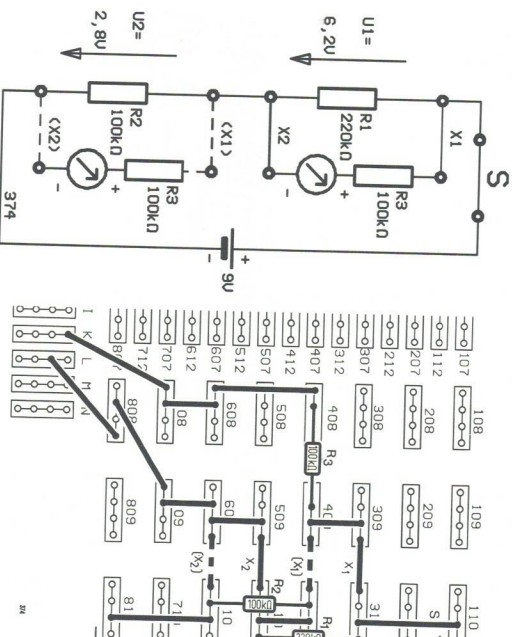


Bild 374. Verblüffend für Anfänger: Starke Abweichungen der Meßwerte von der Spannungsteilerrechnung.

271

Wir wenden diese Erkenntnisse nun auf eine alte Batterie an. $100 \mu\text{A}$ kann man ihr sicherlich noch zumuten, ohne daß sie „in die Knie“ geht. Den groß gewordenen Innenwiderstand, den man nicht greifen kann und der dennoch ihr Ende anzeigt, ermitteln wir nun im Versuch nach Bild 375. Wir messen dazu mit dem Voltmeter (10-V -Bereich)

die Batteriespannung zuerst ohne Belastung (U_0 , Leerlaufspannung). Dann belasten wir nacheinander mit $R_a = 1 \text{ k}\Omega$, 470Ω usw. bis herunter zu 12Ω (kurzzeitig). In dieser Reihenfolge wird eine immer kleinere Spannung angezeigt. Vielleicht treffen wir dabei zufällig auf einen Lastwiderstand, bei dem die halbe Leerlaufspannung auftritt. Das wäre dann genau der Wert des „Unsichtbaren“. Spannungsteilung $1:1$. Aber auch mit anderen Werten des Lastwiderstands R_a und der angezeigten Spannung U_a kann er ermittelt werden: $R_i = R_a(U_0 - U_a)/U_a$. Wer will, kann sich das leicht ableiten.

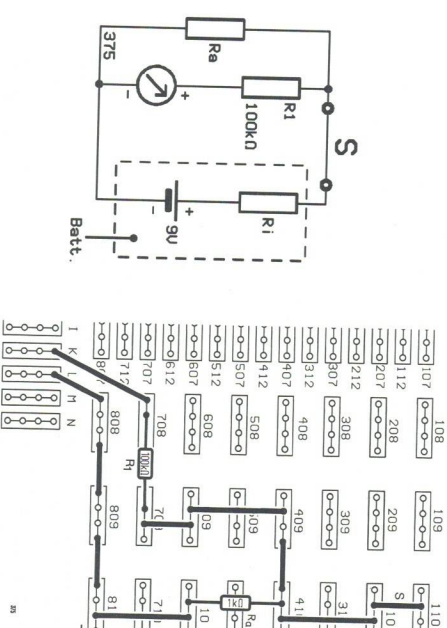


Bild 375. Geschrunppte Spannung: Dem Innenwiderstand auf der Spur.

Rettender OP

Kleiner Ausgangswiderstand und nur vom Ableitwiderstand für den Eingangsstrom bedingter (hoher) Eingangswiderstand – wer war das? Richtig – ein nichtinvertierender OP. Wichtig ist der hohe Eingangswiderstand. Verstärken muß er nicht. Also nehmen wir den Eins-Verstärker. Ergebnis:

272

Wir bauen uns im Handumdrehen nach Bild 376 eine die Brücke X. Die Diode schützt vor Falschpolung am Eingang. Die höchste mögliche Ausgangsspannung ist daher auf die Sättigungsspannung in positiver Richtung minus Diodenflußspannung begrenzt. Also nicht wundern, daß dadurch 9 V nicht angezeigt werden! Und nun die Probe am Teiler nach Bild 374 (Brücke X einsetzen): Das Meßergebnis dürfte jetzt nahe am Rechenwert für den unbelasteten Teiler liegen. Der Eingangswiderstand unseres Voltmeters ist jetzt nämlich rund $15 \text{ M}\Omega$ so groß wie bei Experiment 270.

Verstärkung mit Kompromiß

Kleinere Spannungen zu messen ist kein Problem. Der OP kann ja verstärken. Dann wirken allerdings auch seine Unvollkommenheiten stärker. Das merken wir gleich.

273

Wir ändern $V = 1$ in $V \approx 10$ (Bild 378). „Ungefähr“, weil das Poti mitzählt. Doch es geht nur ums Prinzip. Zunächst legen wir aber $R1$ an Masse ($Y1$ rein, $Y2$ raus) statt an $P1$. Wir ziehen die Diode $D1$ heraus und das Meßgerät schlägt aus, obwohl das nicht sein dürfte. Doch ein wenig „schief“ ist jeder OP im Innern. Am hochohmigen Ableitwiderstand $R3$ erzeugt der Eingangssteuerstrom, der sogenannte *Biasstrom*, eine Spannung. Sie wird nun 10fach verstärkt. Diese Anzeige läßt sich mit $P1$ beseitigen, an dessen Schleifer wir jetzt $R1$ anschließen ($Y1$ raus, $Y2$ rein). $P1$ muß nur wenig aus der Mittelstellung gedreht werden. Nach dem Nullabgleich und Einsetzen von $D1$ ist das Voltmeter einsatzbereit.

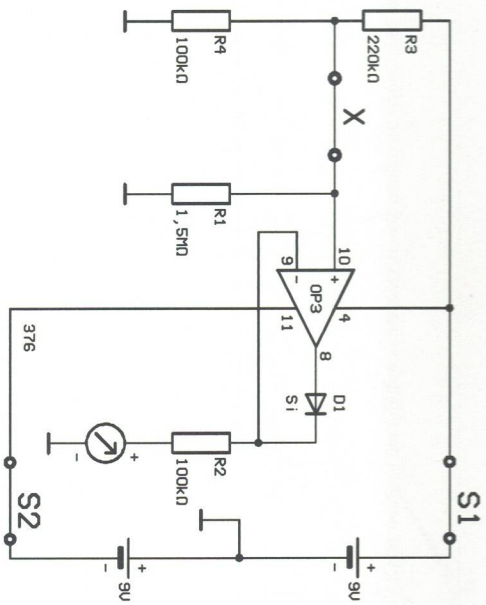


Bild 376. Genügsam und gegen Verpölung geschützt: OP hilft Spannung messen.

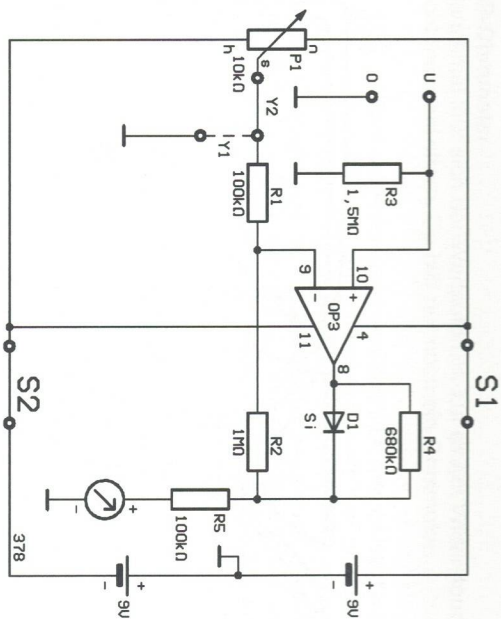


Bild 378. Verstärkung mit Kompromiß: Abgleich der eingangsstrombedingten Fehlerspannung.

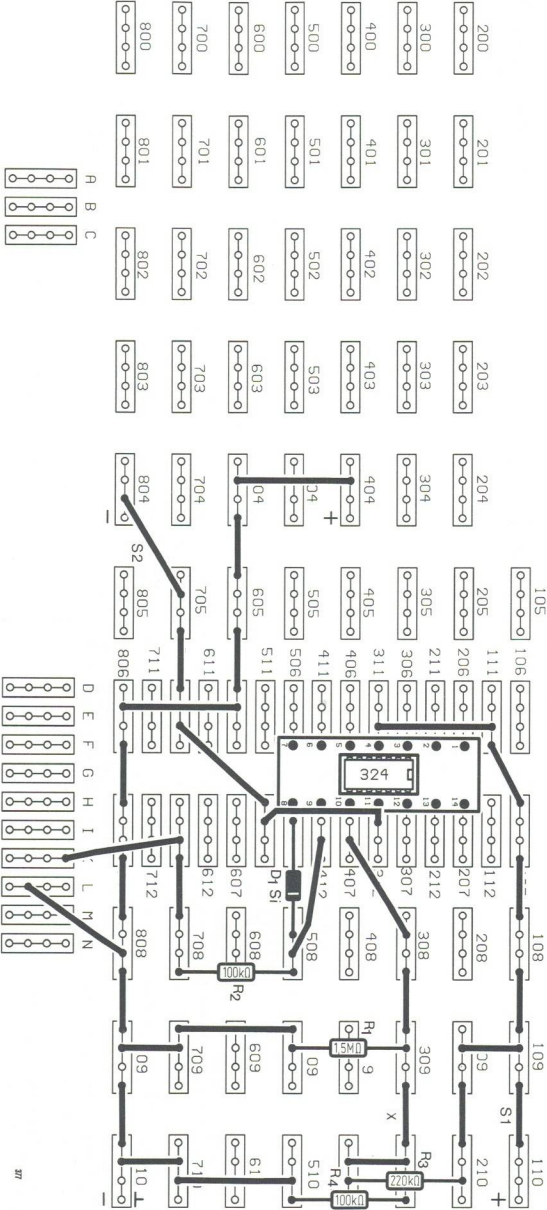
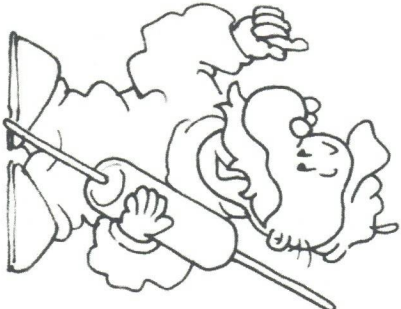


Bild 377. Aufbau zu Bild 376.



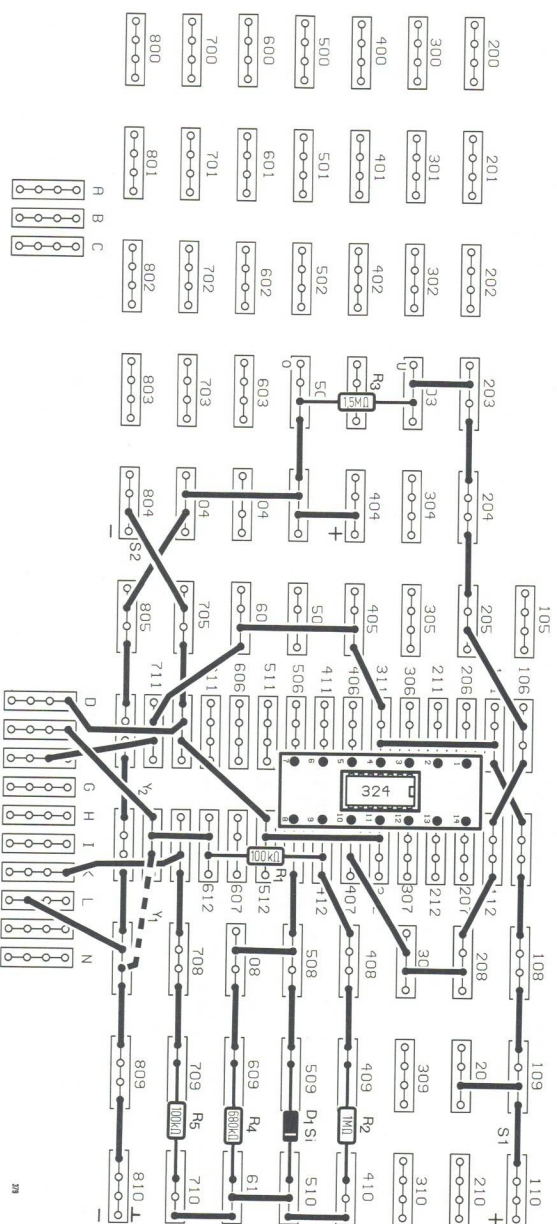


Bild 379. Aufbau zu Bild 378.

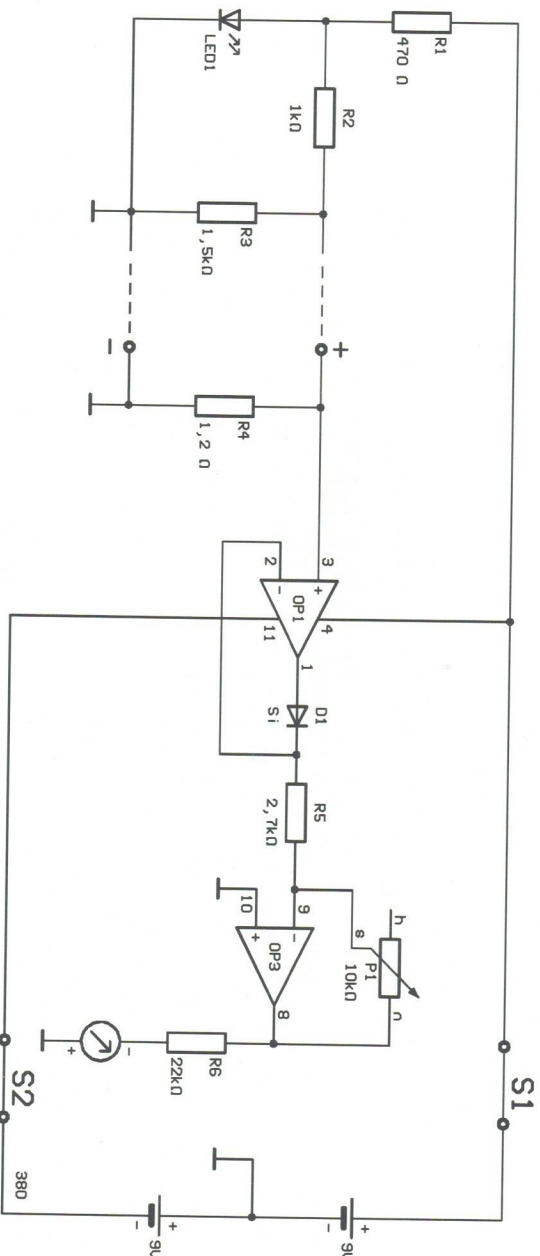
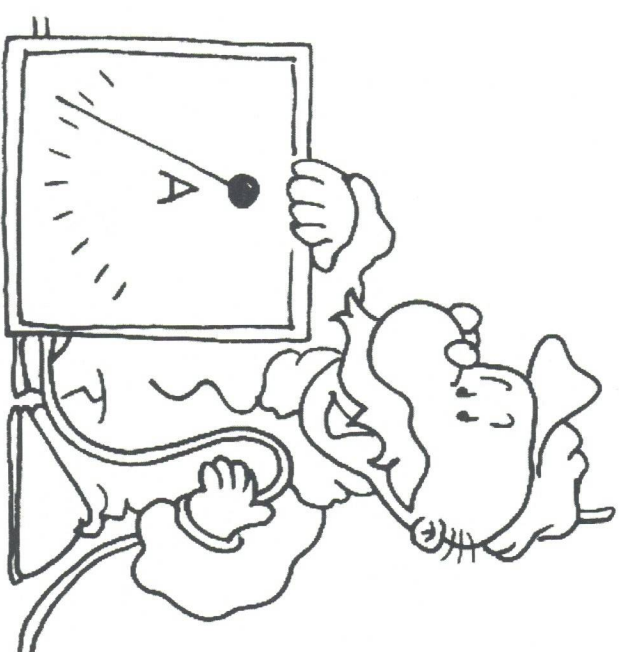


Bild 380. Gegen Verpolung geschütztes Amperemeter mit Kalibriermöglichkeit: Stabile Spannung von 1,2 V simuliert Strom von 1 A.

274

Die Schaltung nach Bild 380 trennt Meßzweig und Anzeige, schützt das Instrument vor Falschpolung und erlaubt über P1 freie Bereichswahl ohne Wechseln des „Stromfühlers“ R4. Und – wir können sie mit der Hilfschaltung links im Bild auf den Meßbereich 1 A (Endwert) abgleichen, ohne daß 1 A fließen muß. Wir ziehen dazu R4 und schließen die gestrichelten Verbindungen. Damit kommt eine Spannung von 1,2 V an die Schaltung, so viel, wie 1 A über R4 erzeugen würde.



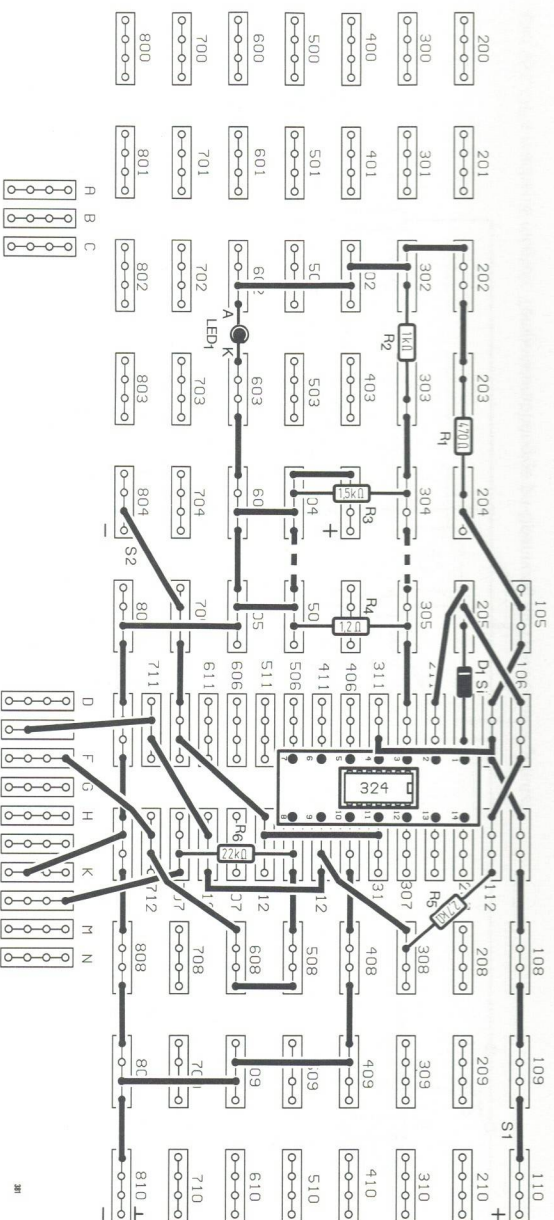


Bild 381. Aufbau zu Bild 380.

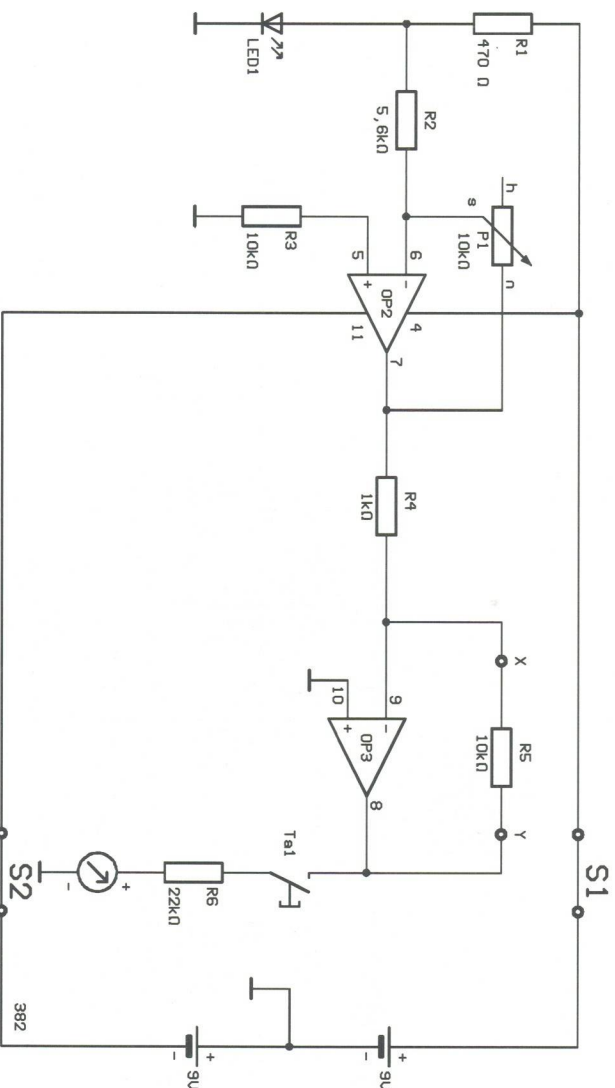


Bild 382. Entartete Widerstände: Invertierender Verstärker als Ohmmeter. Meßbereiche siehe Tabelle.

OP-Ohmmeter

Manchmal läßt sich der Wertaufdruck auf einem Widerstand nicht mehr entziffern. Da hilft nur noch ein Ohmmeter.

275

Baut die Schaltung nach Bild 382, und ihr habt es. Der „Prüfling“ wird zwischen X und Y in den Gegenkopplungszweig eines invertierenden Verstärkers eingesetzt. Den gleicht man vorher mit einem bekannten Widerstand der erforderlichen Größe auf Vollausschlag für einen der vier vorgeschlagenen Bereiche ab. Die folgende Tabelle zeigt die Zuordnungen.

R4 (Bereich)	Prüfling R5 bis
100 Ω	1 kΩ
1 kΩ	10 kΩ
10 kΩ	100 kΩ
100 kΩ	1 MΩ

Die wirksame Verstärkung von maximal 10 wird also durch den Prüfling bestimmt. Das Meßinstrument mit Vorwiderstand und die an LED1 erzeugte Konstanzspannung sind mit Hilfe der Verstärkung des ersten OP leicht anzupassen. Beispiel: $R4 = 1 \text{ k}\Omega$, $R5 = 10 \text{ k}\Omega$ (später hier den Prüfling einsetzen), P1 auf Mitte, Ta1 drücken und an P1 auf Vollausschlag des Meßinstruments korrigieren. Das war schon alles. Es darf gemessen werden!

