



# Digitaltechnik Versuche





# Lectron

## Anleitungsbuch zum Experimentiersystem Digitaltechnik

Autor:  
Gerd Kopperschmidt

Herausgeber  
Reha Werkstatt Oberrad  
Lectron

Buchrainstraße 18  
60599 Frankfurt

Tel.: +49 (0)69 90 50 12 82

Fax: +49 (0)69 90 50 12 83

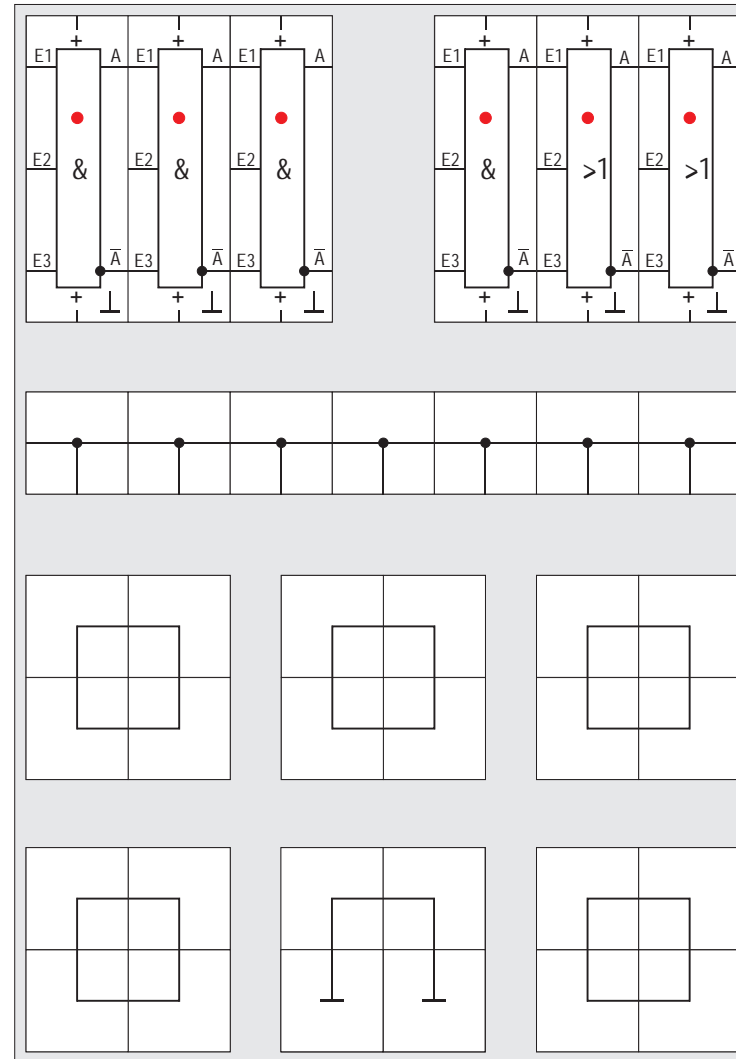
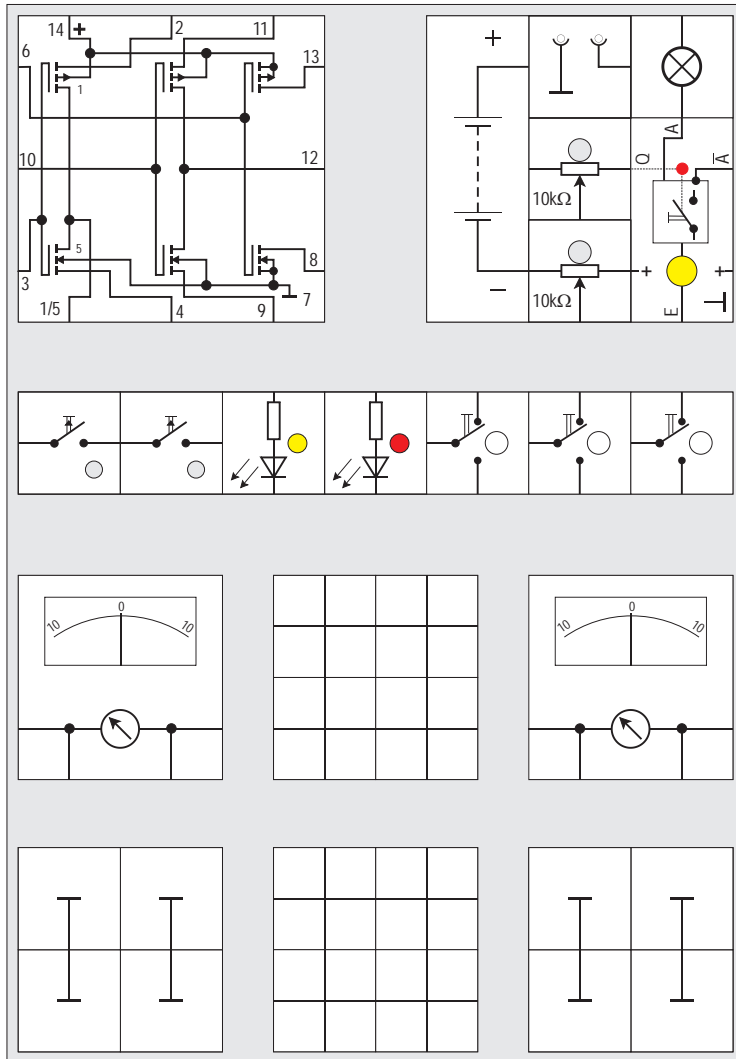
Email: [lectron@frankfurter-verein.de](mailto:lectron@frankfurter-verein.de)

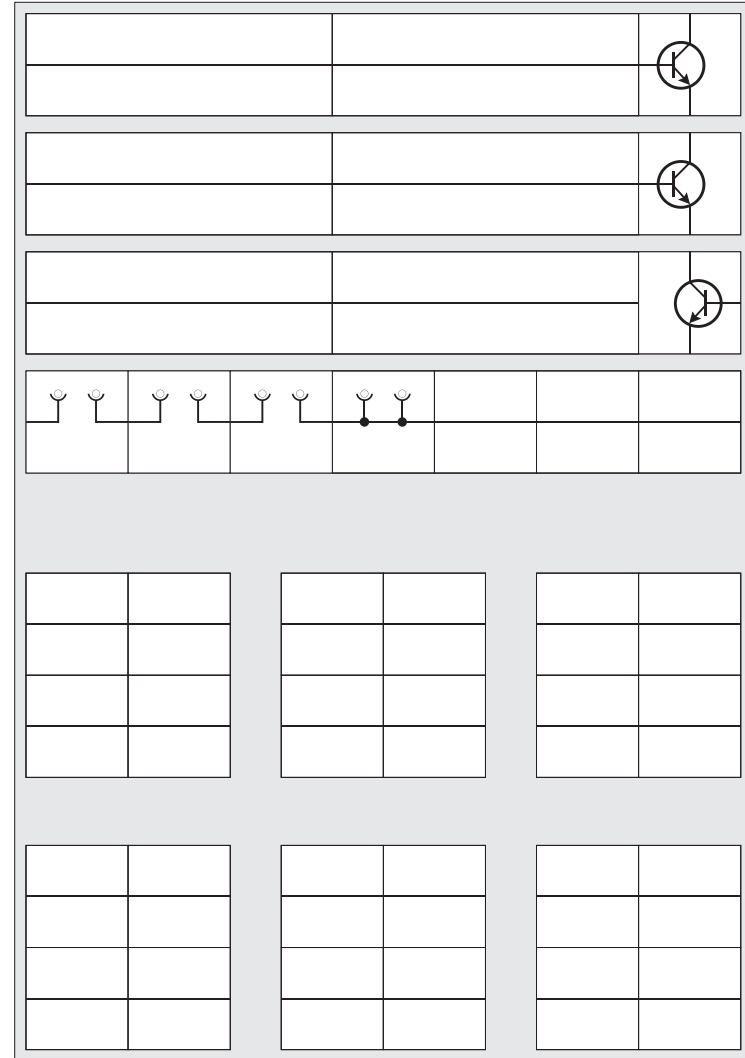
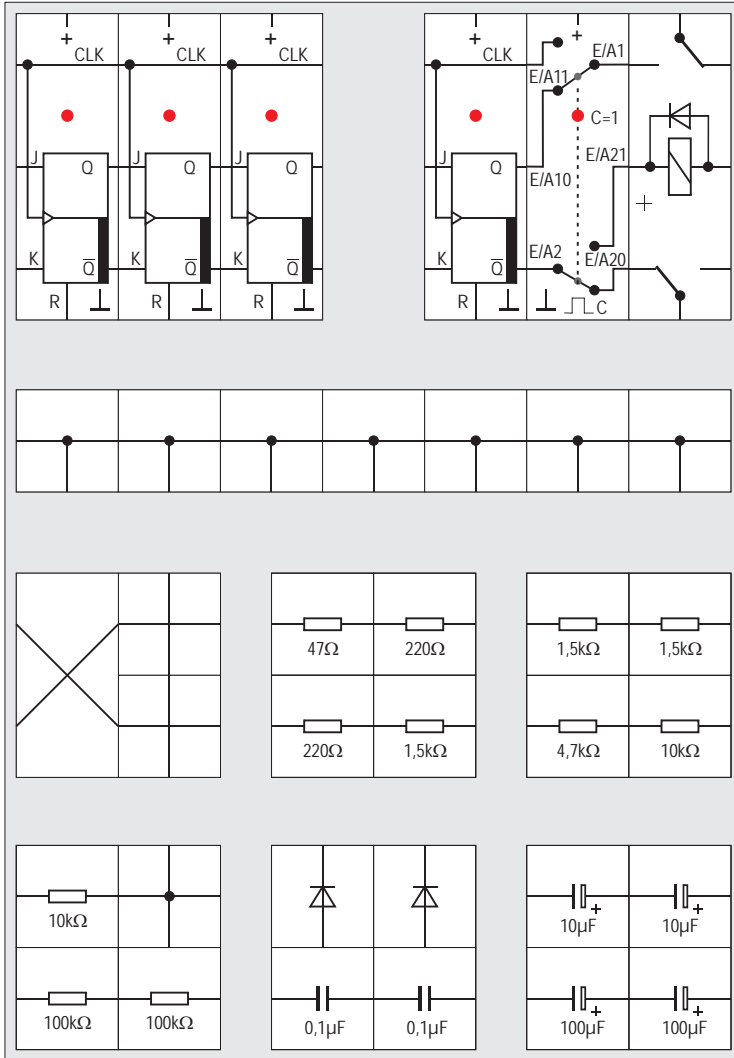
[www.lectron.de](http://www.lectron.de)

# Bauteile System 1011



# Lectron





# Verzeichnis der Versuche

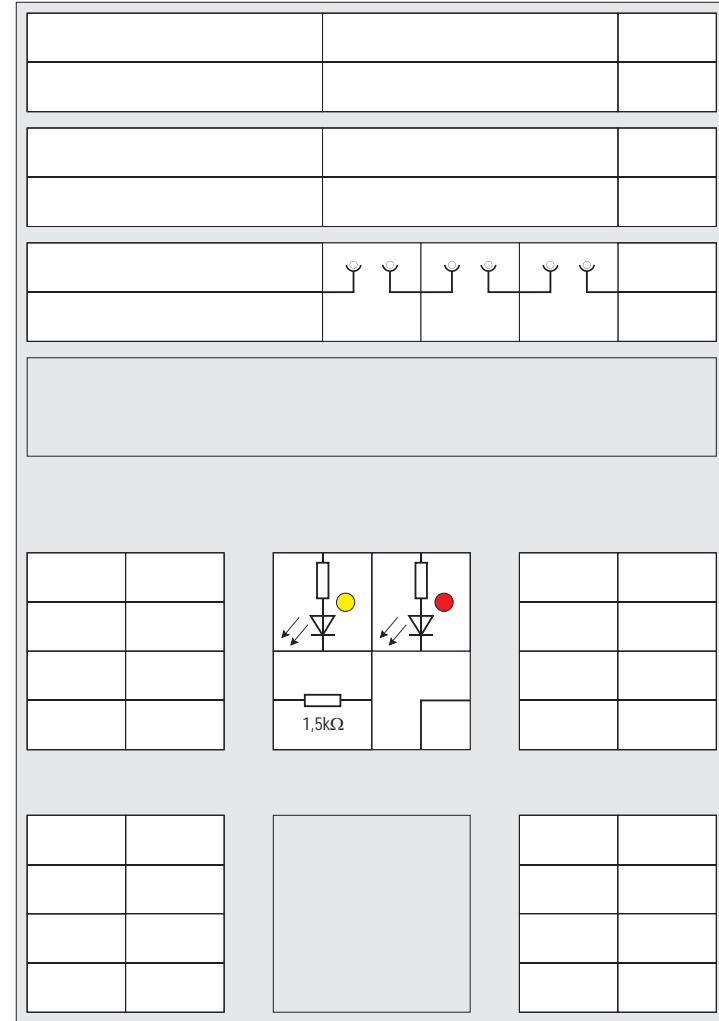
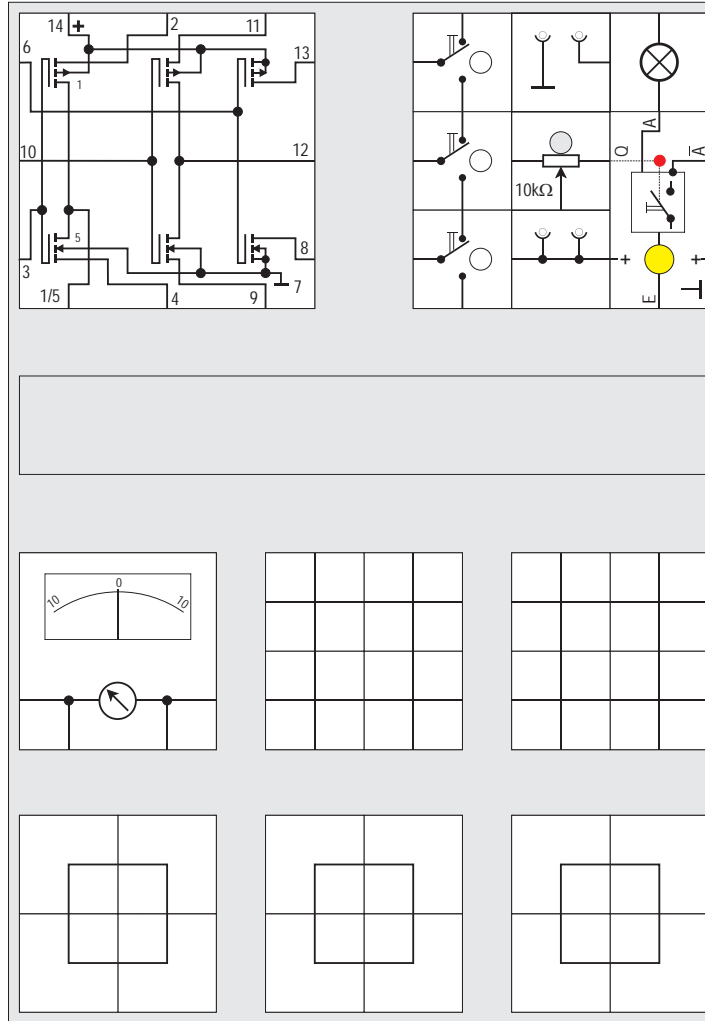
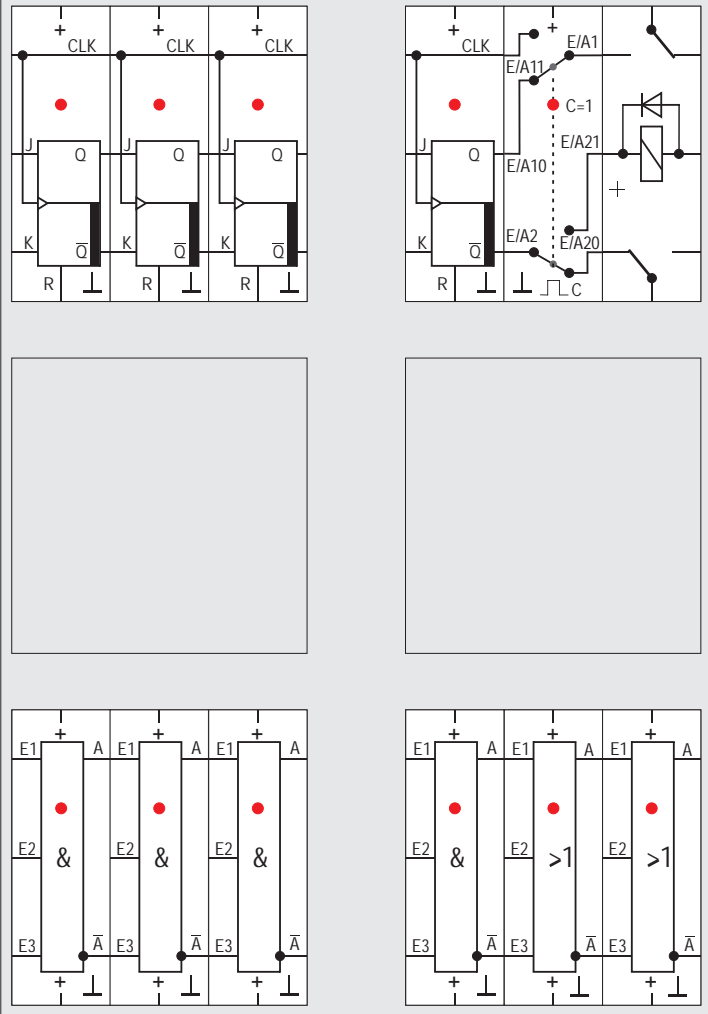
# Lectron