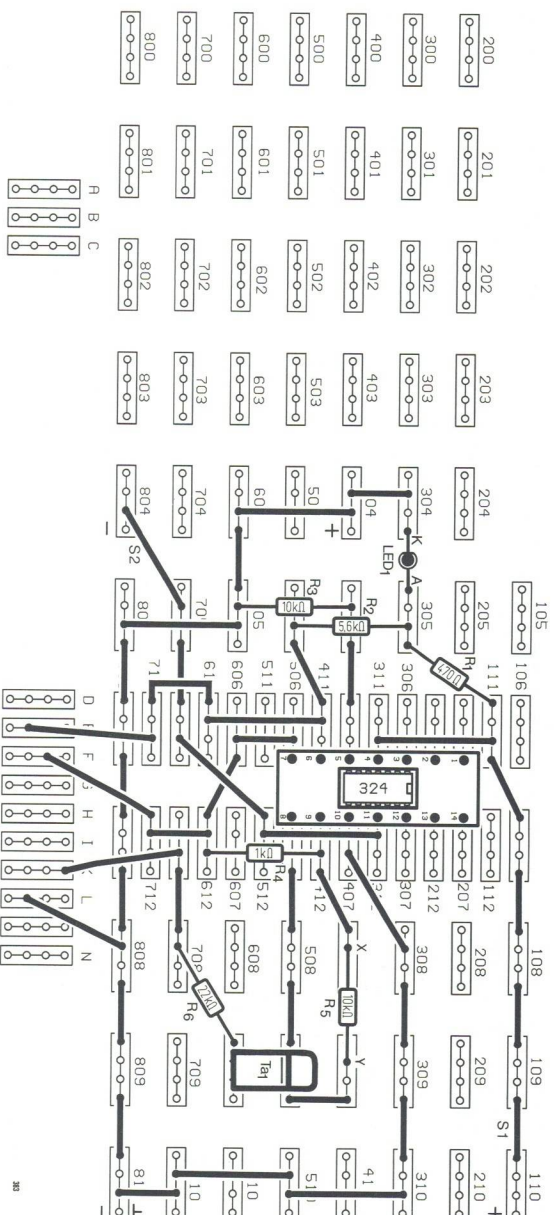


Bild 383. Aufbau zu Bild 382.

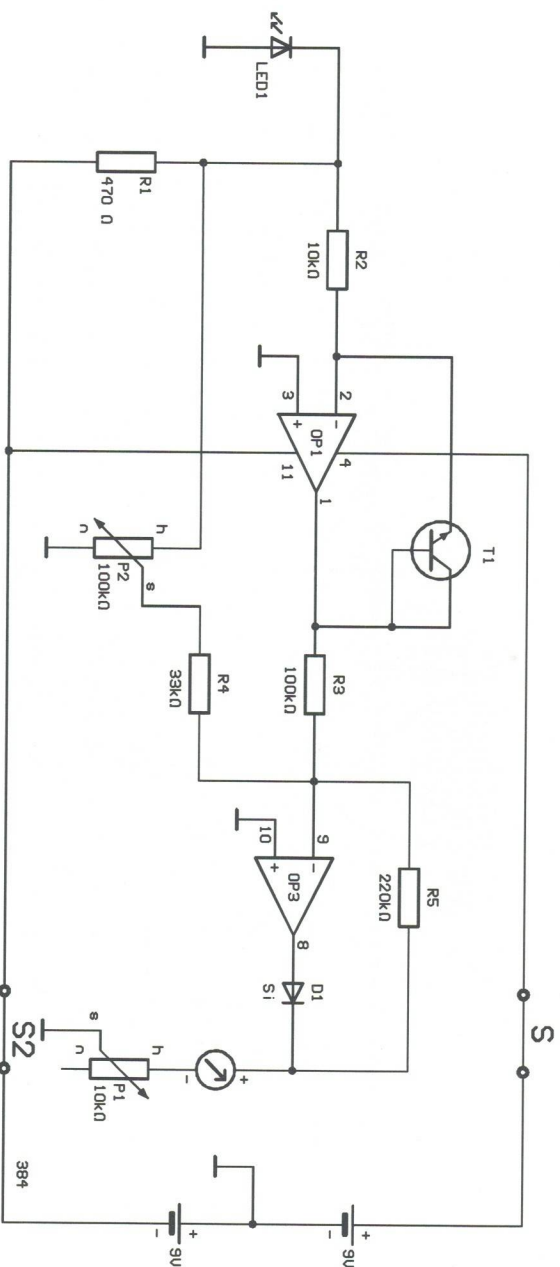


Bild 384. OP's machen's möglich: Temperaturabhängige pn-Spannung für Thermometer genutzt.

Thermometer für Umweltengel

Ohne Quecksilber geht es mit einem pn-Übergang. Rechnen wir mit 2,4 mV/K. Das ist die von der Temperatur bedingte Änderung der Spannung an einem pn-Übergang bei Konstantstromspeisung mit 200 μ A. Die Basis-Emitter-Spannung eines Si-Transistors aus unserem Experimentierkasten liegt bei 0 °C etwa bei 630 mV. Bei 100 °C dürften es noch rund 390 mV sein.

276

Laßt uns damit nach Bild 384 ein Thermometer bauen! Ein wasserdichter Plastikbeutel mit schmelzenden Eiswürfeln liefert die Null-Grad-Referenz. Voreinstellungen: P2 auf etwa 10 % über Anschlag n, P1 auf 50 %. Ist T1 auf Schmelzwassertemperatur, Zeiger mit P2 auf Null stellen. Danach bei beliebiger höherer Temperatur unter 100 °C im Vergleich mit normalem Thermometer an P1 zutreffenden Ausschlag einstellen.

Zum Prinzip: 2 V von LED1 ergeben 200 μ A durch R2. Dieser Strom fließt auch vom Ausgang durch T1 und ergibt zwischen Ausgang und Knoten am invertierenden Eingang die temperaturabhängige Spannung – z. B. 630 mV bei 0 °C. Ohne den Zweig mit R4 wird diese Spannung durch den zweiten OP wegen R5/R3 rund 2,2fach verstärkt, also auf etwa 1,4 V. Stellt man jedoch an P2 eine solche Spannung an R4 ein, daß bei 0 °C genau der von R3 in den Knoten am invertierenden Eingang fließende Strom wieder abgeleitet wird, wird der Ausgang hinter D1 auf 0 V gehalten. (Polarität an P2 ist ja negativ, an R3 positiv.) Mit steigender Temperatur sinkt der Strom von R3 her. Zum (konstanten) Strom von R4 entsteht eine mit der Temperatur wachsende Differenz, und die Ausgangsspannung steigt. (Jetzt muß der Ausgang über R5 den von R3 „fehlenden“ Strom in den Knoten liefern.)

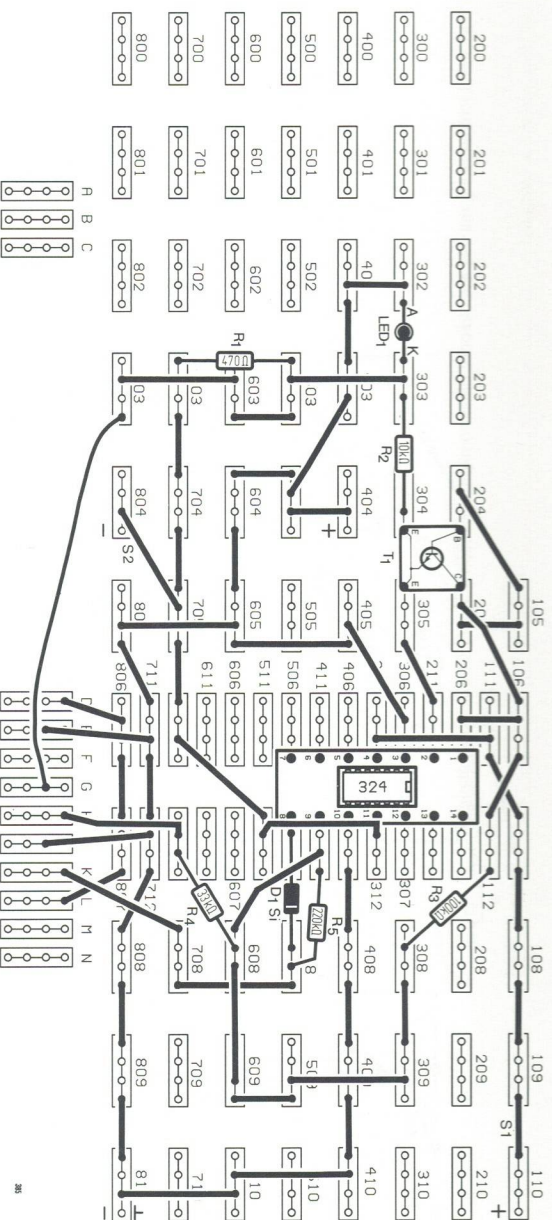


Bild 385. Aufbau zu Bild 384.

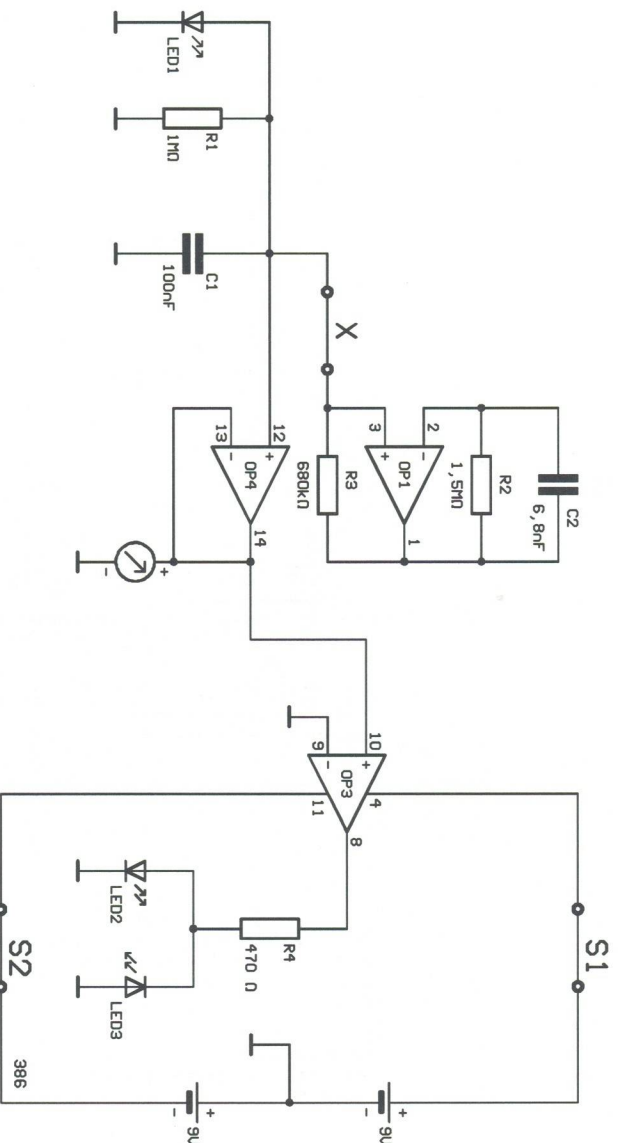


Bild 386. Empfindlicher durch Kompensation: OP leitet von der Meßsonde unerwünschten OP-Eingangsstrom (Biasstrom) ab.

Eine feine Sache

Die vier OP-Elemente auf unserem Schaltkreis-Chip dürften nahezu gleiche Eigenschaften haben, also auch fast gleiche Biasströme aus den Eingängen heraus. 50 nA (Nanoampere, Milliardstel Ampere!) sind schon ein hoher Wert für sie. Das gibt an 1 M Ω immerhin 50 mV Spannungsabfall. In der Schaltung nach Bild 386 geht es aber um ähnlich kleine Signalspannungen. Der Eingangsstrom stört also merklich. Ein Trick kompensiert seine Wirkung.

277

Wir setzen dazu die Testschaltung nach Bild 386 zusammen. Die Verbindung X bleibt zunächst offen, das Meßinstrument schlägt aus. Nun Brücke X einsetzen: Der Ausschlag geht stark zurück. Im besten Fall steht der Zeiger jetzt auf 0. Und so funktioniert das:

Der obere OP wird zur Kompensation benutzt. Wegen des Verhältnisses der Werte von R2 und R3 muß der Strom durch R3 etwa doppelt so groß sein wie der durch R2. Damit hat dem oberen OP der Biasstrom des unteren gerade noch gefehlt. In den Knoten, der von den beiden nichtinvertierenden Eingängen und R3 gebildet wird, fließen aus den Eingängen Ströme, die ziemlich genau die Größe des Stromes durch R3 haben – die Signalquelle ist davon entlastet. Die rechte Seite der Testschaltung ist übrigens nur ein empfindlicher „Zusatzindikator“ der bekannten Art.

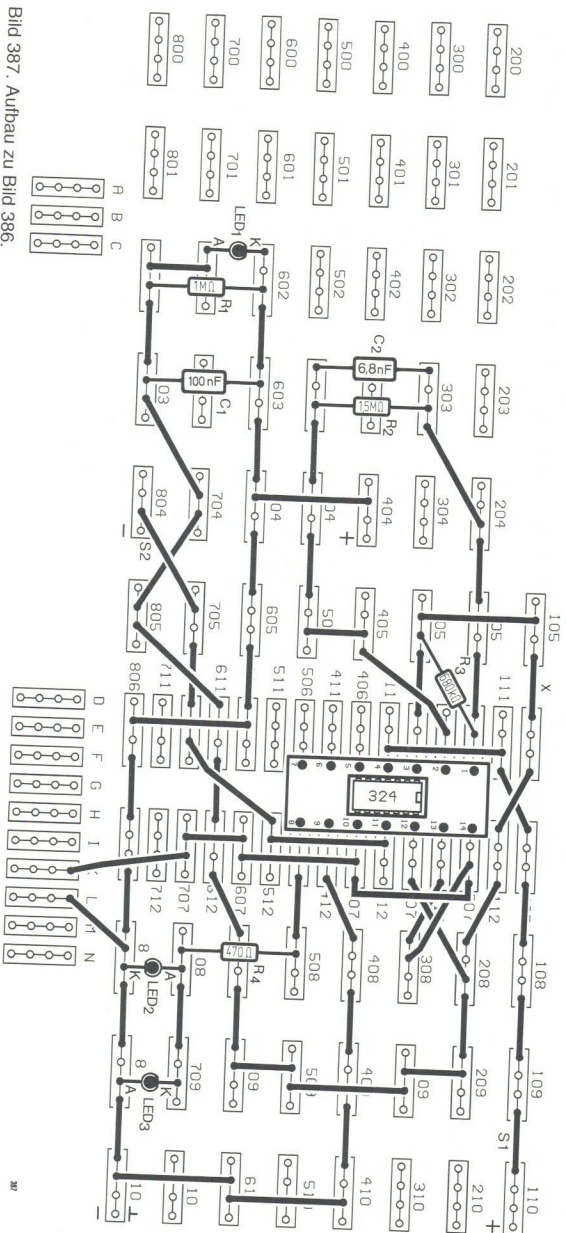


Bild 387. Aufbau zu Bild 386.

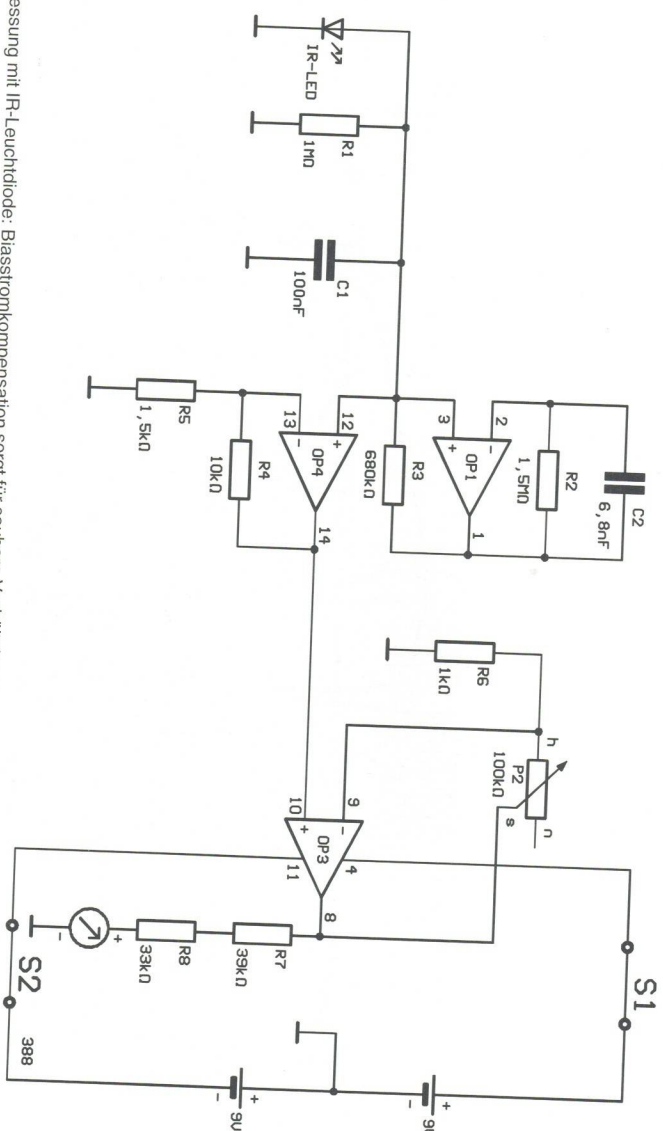
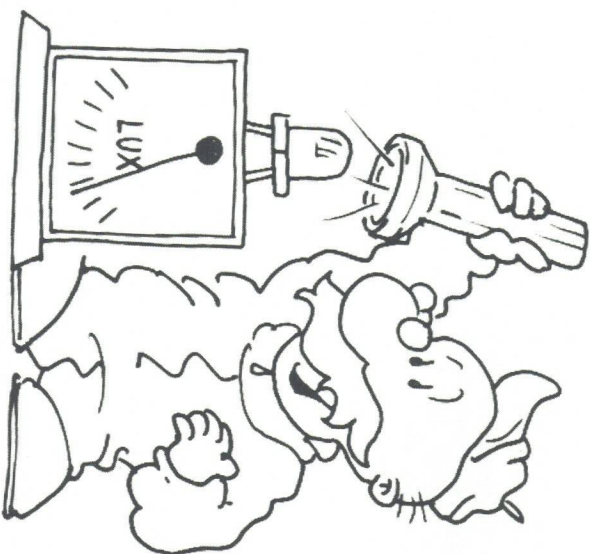


Bild 388. Lichtmessung mit IR-Leuchtdiode: Biasstromkompensation sorgt für saubere Verhältnisse.

278

Als „thematische Fortsetzung“ des Tests von oben bauen wir die Schaltung nach Bild 388 auf. Signalquelle ist die IR-LED. Vorerst bleibt sie aber noch draußen. Das Instrument darf fast nichts zeigen. Es liegt diesmal hinter zwei Verstärkern. Der erste verstärkt etwa 6,7fach. Die Verstärkung des zweiten wird mit Hilfe von P2 den Bedürfnissen hellsten Licht aus, das im Zimmer vorkommt. Das gelte als Maximum, darauf wird mit P2 abgeglichen. Dann vergleicht verschiedene Plätze in der Wohnung mit diesem Wert. Schaltet einzelne Lichtquellen ein und aus und registriert die Unterschiede. Lichtmessung ist ein weites Feld...



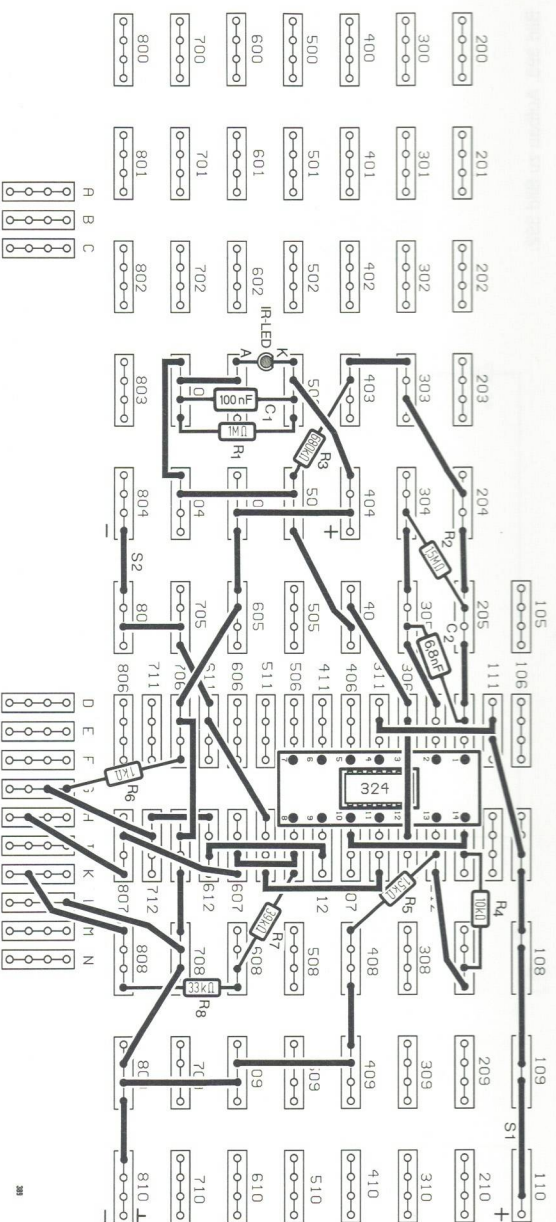


Bild 389. Aufbau zu Bild 388.

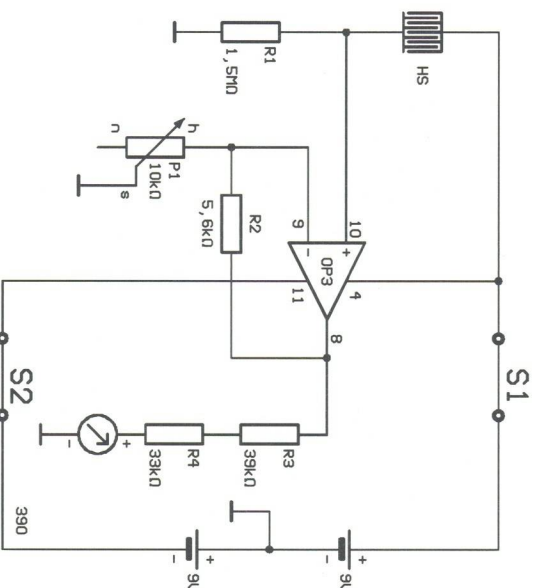


Bild 390. Ausschlag bei Feuchte: Hygrometer mit Feuchtesensor.

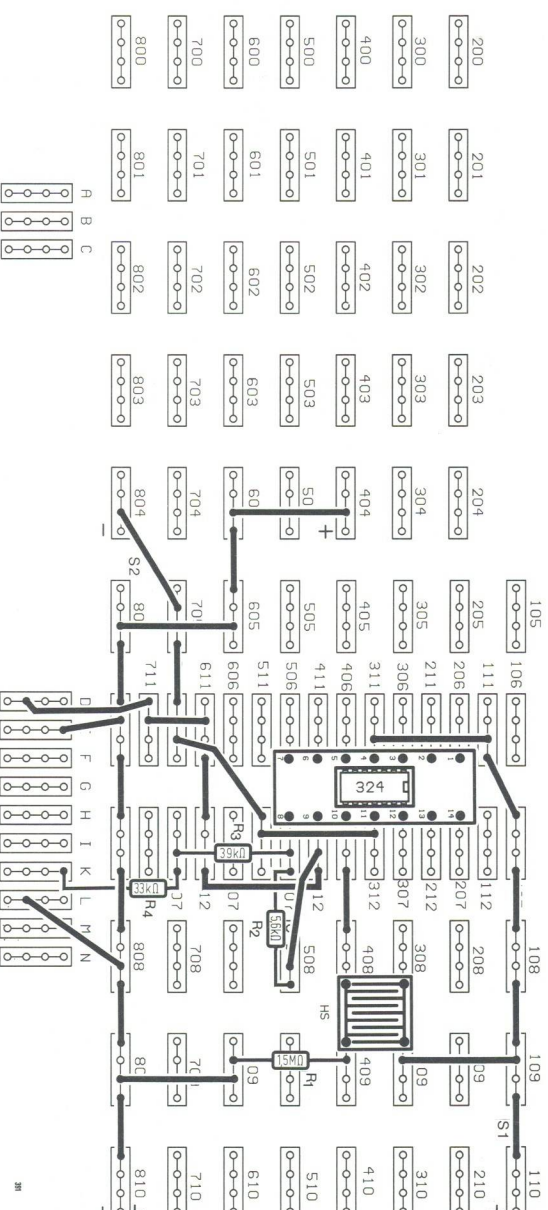


Bild 391. Aufbau zu Bild 390.

Hygrometer mit OP

Unser Feuchtesensor (HS) mit dem Kochsalzüberzug sieht inzwischen nicht mehr neu aus. Doch er tut es immer noch.

279

In der Schaltung nach Bild 390 bestimmt P1 die Verstärkung. Wir stellen zunächst auf Mitte und hauchen dann den Sensor kräftig an. Anschließend können wir in einem akzeptablen Bereich die schwankende Luftfeuchtigkeit beobachten und beurteilen, wie wir uns dabei fühlen. Ergänzung für die Fitness-Station?

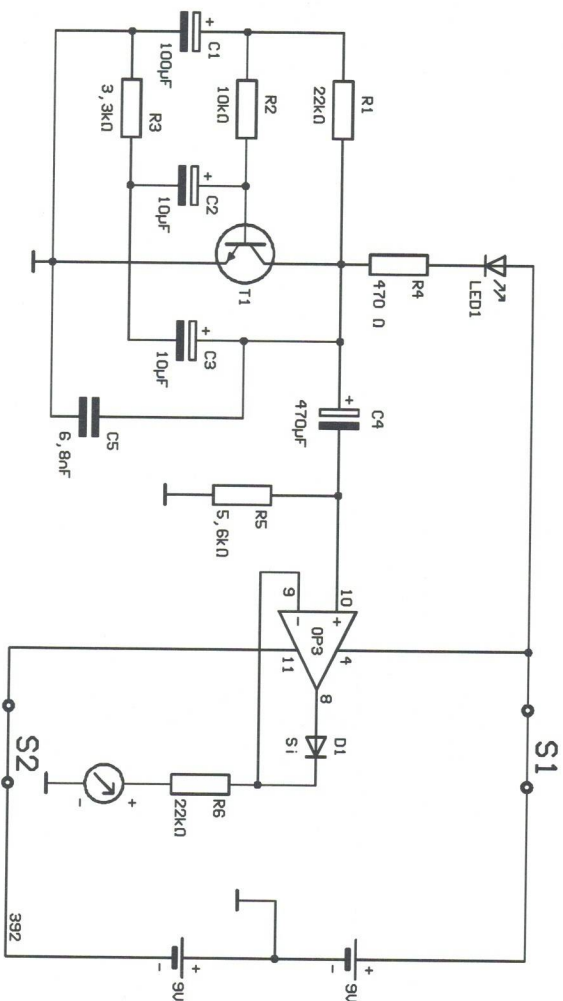


Bild 392. Bei der Arbeit beobachtet: Präzisionsgleichrichter an „langsamer“ Sinusquelle.

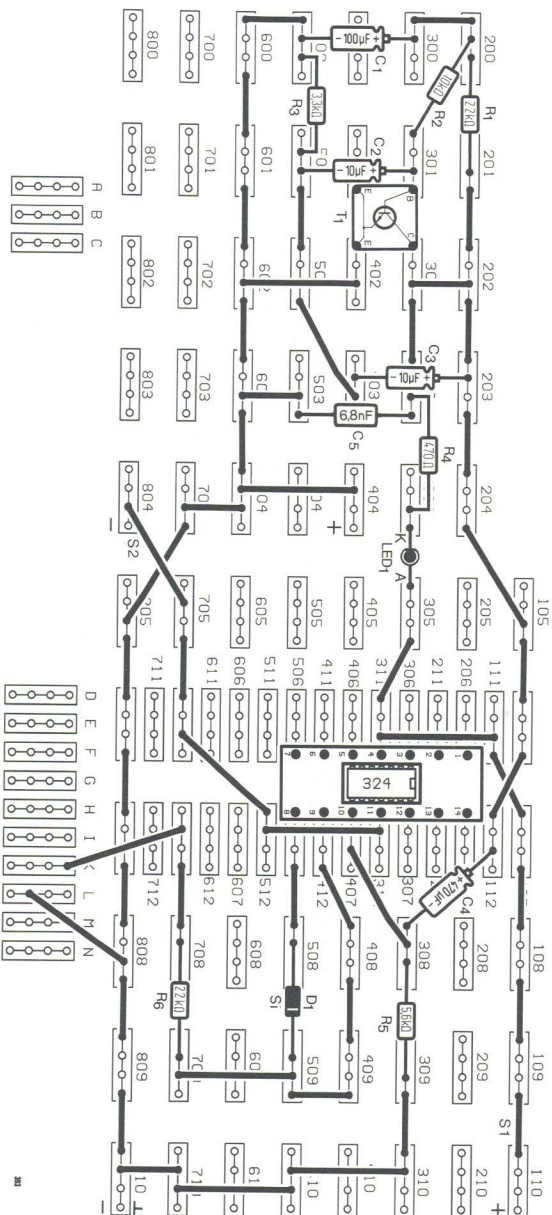


Bild 393. Aufbau zu Bild 392.

Wechsel im Blick
Fast alles ist schon dagewesen. Das Verstehen dürfte immer leichter fallen.

280 Zwei alte Bekannte begegnen uns in Bild 392: Phasenschiebegerator (Sinus!) und Präzisions-Meßwerk an. Allerdings nur die positiven Halbwellen. Da der Generator mit weniger als 1 Hz schwingt, sieht man das schön: Ausschlag – kurze Pause – Ausschlag usw.

281 Wir drehen D1 und das Instrument um. Was sehen wir? Das gleiche Bild. Scheinbar jedenfalls. Nur sind es jetzt die negativen Halbwellen, die die Ausschläge ergeben.

282 Wir testen alle Dioden unseres Expertimentersystems als D1. Erstaunliches Ergebnis: Keine gravierenden Unterschiede! Der OP macht's möglich, unterschiedliche Flußspannungen haben hier keinen Einfluß.



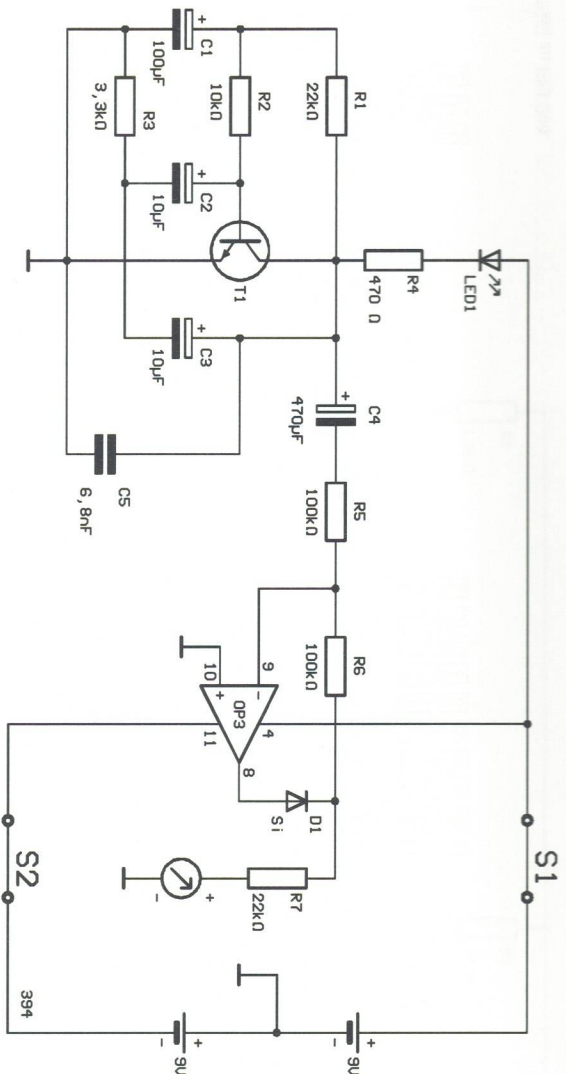
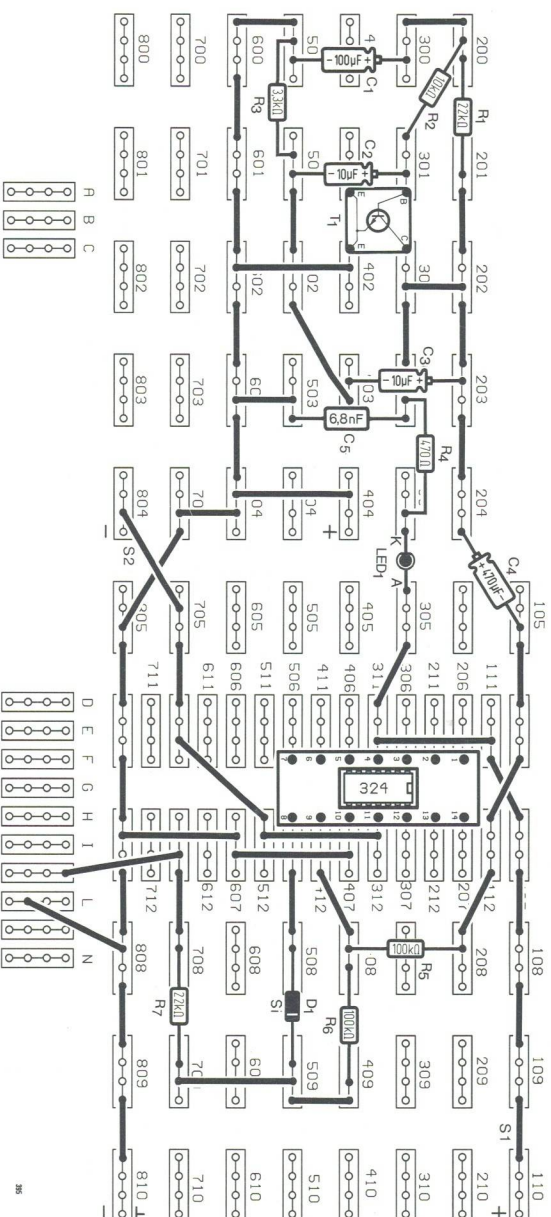


Bild 394. Bei Drehung nichts Neues: Auch in invertierender Betriebsart wird gleichgerichtet.



283 Mit dem Test nach Bild 394 überzeugen wir uns, daß ein solcher Gleichrichter auch mit invertierendem Verstärker funktioniert. Wer Lust hat, kann noch einmal alle Dioden probieren.

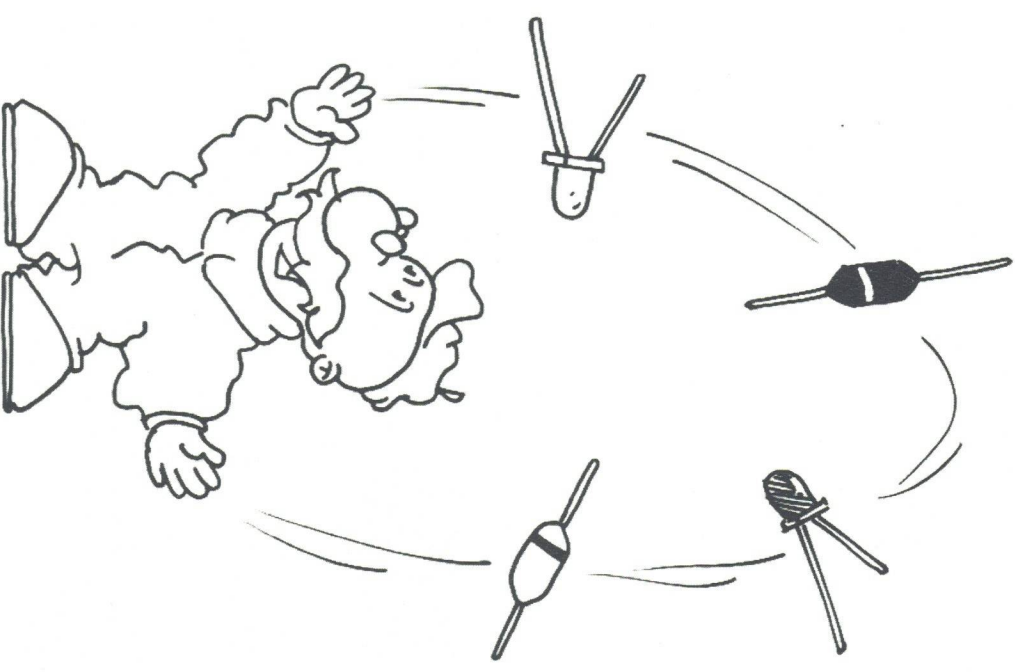


Bild 395. Aufbau zu Bild 394.

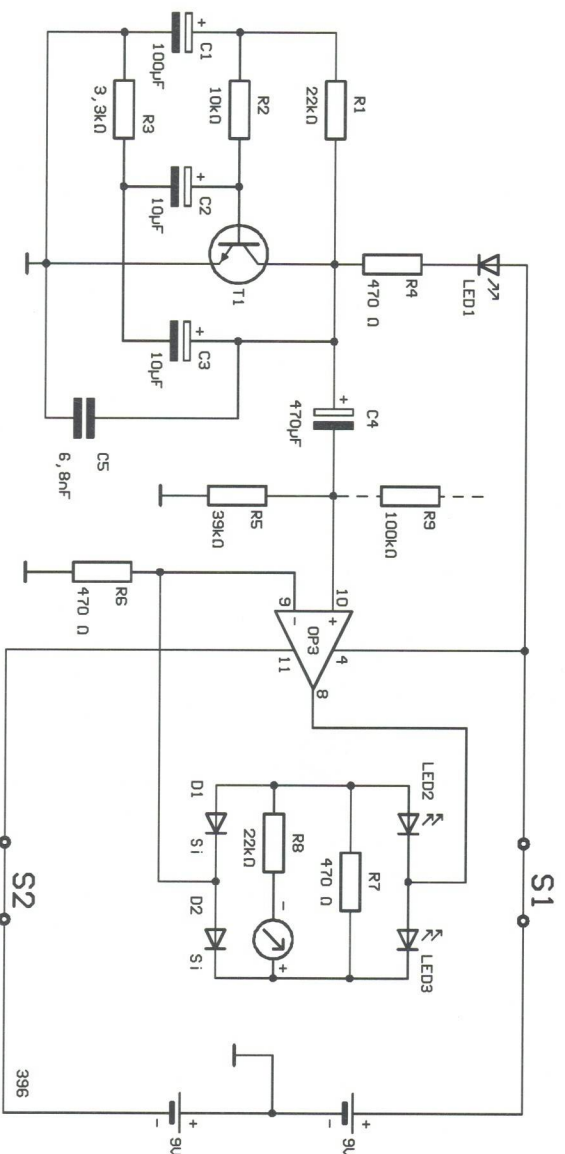


Bild 396. Brücke zwischen Plus und Minus: Vollwellengleichrichter nach Graetz mit Richtungsanzeige.

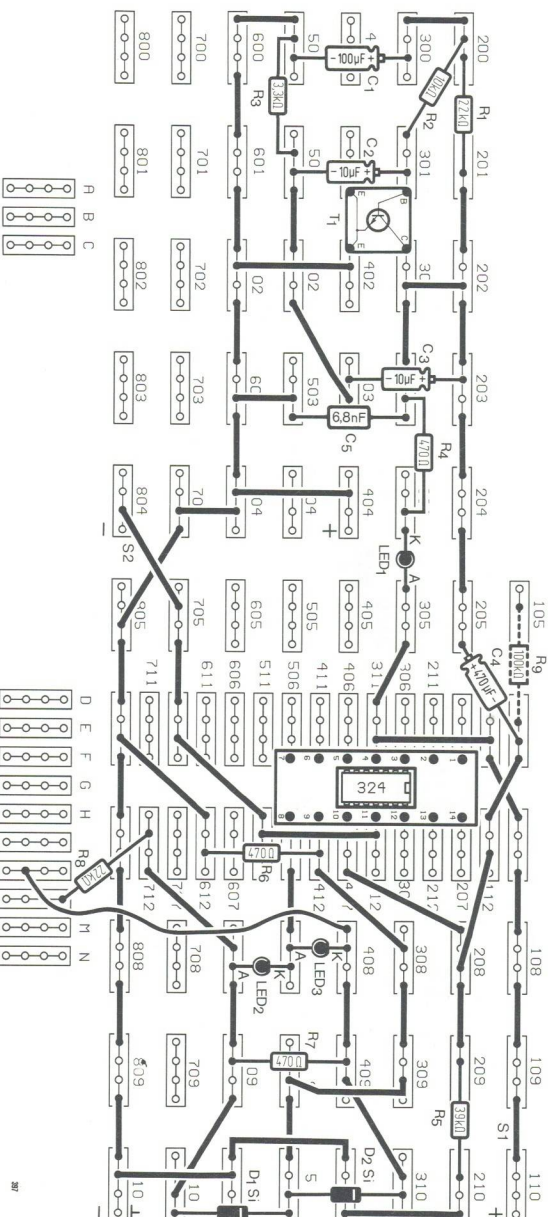


Bild 397. Aufbau zu Bild 396.

284 Richtig „rund“ wird die Gleichrichtung via OP durch einen Brückengleichrichter. Nach Bild 396 ist er in den Gegenkopplungszweig einbezogen. Gratis gibt's darin, weil zwei der Gleichrichter Leuchtdioden sind, die Anzeige der Polarität der anliegenden Eingangsspannung. Bei positiven Halbwellen leuchtet LED3, bei negativen LED2. Der Sinusgenerator läßt den Zeiger doppelt so oft ausschlagen wie bei Einweggleichrichtung – es ist eben eine *Vollwellengleichrichtung*. Für Einstieger bei dieser Gelegenheit noch die Erklärung dieses Brückengleichrichters: Plus am OP-Ausgang: Pfad LED3. Instrumentenzweig – D1 – R6 – Masse. Minus am Ausgang: Pfad LED2 – Instrumentenzweig – D2 – R6 – Masse. Die Stromrichtung durch das Instrument ist in beiden Fällen die gleiche!

285 Wir ziehen C4 heraus und stecken dafür einen Widerstand von 100 kΩ (R9) einseitig an den nichtinvertierenden Eingang. Die andere Seite kommt in eine freie Feder (den Sinusgenerator können wir jetzt „abräumen“). An diesen Punkt führen wir nacheinander die positive und die negative Betriebsspannung. Wir stellen mit Freude fest: Jedemal schlägt das Instrument richtig herum aus. Ab 20 % des Vollausschlags mindestens ist außerdem an LED2 bzw. LED3 erkennbar, welche Polarität gerade anliegt. Damit steht ein hochohmiges, verpolungsicheres Voltmeter mit Polaritätsanzeige vor uns, das nur einen OP braucht. Für seine Anpassung an beliebige Meßaufgaben merken wir uns dies: Der Strom durch R6 wird immer so groß, daß an ihm die Spannung abfällt, die am nichtinvertierenden Eingang anliegt. Bei 100 kΩ auf 39 kΩ – wie im Beispiel – sind das für 10 V Meßspannung etwa 2,85 V. Dabei fließen 6,08 mA – genug für helles Leuchten der jeweils zutreffenden Leuchtdiode. Da der Widerstand in der Brücke ebenfalls 470 Ω hat, wird das Instrument in diesem Falle auf 2,85 V Vollausschlag eingestellt (R8 etwa 27 kΩ).

28. On Chip: Teile und zähle!

Das dynamische Transistor-Flip-Flop konnte nicht einmal bis 3 zählen. Beim Zusammenschalten zu größeren Zählweiten gab es früher erhebliche Schaltungsprobleme. Heute interessiert das niemand mehr. Integrierte Schaltkreise zählen und teilen für uns. Wie etwa der 4024.

Zur Person

In einem 14poligen Gehäuse sind 7 Flip-Flop-Einheiten auf einem Chip integriert, von denen jeweils ein Ausgang über eine Pufferstufe herausgeführt ist. An ihm erscheint die positive Spannung, wenn er aktiv ist. Sonst liegen alle an Minus. Intern sind sie so hintereinandergeschaltet, daß jeder zweite Eingangstakt (am Eingang CLK) das erste kippt, dieses wieder nach zwei Taktten das nächste usw. An den Ausgängen Q1 bis Q7 passiert also in der Folge 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 etwas. Der letzte Ausgang Q7 schaltet erst beim 64. Eingangsimpuls hoch und beim 128. wieder herunter. Bild 400 skizziert dieses Verhalten.

Mit einem positiven Impuls am Eingang R läßt sich alles löschen, alle Ausgänge liegen dann an Minus. Sonst liegt R an 0 V. Der Takteingang CLK wirkt invertierend. Man hält ihn daher auf Plus, der Takt schaltet ihn jeweils vorübergehend

nach Minus. Darauf reagiert die Schaltung. Beim Rückschalten passiert nichts. Die Zählflanke ist also der Übergang von „hoch“ nach „tief“ (engl.: von high nach low, daher H und L als gebräuchliche Begriffe der Digitaltechnik). Der 4024 ist ein CMOS-Schaltkreis. Er verhält sich ähnlich wie unser MOS-FET: Kein Eingangsstrom, aber gegen statische Aufladungen empfindlich. Daher Eingänge stets an Plus oder Minus legen, je nach Anwendung, aber nicht offen lassen. Was sonst passiert, sehen wir gleich.

287

Der 4024 wird statt des OP in die IC-Fassung gesteckt, wieder Kerbe im Gehäuse auf Kerbe in der Fassung. Die Anschlüsse zählen dann wieder ab links von der Kerbe mit 1 beginnend, einmal links herum bis 14. Im Experiment nach Bild 401 lassen wir zunächst Eingang A1 schluß 1 offen, also ohne R1 und C1, und schließen die bewährte Geisterantenne in Form eines längeren Drahtes an. LED2 wird mit R4 probeweise an Q2, dann an Q3 usw. angeschlossen. Wir sehen, wie die Leuchtdioden flackern. Besonders in der Nähe von Geräten am Lichtnetz oder bei Betrieb mit dem KOSMOS Netzgerät X. Einstreuender Netzrumm läßt z. B. eine LED an Q6 etwas schneller als im Sekundenrhythmus blinken.

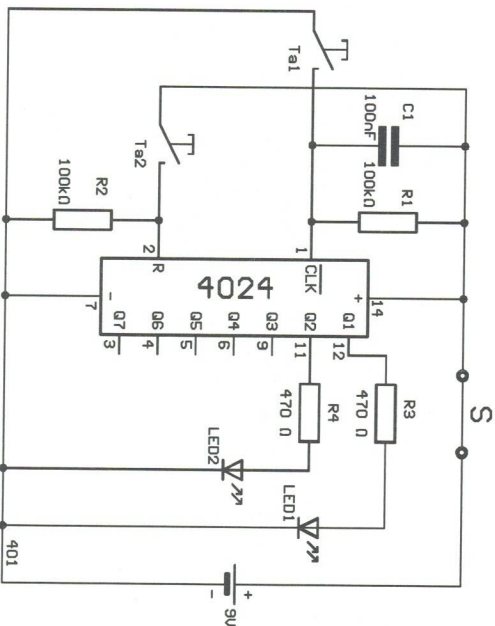


Bild 401. Einstieg in die Welt des Zählens: Merkwürdige Ergebnisse.