Versuch-Nr.	Seite	Versuch-Nr.	Seite	Versuch-Nr.	Seite
Bauteile des Elementarsystems 1011	4	9 Halbleiter - UND - Schaltung mit Impedanzwandler	42	23 Erweiterung der EXOR - Funktion mit Relais	70
Verzeichnis der Versuche	6	10 Gegenseitige Beeinflussung der UND - Schaltungseingänge	44	Zusammenfassung bisheriger Ergebnisse	73
Bauteile des Ausbau-Systems 1007	8	11 Beeinflussung des anderen UND - Schaltungseinganges	46	Klassifizierung der Feldeffekttransistoren	74
Spannungsquellen	9	12 ODER - Funktion mit Halbleitern	48	Aufbau des MOSFETs	76
Messen mit dem Digitalmultimeter	10	13 Belastung der Halbleiter ODER - Schaltung mit Glühlampe	50	Schutzmaßnahmen	79
Grundlagen der digitalen Elektronik	13	14 Halbleiter ODER - Schaltung mit Impedanzwandler	52	Zusatzbeschaltung	79
Unterschied zwischen der Analog- und Digitaltechnik	14	15 NICHT - Funktion mit Relais und Anzeige mit Instrument	54	24 Eingangskennlinie eines n - Kanal - MOSFETs	80
Aufbau und System des Experimentierkastens	15	16 NICHT - Funktion mit Relais und Anzeige mit Glühlampe	56	25 Eingangskennlinie eines p - Kanal - MOSFETs	82
Logische Verknüpfungen	25	17 NICHT - Funktion mit Transistor	58	Ausgangskennlinie eines n - Kanal - MOSFETs	84
1 UND - Funktion mit zwei Tasten und Instrument	26	18 Belastung der Halbleiter NICHT - Schaltung mit Glühlampe	60	CMOS - Inverter	85
2 UND - Funktion mit zwei Tasten und Glühlampe	28	19 NICHT - Schaltung mit Glühlampen- anzeige und Impedanzwandler	62	26 Übertragungskennlinie eines CMOS - Inverters	86
3 UND - Funktion mit Relais	30	20 NAND - Funktion mit Relais und Glühlampe	64	27 Übertragungskennlinie hintereinander geschalteter Inverter	88
4 UND - Funktion mit Halbleitern	32	21 NOR - Funktion mit Relais und Glühlampe	66	28 Übertragungskennlinie parallel geschalteter Inverter	90
5 Belastung der Halbleiter UND - Schaltung mit Glühlampe	34	22 EXOR - Funktion mit Glühlampe	68	29 Die NAND - Verknüpfung	92
6 Stromverstärkung eines Transistors in Kollektorschaltung	36			30 Die AND - Verknüpfung	94
7 Wirkung eines Widerstandes am Eingang der Kollektorschaltung	38			31 Übertragungskennlinien eines AND/NAND - Bausteins	96
8 Zwei Transistoren in »Kaskaden- Kollektorschaltung«	40			32 Die NOR - Verknüpfung	98
				33 Die OR - Verknüpfung	100



Versuch-Nr.	Seite	Versuch-Nr.	Seite	Versuch-Nr.	Seite
34 Übertragungskennlinien eines OR/NOR - Bausteins	102	50 Das taktflankengesteuerte D- Flipflop	142	Wie geht es weiter?	
MOSFET - Analogschalter	104	51 Der Funktionsbaustein »Transmission Gate«	144	Ausbau-System Zähler und Schrittmotor	178
35 Transmission - Gate	106	52 Das »Master - Slave -Flipflop«	146	Ausbau-System Schwellwert- und Majoritätslogik	180
Die EXOR - Verknüpfung	108	53 Frequenzteiler	148	Ausbausystem Operationsverstärker	182
Der AND/NAND - Funktionsbaustein	110	54 Das JK - Master - Slave - Flipflop	150	Bauteilliste	184
Der OR/NOR - Funktionsbaustein	112	55 Binärzähler aus JK - Master -Slave - Flipflops	152	Anhang Messbereichserweiterung	185
36 Umschaltkennlinien des AND/NAND - Funktionsbausteins	114	56 Synchroner Binärzähler aus JK - Master -Slave - Flipflops	154	Der Timer-Baustein 555	187
37 Umschaltkennlinien des OR/NOR - Funktionsbausteins	116	57 Synchroner modulo-8-Zähler	156	Astabiler Multivibrator	189
38 Eine einfache Speicherzelle	118	58 Synchroner modulo-16-Zähler	158	Spannungsverdoppler, Spannungsinvertierer	191
39 Einfache Speicherzelle aus Funktionsbausteinen	120	59 Synchroner modulo-16- Rückwärts-Zähler	160	Monostabile Kippstufe	193
40 Speicherzelle aus AND/NAND - Funktionsbausteinen	122	60 Synchroner Dekadenzähler	162		
41 Speicherzelle aus OR/NOR - Funktionsbausteinen	124	61 Vierstufiges Schieberegister	164		
42 Funktionsbaustein »Entprellte Taste«	126	62 Monostabile Kippstufe mit OR/NOR - Funktionsbausteinen	166		
43 Schmitt-Trigger	128	63 Monostabile Kippstufe mit AND/NAND - Funktionsbausteinen	168		
44 Schmitt-Trigger mit kleiner Hysterese	130	64 Astabiler Multivibrator aus OR/NOR - Funktionsbausteinen	170		
45 Schmitt-Trigger m. einstellb. Hysterese	132	65 Einfacher astabiler Multivibrator	172		
46* Schmitt-Trigger aus Invertern	134	66 Ringoszillator	174		
47 Das getaktete RS - Flipflop	136	67 Ringoszillator mit modulo-16-Zähler	176		
48 Das D - Flipflop	138				
49 Das taktflankengesteuerte $\overline{RS}$ - Flipflop	140				

# Bauteile System 1007



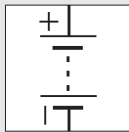
Teile Ausbau-System



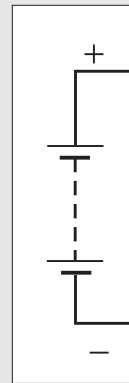
# Spannungsquellen

# Lectron

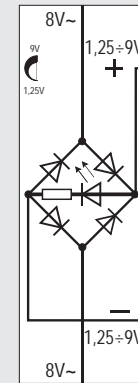
Die Lectron Schaltungen können aus verschiedenen Spannungsquellen versorgt werden



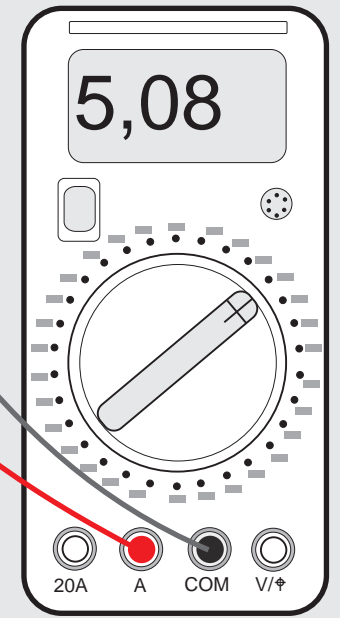
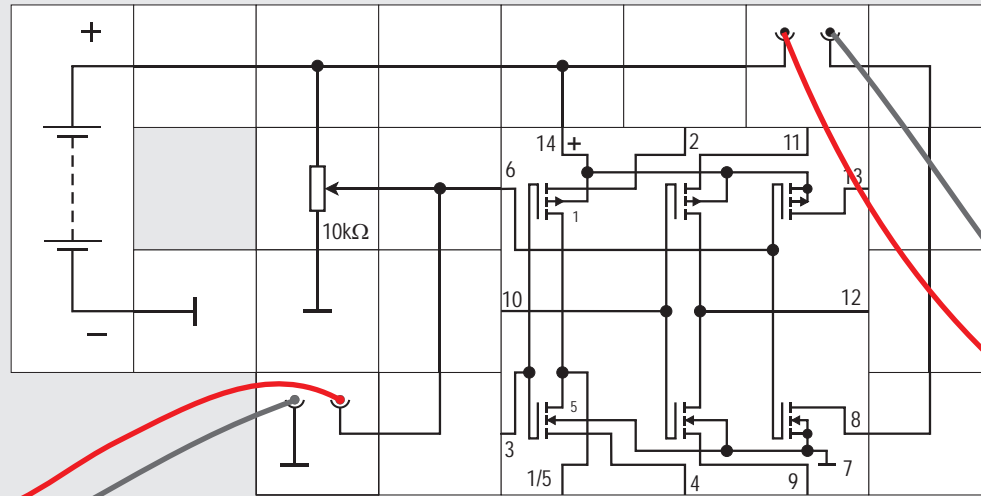
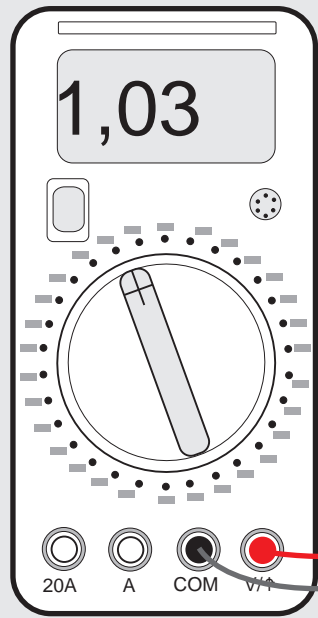
Batterie - Anschlussbaustein 2 - polig für 9V Batterie oder 6 Stück Mignon im Batteriekasten



9V Batterie im Batteriebaustein



Netzteil LN 500 220 / 1,25 - 9V= stabilisiert 8V AC





## Messen mit dem Digitalmultimeter

Wenn man genauere Messergebnisse haben möchte als das Lectron Messinstrument liefern kann, verwendet man Digitalmultimeter bei Lectron Schaltungen.

Spannungsmessungen (linkes Instrument) werden mit dem Messbaustein oder dem Trennbaustein durchgeführt. Dazu muss der Baustein an Stelle einer Geraden - Verbindung oder zusätzlich in den Stromkreis eingebaut und mit dem Messinstrument verbunden werden. Soll die Spannung gegen Masse gemessen werden, ist der Anschlussbaustein vorteilhaft.

Für Strommessungen (rechtes Instrument) muss der Lectron Trennbaustein in die Schaltung eingeführt werden. Beide Pole der Messleitung sind - wie in der Abbildung gezeigt - einzustecken und der Messbereich bei ausgeschaltetem Multimeter einzustellen.





## Grundlagen der digitalen Elektronik

Ein modernes Wirtschaftsleben ohne die »digitale Technik« ist heute kaum mehr vorstellbar. Riesige Fabriken werden mit Hilfe der digitalen Elektronik automatisch gesteuert, die Flugbahnen von Flugzeugen und Weltraumsatelliten werden elektronisch errechnet, die Lagerung und Auslieferung zehntausender Waren in den großen Versandhäu-

sern werden durch Datenverarbeitungsanlagen überwacht und die Rechnungen automatisch von Computern erstellt. Der vorliegende Lectron - Experimentierkasten soll uns mit dieser interessanten Technik vertraut machen. Zum Verständnis der hier beschriebenen Schaltungen ist ein Grundwissen über die allgemeine elektronische Schaltungstechnik erforderlich. So wird zum Beispiel vorausgesetzt, dass die Funktion einer Halbleiterdiode bekannt ist oder dass man die verschiedenen Grund-

schaltungen eines Transistors beherrscht. Wem die in diesem Buch erwähnten Begriffe nicht geläufig sind, dem seien an dieser Stelle die Lectron - Baukästen »Elektronik, Start-System« und »Ausbausystem« empfohlen, die nach dem gleichen System aufgebaut sind. Dort findet man in einem ebenfalls ausführlichen Experimentierbuch alle Grundbegriffe der Elektronik, angefangen mit den allereinfachsten Schaltungen, in leicht verständlicher Form dargestellt.



## Unterschied zwischen der Analog- und Digitaltechnik

Der vorliegende Experimentierkasten befasst sich ausschließlich mit der digitalen Schaltungstechnik. Neben dem digitalen Verfahren gibt es aber noch das analoge Verfahren. An dieser Stelle soll zunächst kurz der Unterschied zwischen diesen beiden Verfahren am Beispiel der analogen und digitalen Rechentechnik erläutert werden.

Bei einem Analogrechner sind die einzugebenden wie auszurechnenden Größen kontinuierlich, also stufenlos, veränderlich. Es können daher beliebig viele Zwischenergebnisse erzielt werden. Für die Genauigkeit des Endergebnisses ist lediglich die Messgenauigkeit der Einrichtung (die Ablesegenauigkeit) entscheidend.

Ein vielleicht noch bekanntes Gerät für ein analoges Rechenverfahren ist der Rechenschieber, bei dem durch Zusammenzählen von Streckenabschnitten Zahlen zum Beispiel miteinander multipliziert werden können. Die Genauigkeit der zu errechnenden Zahl ist dabei von der Genauigkeit der Skaleneinteilung des Rechenschiebers abhängig. Beim elektronischen Analogrechner verwendet man an Stelle der mechanischen Skaleneinteilungen hochgenaue, kontinuierlich einstellbare Potentiometer mit linearer oder beliebig anderer Charakteristik. Auch

Halbleiter mit nichtlinearer Kennlinie, die einer bestimmten, genau bekannten Funktion folgen, kommen zur Anwendung.

Dem digitalen Rechenverfahren liegt ein ganz anderes Prinzip zugrunde. Hier gibt es nur eine ganz bestimmte, endliche Zahl von Schaltungszuständen. Das Ausrechnen erfolgt durch »Abzählen« von Schaltvorgängen (Impulsen).