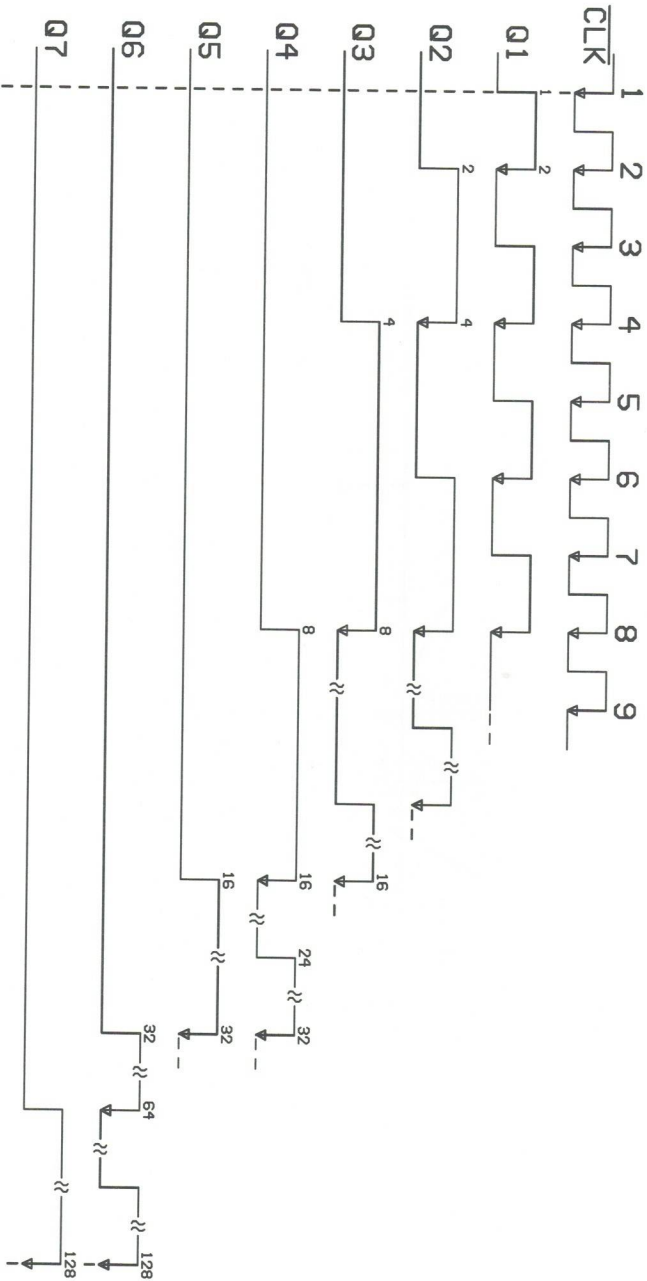


Bild 400. Zählt (und teilt) bis (durch) 128: Wirkungen des Eingangstaktes an den 7 Ausgängen des 4024 (Reseteingang R auf 0 V).

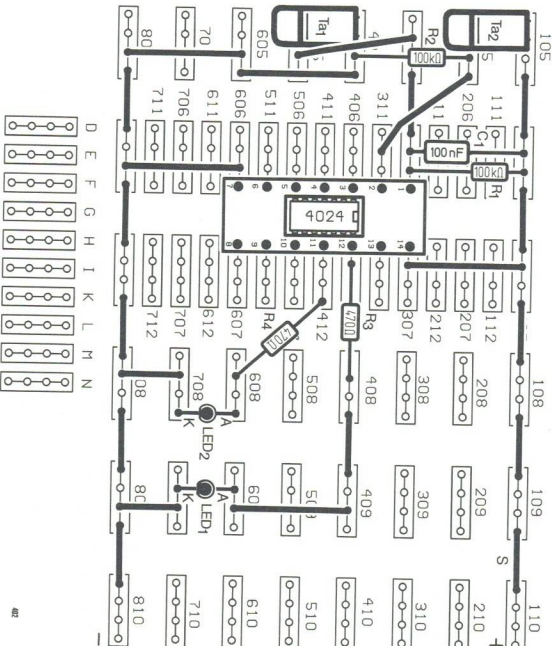


Bild 402. Aufbau zu Bild 401.

288

Wir verbinden 1 (CLK) jetzt mit R1 und C1 und betätigen den Reset-Taster Ta2. Die Leuchtdioden, an welchem Ausgang sie auch liegen, werden verlöschen. Nun drücken wir einige Male Ta1. Leider sind die Reaktionen

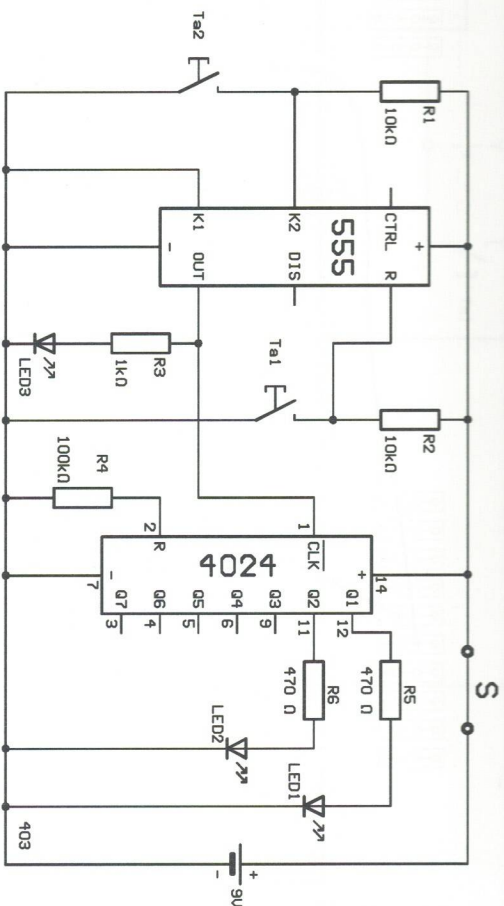


Bild 403. Saubermann 555: Entprellter Taster bringt glaubwürdige Reaktionen – gerade wie nach Bild 400!

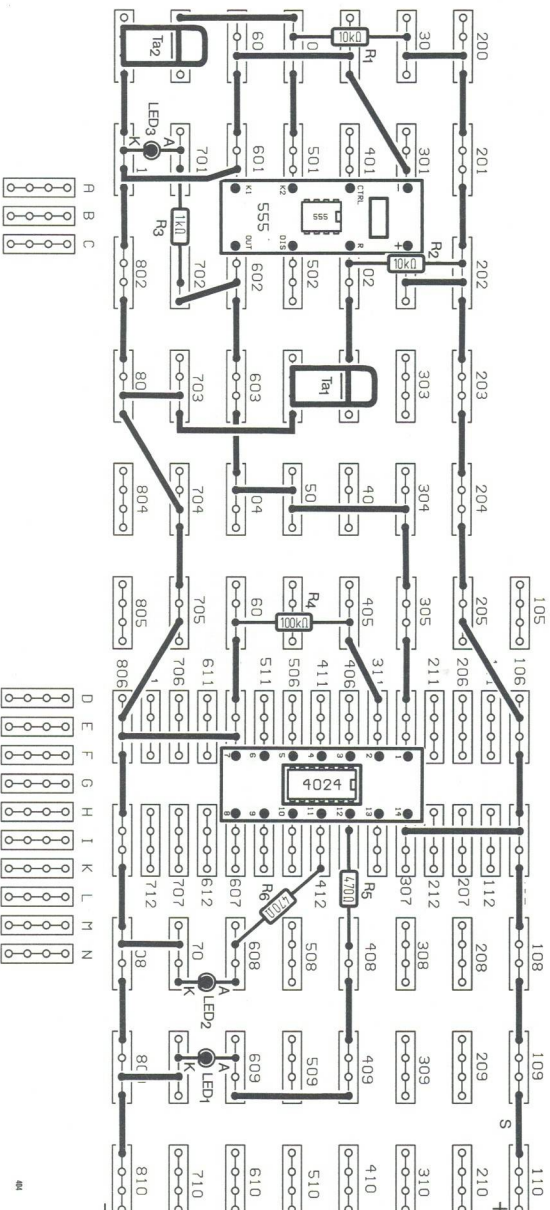


Bild 404. Aufbau zu Bild 403.

an den Ausgängen nicht so exakt wie nach Bild 400. Das liegt an dem für diese Zwecke schlechten Kontakt des Tasters und daran, daß der Schaltkreis schon bei äußerst schmalen Impulsen schaltet. Mechanische Kontakte neigen, wie man sagt, zum *Prellen*, geben bei Betätigung mehrere Impulse ab. Der Kondensator C1 verhindert das nicht vollständig.

289

Nach Bild 403 bauen wir uns mit Hilfe des 555 einen *prellfreien Taster*. Die beiden Taster sind normalerweise zu einem Umschalter vereint. Mit den Einzeltastern behalten wir die Übersicht. Zuerst drücken wir Ta2, so daß LED3 leuchtet. Drückt nun nach Belieben auf Ta1 – nur beim ersten Mal werden LED1 bzw. LED2 reagieren. Mit Ta2 holen wir den 555-Ausgang anschließend wieder auf „H“. Leuchtet LED3 an OUT, ist eine neue Eingabe mit Ta1 möglich. Jetzt geht das Zählen sauber!



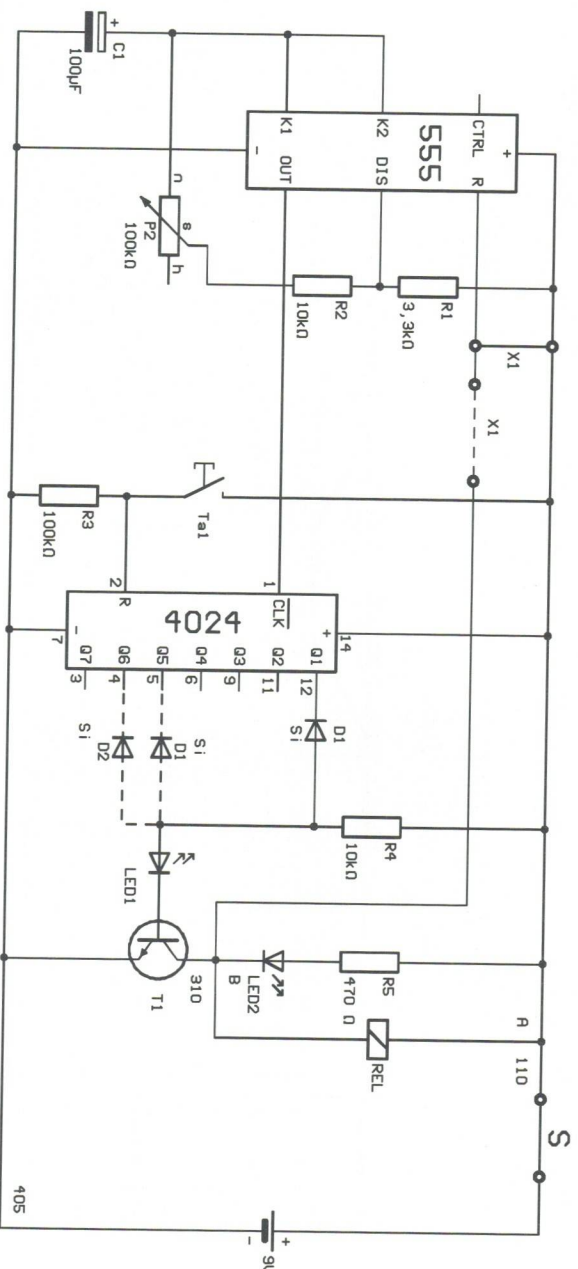
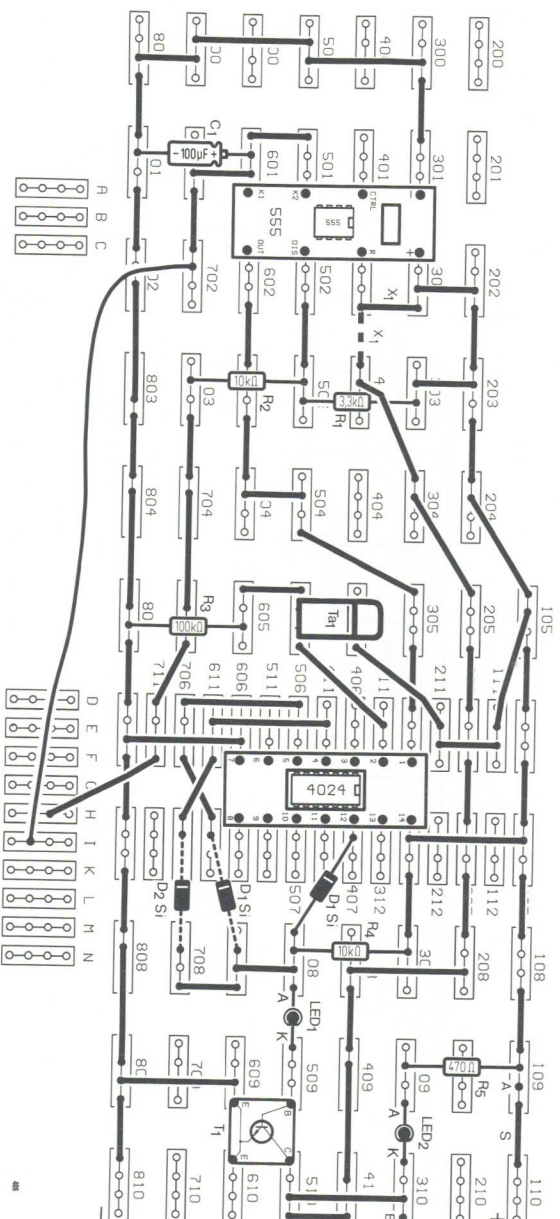


Bild 405. Zeitdehner im Verbund: Langer Takt des 555 – bis 128fach streckbar. Maximaler Zeitbereich mit 470 μF für C1!



Zeit-Dehner

Mit dem 555 als Monoflop lassen sich gut 10 Minuten „verwalten“. Als langsam laufender Multivibrator kann seine Periode nun bis zum 128fachen verlängert werden.

290

Wir lassen in Bild 405 zunächst die Verbindung R – T1 offen und legen R an Plus (Brücke X1 in der durchgezogen gezeichneten Position). Von den Si-Dioden wird vorerst nur D1 gesteckt, und zwar auf Q1. REL muß im Augenblick noch nicht sein. Damit kann später – zeitverzögert – alles mögliche geschaltet werden. Wir stellen P2 auf Minimum (n) und benutzen für C1 erst einmal 100 μF , damit alles schneller geht. Der 555 wird nach jeweils etwa 2,5 s einen H-L-Taktimpuls liefern, denn $T \approx 0,7 \cdot C1 \cdot (R1 + 2R2)$. Immer für diese Zeit wird LED2 periodisch hell und dunkel. Denn: Q1 schaltet bei der ersten H-L-Flanke auf H, bei der zweiten auf L usw. Bei L wird T1 gesperrt, bei H ist er durchgeschaltet.

291

Jetzt wird die Schaltung nach Bild 405 durch die gestrichelt gezeichnete Position ergänzt (X1 in gestrichelt gezeichnete Position umstecken, D1 umstecken, D2 einfügen). Mit Druck auf Ta1 wird gestartet. Der 555 taktet nun. Bild 400 zeigt: Q5 wird beim 16. Taktimpuls von L nach H schalten. Q6 folgt beim 32. Impuls. Da ist aber Q5 gerade für 16 Impulse auf L gegangen. Ab 48. bis zum 64. Impuls sind beide H. Darauf hat die NAND-Verknüpfung aus D1, D2 mit LED1 und T1 gewartet, und T1 schaltet durch. Damit stoppt der Generator (weil der Rücksetzeingang auf „L“ geht), und der jetzige Zustand bleibt. Das ist eine *einstellbare Einschaltverzögerung*.

292

Wir entfernen wieder die Rückführung auf R des 555 und legen den Rücksetzeingang des 555 mit der Brücke X1 zurück an Plus. Nach dem Start beobachten wir LED2. Sie verlischt nach kurzer Zeit, kommt aber periodisch wieder. Logisch – jetzt läuft ja der Zähler durch. Unter Beachtung von Bild 400 lassen sich viele interessante Schaltaufgaben lösen. Man muß nur an die richtigen Ausgänge anknüpfen. Und bei voller Ausschöpfung der maximal funktionierenden Widerstands- und Kondensatorwerte am 555 kommt man in den Bereich von Stunden bis zu maximal einem Tag.

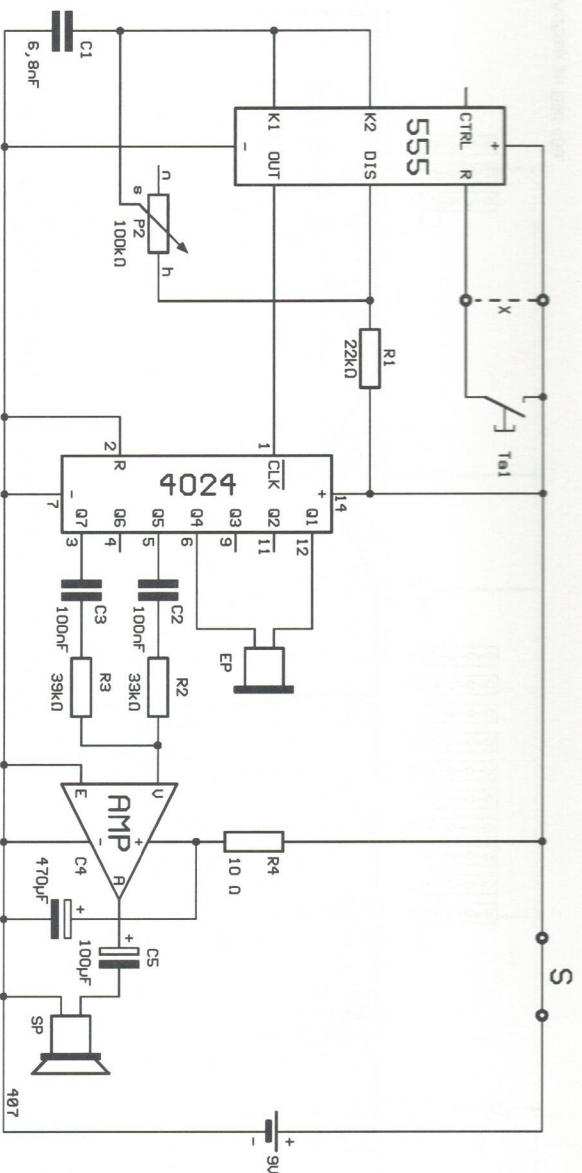


Bild 407. Teilen und Tönen: Sieben Oktaven von einem Chip – Kombinieren erlaubt!

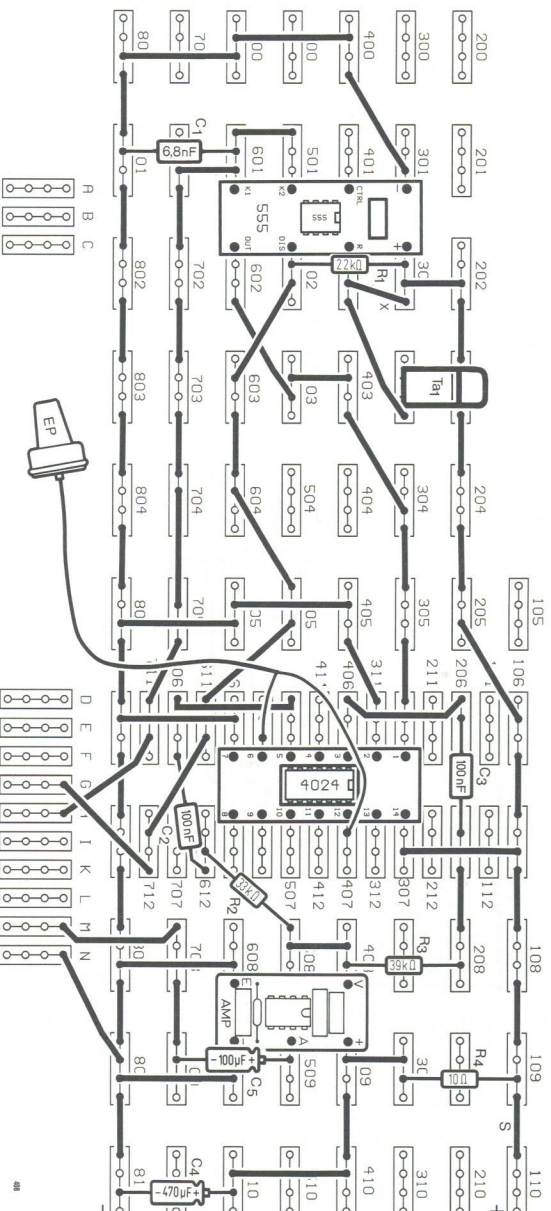


Bild 408. Aufbau zu Bild 407.

Digital-Sound
Geringe Änderungen machen aus dem Langzeitschalter eine Mini-Elektronenorgel.

293 Sofort nach Bau der Schaltung gemäß Bild 407 kann gespielt werden. „Manual“ ist der P2-Knopf. Dreht und hört! An jedem folgenden Ausgang erscheint die Hälfte der Frequenz des vorangegangenen Ausgangs. Der Schaltkreis bietet also 7 Oktaven. Die Verknüpfungen ergeben interessante Effekte. Steck die Verbindungen zu den Ausgängen beliebig um, bezieht auch den 555-Ausgang mit ein – es gibt den verrücktesten Sound aus SP.

294 Wir öffnen die Verbindung von R des 555 nach Plus (Brücke X rausziehen). Jetzt spielt die Orgel nur, wenn der Taster gedrückt wird. An P2 werden die Töne „vorgewählt“. Eine günstige Anschlußkombination ist auch Q4, Q6. Dabei werden die Töne hörbar.

295 Steck den Hörer EP einseitig in eine mit Minus verbundene Feder und mit der anderen Seite in den 555-Ausgang. Stellt an P2 eine noch gut hörbare Frequenz ein (P2-Schleifer Nähe h). Dann tippt mit diesem Stecker nacheinander an Q1, Q2 usw. Jetzt hören wir alle Oktaven nacheinander.

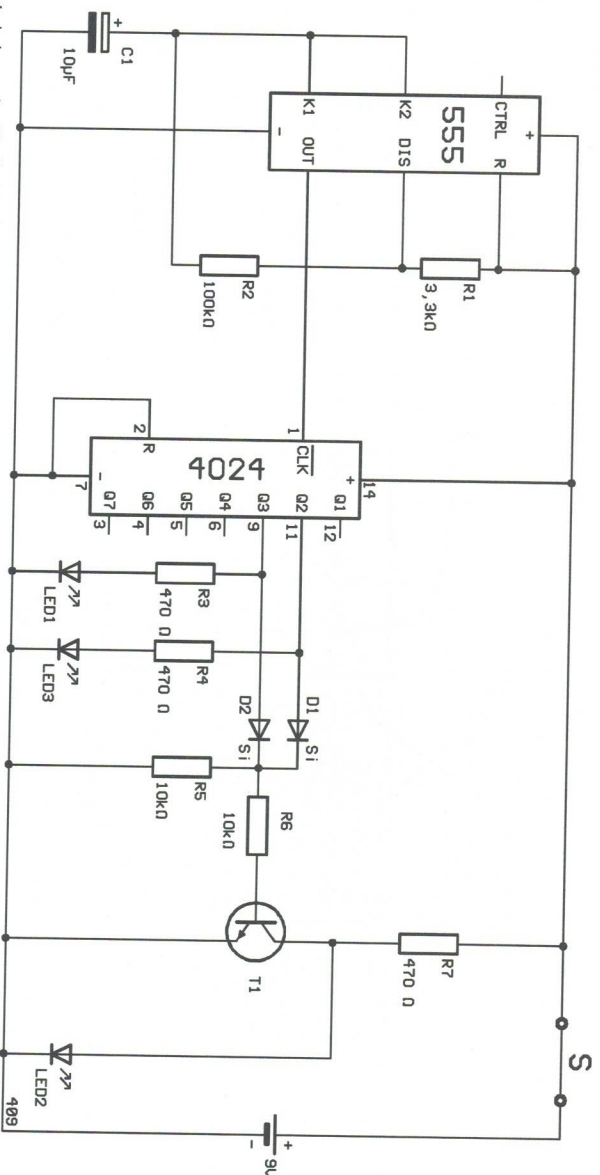


Bild 409. Verkehrsregler für die Modellstadt: Ampel mit Rot-Gelb-Phase.

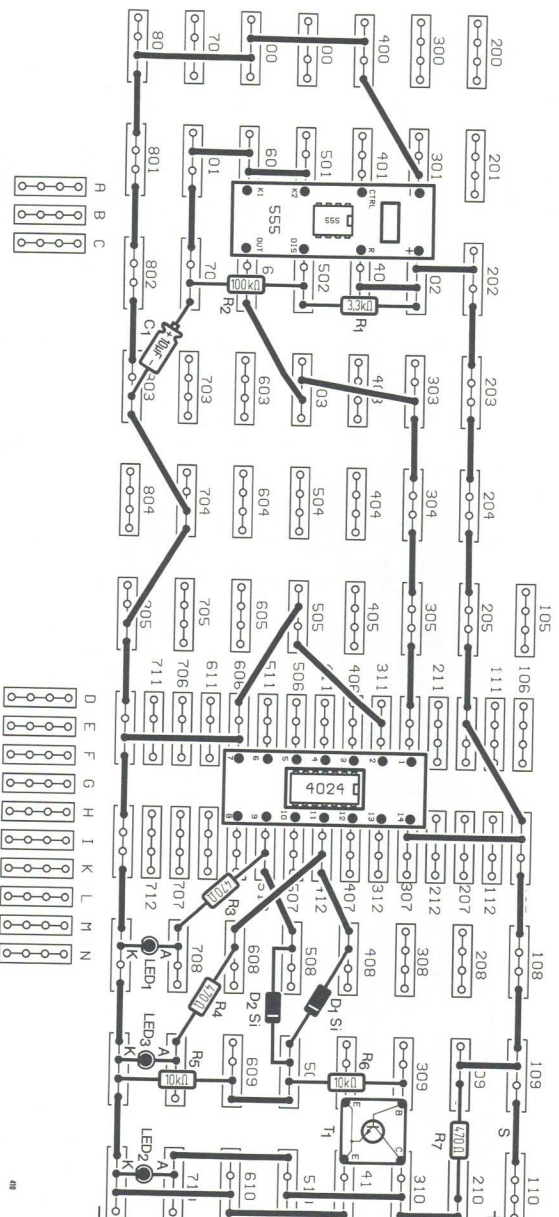
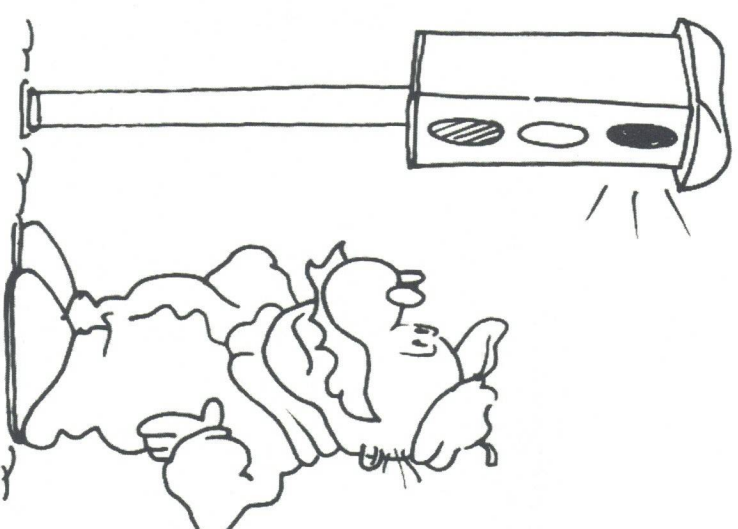


Bild 410. Aufbau zu Bild 409.

Verkehrsregler Etwas für Spielautos ist diese Nachbildung.

296 Die Schaltung nach Bild 409 liefert, wie wir sehen können, die Phasen Grün – Gelb – Rot – Rotgelb – Grün usw. Der Zyklus beginnt mit dem Einschalten (oder nach einem hier nicht vorgesehenen Reset) mit LED2 (Grün). Denn wenn alle Ausgänge L führen, ist T1 gesperrt. Mit der zweiten H-L-Flanke schaltet sich Gelb ein (LED3). Grün verlischt, denn H an Q2 (also Gelb) öffnet T1, und LED2 wird der Strom entzogen. Jeweils beim zweiten H-L am Takteingang wechselt die Phase. Wie es weitergeht, könnt ihr mit Hilfe von Bild 400 selbst ableiten.



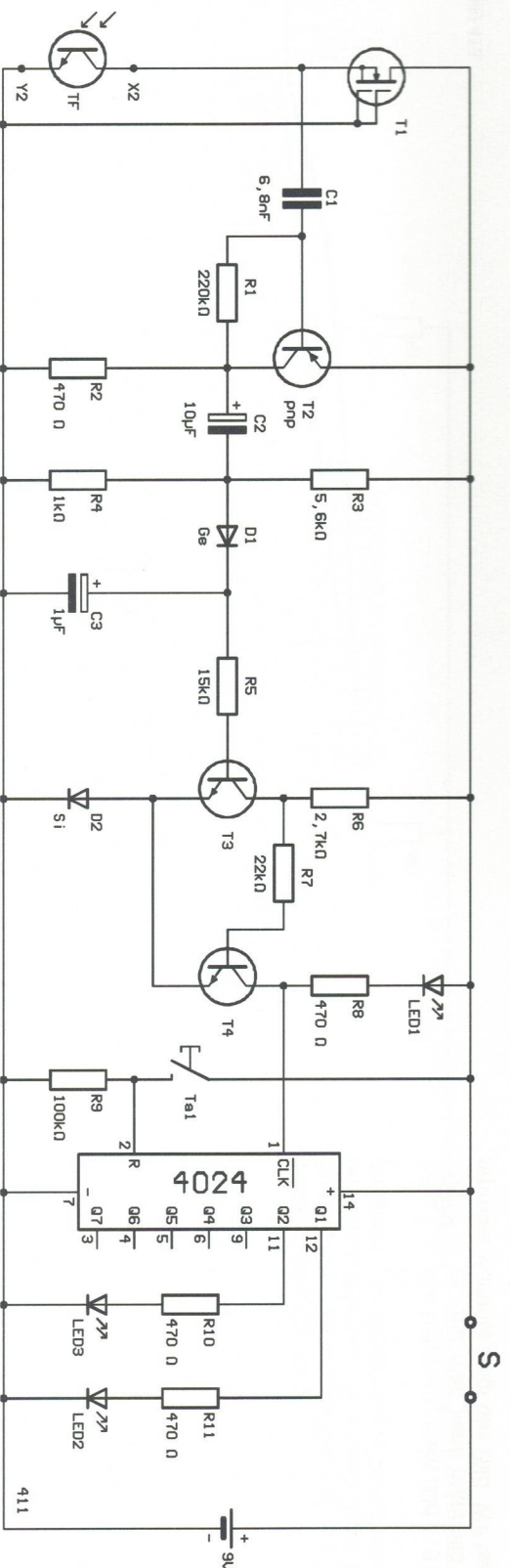


Bild 4.11. Abzähl-Wächter: Lichtschranke nach Bild 304; Zählerausgänge gestatten Reaktion nach wählbarer Anzahl von Unterbrechungen.

297

Sollte nach dem Einschalten eine LED leuchten, wird mit T₁ rückgesetzt. Danach unterbrechen wir den (unsichtbaren) Strahlengang und stellen fest: Bei jeder Unterbrechung leuchtet LED1 zum Zeichen, daß der Trigger aus T₃ und T₄ umgeschaltet, also einen H-L-Impuls an den CLK-Eingang geliefert hat. Gleichzeitig leuchtet LED2 auf. Nächste Unterbrechung: LED2 geht aus, LED3 leuchtet; dritte Unterbrechung: beide leuchten, vierte: beide gehen aus.

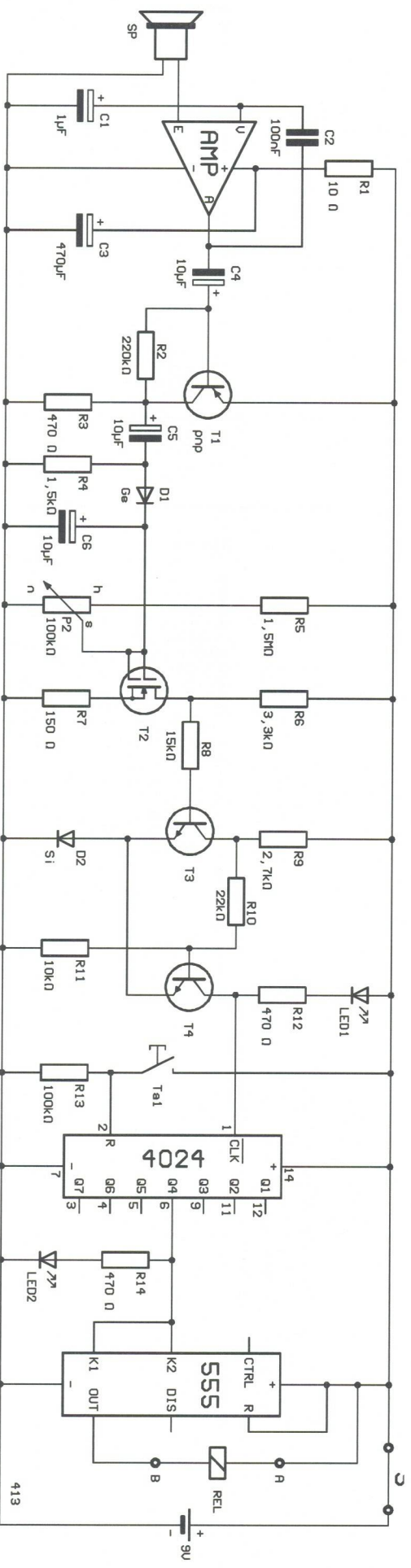


Bild 413. Codierter Haus Telefonschalter: Ein nach 8, Aus nach nochmals 8 Klingeltönen. Änderungen erlaubt, Postnetzeinsatz verboten. Variationen nach Text.

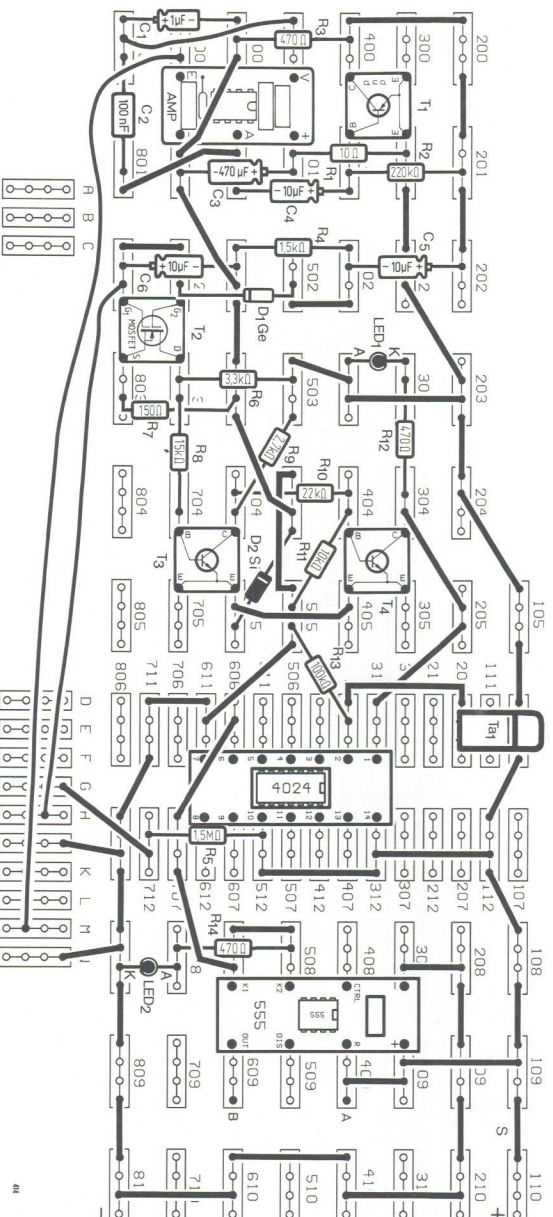


Bild 414. Aufbau zu Bild 413.

298

Wir legen LED2 statt an Q1 an Q3 und unterbrechen wieder viermal. Jetzt leuchtet LED2 erst bei der vierten Unterbrechung und geht bei der achten wieder aus. Das wäre so ein Punkt, wo z. B. mit dem AMP als Generator ein Alarmton ausgelöst werden könnte, oder wo nach vier Impulsen ein Relais anzieht: Der Vierte wird gefangen! TF arbeitet hier im „Verbund“ mit einem MOSFET. Der hält die Kollektor-Emitter-Spannung von TF auf Grund seiner Kennlinie in einem großen Bereich der Umgebungshelligkeit ziemlich konstant. Sein Widerstand paßt sich also dem des TF an. Für das Signal stellt er eine Art Basisschaltung dar. Der pnp-Transistor verstärkt die tonfrequente Schwingung, die auf Grund des kleinen C1 als nadelförmige Impulse ankommt. Sie werden von D1 gleichgerichtet und mit C3 integriert. Der Widerstandsteiler sorgt für den richtigen Arbeitspunkt, denn der Trigger hat eine Eingangsschwelle von etwa 1,2 V. Er schaltet beim Absinken der Eingangsspannung infolge Strahlunterbrechung. T4 zieht dabei CLK nach L, und der Zähler wird weitergeschaltet.

Telefon-Schaltwarte

Schöne alte Telefonapparate mit „richtiger“ Klingel gibts für den Hausgebrauch außerhalb des Telefonnetzes relativ preiswert. Wir können damit einmal wieder Zauberer spielen.

299

Die Schaltung nach Bild 413 enthält viele Bekannthe, und man kann manches noch variieren. Eine erprobte Variante zeigt das Bild. Wir lassen vorerst R5 noch

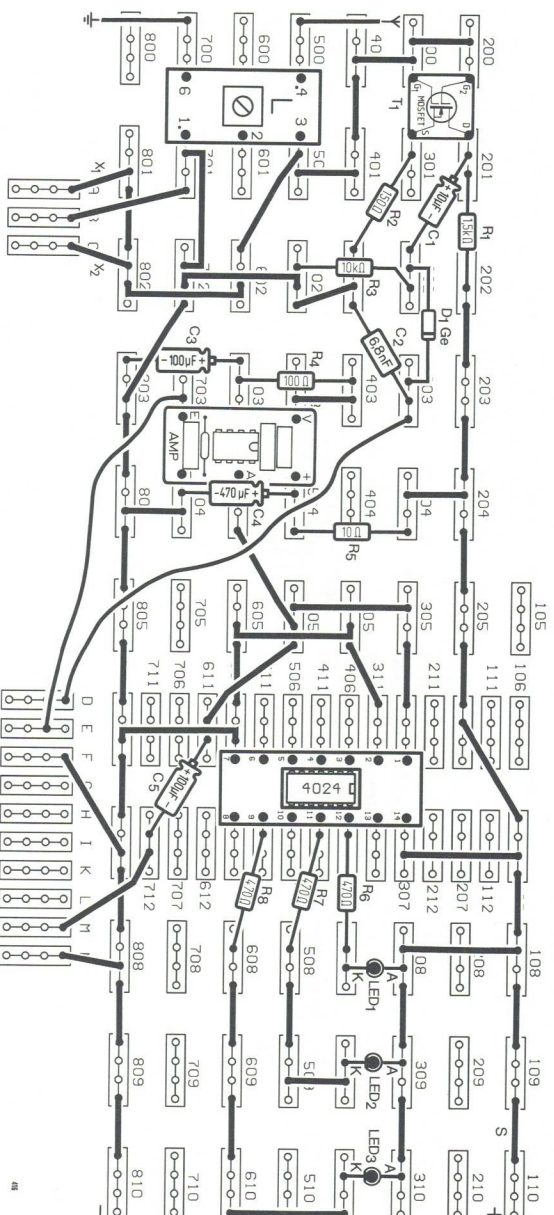


Bild 416. Aufbau zu Bild 415.

29. Spielwiese (2)

Spielen heißt nicht unbedingt nur Spaß. Spielen kann zum Verstehen beitragen.

Von Star-Pieps bis „star wars“

Mit drei Rechteckgeneratoren läßt sich die ganze Skala vom Kükenpieps über Krähen-Krächzen bis zum schauerlichen Space-Sound fabrizieren – nach 22 Uhr mit wenigstens 100 Ω vor dem Lautsprecher.

305

Baut die Schaltung nach Bild 417 und beginnt am besten mit $C1 = 10\ \mu\text{F}$ sowie Potis in Mittelstellung. Dann an P2 drehen und auf Ton und LED1 achten. Wir sehen: Wenn sie leuchtet, herrscht Ruhe. Je weiter s nach h gedreht wird, um so länger die Pausen- und Tonzeiten. Bei P1 sitzen nahe h die Küken, nach n zu die Krähen.

306

Setzt nun für $C1$ 100 μF ein und verringert R6 auf 150 Ω. Viel ratterndes Blech, viel Spaß. Da alle Grundschaltungen inzwischen bekannt sind, erklärt euch selbst die Effekte!

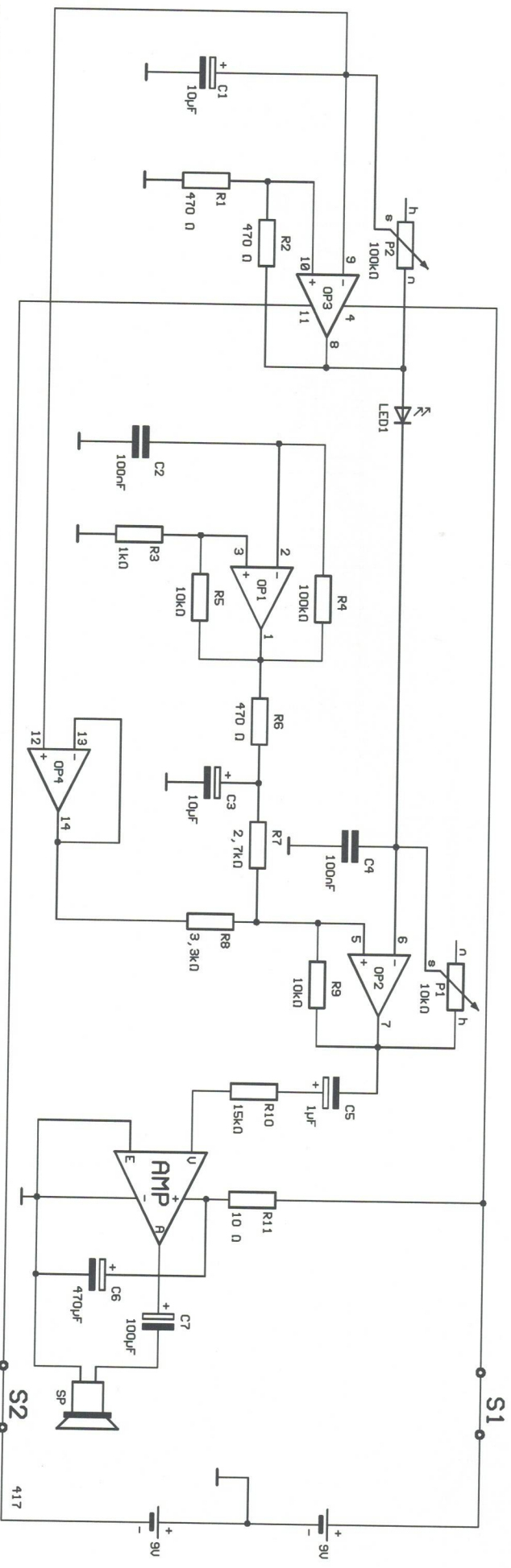


Bild 417. Einen Vogel hat jeder: Vielfalt der Geräusche an P1 (Tonthöhe) und P2 (Pausenlänge) einstellbar.

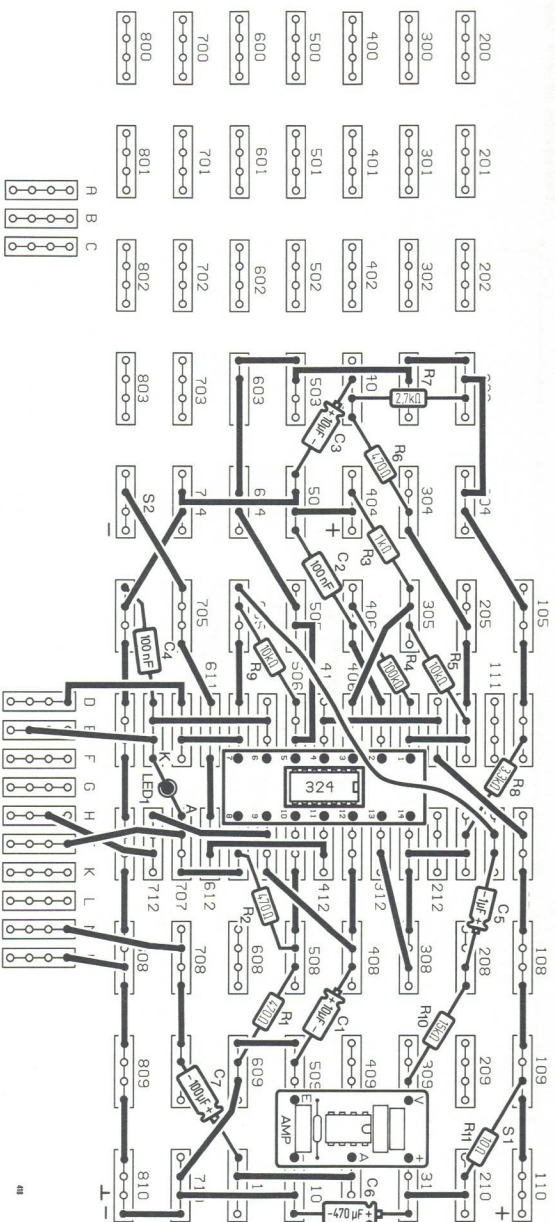
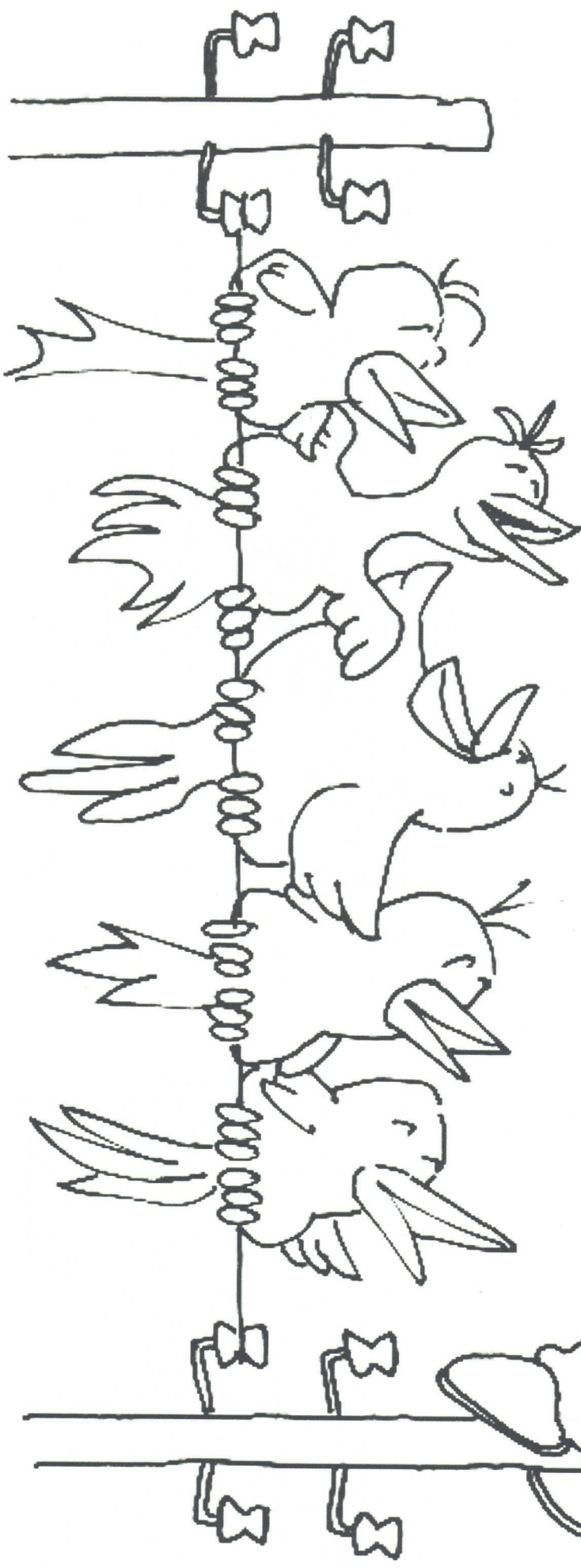


Bild 418. Aufbau zu Bild 417.