Das Ergebnis steht dann in festen Stufen zur Verfügung. Zwischenergebnisse sind nicht möglich. Die Genauigkeit der Anzeige hängt damit ausschließlich von der Stellenzahl ab. Während bei einem elektronischen Analogrechner beispielsweise ein Transistor mehr oder weniger leitend sein kann, gibt es in der elektronischen Digitaltechnik nur die Möglichkeiten, dass der Transistor entweder leitend oder gesperrt ist. Die Anzeige erfolgt daher im allgemeinen auch nicht durch kontinuierlich anzeigende Messinstrumente, sondern durch Bauelemente, die eindeutig den Zustand »ein« oder »aus« anzeigen. Besonders einfach kann das durch Glühlampen oder Leuchtdioden geschehen. Die folgenden Versuche enthalten daher meist Glühlampen oder Leuchtdioden als Anzeigeelemente.

Für die Zustände »aus« und »ein« hat man in der Fachsprache die Bezeichnungen »0« und »1« eingeführt. Der Zustand »aus« entspricht dabei dem Be-

triebszustand »0«, der Zustand »ein« dem Betriebszustand »1«. Statt »1« findet man in der Fachliteratur auch vielfach die Bezeichnung »L«, um den Unterschied zur Ziffer 1 deutlich zu machen.

Es muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass durch den Schaltungsaufbau und durch die Eigenschaften der verwendeten Bauelemente die theoretischen Begriffe »ein« und »aus«, d. h. »volles Signal vorhanden« und kein Signal »vorhanden«, in der Praxis nicht immer erreicht werden. Das ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die Transistoren und Dioden Restspannungen und Restströme (Verluste) haben. Bei der Beurteilung der einzelnen Versuchsergebnisse – insbesondere durch das Anzeigeelement – ist das entsprechend zu berücksichtigen. Für den Experimentierkasten wollen wir daher folgende Werte festlegen:

Alle Signale von 0 bis 3 Volt werden als Betriebszustand »0« definiert, während alle Signale über 6 Volt als Betriebszustand »1« gelten sollen, wenn wir mit der Versorgungsspannung 9 V arbeiten.

Die Experimente sind im wesentlichen in drei Gruppen unterteilt, nämlich:

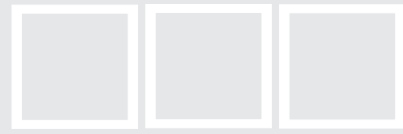
- ` Logische Verknüpfungen
- ` Zehlschaltungen
- ` Anwendungen der ersten beiden Gruppen

## Aufbau und System des Experimentierkastens

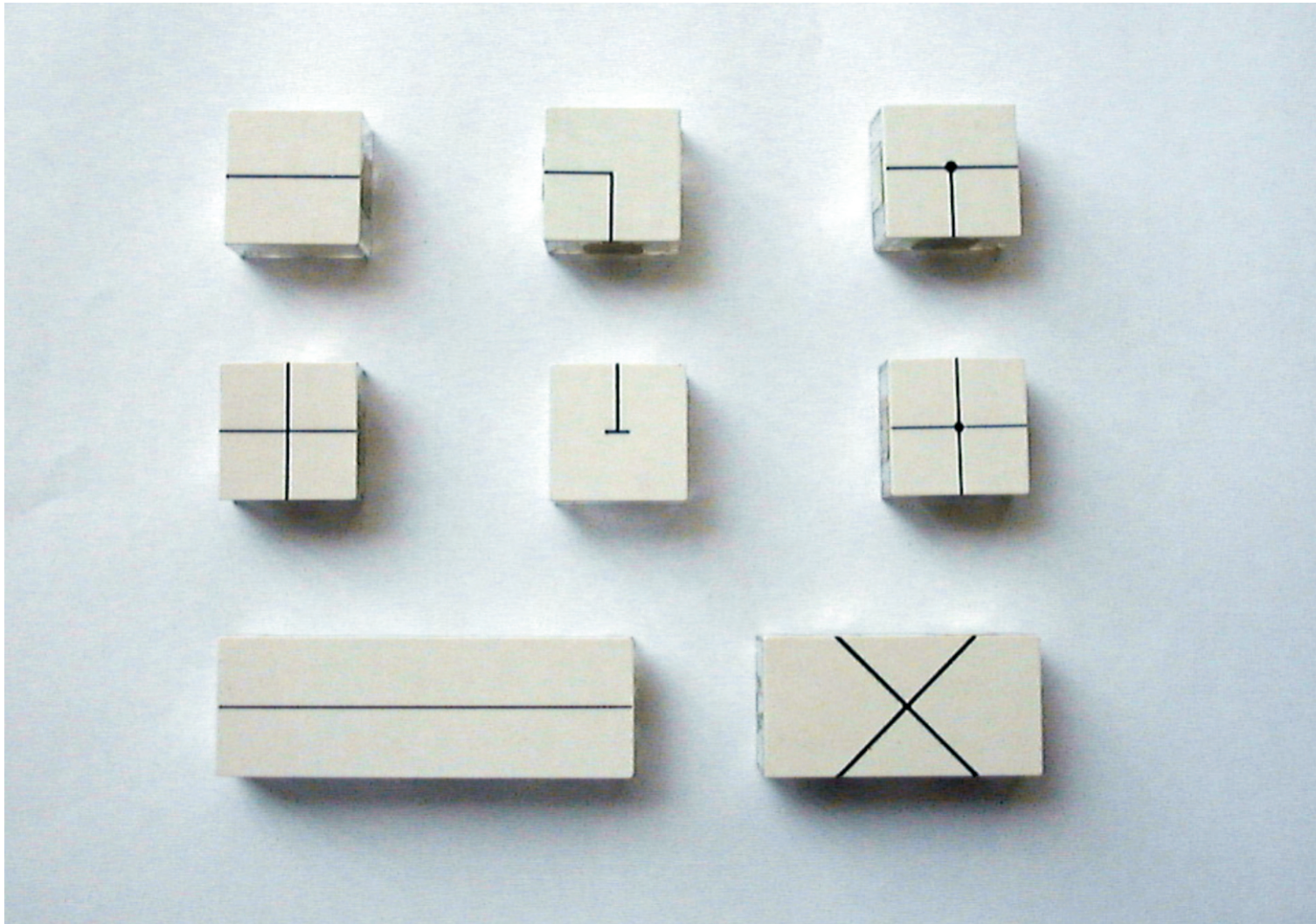
Der Aufbau einer elektrischen Schaltung aus vielen Einzelteilen erfolgt in der Praxis meist, indem die Bauelemente durch Kabel oder Drähte verbunden werden. Entsprechend der Lage der Teile müssen die Verbindungsstücke zugeschnitten werden. Die Ver-

bindung geschieht dann im allgemeinen durch Löten. Bei Versuchsaufbauten im Elektrolabor stellt man die Verbindungen zumeist durch Prüfschnüre her, die an die Bauteile durch Stecker oder Klemmen herangeführt werden. Bei einem Experimentierkasten, der ja ein kleines Elektrolabor darstellt, könnte man natürlich auch mit solchen Prüfschnüren oder zugeschnittenen Drahtstückchen arbeiten. Man verliert jedoch bei diesem Verfahren sehr schnell die Übersicht, besonders dann, wenn es sich um umfangreichere Schaltungen handelt. In dem Gewirr aus langen und kurzen Leitungen, zwischen denen die Bauelemente liegen, kann man die Funktion der Schaltung nur noch mit Mühe erkennen. Das patentierte Lectron - System vermeidet diese Nachteile. Kabel oder Drähte sind hier überhaupt nicht notwendig. Die Bauelemente sind in »Bausteinen« angeordnet, die einfach aneinandergereiht werden. Dabei werden sie durch Magnetkraft mechanisch festgehalten. Der elektrische Kontakt wird durch »Kontaktplättchen« an den Seitenflächen gewährleistet. Für den Aufbau einer Schaltung aus diesen Bausteinen benötigt man daher auch keinerlei Werkzeug oder handwerkliches Geschick. Man kann sich ausschließlich auf das Experiment selbst konzentrieren. Im Inneren des Bausteins ist jeweils ein elektrisches

Bauelement - z. B. ein Widerstand, ein Kondensator, ein Transistor - an die Kontaktplättchen angelötet. Durch das Zusammenlegen werden also die elektrischen Bauteile miteinander verbunden. Die Bausteine haben aber nur an den Seitenflächen Magnete und Kontaktplättchen, wo auch wirklich Bauteile angeschlossen sind. Zusätzlich hat jeder Baustein noch einen Magnet - bei größeren Bausteinen mehrere - und Kontaktplättchen an der Bodenfläche. Hiermit haftet der Baustein an der zum Lectron - System gehörenden metallischen Grundplatte. Legt man einen Baustein mit seiner Bodenfläche auf die Grundplatte, dann wird er dort durch die Magnetkraft festgehalten. Bauteile, deren Anschluss an das Kontaktplättchen an der Bodenfläche des Bausteins geführt ist, erhalten somit auch gleichzeitig elektrische Verbindung mit der Grundplatte. Diese bildet somit einmal das »mechanische Gerüst« für alle Bausteine und andererseits elektrisch das »Chassis«, wie es bei industriellen Rundfunk- und Fernsehgeräten und den meisten elektronischen Apparaten bekannt ist. Die Bausteine haften durch die Magnetkraft so fest auf der Grundplatte, dass man diese mit der fertigen Schaltung auch schräg oder sogar senkrecht aufstellen kann, ohne dass die Teile auseinander fallen.



# Lectron





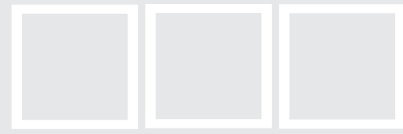
gen Deckplatte des Bausteins ist das Schaltsymbol des eingebauten Einzelteiles aufgedruckt. Beim Zusammenbau sind dann gleichzeitig die richtigen Stromläufe zu erkennen. Der fertige Versuchsaufbau zeigt dann auf den Deckplatten originalgetreu wieder das Schaltbild, das im Anleitungsbuch zu sehen ist. Durch Vergleich mit dem Originalschaltbild kann man daher jeden möglichen Fehler sofort feststellen und beseitigen. Weil sich die Bausteine so leicht aneinanderlegen und wieder trennen lassen, kann man bei der fertigen Schaltung auch durch Entfernen des einen oder anderen Bauteils oder Ersatz gegen ein anderes Bauteil erkennen, welche Funktion dieses Teil hat und wie sein elektrischer Wert die Schaltung beeinflusst.

Mit Ausnahme des Batteriebausteins sind bei allen Bausteinen die Deckel mit den Gehäusen fest verbunden. Nur die Batterie muss nach einiger Zeit ausgetauscht werden. Hinweise zum Austausch der Batterie findet man bei der näheren Beschreibung dieses Bausteins. Sehr empfehlenswert ist es, statt der Batterie das Lectron Netzgerät, das neben der einstellbaren Gleichspannung 1,25-9V auch noch 8V Wechselspannung liefert, zu verwenden.

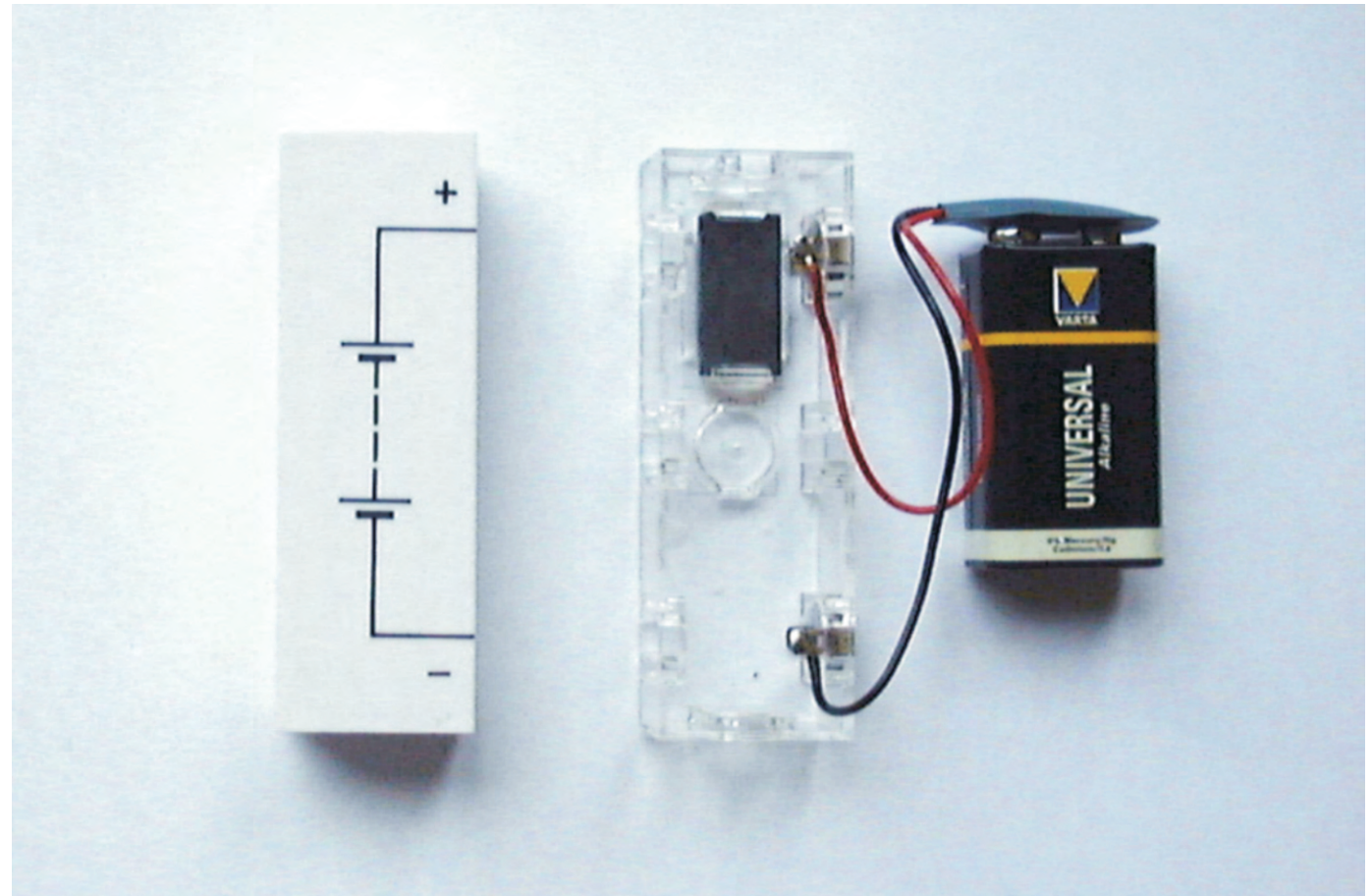
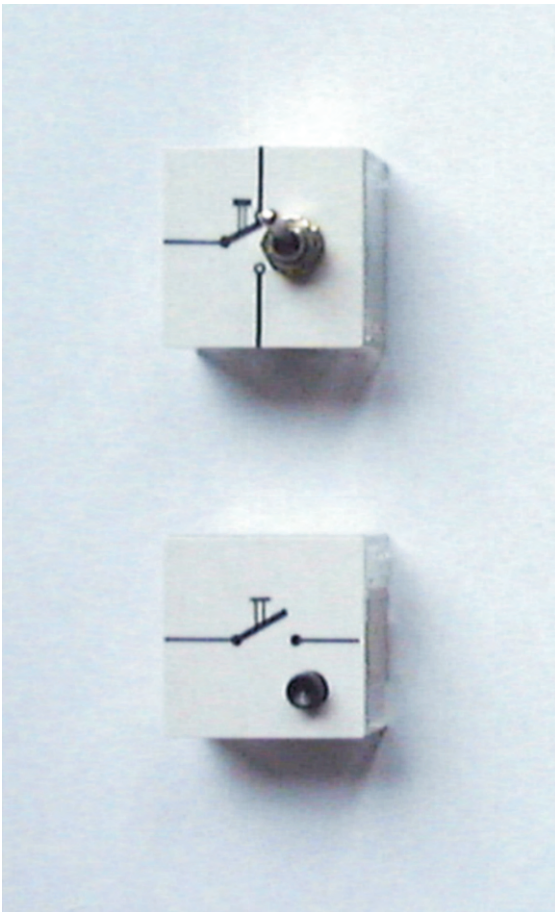
Bevor wir mit den Versuchen beginnen, wollen wir uns die einzelnen Bausteine des Experimentierkastens noch näher ansehen. Wie schon erwähnt wur-

de, benötigt man für das vorliegende Experimentiersystem keine losen Kabel oder Drähte. Um die notwendigen Verbindungen zwischen den einzelnen Bauelementen herstellen zu können, sind hier eine ganze Reihe von »Verbindungsbausteinen« vorgesehen. Sie enthalten keine elektrischen Bauelemente wie Widerstände, Kondensatoren usw., sondern nur durchgehende Drahtstücke zwischen zwei oder mehreren Kontaktplättchen. Die Abbildungen zeigen die Vielfalt der vorhandenen Verbindungsbausteine. Neben einfachen Verbindungsstücken in Grundbausteingröße sind auch Bausteine mit mehrfacher Grundgröße vorgesehen, damit bei längeren Leitungszügen nicht zu viele Kontaktstellen zwischen den einzelnen Bauelementen liegen. Winkel- und T-Stücke sind ebenfalls vorhanden. Bei den Leitungskreuzen ist stets darauf zu achten, ob es sich um eine Verbindung aller vier Enden oder nur um eine isolierte Leitungskreuzung handelt. Das isolierte schräge Leitungskreuz vereinfacht viele der aufgeführten Schaltungen erheblich. Zu den Verbindungsstücken gehört schließlich auch noch die Masseverbindung, bei der das Kontaktplättchen einer Seitenfläche mit dem Kontaktplättchen am Bausteinboden verbunden ist. Damit lässt sich der Anschluss eines Bauelements mit der Grundplatte (dem »Chassis«) leitend verbinden.

Das Gehäuse der Bausteine besteht aus durchsichtigem Kunststoff. Man kann daher die eingebauten Einzelteile sehen. Auf der weißen, undurchsichti-



# Lectron



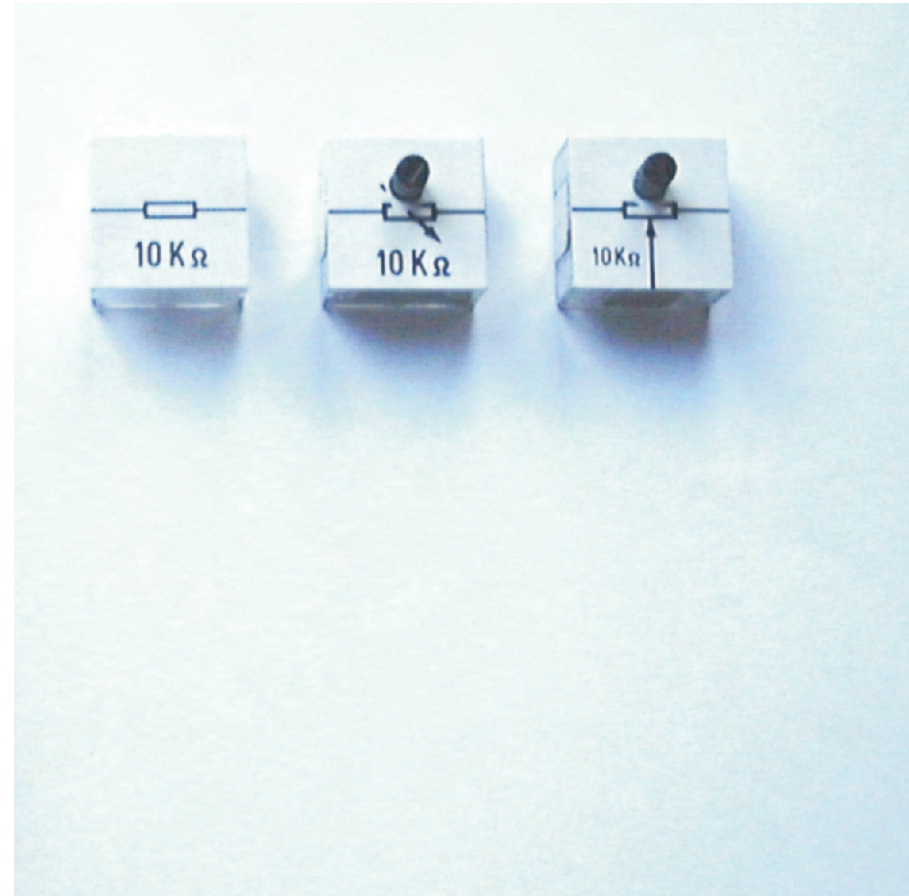
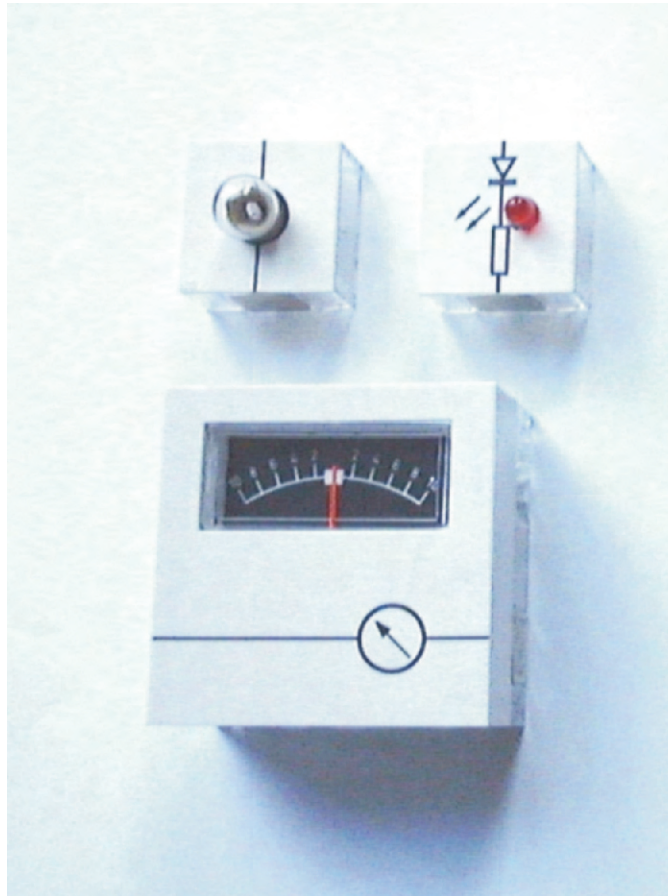
Für Verbindungen, die beliebig oft auch getrennt werden sollen, sind Schalter erforderlich. Der Experimentierkasten enthält neben Umschaltern hierzu Taster mit einem Arbeitskontakt, der durch Druck auf den kleinen Knopf am Bausteindeckel geschlossen wird.

Als Spannungsquelle für alle Versuche ist im Baukasten ein Batteriebaustein vorgesehen. In ihm ist eine handelsübliche 9 V Batterie für Transistorradios enthalten, die in jedem Radio- und Elektrogeschäft erhältlich ist.

Durch leichtes Drücken an die Seitenwände des Oberteils kann der Batteriebaustein geöffnet werden. Beim Schließen des Deckels ist darauf zu achten, dass die Abwinkelungen der Leitungen beim Schaltsymbol auf die seitlichen Kontaktplättchen hinweisen.



# Lectron



Vielfach ist es bei den Versuchen notwendig, Spannungen oder Ströme zu messen. Hierzu ist ein empfindliches Drehspul - Messwerk vorgesehen, mit dem sich alle erforderlichen Messungen mit guter Genauigkeit durchführen lassen. Das Messwerk hat einen Vollausschlag von  $100\mu\text{A}$  bei einem Innenwiderstand von  $4\text{ k}\Omega$ . Es dient nicht nur zu Messungen an den Versuchsschaltungen, sondern kann auch die Batteriespannung kontrollieren. Hierzu ist es über einen Vorwiderstand von  $100\text{ k}\Omega$  mit der Batterie zu verbinden. Auf diese Weise lässt sich rechtzeitig feststellen, ob die Batterien noch frisch sind oder ob sie gegen neue ausgetauscht werden müs-

sen. Bei verbrauchten Batterien arbeiten viele Schaltungen nicht mehr einwandfrei oder sogar überhaupt nicht mehr.

Bei der neueren Ausführung des Messgerätes ist das Messwerk mit zwei antiparallel geschalteten Dioden gegen Überlastung geschützt. Außerdem sind beide Anschlüsse zusätzlich auf je ein Kontaktplättchen geführt. Durch Anlegen eigens dafür geschaffener Nebenschlusswiderstände sind Strommessungen mit  $10 / 100\text{ mA}$  und  $5 / 50\text{ mA}$  Vollausschlag bausteinsparend möglich. Die beiden Bausteine sind in diesem Kasten nicht enthalten, können aber bei Lectron unter den Bestellnummern 2227 bzw. 2228 bezogen werden.

Für die Aufnahme von Kennlinien sind Digitalmultimeter empfehlenswert, da man mit ihnen genauer die Messwerte ermittelt als mit dem Drehspulinstrument. Sie werden über den Trennbaustein / Anschlussbaustein oder den Messbaustein mit der Schaltung verbunden, je nachdem ob man Spannungen oder Ströme messen will.

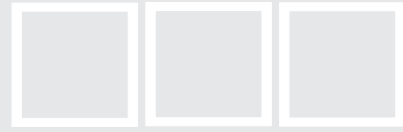
Zur Sichtanzeige eines bestimmten Schaltungszustandes, wenn es dabei nicht auf den genauen Wert einer Spannung oder eines Stromes ankommt, genügen Glühlampen oder Leuchtdioden. Der vorliegende Baukasten enthält Glühlampen- und Leuchtdiodenbausteine. Einige der Funktionsbausteine besit-

zen bereits eine eingebaute Leuchtdiode, die den Zustand des Ausgangssignals anzeigt.

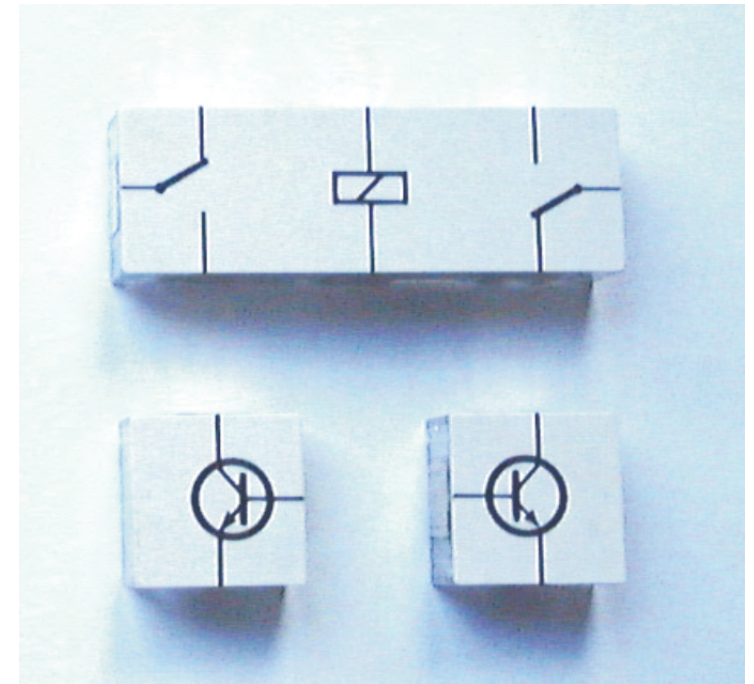
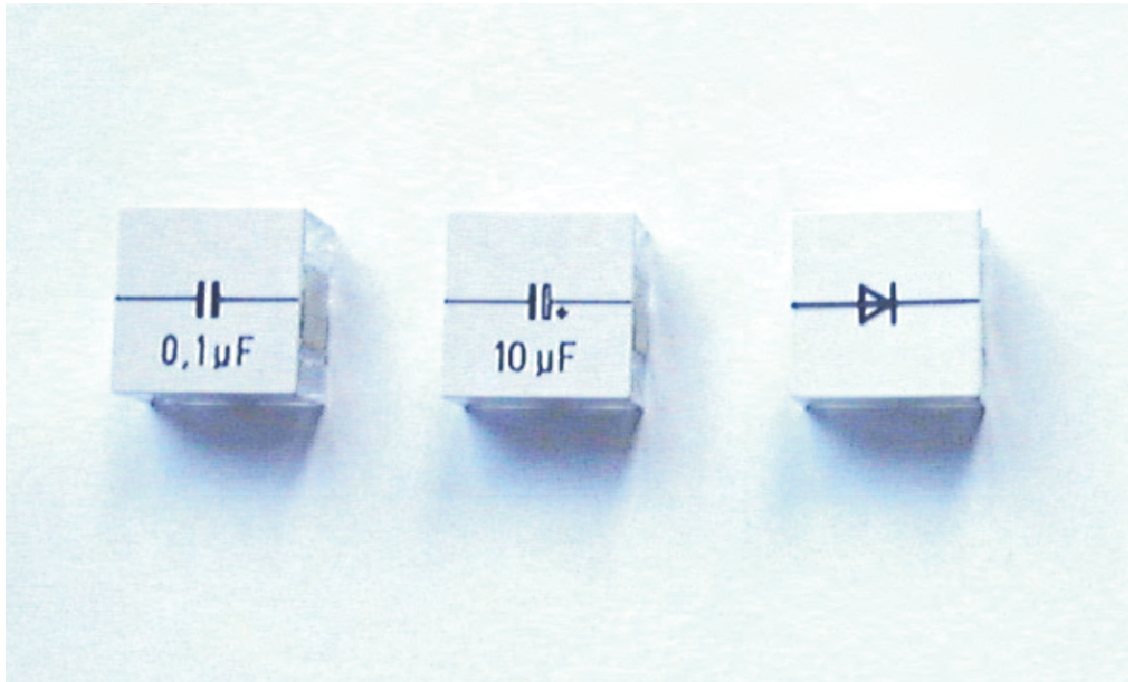
Im Glühlampenkästchen ist eine kleine Schraubfassung E 10 eingebaut, in die eine Niederspannungsglühlampe eingeschraubt wird. Sie ist somit leicht auswechselbar, falls sie einmal durchbrennen sollte. Es ist jedoch zu beachten, dass stets der gleiche Glühlampentyp verwendet wird, nämlich  $6\text{V}/0,05\text{A}$ , da bei Verwendung falscher Glühlampen andere Bauelemente - vor allem Transistoren und Dioden beschädigt werden können.

Die Leuchtdiodenbausteine sind bereits zur Strombegrenzung mit einem  $220\ \Omega$  Vorwiderstand ausgerüstet, da sie im Gegensatz zu Glühlampen nie direkt an einer Batterie betrieben werden dürfen.