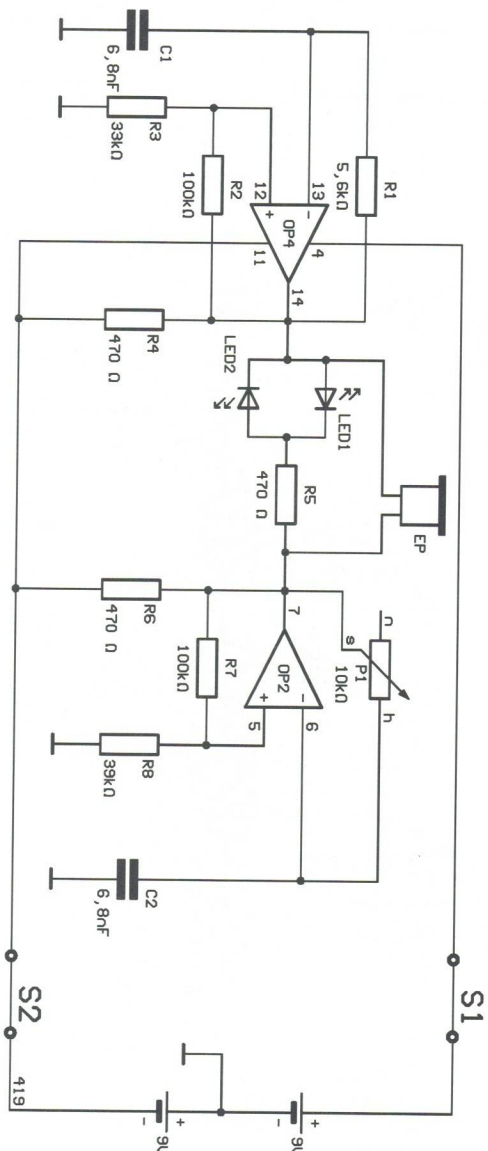


Bild 419. Schwebungen, diesmal direkt am Hörer. Aus bei gleichen Angeboten von links und rechts.

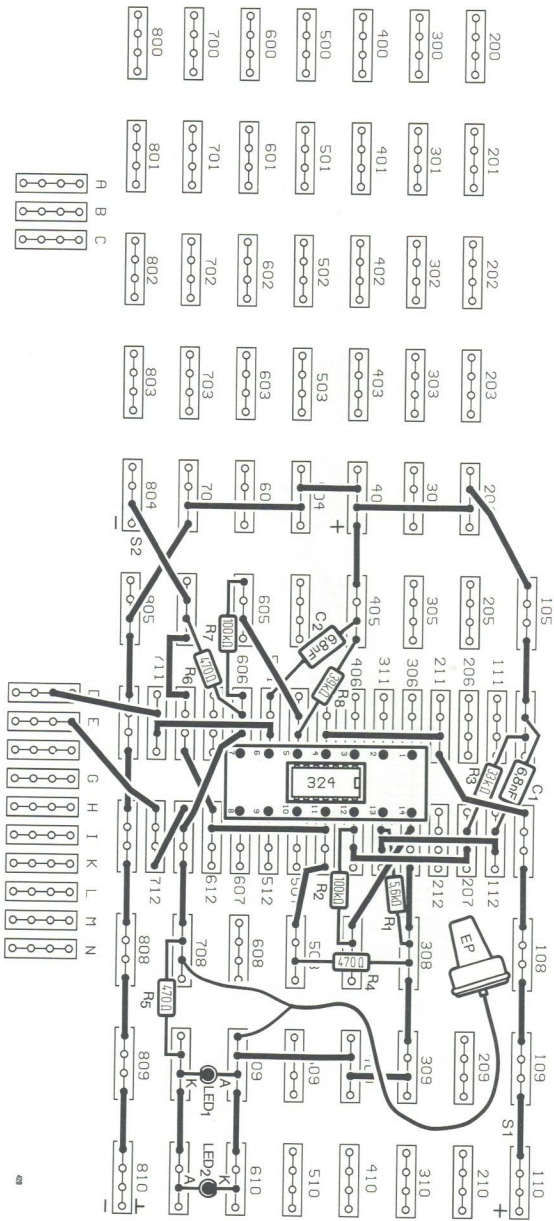
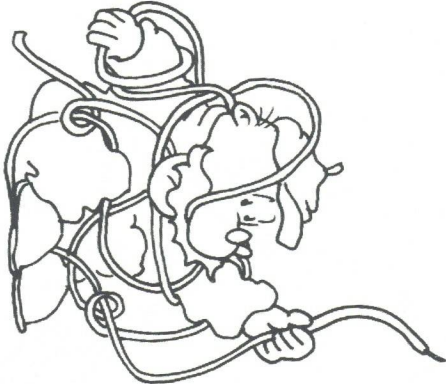


Bild 420. Aufbau zu Bild 419.

Ton in der Schwebung
Schwebungen hatten wir schon – im Ohr. Diesmal koppeln wir die Generatoren selbst.

307 Wenn in Bild 419 die Frequenzen der beiden Generatoren zu hoch sind, wählt für C1 und C2 statt 6,8 nF gleich 100 nF. Dann wird P1 langsam hin- und hergedreht. Dabei Leuchtdioden beobachten und auf den Ton achten. Erst dann, wenn die Helligkeit geringer wird und der Ton leiser, stecken wir den Hörer ins Ohr. Das ist so etwa in der Mitte des Drehbereichs der Fall. Bei einer bestimmten Poti-Stellung ist nichts mehr zu hören. Nur durch wechselseitigen Anschluß des Hörers an jeden Ausgang gegen Minus zeigt sich, daß beide Generatoren noch kräftig schwingen. Nur – die Differenz ist in einem engen Stellbereich gleich Null. Da haben beide Ausgänge zur gleichen Zeit die gleiche Amplitude und Phasenlage und natürlich gleiche Frequenz.



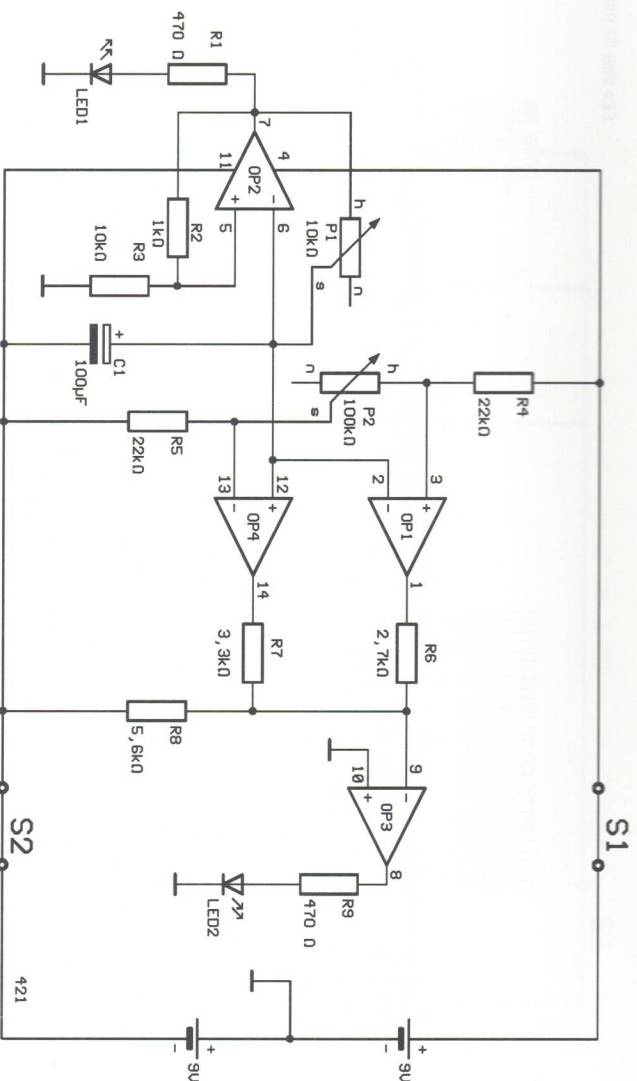


Bild 421. Doppel-Fenster: Fensterkomparator mit einstellbarer Öffnung (P2) verdoppelt Eingangsfrequenz (einstellbar mit P1).

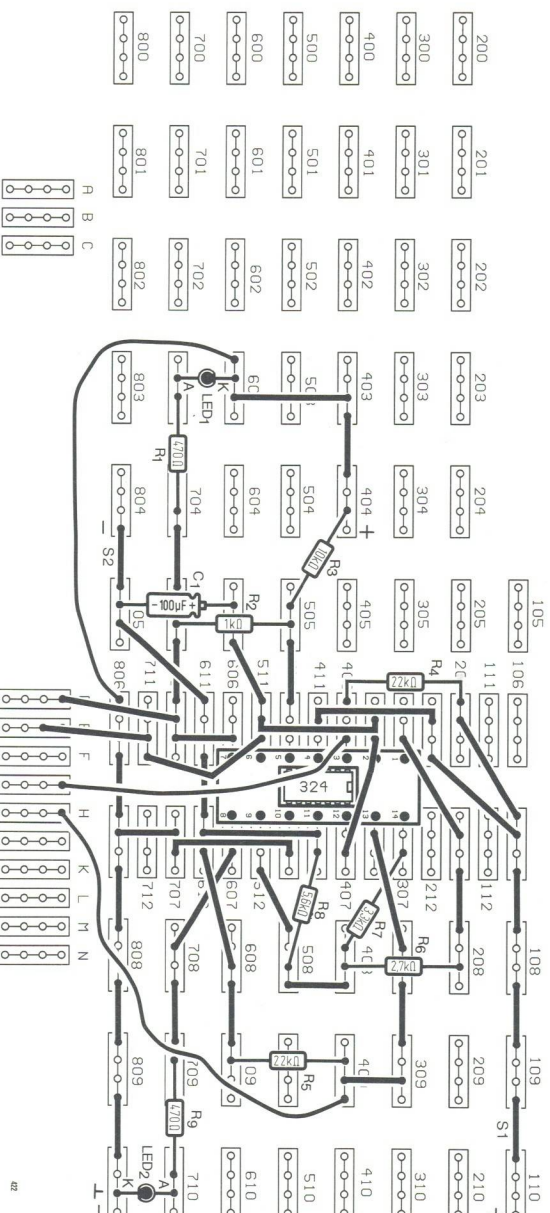


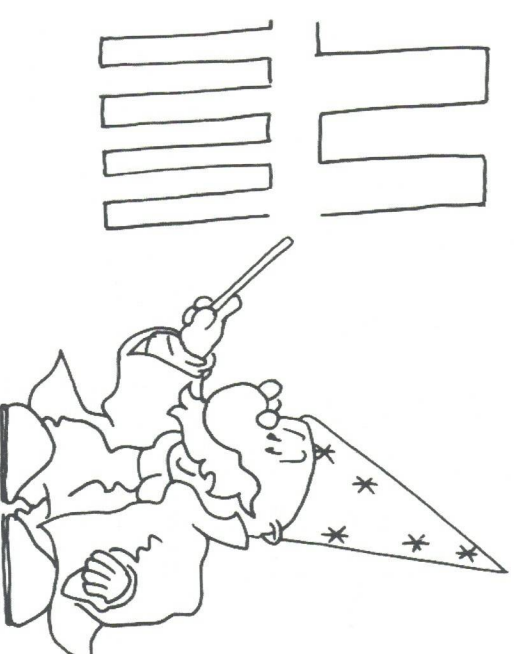
Bild 422. Aufbau zu Bild 421.

Aus Eins mach Zwei
Geschicktes Kombinieren von Generatoren und Komparatoren bringt Interessantes wie dies:

308

Zunächst bauen wir nur den linken Teil von Bild 421 auf und setzen für C1 100 µF ein (bzw. zwei antiseriell geschaltete Elkos, wie früher erläutert). P1 auf Mitte oder höher stellen. LED1 ist nur Funktionsanzeige – sie blinkt mit der Frequenz f1. Nun zum Rest der Schaltung. Wir speisen sie mit dem Sägezahn an C1, der fast zwischen positiver und negativer Sättigungsspannung pendelt. Mit P2 (etwa auf Mitte) wird der Abstand der Schaltschwellen der beiden Komparatoren bestimmt. Was sehen wir? LED2 blinkt doppelt so schnell wie LED1. Ein *Frequenzverdoppler* also! Er funktioniert auf Grund der unterschiedlichen Ströme, die in den Knoten des letzten OP fließen, je nachdem, wie die Komparatorausgänge gerade stehen. Bevor wir dazu lange Sätze formulieren: Schaut es Euch an, es ist eine gute Übung für die gewonnenen Erkenntnisse! Das Kernstück dieser Schaltung nennt man übrigens einen *Fensterkomparator*. Das „Fenster“ wird mit P2 eingestellt.

Der letzte OP wirkt in Verbindung mit den Widerständen als logische Schaltung – in „positiver Logik“ als NAND. Denn: R6 und R7 müssen Plus erhalten, damit der Ausgang auf invertiertes Plus (also Minus) schaltet.



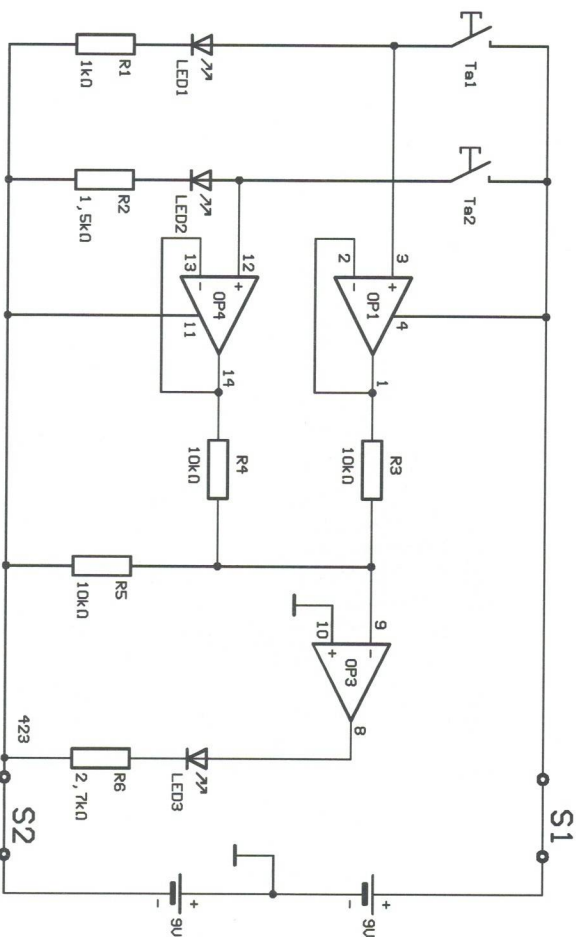


Bild 423. NAND mit OP: Geputzte Eingänge entlasten die Signalquellen.

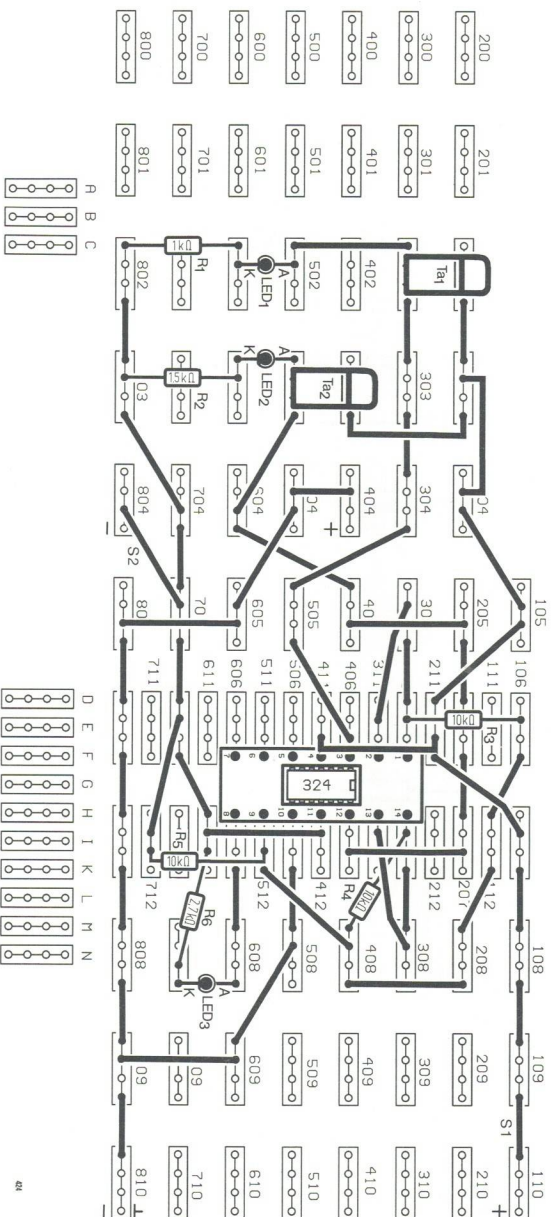


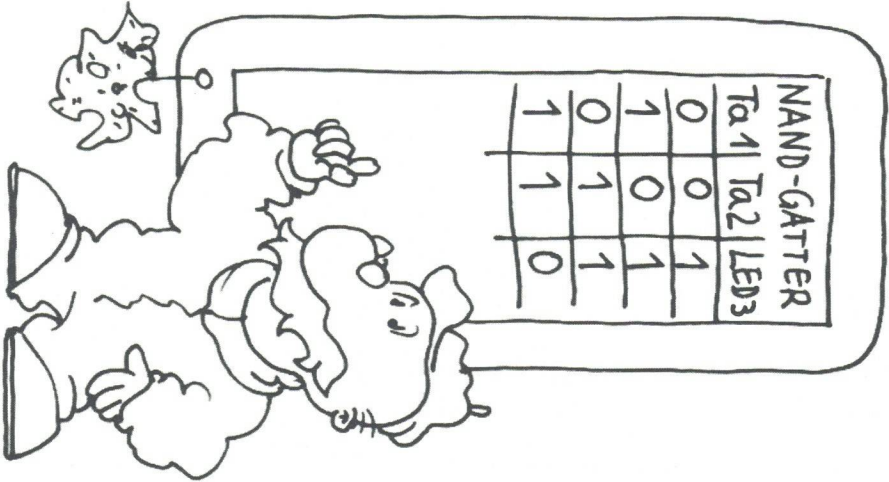
Bild 424. Aufbau zu Bild 423.

OP-Logik

Logisch, daß wir die Erkenntnis von eben noch etwas erweitern. AND, NAND, OR, NOR – alles aus einer Hand, von nur einem Vierfach-OP-Chip.

309

Mit Bild 423 haben wir das NAND des Verdopplers um zwei Pufferstufen erweitert, wie sich das für gute Logikschaltungen gehört. LED1 und LED2 zeigen durch Leuchten an, wo gerade „ja“ anliegt. Drückt beide Taster gleichzeitig, und LED3 verlischt (und nur dann).



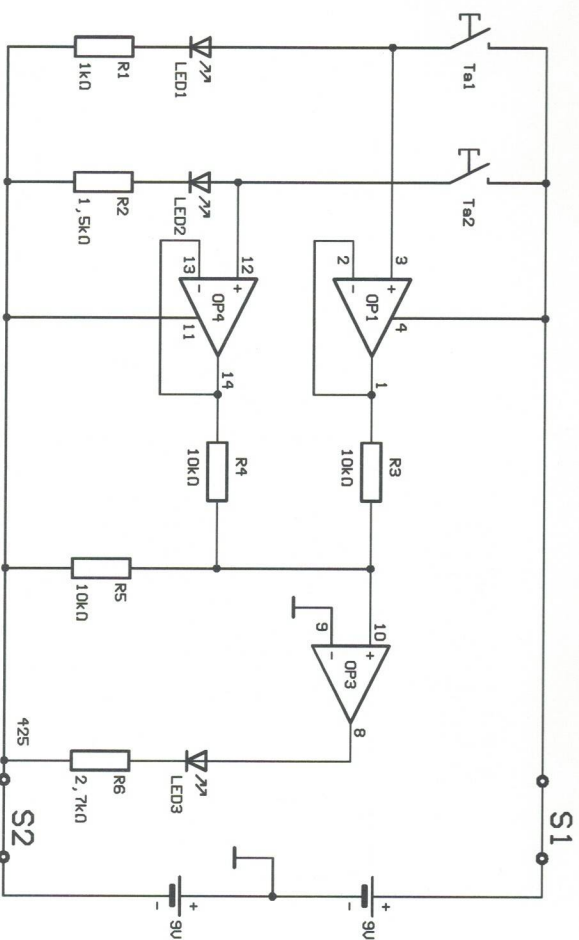


Bild 425. AND, abgeleitet vom NAND: Eingangstausch genügt.