Widerstandsbausteine mit Festwiderständen sind in fast allen Versuchen notwendig. Sie sind daher in ausreichender Zahl im Bereich von  $47\ \Omega$  bis  $100\text{ k}\Omega$  vorhanden. In einigen Experimenten kann auch ein stetig einstellbarer Widerstand eingesetzt werden. Hierzu gibt es im Lectron System einen Baustein mit einem Einstellwiderstand von  $10\text{ k}\Omega$ . Für Experimente, bei denen eine Spannungsteilung erforderlich wird, ist ein weiterer Baustein beigegefügt, bei dem alle drei Anschlüsse eines Potentiometers herausgeführt sind. Der Nennwert ist auch hier  $10\text{ k}\Omega$ ; er kann den einstellbaren Widerstand ersetzen.



# Lectron

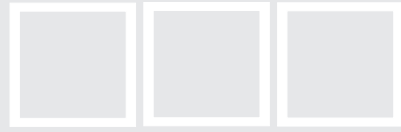


Neben Widerständen gehören die Kondensatoren zu den am häufigsten verwendeten Bauelementen der Elektronik. Wir unterscheiden zwischen den meist gepolten Elektrolyt - Kondensatoren (Elkos) und den ungepolten Papier- oder Kunststofffolien Kondensatoren. Bei den Elektrolyt - Kondensatoren ist der Pluspol durch das Schaltzeichen und durch ein zusätzliches + deutlich gekennzeichnet.

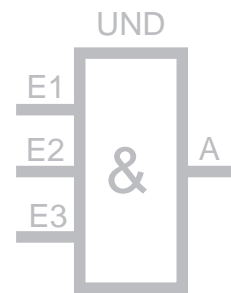
Der Relaisbaustein enthält ein Gleichstromrelais mit zwei Umschaltkontakten. Damit lassen sich verschiedene interessante Schaltungen aufbauen. Auch bestimmte Grundschaltungen der digitalen Elektronik lassen sich zunächst sehr einfach durch

ein Relais darstellen, bevor anschließend entsprechende Halbleiterschaltungen aufgebaut werden. Bei neueren Ausführungen ist parallel zu dem Relais eine sogenannte Freilaufdiode geschaltet, ohne dass es zusätzlich auf der Abdeckplatte vermerkt ist. Sollte das Relais wider Erwarten nicht mit einem leisen Klick anziehen, so muss der Baustein um 180° gedreht eingebaut werden.

In den Dioden - Bausteinen befinden sich hochwertige Siliziumdioden, die für alle Versuche reichlich dimensioniert sind. Sie haben ein gutes Vor - Rück - Verhältnis, d.h. einen relativ kleinen Durchlass- und einen sehr hohen Sperrwiderstand. Schließlich sind noch drei Transistor-Bausteine mit Silizium - npn - Transistoren vorhanden. Alle Bausteine enthalten den gleichen Transistortyp, können also beliebig untereinander ausgetauscht werden. Neben den zwei Transistorbausteinen mit links herausgeführtem Basisanschluss ist auch noch ein Transistorbaustein mit rechts herausgeführtem Basisanschluss vorhanden. Dadurch lassen sich symmetrische Schaltungen, so zum Beispiel Multivibratoren, erheblich einfacher aufbauen. Der Experimentierkasten enthält außer den beschriebenen Einzelbausteinen noch verschiedene Funktionsbausteine. Deren Eigenschaften werden jedoch erst an den entsprechenden Textstellen erklärt.



# Lectron



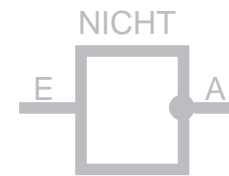
E1	E2	E3	A
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

$$A = E1 \wedge E2 \wedge E3$$



E1	E2	E3	A
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

$$A = E1 \vee E2 \vee E3$$



E	A
0	1
1	0

$$A = \bar{E}$$



## Logische Verknüpfungen

Die Grundlage der digitalen Elektronik bilden die sogenannten logischen Verknüpfungsschaltungen. Wie schon erwähnt, handelt es sich auch hier um Schaltungen, deren Ein- und Ausgänge die Betriebszustände »ein« und »aus« annehmen können. Mit anderen Worten: Die Spannungen, die an den Ein- und Ausgängen der Verknüpfungsschaltung auftreten können, liegen entweder zwischen 0 und 3 Volt (= Zustand »aus«), oder sie sind größer als 6 Volt (= Zustand »ein«).

Die Zustände der Eingänge werden in der Schaltung »verknüpft«, d.h. das Ausgangssignal ist abhängig von den verschiedenen möglichen Zuständen der Eingänge und natürlich auch von der Funktion der Verknüpfungsschaltung.

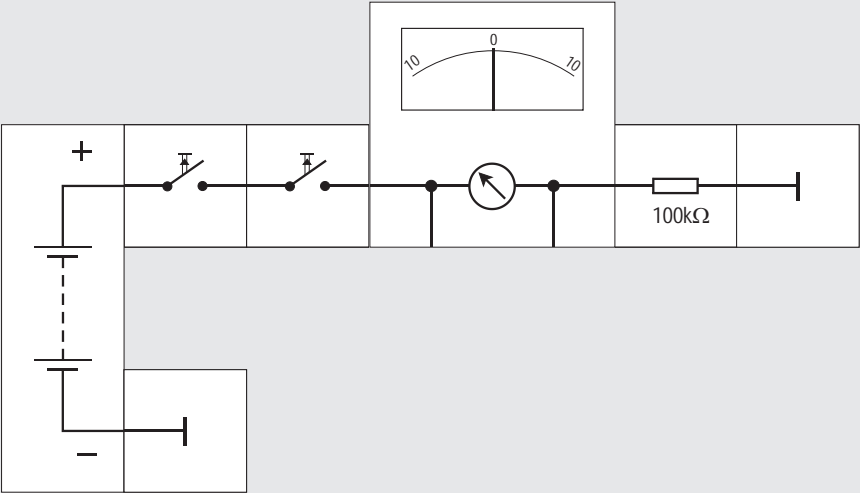
Die drei Grundfunktionen der digitalen Elektronik sind die UND - Funktion, die ODER - Funktion und die NICHT - Funktion, die in der Technik durch die UND - Schaltung, die ODER - Schaltung und die NICHT - Schaltung realisiert werden.

Aus diesen drei Grundfunktionen lassen sich noch andere Funktionen ableiten. Die folgenden Versuche werden zeigen, welche vielfältigen Aufgaben mit logischen Verknüpfungen dargestellt werden können. Damit die Arbeitsweise jeder einzelnen

Schaltung klar erkennbar wird, werden die einzelnen Funktionen immer zuerst mit Hilfe von Schaltern und Relais dargestellt, bei denen der Stromverlauf besonders einfach zu erkennen ist. Sodann erfolgt die Darstellung der jeweils gleichen Funktion mit Halbleitern, also mit Dioden und Transistoren aus Einzelbausteinen, und schließlich verwenden wir dann sogenannte Funktionsbausteine mit den gleichen Eigenschaften.

Bevor wir mit den Versuchen beginnen, wollen wir noch den Begriff der »Funktionstabelle« kennen lernen. Es handelt sich dabei einfach um eine tabellarische Aufstellung der Betriebszustände der verschiedenen Ein- und Ausgänge einer Schaltung. Die einzelnen Anschlüsse werden hierzu mit E1, E2, A1, A2 usw. bezeichnet und nebeneinander in der Tabelle aufgeführt. Darunter sind dann die jeweils möglichen Betriebszustände angegeben. Aus den folgenden Versuchen lässt sich der Sinn der Funktionstabelle am besten erkennen. So lässt sich auf einen Blick erkennen, welche Eingangssignale zur Erreichung bestimmter Ausgangssignale notwendig sind. Man nennt die Funktionstabelle gelegentlich auch WAHRHEITSTABELLE oder WAHRHEITSTAFEL (engl. TRUTH TABLE). Als erste logische Verknüpfung soll die UND - Schaltung untersucht werden.

01





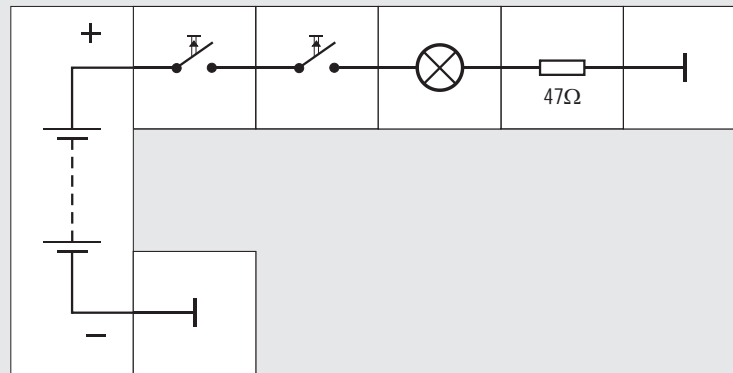
## Versuch 01

### UND - Funktion mit zwei Tasten und Instrument

Die Batterie speist eine Reihenschaltung aus zwei Tastenbausteinen mit Arbeitskontakt und dem Anzeigeelement mit  $100\text{ k}\Omega$  Vorwiderstand. Bei angelegter Batterie schlägt der Zeiger des Instruments selbstverständlich noch nicht aus. Auch das Drücken einer der beiden Tasten ergibt noch keinen Zeigerausschlag. Erst wenn die linke UND die rechte Taste gleichzeitig betätigt werden, wird am Instrument Spannung angezeigt. Die beiden Tasten stellen im Prinzip zwei Eingänge dar, und nur dann, wenn am Eingang 1 UND am Eingang 2 der Betriebszustand »1« (hier durch das Niederdrücken der Taste dargestellt) auftritt, dann ist auch am Ausgang - hier durch das Instrument gebildet - das Signal »1« vorhanden. An dieser Stelle wollen wir die erste Funktionstabelle anwenden:

E1	E2	A
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

02



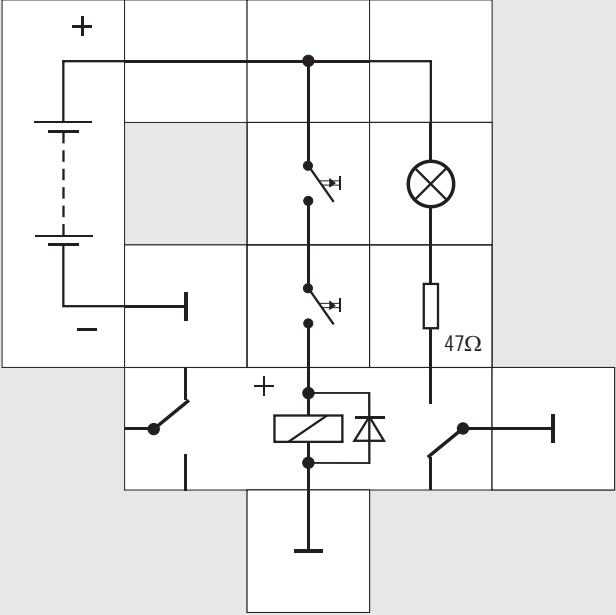


## Versuch 02

### UND - Funktion mit zwei Tasten und Glühlampe

Der Versuch soll gleich noch mit dem einfachsten Anzeigeelement, dem Glühlampenbaustein, wiederholt werden, da die Glühlampe auch für spätere, komplizierte Versuche verwendet werden muss.

Die Batterie speist bei diesem Versuch die Reihenschaltung aus den beiden Tasten, einer Glühlampe und einem Widerstand von  $47 \Omega$ . Dieser Vorwiderstand dient zur Strombegrenzung. Die Glühlampe kann dann nicht so hell aufleuchten und hat demzufolge eine höhere Lebensdauer. Auch wird durch den geringeren Stromfluss die Batterie geschont. In allen weiteren Versuchen, bei denen die Glühlampe direkt über Tasten angesteuert wird, werden wir den  $47 \Omega$  Vorwiderstand anordnen. Er wird aber nicht mehr besonders erwähnt. Nach Anlegen der Batterie an die Schaltung 2 werden wir sehen, dass nur durch Drücken der linken UND der rechten Taste gleichzeitig ein Aufleuchten der Glühlampe zu erreichen ist.



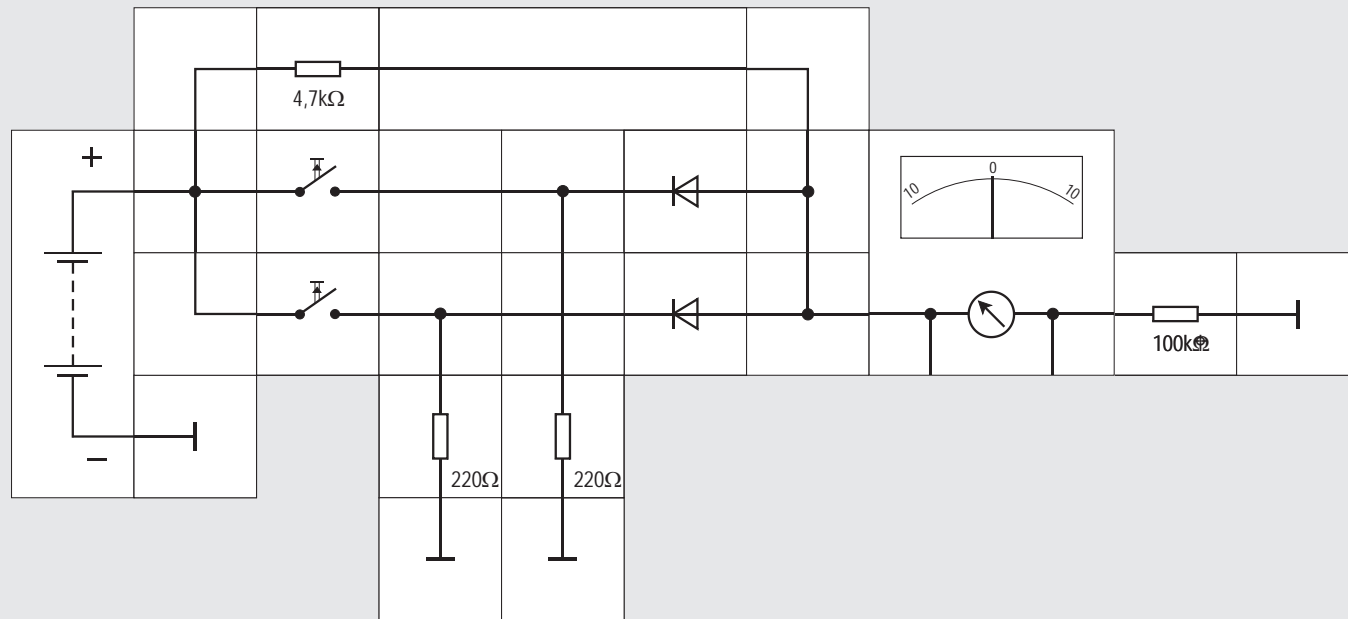


## Versuch 03

### UND - Funktion mit Relais

Der gleiche Effekt lässt sich erreichen, wenn man den Relaisbaustein verwendet. Damit kommt man schon einer auch in der Praxis vorkommenden Schaltung näher, denn es gab digitale Rechenmaschinen, die mit Relais als Verknüpfungselementen arbeiteten. Die Relaispule liegt hier in Reihe mit zwei Tasten an der Batteriespannung. Über einen Arbeitskontakt des Relais wird der Glühlampenbaustein ebenfalls mit der Batterie verbunden. Beim Anlegen der Betriebsspannung leuchtet die Glühlampe zunächst nicht auf. Nur durch gleichzeitiges Betätigen der oberen UND der unteren Taste wird es möglich, dass das Relais anzieht, wobei sein Arbeitskontakt schließt und die Glühlampe mit der Batteriespannung verbindet.

04







## Versuch 04

### UND - Funktion mit Halbleitern

Nachdem das Prinzip der UND - Funktion klar geworden ist, wollen wir versuchen, das gleiche Ergebnis auch mit Halbleiter-Bauelementen zu erreichen. Es wird wieder eine UND - Schaltung mit zwei Eingängen aufgebaut. Die Eingänge sind die Kathoden der Diodenbausteine. Sie sind beide getrennt über Taster mit dem Pluspol der Batterie zu verbinden. Auf richtige Polung der Dioden ist besonders zu achten.

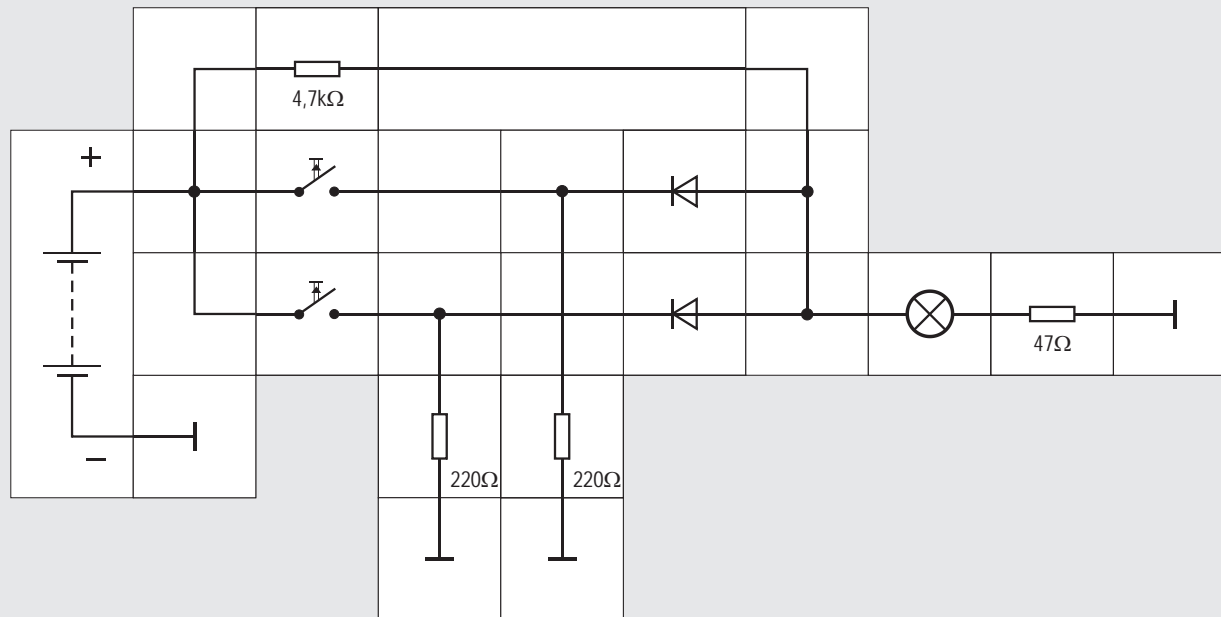
Für den Versuch 4 erfolgt die Kontrolle des Ausgangs der Schaltung mit dem Anzeigeelement, dem ein Vorwiderstand von 100 k $\Omega$  in Reihe geschaltet ist. Legt man die Betriebsspannung an,

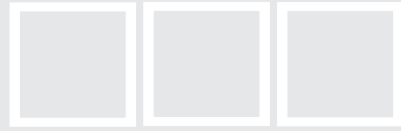
dann zeigt das Instrument eine geringe Spannung an; es fließt Strom vom Pluspol der Batterie über den 4,7 k $\Omega$  Widerstand und die beiden Zweige aus je einer Diode und einem 220  $\Omega$  Widerstand nach Masse. Da die beiden Dioden in Durchlassrichtung angeordnet sind, ist ihr Widerstand vernachlässigbar klein gegenüber dem 4,7 k $\Omega$  Widerstand. Auch der 220  $\Omega$  Widerstand ist sehr klein gegenüber dem 4,7 k $\Omega$  Widerstand. Es liegt ein Spannungsteiler vor. Aufgrund der Widerstandsverhältnisse ist die Spannung am Verbindungspunkt der beiden Dioden, der gleichzeitig den Ausgang der Schaltung darstellt, nur sehr gering. Der Zeiger des Instruments kann deshalb nicht sehr ausschlagen. Drückt man jetzt beispielsweise die obere Taste, dann wird die Kathode der oberen Diode direkt mit dem Pluspol der Batteriespannung verbunden. Damit arbeitet diese Diode in Sperrichtung und wird sehr hochohmig. Der Ausgang der Schaltung, dem das Instrument parallel liegt, wird also durch die obere Diode und den dazugehörigen 220  $\Omega$  Widerstand nicht mehr belastet. Über die untere Diode mit dem zweiten 220  $\Omega$  Widerstand fließt dagegen auch jetzt noch Strom. Am Ausgang der Schaltung tritt somit immer noch keine nennenswerte Spannung auf, der Ausgang verbleibt im Betriebszustand »0«. Das glei-

che gilt, wenn man die untere Taste allein drückt. Dann wird die Belastung des Ausgangs über die untere Serienschaltung aus einer Diode und einem 220  $\Omega$  Widerstand zwar aufgehoben, aber die entsprechende obere verhindert weiterhin ein Ansteigen der Ausgangsspannung. Erst wenn man beide Tasten gleichzeitig drückt, werden beide Dioden in den Sperrzustand versetzt und damit nichtleitend. Der Ausgang der Verknüpfungsschaltung ist dann nicht mehr niederohmig belastet, die Spannung steigt auf nahezu die volle Betriebsspannung an. Der Ausgang nimmt den Betriebszustand »1« an. Sofern man als Anzeigeelement das Instrument (mit hochohmigem Vorwiderstand) benutzt, verhält sich die Schaltung wie der prinzipielle Aufbau im Versuch 1. Es ergibt sich also die gleiche Funktionstabelle:

E1	E2	A
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Statt der Dioden kann man auch die Leuchtdiodenbausteine verwenden; dann sieht man sehr schön den bei offener Taste fließenden Strom (Leuchtdiode leuchtet) und dass bei geschlossener Taste kein Strom fließt (Leuchtdiode dunkel).

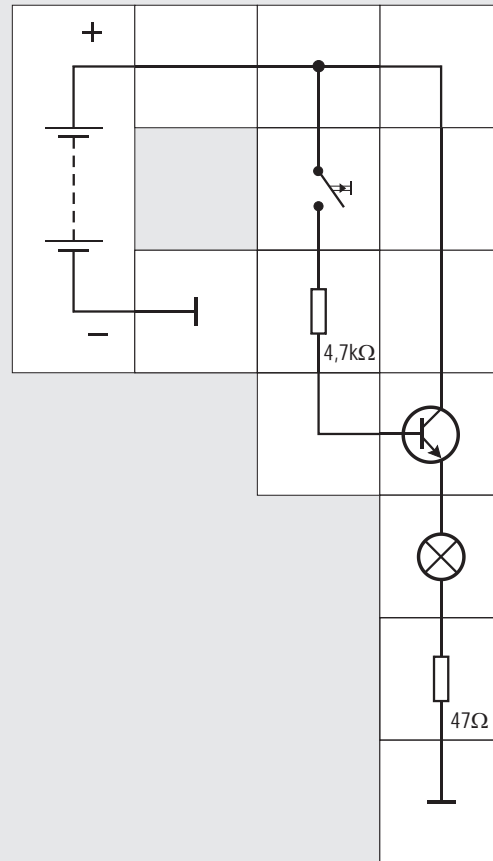




## Versuch 05 Belastung der Halbleiter UND - Schaltung mit Glühlampe

Gegenüber der Schaltung 4 ist hier nur die Belastung des Ausgangs geändert. Anstelle des Anzeige - Instruments mit Vorwiderstand liegt ein Glühlampenbaustein. Man führt den Versuch genau so durch wie bei der letzten Schaltung. Die Glühlampe wird jedoch in keinem Falle aufleuchten. Bei genauer Betrachtung ist auch die Ursache leicht einzusehen. Zwischen dem Pluspol der Batteriespannung und dem Glühlampenbaustein liegt immer ein Widerstand von  $4,7 \text{ k}\Omega$ , der einen ausreichenden Stromfluss über die Glühlampe verhindert. Es ist

daher gleichgültig, ob die parallele Belastung des Ausgangs durch die beiden Zweige Diode -  $220 \Omega$  Widerstand durch Tastendruck aufgehoben wird oder nicht; die aus Halbleitern aufgebaute UND - Schaltung kann einen niederohmigen Belastungswiderstand nicht ansteuern. Um niederohmige Belastungswiderstände anschließen zu können, müssen geeignete Maßnahmen getroffen werden. Eine solche Möglichkeit bietet zum Beispiel ein Transistor in Kollektorschaltung (Emitterfolger). Es ist bekannt, dass der Basisstrom eines Transistors in Kollektorschaltung wesentlich niedriger ist, als sein Kollektorstrom. Das bedeutet das gleiche, als ob der »Eingangswiderstand« des betreffenden Transistors größer als sein »Ausgangswiderstand«, also seine Belastung im Emitterkreis, ist. Die Spannungsverstärkung einer solchen Schaltung ist nahezu 1, d. h. am Ausgang der Schaltung steht fast die gleiche Spannung zur Verfügung wie am Eingang. Schließt man daher einen niederohmigen Belastungswiderstand, also beispielsweise die Glühlampe, am Ausgang einer Kollektorschaltung an, dann kann man den Eingang des Transistors über einen relativ hochohmigen Widerstand (je nach Verstärkungsfaktor des Transistors) an die Betriebsspannung anschließen, und die Lampe leuchtet auf.



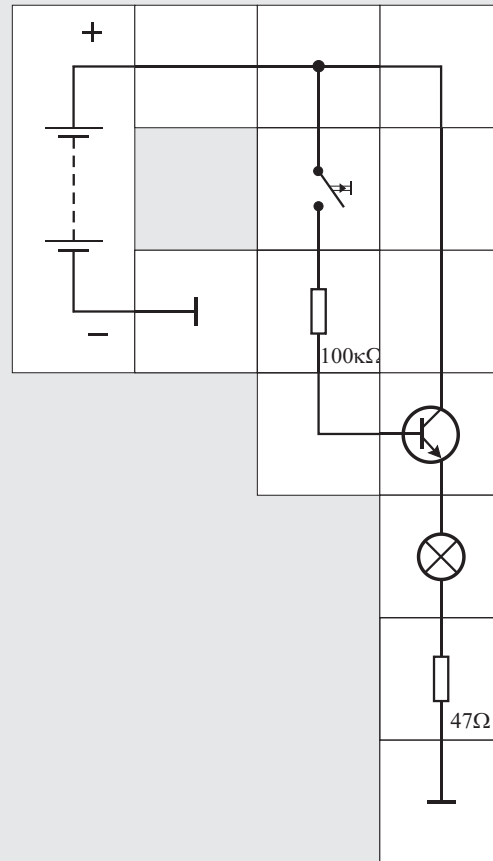


## Versuch 06 Stromverstärkung eines Transistors in Kollektorschaltung

Die zuletzt erwähnten Angaben über die Stromverstärkung des Transistors in Kollektorschaltung sollen in diesem Versuch noch einmal überprüft werden, da sie für die digitale Elektronik von großer Bedeutung sind. Für den Versuch wird ein Transistor-

baustein mit linkem Basisanschluss verwendet. Der Kollektor des Transistors liegt direkt am Pluspol der Batterie. Der Emitter ist über einen  $47\ \Omega$  Widerstand als Strombegrenzer und einen Glühlampenzaubstein nach Masse geführt. Der Begrenzungswiderstand verhindert ein zu helles Aufleuchten der Glühlampe, wodurch deren Lebensdauer erhöht und der Transistor geschont wird. Der Basisanschluss des Transistors ist über einen  $4,7\ \text{k}\Omega$  Widerstandsbaustein und einen Taster auch mit dem Pluspol der Batterie verbunden. Beim Anlegen der Batteriespannung wird die Glühlampe zunächst nicht aufleuchten. Drückt man die Taste, dann fließt ein geringer Basisstrom über den  $4,7\ \text{k}\Omega$  Widerstand. Dieser wird über den Transistor verstärkt und lässt die Glühlampe einwandfrei aufleuchten.

Man kann also mit einer solchen Transistorschaltung durch einen geringen Strom über einen relativ hochohmigen Widerstand einen niederohmigen Verbraucher, wie hier die Glühlampe, einschalten. Eine derartige Schaltung ließe sich demnach als »Stromwandler« bezeichnen. In der Fachsprache hat sich jedoch eine andere Bezeichnung durchgesetzt. Da Ein- und Ausgangswiderstände der Schaltung sich ebenfalls beträchtlich unterscheiden, liegt auch ein »Widerstandswandler« vor. Der Fachmann spricht allgemein von einem IMPEDANZWANDLER.



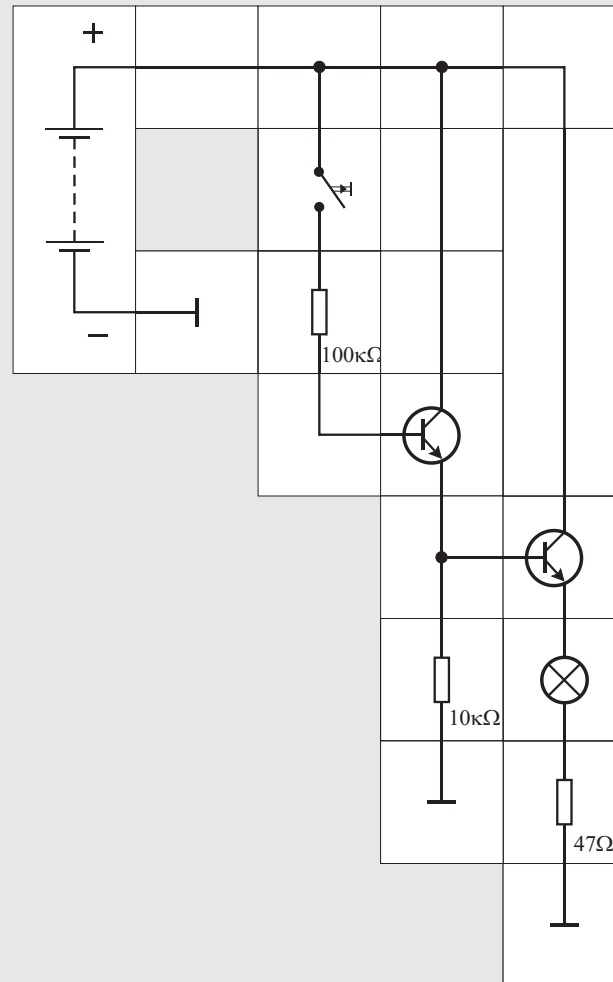


## Versuch 07

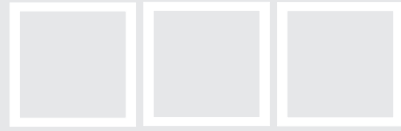
### Wirkung eines Widerstandes am Eingang der Kollektorschaltung

Gegenüber dem letzten Versuch ist anstatt des 4,7k $\Omega$  Widerstandes ein 100 k $\Omega$  Widerstand in die Basisleitung eingefügt worden. Bei gleicher Versuchsdurchführung zeigt sich, dass der nun noch erheblich geringere Basisstrom nicht mehr ausreicht, um die Glühlampe aufleuchten zu lassen. Die Stromverstärkung des Transistors ist zu gering, um bei diesem Verhältnis von Eingangs- zu Ausgangswiderstand durchzuschalten.

Man kann aber über sehr hochohmige Widerstände, d.h. sehr geringe Basisströme, einen niederohmigen Verbraucher ansteuern, wenn man zwei der beschriebenen Impedanzwandler hintereinander schaltet.