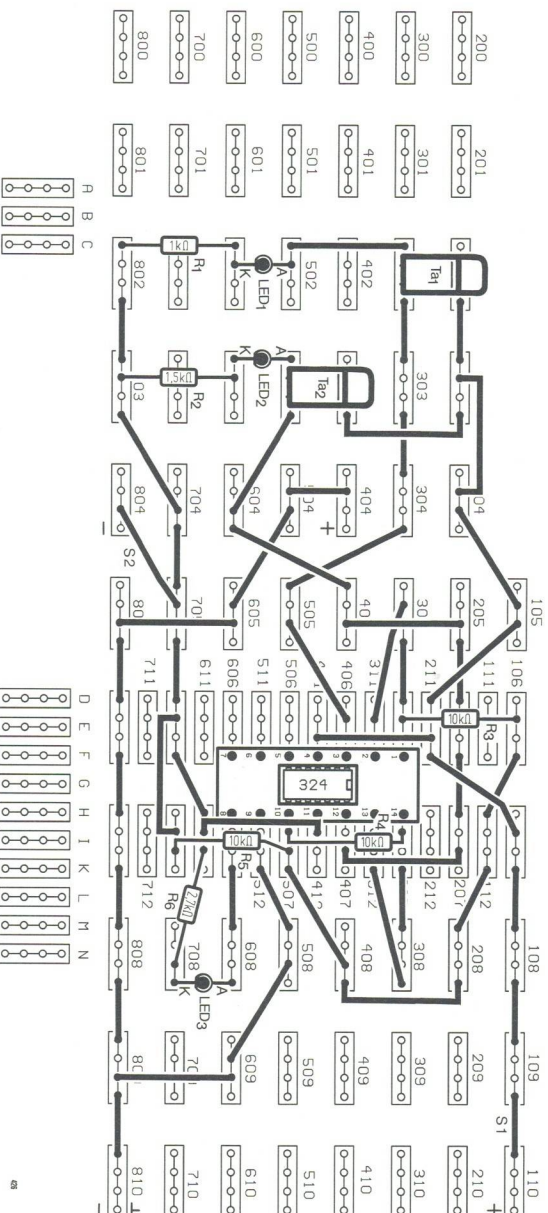
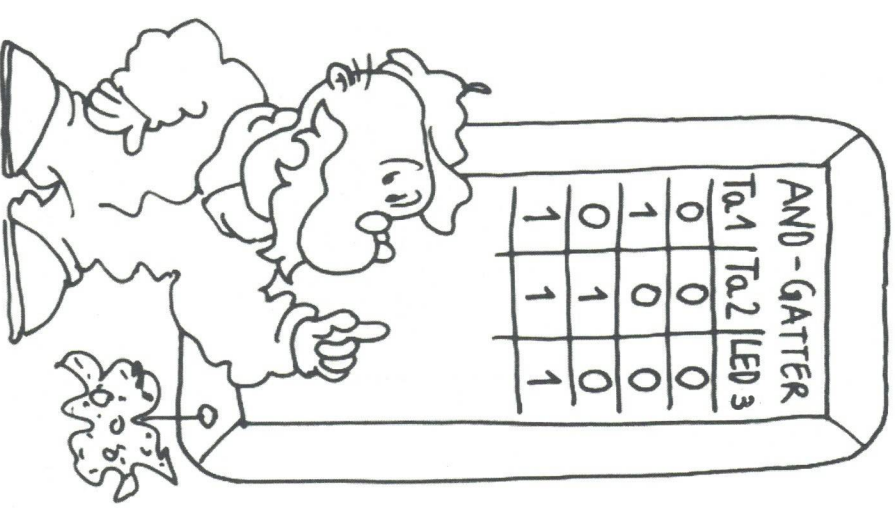


Bild 426. Aufbau zu Bild 425.

310

Vom NAND zum AND – hier ganz einfach: Am dritten OP einfach Eingänge umgedreht anschließen (Bild 425). Aufbauen – beide Taster drücken – LED3 leuchtet (nur dann).



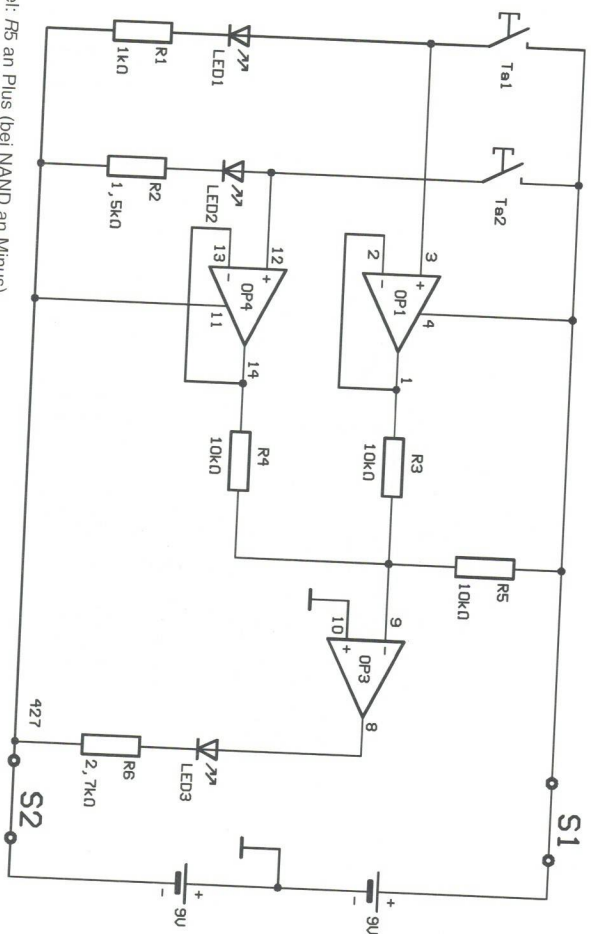


Bild 427: NOR durch Wechsel: F5 an Plus (bei NAND an Minus).

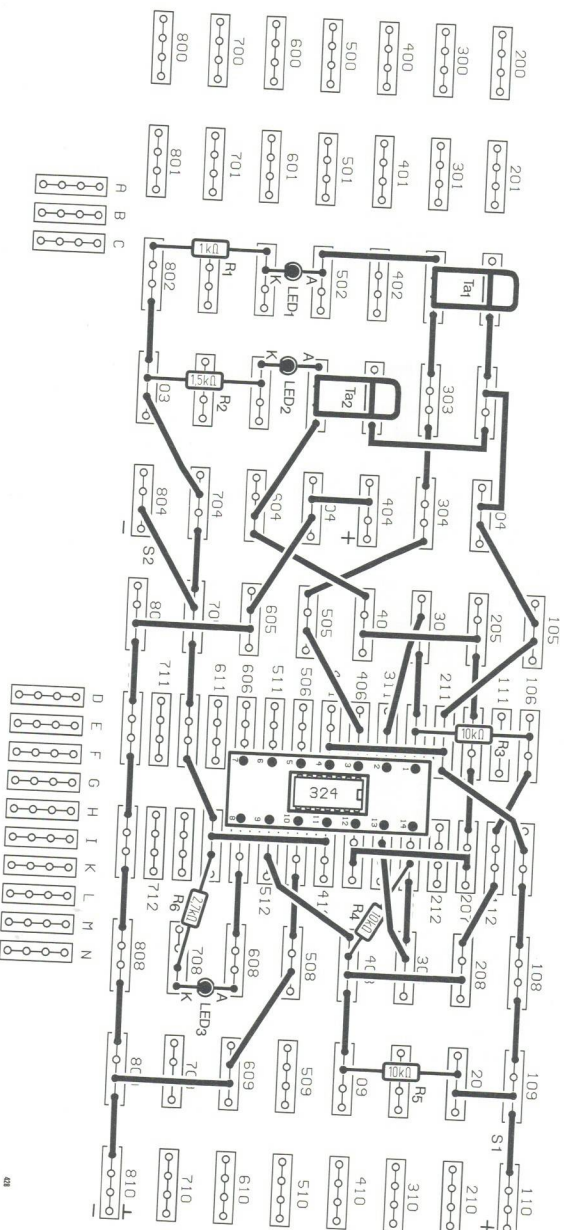
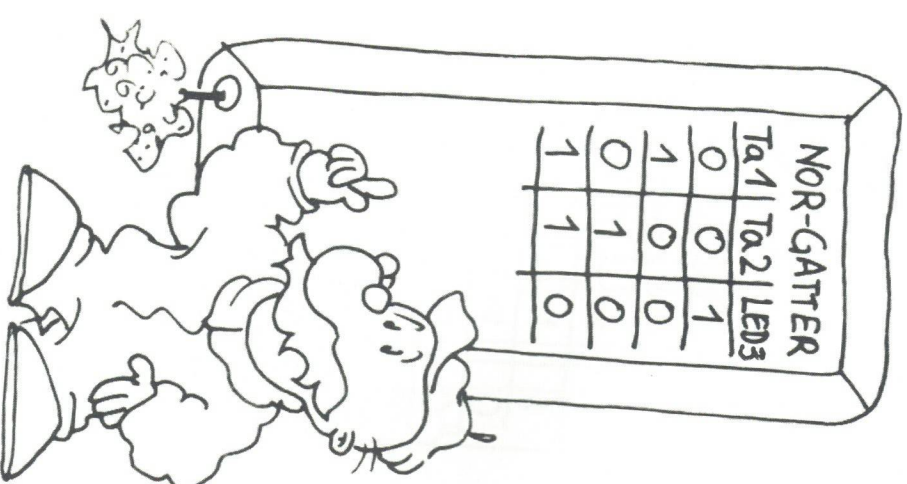


Bild 428: Aufbau zu Bild 427.

311 Die Schaltung nach Bild 427 weicht nur wenig von den Vorgängern ab (F5 hängt jetzt an Plus), doch sie wirkt als NOR. Ta1 oder Ta2 oder beide drücken: LED3 verlicht.



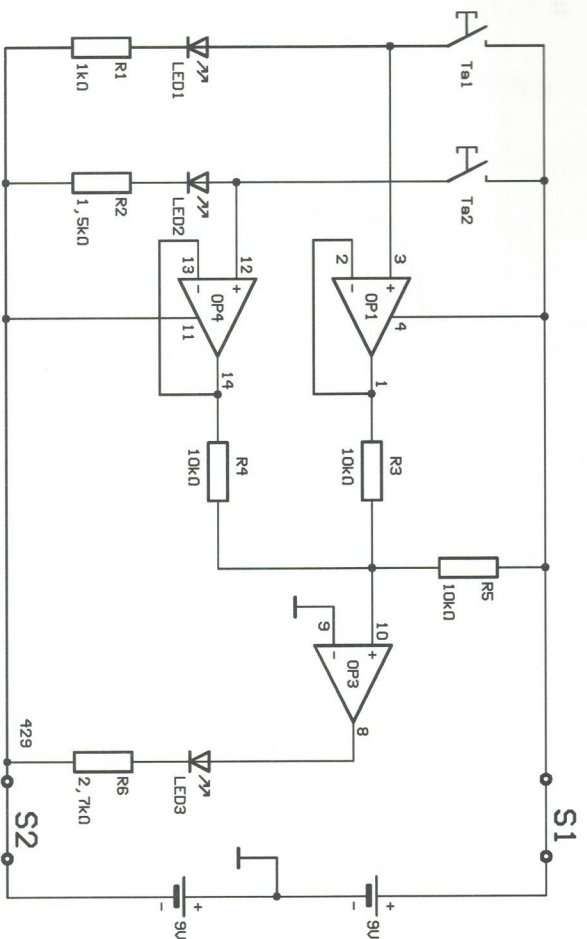


Bild 429. OR aus NOR: Eingänge tauschen – wie beim AND.

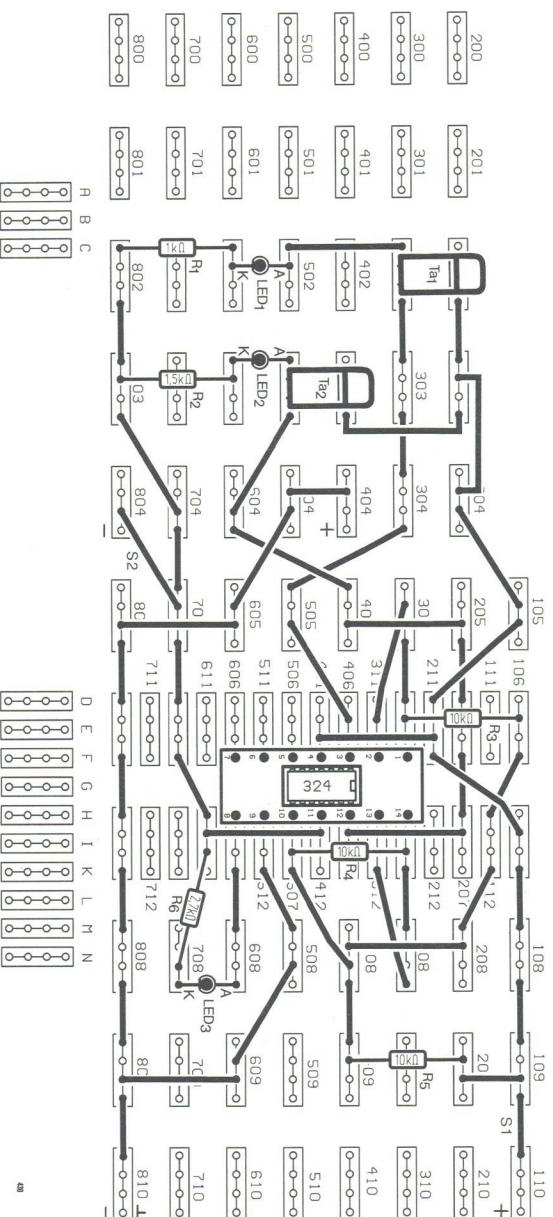
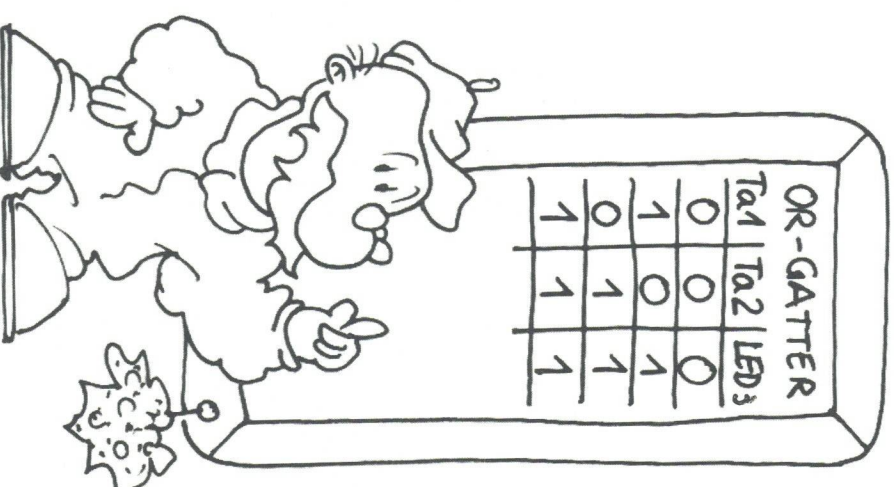


Bild 430. Aufbau zu Bild 429.



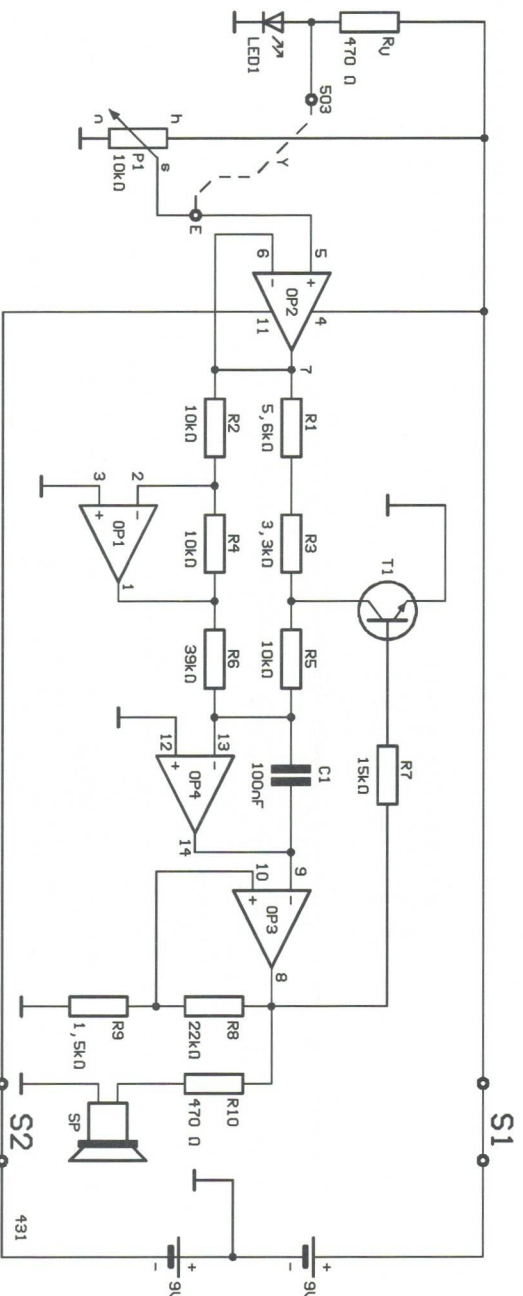


Bild 431. Hören statt Sehen: Farbauskunft zur Tonhöhenänderung.

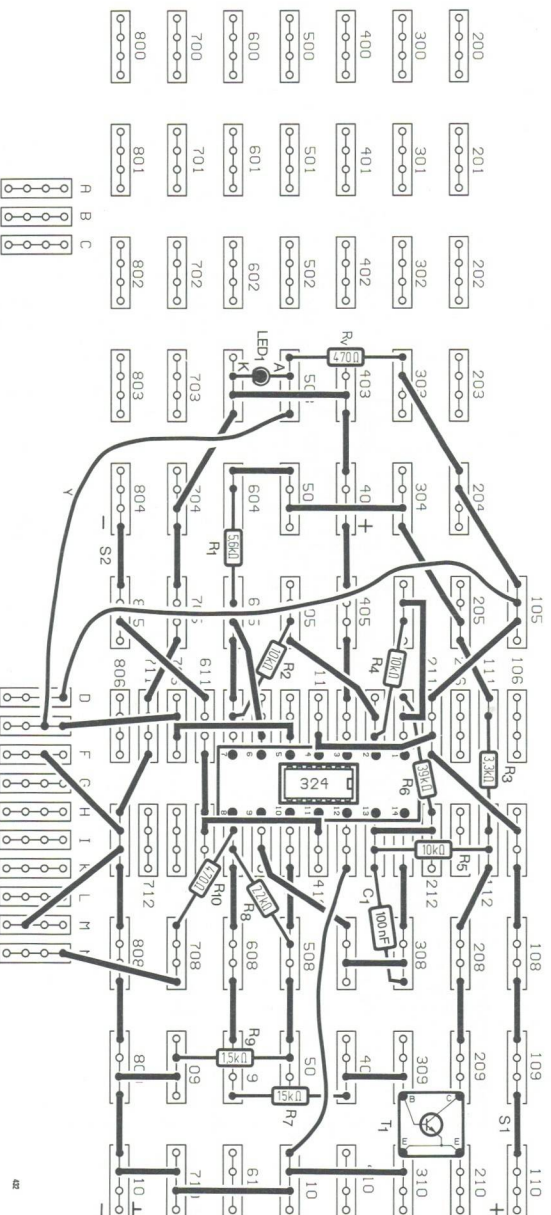


Bild 432. Aufbau zu Bild 431.

Ton-Farben

Leuchtdioden verschiedener Farbe haben unterschiedlich große Flußspannungen, bezogen auf den gleichen Strom. Bei einigen Typenfamilien sind diese Unterschiede nicht sehr groß. Manchmal geht es nur um wenige zehn Millivolt. Für die folgende Schaltung genügt sogar diese kleine Differenz. Mit ihr können z. B. Rot-Grün-Blinde ihr Gehör zur Unterscheidung der Dioden benutzen.

313

Die Schaltung nach Bild 431 gibt einen Ton von sich. Je tiefer der Schleifer von P1 steht, um so tiefer ist der Ton. Wir stecken nun ein Stück Draht (Brücke Y) in die Verbindungsstelle zwischen LED1 und Rv (Kontakt 503) und tippen mit dem anderen Ende auf den Anschluß E, also auf den Potischleifer s. Solange sich der Ton dabei noch ändert, drehen wir am Poti – bis kein Unterschied mehr zu hören ist. Nun setzen wir eine andere Leuchtdiode ein und wiederholen den Test. Ist der Ton jetzt höher, hat diese LED eine höhere Flußspannung – und umgekehrt. Aus früheren Messungen können wir die Farben den Änderungen zuordnen.

Die Schaltung, mit der wir dies tun, ist ein *Spannungs-Frequenz-Wandler*. Eine geschickte Kombination von Einstärker (entkoppelt die Quelle vom Rest der Schaltung), Inverter (unterer OP, dreht die Flußspannung um), Integrator und Komparator sowie Schalttransistor. Sie reagiert auf unterschiedliche Eingangsspannung mit unterschiedlicher Tonhöhe. Zum Verständnis trägt die Betrachtung der von der Eingangsspannung abhängigen Ströme durch R1, R3, R5 einerseits und durch R6 andererseits bei. Der Strom durch R6 ist immer halb so groß wie der eigensamte bei gesperrtem Transistor. Wendet die Erläuterungen früher behandelte Teilschaltungen auf dieses Problem an, und Ihr werdet alles verstehen!