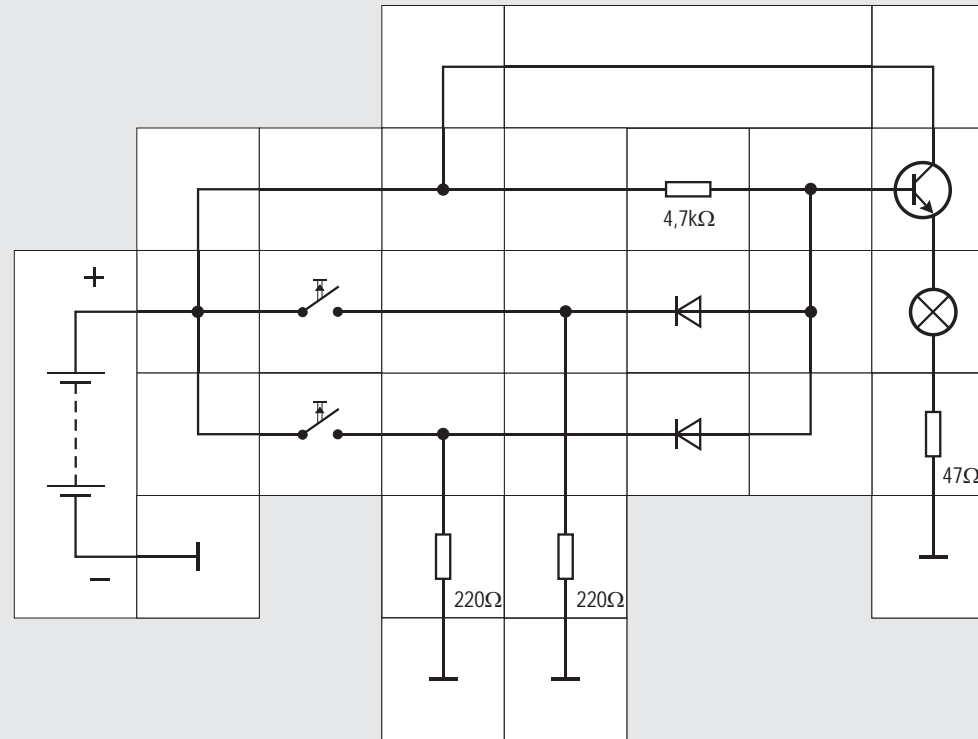
## Versuch 08 Zwei Transistoren in »Kaskaden- Kollektorschaltung«

Die Grundschaltung des Versuchs 7 ist erhalten geblieben. Die Basis des bisherigen (rechten) Transistors ist jetzt jedoch nicht direkt über einen Widerstand mit dem Pluspol der Batterie verbunden. Statt dessen ist hier der Emitter eines zweiten Transistors angeschlossen. Die Kollektoranschlüsse der Transistoren führen direkt an den Pluspol der Batterie.

Der Basisanschluss des zweiten (linken) Transistors liegt nun über einen  $100\text{ k}\Omega$  Widerstand und einen Tasterbaustein am Batteriepluspol. Vom Basisanschluss des rechten Transistors führt noch ein  $10\text{ k}\Omega$  Widerstand nach Masse. Dadurch wird die Basis dieses Transistors im nicht angesteuerten Zustand eindeutig auf das Potential »0« gelegt. Es kann sonst vorkommen, dass über den immer vorhandenen, sogenannten Kollektor - Reststrom des linken Transistors bereits eine geringfügige Ansteuerung des rechten Transistors erfolgt und die Glühlampe schwach aufleuchtet. So aber bildet der  $10\text{ k}\Omega$  Widerstand mit dem Basiswiderstand des linken Transistors einen Spannungsteiler, der eine Ansteuerung des rechten Transistors mit Sicherheit vermeidet. Legt man die Batteriespannung jetzt an, dann fließt wiederum zunächst noch kein Basisstrom, und die Glühlampe kann nicht aufleuchten. Bei gedrückter Taste ergibt sich ein sehr geringer Strom über die Basisleitung des linken Transistors und den  $100\text{ k}\Omega$  Widerstand, der durch den Transistor verstärkt und dem Basisanschluss des rechten Transistors zugeführt wird. In diesem Transistor wird nochmals verstärkt, und die Glühlampe kann mit voller Helligkeit aufleuchten.

Durch die beschriebene Anordnung zweier Transistoren in Kollektorschaltung, wobei der Emitteran-

schluss des eingangsseitigen mit dem Basisanschluss des nachfolgenden Transistors verbunden ist, kann man also eine noch wesentlich größere Stromverstärkung bzw. ein noch größeres Verhältnis zwischen Eingangs- und Ausgangswiderstand der Gesamtschaltung erreichen. Die Stromverstärkung beider Transistoren ist das Produkt beider Einzel - Stromverstärkungen. Da auch das Widerstandsverhältnis etwa der Stromverstärkung entspricht, ist der Eingangswiderstand der Gesamtschaltung um das Produkt der beiden Stromverstärkungen der Transistoren geringer als der Ausgangswiderstand (Belastungswiderstand). Man nennt eine derartige Schaltung auch die Kaskadenschaltung von Transistoren oder DARLINGTONSCHALTUNG. In der Praxis kommt es vor, dass sogar mehr als zwei Transistoren in Kaskade geschaltet sind. Man kann auf diese Weise extrem hohe Eingangswiderstände erreichen und sehr niedrige Ausgangswiderstände damit ansteuern. Wir werden noch eine Technik kennen lernen, die von ihrem Aufbau her extrem hohe Eingangswiderstände bei relativ kleinen Ausgangswiderständen besitzt, so dass für die nachfolgenden Versuche des Baukastens ein derart hohes Widerstandsverhältnis nicht notwendig ist. Vorerst genügt grundsätzlich der einstufige Impedanzwandler.





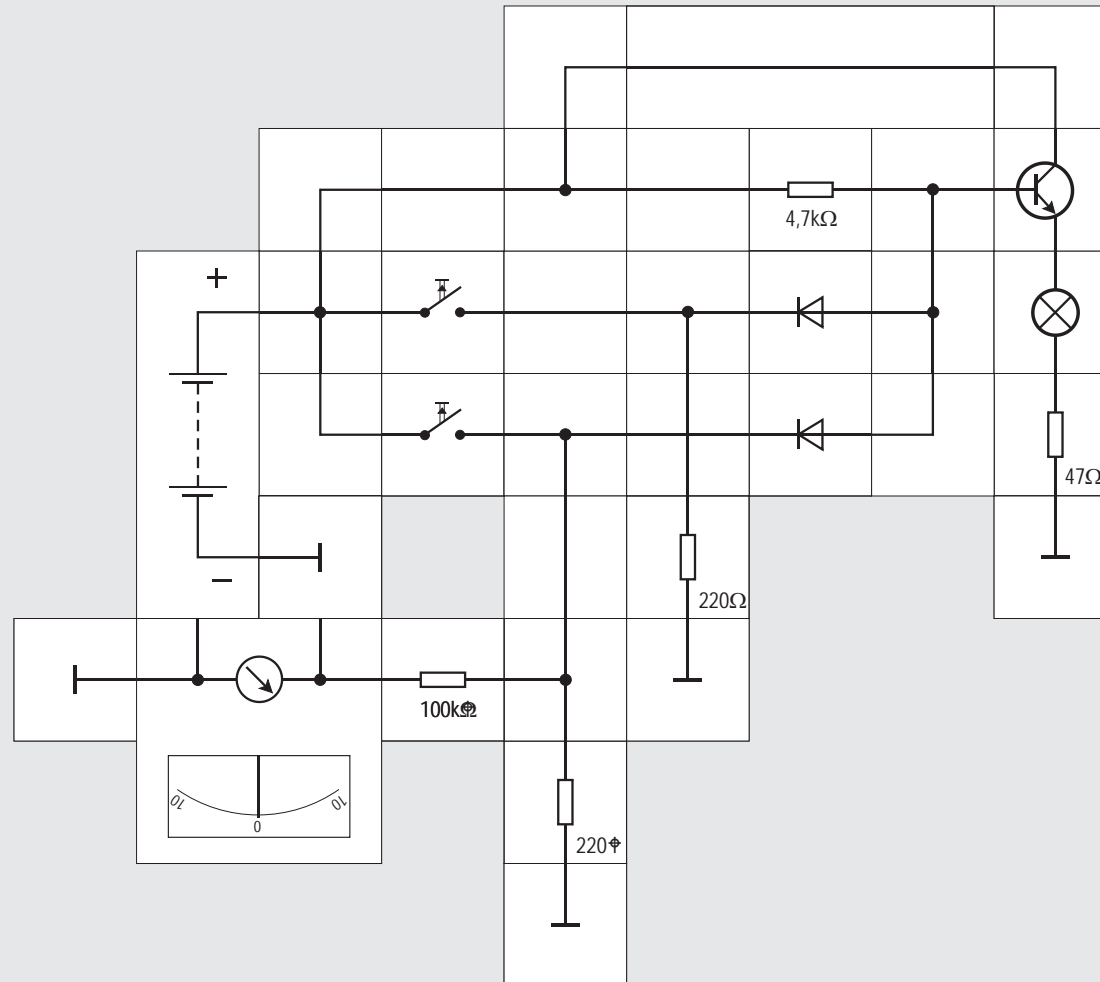
## Versuch 09

### Die Halbleiter - UND - Schaltung mit Impedanzwandler

Mit dem Ausgang der UND - Schaltung ist der Eingang eines Impedanzwandlers (Transistor in Kollektorschaltung) verbunden. Dessen Ausgang wiederum speist einen Glühlampen - Baustein. Wenn man jetzt den Versuchsablauf, wie bei Versuch 4 beschrieben, wiederholt, dann erzielt man ein brauchbares Ergebnis. Die Glühlampe leuchtet dann auf, wenn die obere UND die untere Taste gleichzeitig gedrückt werden. Drücken einer Taste allein hat kein Aufleuchten zur Folge.

Für die Anwendung einer logischen Verknüpfung ist es von großer Bedeutung, dass sich die Eingänge nicht gegenseitig beeinflussen. Sieht man sich die Schaltungen zu den Versuchen 1 bis 3 daraufhin noch einmal an, so erkennt man, dass die beiden Eingänge (die beiden Tasten) direkt miteinander verbunden sind. Das ist aber für viele Anwendungszwecke in der digitalen Elektronik nicht brauchbar. Daher soll nun bei der Schaltung mit Halbleitern untersucht werden, wie sich hier die Eingänge beeinflussen.

10

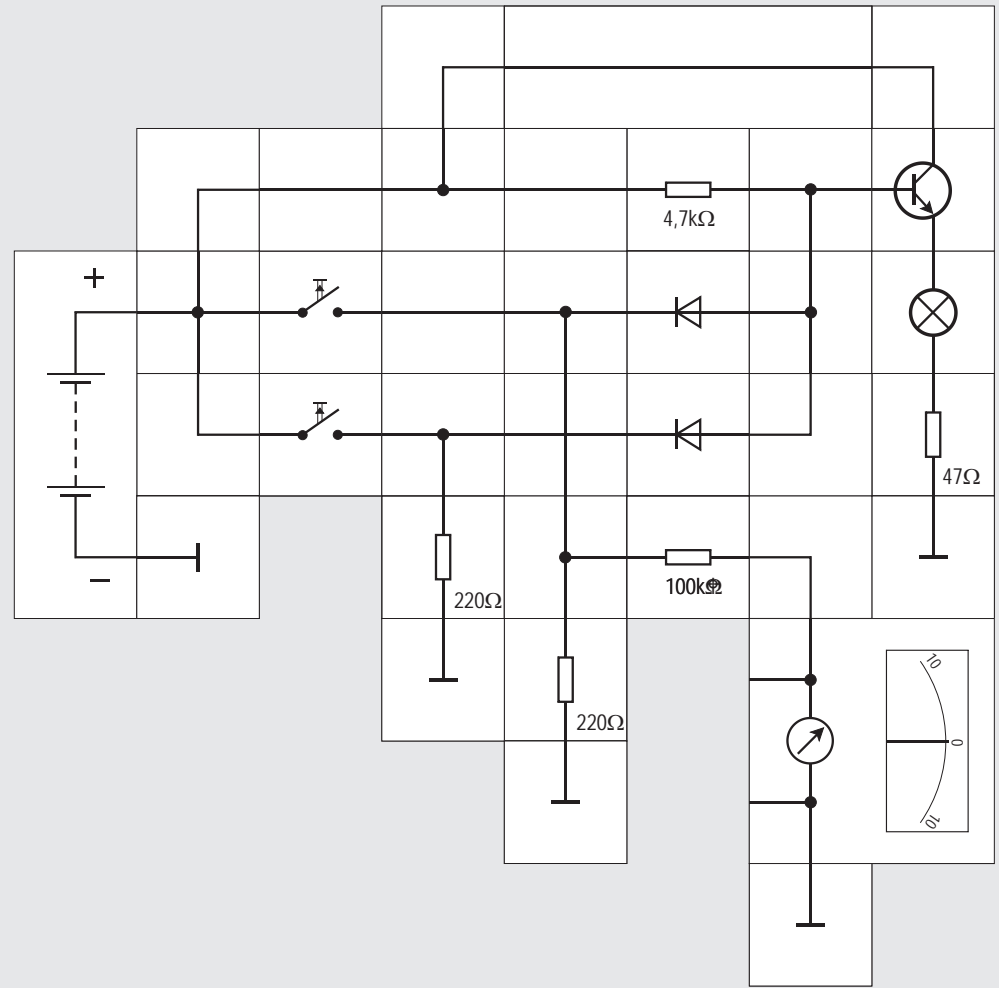




## Versuch 10 Gegenseitige Beeinflussung der UND - Schaltungseingänge

Die Grundsaltung entspricht dem Versuch 9. Am unteren Eingang ist jedoch zusätzlich das Anzeigeelement über einen  $100\text{ k}\Omega$  Vorwiderstand angeschlossen. Bei angelegter Betriebsspannung leuchtet zunächst weder die Glühlampe auf, noch zeigt das Instrument einen Ausschlag. Drückt man die untere Taste, dann wird der untere Eingang mit dem Pluspol der Batterie verbunden. Damit muss selbstverständlich der Zeiger des Instruments ausschlagen. Die Glühlampe leuchtet dagegen noch nicht, weil der andere (obere) Eingang kein Signal erhält. Im zweiten Teil des Versuches wird die untere Taste wieder losgelassen und dafür die obere gedrückt. Der obere Eingang wird dann mit dem Pluspol der Batterie verbunden, an ihm tritt der Betriebszustand »1« auf. Dass die Glühlampe auch dabei nicht leuchtet, ist aufgrund der bisherigen Versuche klar. Bemerkenswert ist, dass das am unteren Eingang angeschlossene Instrument nicht ausschlägt. Diese Tatsache wird verständlich, wenn man sich die Polarität der beiden Dioden ansieht. Diese liegen nämlich - vom Instrument aus betrachtet - entgegengesetzt in Reihe. Eine der beiden Dioden arbeitet daher auf jeden Fall in Sperrrichtung, ganz gleich in welcher Polarität man die Spannung anlegt.