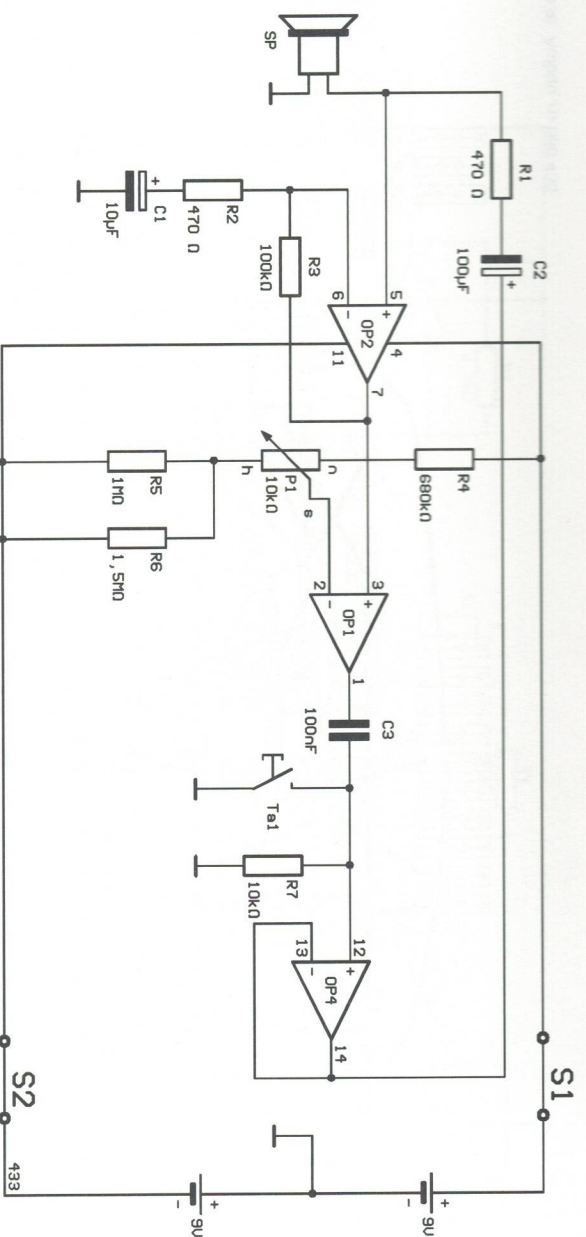
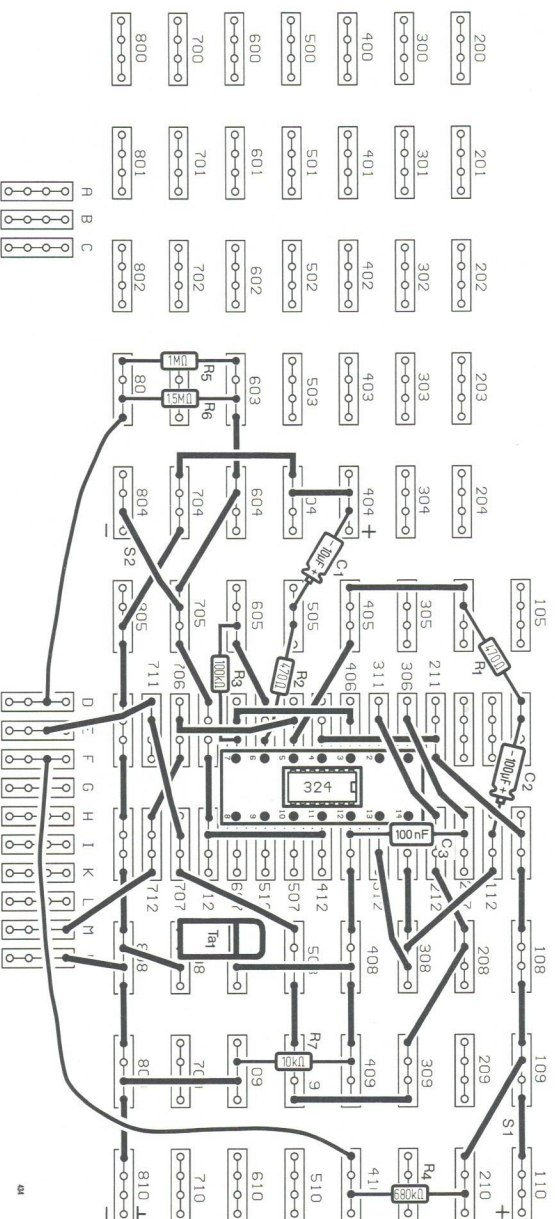
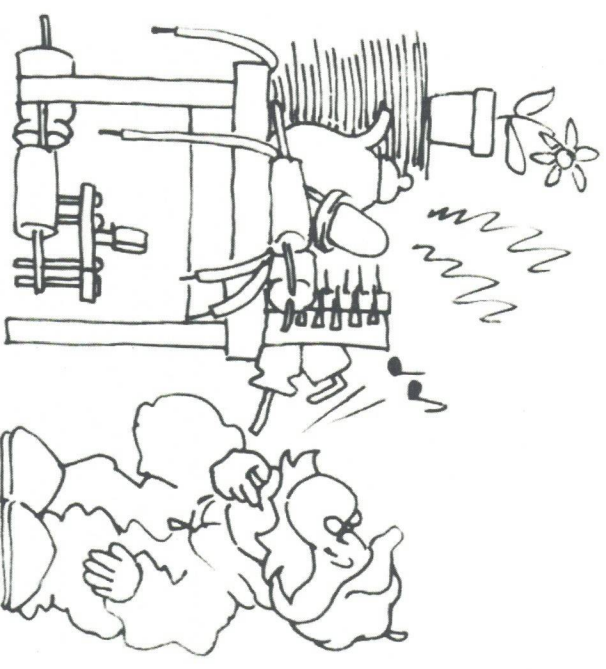


Bild 433. Wer ruft, der findet: Nachbildung des „Schlüsselfinder“-Prinzips. Auch als geräuschempfindliche Alarmanlage verwendbar.



Schlüsselfinder nach Art des Hauses
Mehr als eines dieser Dinger sollte man nie im Zimmer haben, das Piepsen hört sonst nicht auf.

314 Den Grundversuch zu den kleinen Vorbildern bauen wir nach Bild 433 auf. Klatschen, Pfeifen, auf den Tisch klopfen – alles führt zum Alarm. Löschen läßt er sich nur mit Ta1. Vorsichtig, damit nicht gleich wieder ein auslösendes Geräusch entsteht. Es hängt von den Toleranzen der Widerstände ab, wie empfindlich an P1 gestellt werden kann. Darum eine Erweiterungsempfehlung:



Zur Funktion: Linker OP (OP2) hat hohe Verstärkung für Wechselspannung, aber stabilen Gleichstrom-Arbeitspunkt (nahe 0 V). Mittlerer OP (OP1) ist Komparator mit Ausgang auf positiver oder negativer Sättigung. C3 blockt das nach dem rechten OP (OP4) hin ab, der in Ruhe als Eins-Verstärker ebenfalls ziemlich stabil 0 V am Ausgang führt. C2 trennt diesen Punkt gleichspannungsseitig vom Lautsprecher, der auch als Mikrofon wirkt. Was bei Auftreffen von Schall passiert, könnt ihr euch leicht erklären.

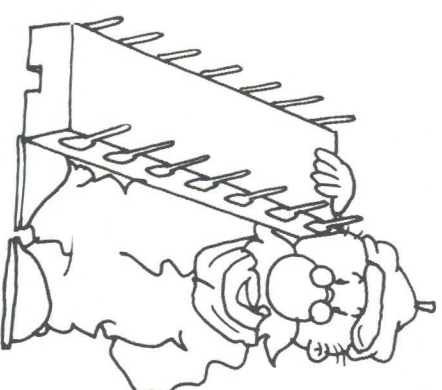


Bild 436. Aufbau zu Bild 435.

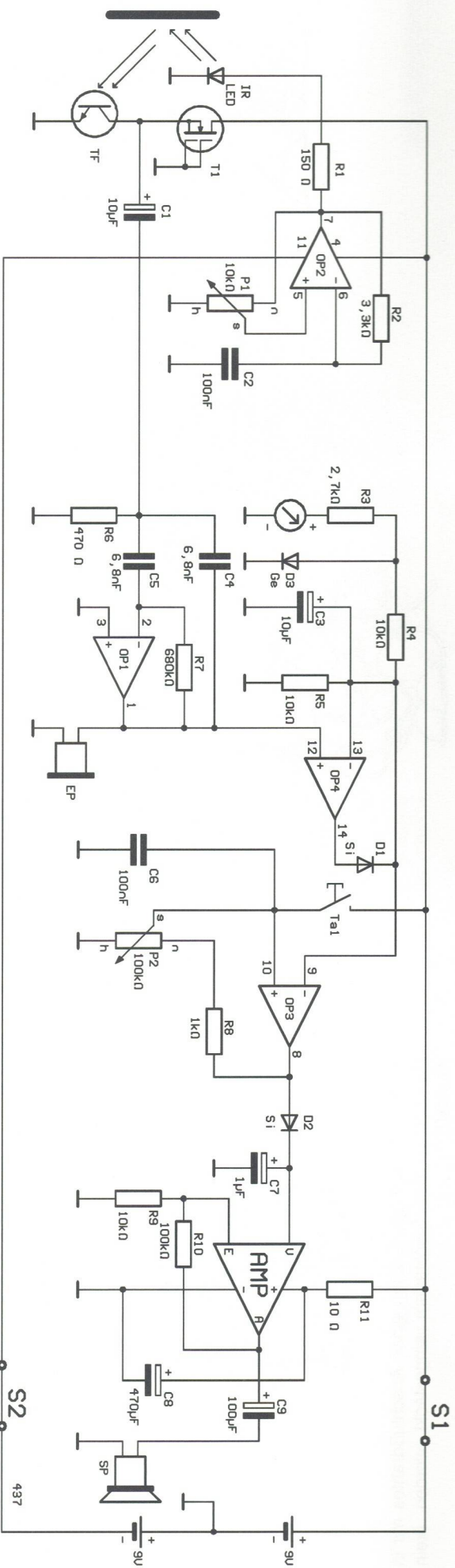


Bild 437. Störfrei durch Auslese: Auf Frequenz des Senders abgestimmtes OP-Filter in Alarmanlage mit Reflexlichtschranke.

Alarm vom Feinsten

Bei dieser Anlage wird der aus dem Pult kommende IR-Strahl durch reflektierende Gegenstände auf den Fototransistor im gleichen Pult zurückgeworfen: eine *Reflexlichtschranke*.

316

Nach Aufbau der Gesamtschaltung gemäß Bild 437 prüfen wir zunächst die Teilschaltungen. P1 und P2 werden in Mittelstellung gebracht. Anschließend ziehen wir D2 und hören den Alarmton, wenn der AMP richtig beschaltet ist. Danach D2 wieder einstecken und Verbindung zu TF ziehen. Vom Verbindungspunkt IR-LED – R1 einen Widerstand von 1,5 M Ω an den Pluspol von C1 stecken und auf EP sowie das Instrument achten. An P1 Ton bzw. Ausschlag auf Maximum drehen. 1,5 M Ω entfernen, TF wieder anschließen.

Nun die Hand, ein Stück Pappe o. ä. in einigen Zentimetern Abstand vor die Öffnungen von IR-LED und TF halten. Nochmals an P1 Tonmaximum suchen. Die Lautstärke hängt von der Entfernung des „Reflektors“ ab. Nun P2 langsam nach n zu drehen, bis Alarmton einsetzt. Reflektortafel entfernen, mit Ta1 Alarm löschen. Jetzt nähern wir uns erneut – es dürfte wieder Alarm geben.

Die Schaltung ist ein Leckerbissen für „Analytiker“. Fast alles bekannte Teilschaltungen, bis auf den OP mit C4 und C5. Das ist ein *Bandpaß zweiter Ordnung*. Auf ihn stimmen wir mit P1 die Sendertfrequenz ab, denn nur für eine von seiner RC-

Beschaltung bestimmte Frequenz verstärkt diese Stufe besonders gut. Alle übrigen Frequenzen werden, wie beim Schwingkreis, stark bedämpft.

317

Mit den Werten von R7 und R6 kann ein wenig experimentiert werden: R7 bis 1,5 M Ω , R6 zwischen 150 Ω und 2,7 k Ω .

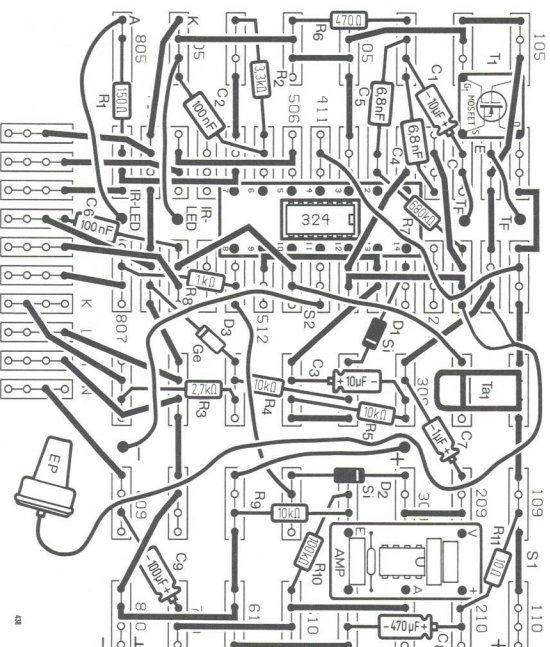
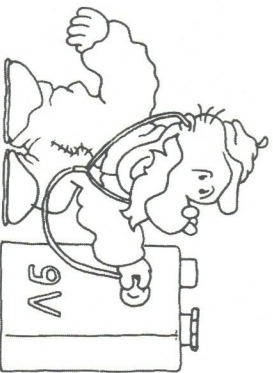


Bild 438. Aufbau zu Bild 437.

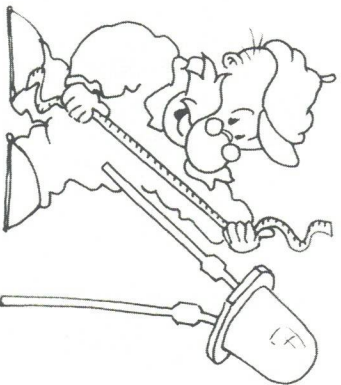
30. Fehlersuche

Wenn eine Schaltung überhaupt nicht gehen will, ist gewöhnlich ein Versehen beim Aufbau schuld. Die Schaltungen selbst arbeiten einwandfrei und sind schon viele Male mit Erfolg aufgebaut worden. Wenn sich ein Problem ergibt, schlagen wir vor, die folgende Checkliste durchzugehen.

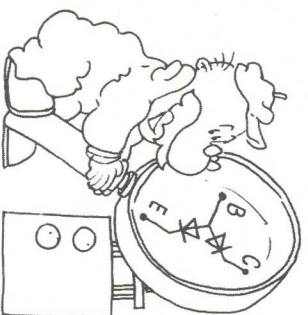
1. Zunächst prüfen, ob die Batterie frisch ist.



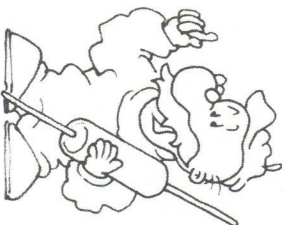
2. Untersuchen, ob Dioden, LEDs und Elkos richtig gepolt sind.



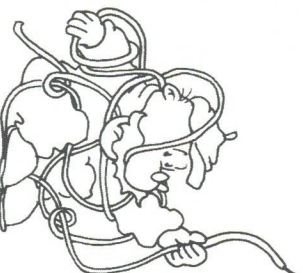
3. Überprüfen, ob die Transistoren richtig herum eingesteckt sind.



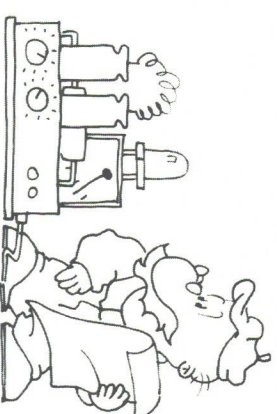
4. Leicht zu verwechseln sind die Widerstände 10 Ω (braun-schwarz-schwarz), 100 Ω (braun-schwarz-braun), 1k Ω (braun-schwarz-rot), 10k Ω (braun-schwarz-orange), 100k Ω (braun-schwarz-gelb) und 1M Ω (braun-schwarz-grün) sowie 3,3k Ω (orange-orange-rot) und 33k Ω (orange-orange-orange) sowie auch 150 Ω (braun-grün-braun) und 15k Ω (braun-grün-orange), eventuell auch noch 1,2 Ω (braun-rot-gold) und 12 Ω (braun-rot-schwarz).



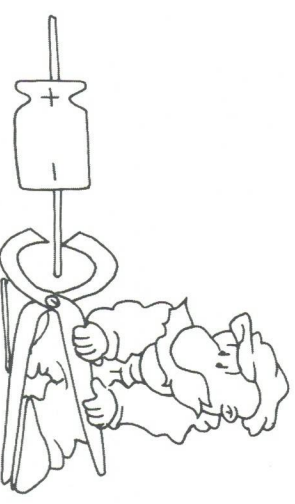
5. Sind alle Drahtbrücken richtig eingesetzt? Jedes Teil, das eingesteckt wird, sollte am besten auf dem Aufbaubild durchgestrichen werden. Außerdem vergleicht man, ob alle Stecklöcher so besetzt oder frei sind wie auf dem Aufbaubild.



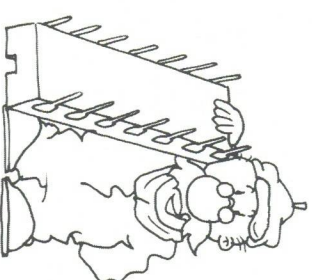
6. Ob ein Teil kaputt ist, kann man mit der Schaltung prüfen, in der es zum ersten Mal verwendet wurde.



7. Manche Bauteile haben unter Umständen etwas zu lange Anschlußdrähte, die gekürzt werden müssen. Sie stehen sonst unten aus den Steckfedern heraus und können sich berühren, was zu unerwünschten Kurzschlüssen führen kann.



8. Sind die Module mit den ICs richtig herum eingesteckt? Ein verdrehtes IC-Modul erhält unter Umständen eine verkehrte gepolte Versorgungsspannung, erhitzt sich und geht kaputt.



9. Niemals darf die Isolation eines Anschlußdrahtes mit in die Löcher der Steckfedern eingesteckt werden (kein Kontakt!).

Sachwörter

- A**
 A/D-Wandler 145
 Aschirnen 56
 AM 58
 Ampere 20
 Amperemeter 133
 Amplitudenmodulation 58, 66
 Analog-Digital-Wandler 145
 analog 45
 Analogrechner 116
 Analogspeicher 62
 AND 53
 Anode 22
 Arbeitspunkt 46
 Audion 69
- B**
 Bandpaß 165
 Basisschaltung 66
 Bauelement 16
 Biasstrom 135
 Bleiakkumulator 21
 Brückenschaltung 82
- C**
 Chip 16
 Computer 39, 53
 Colpitts 66
- D**
 Dämmerungsschalter 100, 106
 Darlington-Schaltung 38
 Datenblatt 134
 Dielektrikum 27
 Dielektrizitätskonstante, relative 28
 Differenz 76, 80
 Differenzverstärker 80
 digital 45
 Digitalrechner 116
 Dimmer 62
 Diode 31
 Diode, lichtaussendende 102
 Dotieren 19, 30
 Drain 58
 DRAM 62
 Drehko 56
 Drehkondensator 56
 Dreiecksschwingung 121
 Driftgeschwindigkeit 20
 dynamisch 40, 77, 94
- E**
 Eigenspannungsbedarf 133
 Einerschalter, lichtgesteuerter 98
 Einschaltverzögerung, einstellbare 148
 Einweggleichrichter 84
 Elektrizität 18
 Elektrode 58
 Elektrolyse 18
 Elektronen 18
 Element, galvanisches 21
 Elko 28
 Emittierfolger 37
 Emitterschaltung 35
 entkoppeln 41
 Erde 57
- F**
 Farad 27
 Feldeffekttransistor 58
 Feldkonstante 27
 Feldkraft 17
 Fensterkomparator 157
 fernsteuern 36
 Flimmererschmelzungsfrequenz 129
 Flipflop 39
 Flußspannung 22
 Fotodarlington 104
 Fourier 123
 Frequenz 41
 Frequenzmodulation 115
 Frequenzteiler 41
 Frequenzverdoppler 157
- G**
 Gate 58
 Gatter 53
 Gegenkoppeln 46
 Gegenkopplung 46
 Gegenaktendstufe 74
 Generator 21
 Gleichgewicht 83
 Gleichrichter, idealer 84
- H**
 Halbleiter 19, 30
 Henry 64
 Hertz 41
 HF 57
 High 87
 Hysteresis 44
- I**
 Induktivität 64
 Innenwiderstand 26, 133
 Integrator 118
 Inverter 36
- invertiert** 84
Isolatoren 19
- K**
 Kanal 58
 Katode 22
 Kennlinien 47, 133
 Kipstufe, bistabile 39
 Knotenpunkt 25
 Kollektorfollower 35
 Komparator 83
 komplementär 48
 Kondensator 27
 Konstantstromquelle 59
 KOSMOS Netzgerät X 5
 KOSMOS Netzschaltgerät 5
- L**
 Ladungsträger 18
 Lastkreis 35
 Lautstärkemesser 126
 Leistung 21
 Leiter 19
 Leitwert 24
 Leuchtdiode 22, 32
 Lichtleitungs-Antenne 57
 Lichtorgel 153
 Lithium-Batterien 21
 Logik, positive 54
 Low 87
 Lux-Meter, akustisches 107
- M**
 magisches Auge 68
 Maschenregel 25
 Masse 84
 Masse, virtuelle 119
 Minimum 82
 Mitkoppeln 75
 Mitkopplung 71, 93
 Mittelwellenmodul 56
 Mittelwellensender 66
 modulieren 57, 93
 Monoflop 43
 MOSFET 58
 Multivibrator, bistabiler 39
 Multivibrator, monostabiler 43
- N**
 NAND 53
 Nennspannung 21
 Nicht-Oder 54
 NOR 53-54
- O**
 Ohm 22
 Operationsverstärker (OP) 55, 116
- Opto-Elektronik** 102
Optokopier 106
OR 53, 55
Oszilloskop 65
- P**
 parallel 23
 Parallelschaltung 24
 Phase 48, 66
 Phasenschiebergenerator 93
 Polung 19
 Potential 59
 Potentiometer 23
 Poti 23
 Pellen 147
 PUT 49
- R**
 Rechteckschwingung 121
 Reed-Relais 40
 Reflexlichtschranke 165
 Reflexstufe 70
 Refresh 62
 Reihenschaltung 24, 28
 Resonanzfrequenz 57, 65
 retrigierbar 95
 Retriggern 94
 RS-Flipflop 49
 Rückkopplung 71
 rücksetzen 49
- S**
 Sägezahnsschwingung 75
 Sättigung 36, 47
 Sättigungsstrom 33
 Schaltung, integrierte 16
 Schwebung 114
 Schwellenspannung 33
 Schwellwertschalter 44
 Schwingkreis, offener 66
 Schwingkreis 56
 Schwingung, gedämpfte 65
 Selbstinduktion 63
 Selektion 69
 Sensor-Dimmer 62
 setzen 49
 Shunt 133
 Signalspannung 46
 Sinuslinie 65
 Source 58
 Spannung 19
 Spannungs-Frequenz-Wandler 162
 Spannungsteiler 22
 Spannungsteiler, kapazitiver 66
 Steuerkreis 35
 Strom 19
 Stromkreis 19

Stromrichtung, physikalische 20
 Stromrichtung, technische 20
 Stromspegel 78
 Stromverstärkung 36
 Synchronisation 114

Timer 85, 94
 Toggeln 40
 Träger 58
 Transistor 33
 Treibertransistor, 74
 Treppenspannung 122
 Trac 48

U
 Unijunction-Transistor 49
 Unipolartransistor 58

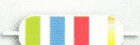
V
 Verarmungstyp 58
 Verstärker, invertierender 124
 Verstärker, nichtinvertierender 124
 Verschichtdiode 48
 Vollwellengleichrichtung 144
 Volt 21
 Voltmeter 133

W
 Wechselstrom 29
 Welle 66

Wellenlänge 57
 Widerstand, spezifischer 20
 Wien 124

Z
 Zählpfeil 25
 Zeitkonstante 28
 Zimmerantenne 57



																
10Ω	33Ω	100Ω	150Ω	470Ω	470Ω	1kΩ	3,3kΩ	5,6kΩ	10kΩ	15kΩ	33kΩ	100kΩ	220kΩ	680kΩ		

1000 pF = 1 nF	100 nF = 0,1 μF	6800 pF = 6,8 nF	1000 nF = 1 μF
----------------	-----------------	------------------	----------------

electronic system I

electronic system II

Die Umrechnungshilfe für die Kondensatoren, die farbig codierte Einlage für die Widerstände sowie die Schriftzüge kann man ausschneiden und auf die Platte kleben. Wo Sie hingehören sieht man auf dem Titelbild der Anleitung.



Widerstände:

Farbe	1. Ring (1. Ziffer)	2. Ring (2. Ziffer)	3. Ring (Zahl der Nullen)	4. Ring (Toleranz)
schwarz	0	0	–	
braun	1	1	0	± 1 %
rot	2	2	00	± 2 %
orange	3	3	000	
gelb	4	4	0000	
grün	5	5	00000	
blau	6	6	000000	
violett	7	7	–	
grau	8	8		
weiß	9	9		
gold			x 0,1	± 5 %
silber			x 0,01	± 10 %
ohne Ring				± 20 %