11





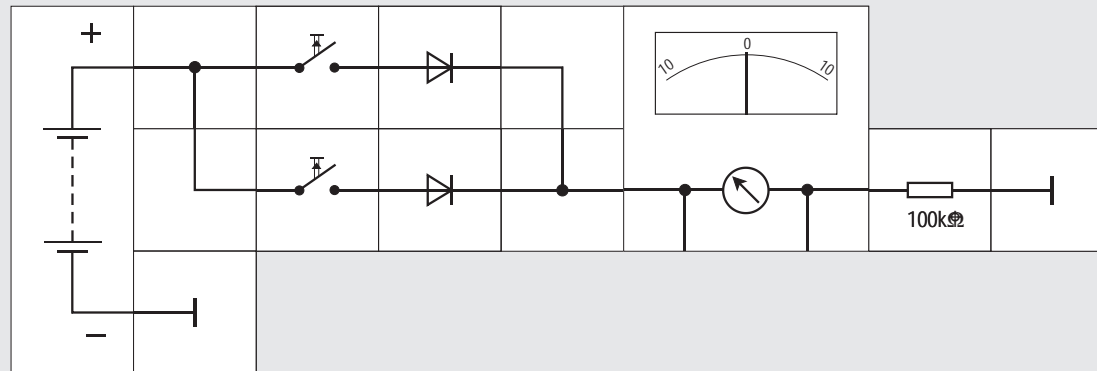
## Versuch 11

### Beeinflussung des anderen UND - Schaltungseinganges

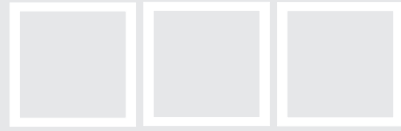
Mit dieser Schaltung wird der andere Eingang der UND - Schaltung untersucht. Das Anzeigeeinstrument mit  $100\text{ k}\Omega$  Vorwiderstand ist bei Versuch 11 mit dem oberen Eingang verbunden. Sinngemäß schlägt der Instrumentenzeiger jetzt aus, wenn man die obere Taste drückt. Durch Drücken der unteren Taste lässt sich das Anzeigeeinstrument nicht beeinflussen.

Schaltungen zur Darstellung der UND - Funktion, die mit Dioden an den Eingängen wie in den Versuchen 9 bis 11 aufgebaut sind, verhindern eine gegenseitige Beeinflussung der Eingänge. Man sagt auch: Die Eingänge sind gegenseitig entkoppelt.

12







## Versuch 12 ODER - Funktion mit Halbleitern

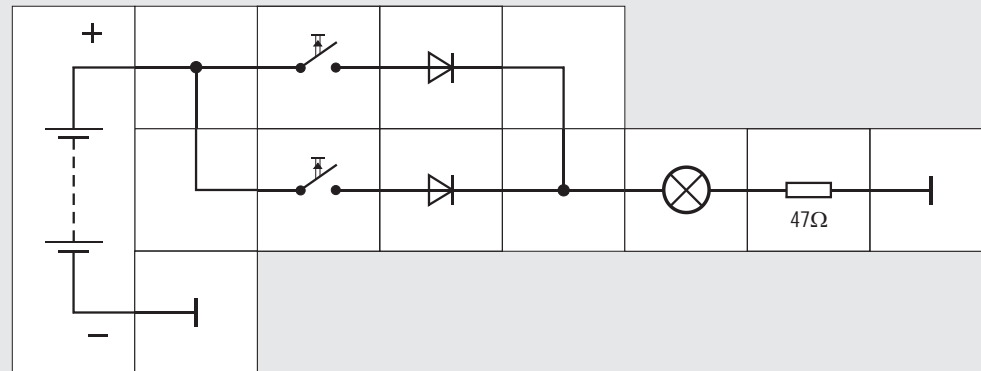
Mit dieser Schaltung wird gezeigt, dass unter Verwendung von Halbleitern auch eine ODER - Schaltung aufgebaut werden kann. Die Schaltung besitzt wiederum zwei Eingänge, die durch die Anoden der beiden Dioden gebildet werden. Beide Eingänge werden durch je eine Taste angesteuert. Die Kontrolle des Ausgangssignals übernimmt das Anzeigeeinstrument. Es liegt in Reihe mit einem  $100\text{ k}\Omega$  Vor-

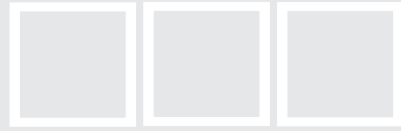
widerstand. Zu beachten ist, dass die Dioden gegenüber Versuch 4 mit umgekehrter Polarität angeordnet sind.

Bei angelegter Betriebsspannung zeigt das Instrument zunächst keinen Ausschlag, denn es besteht nirgends eine Verbindung zum Pluspol der Batterie. Wird nun beispielsweise die obere Taste gedrückt, dann erhält der obere Eingang der Verknüpfungsschaltung nahezu volle Batteriespannung. Er nimmt den Betriebszustand »1« an. Die obere Diode ist für die auftretende Spannung in Durchlassrichtung geschaltet. Es kann daher Strom vom oberen Eingang über die obere Diode, den  $100\text{ k}\Omega$  Vorwiderstand und das Anzeigeeinstrument nach Masse fließen.

Der Instrumentenzeiger schlägt aus. Das gleiche Ergebnis erzielt man durch Drücken der unteren Taste allein oder beider Tasten gemeinsam. Die Funktionstabelle für diese Schaltung lautet folgendermaßen:

E1	E2	A
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1



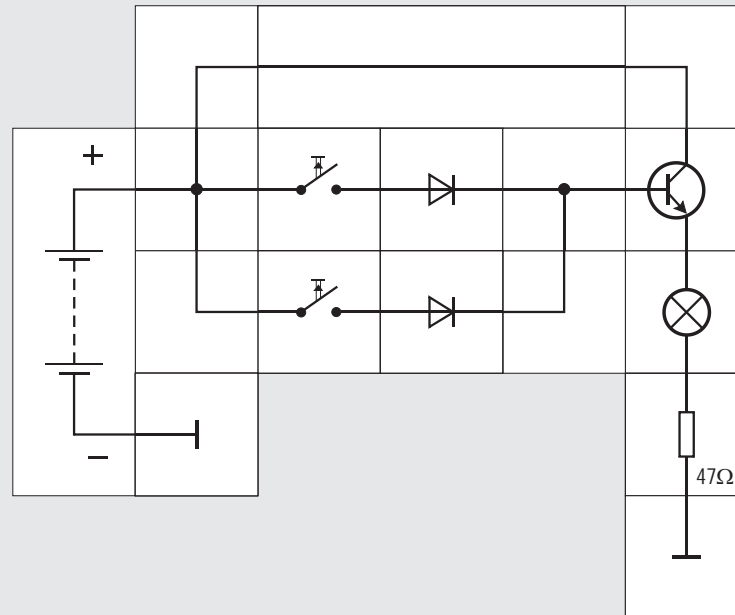


## Versuch 13

### Belastung der Halbleiter ODER - Schaltung mit Glühlampe

Die Grundsaltung entspricht dem Versuch 12. Der Ausgang der ODER - Verknüpfung speist hier jedoch eine Glühlampe. Die Lampe kann natürlich bei angelegter Betriebsspannung noch nicht aufleuchten, da der Stromkreis durch die beiden Taster unterbrochen ist. Durch Drücken einer der beiden Tasten kann man jedoch die Glühlampe einschalten, d.h. wenn an einem der Eingänge der Betriebszustand »1« auftritt, dann nimmt auch der Ausgang den Betriebszustand »1« an, selbst wenn eine niederohmige Belastung vorliegt. Damit verhält sich diese Schaltung anders als die UND - Schaltung im Versuch 5. Der Grund dafür ist leicht einzusehen. Beim Schließen einer der beiden Taster wird der Stromkreis direkt über den Taster, die jeweilige in Durchlassrichtung geschaltete Diode und die Glühlampe geschlossen. Ein Vorwiderstand wie bei der UND - Schaltung in den Versuchen 4 und 5 ist nicht vorhanden. Der Widerstand der Diode in Durchlassrichtung ist sehr gering. Die Schaltungsfunktion wird daher auch bei niederohmiger Ausgangsbelastung erfüllt.

14





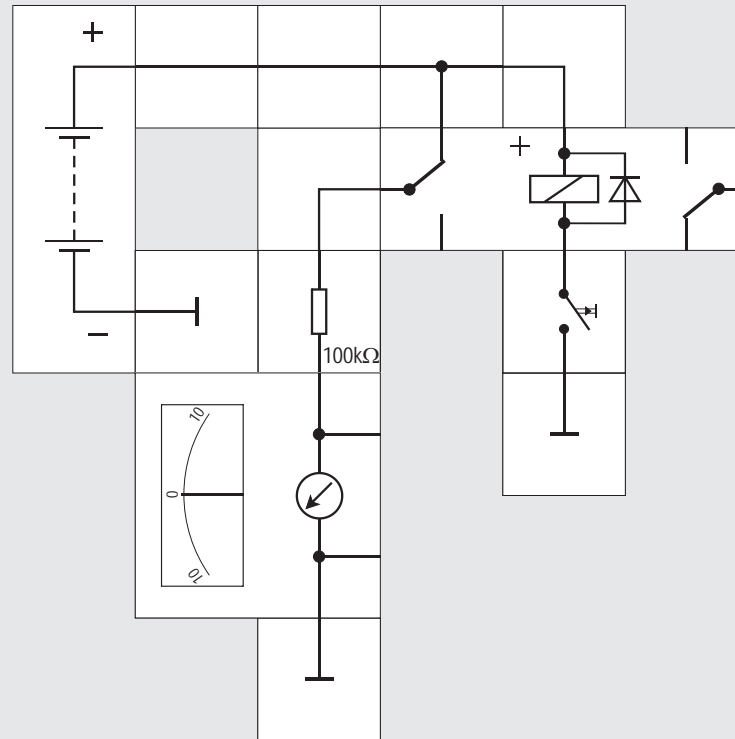
## Versuch 14

### Halbleiter ODER - Schaltung mit Impedanzwandler

Obwohl im vorherigen Versuch gezeigt wurde, dass die ODER - Schaltung eine niederohmige Last unmittelbar ansteuern kann, wollen wir das Verhalten der Verknüpfungsschaltung noch in Verbindung mit einem Impedanzwandler überprüfen. Mit dem Ausgang der ODER - Schaltung ist daher ein Transistor in Kollektorschaltung verbunden, der eine Glühlampe steuert. Versuchsablauf und Ergebnis sind die gleichen, wie sie bei den bisherigen Versuchen mit der ODER - Schaltung vorkamen. Die Glühlampe leuchtet auf, wenn der obere ODER der untere Eingang ODER beide Eingänge gleichzeitig angesteuert werden.

Ohne dass wir jetzt entsprechende Versuche aufbauen, können wir erkennen, dass genauso wie bei der UND - Schaltung (Versuche 10 und 11) auch bei der ODER - Schaltung beide Eingänge voneinander durch die Dioden entkoppelt sind.

15

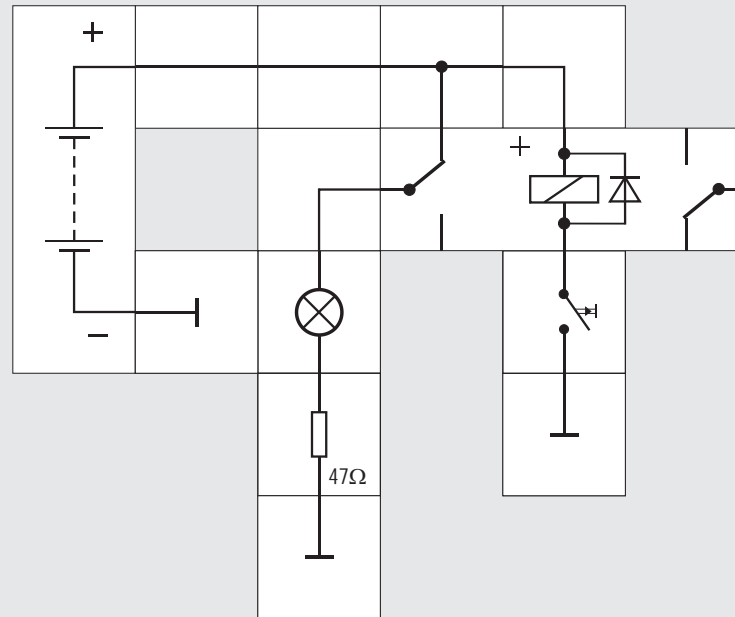




Versuch 15  
NICHT - Funktion mit Relais und Anzeige  
mit Instrument

Für die grundsätzliche Darstellung der NICHT - Funktion verwenden wir den Relaisbaustein. Die Spule des Relais wird über eine Taste mit Arbeitskontakt, die den Eingang der NICHT - Schaltung darstellt, an Batteriespannung gelegt. Über einen Ruhekontakt des Relais wird außerdem die Batteriespannung dem Anzeigeelement über einen  $100\text{ k}\Omega$  Vorwiderstand zugeführt. Legt man die Batterie an, dann schlägt der Instrumentenzeiger sofort aus, da der Relais - Ruhekontakt geschlossen ist. Wenn der Eingang der Schaltung NICHT angesteuert wird, also das Signal »0« aufweist, dann herrscht am Ausgang der Betriebszustand »1«. Betätigt man die Taste, dann erhält die Relaispule Strom. Der Eingang nimmt den Betriebszustand »1« an. Durch den Relaisanker wird der Relais - Ruhekontakt geöffnet, der Instrumentenzeiger geht in seine Nulllage zurück. Wird der Eingang der NICHT - Schaltung angesteuert, dann kann man am Ausgang NICHT mehr Spannung entnehmen. Der Ausgang befindet sich im Betriebszustand »0«. Für diese Funktion erhält man folgende Funktionstabelle:

E	A
0	1
1	0



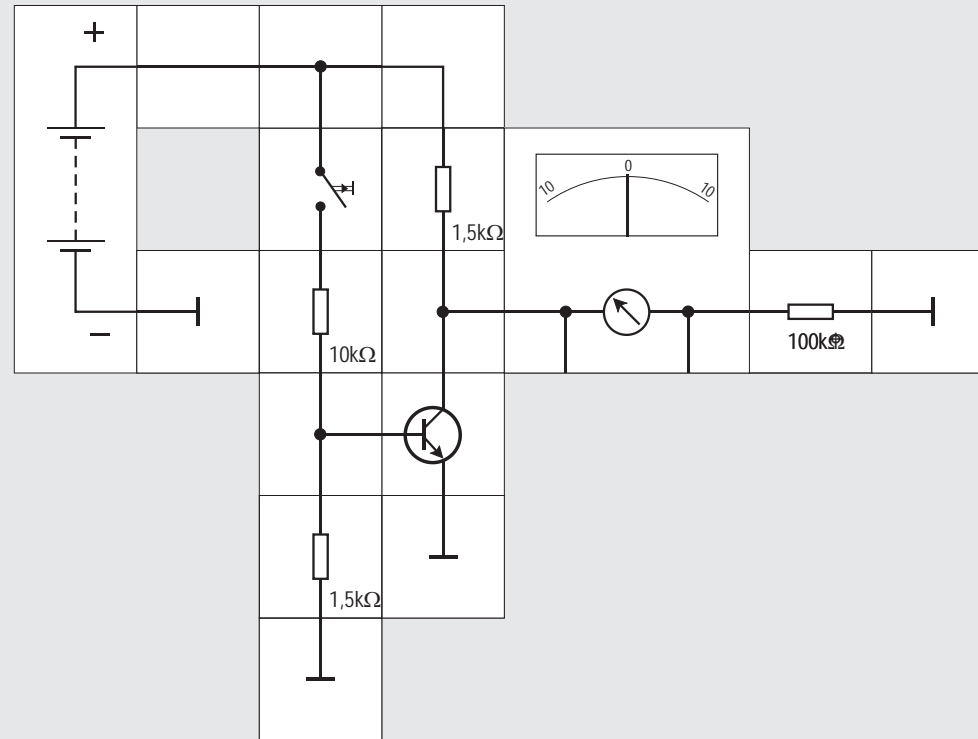




## Versuch 16

### NICHT - Funktion mit Relais und Anzeige mit Glühlampe

Man kann den Ausgang der soeben aufgebauten Schaltung auch mit einem niederohmigen Widerstand, also beispielsweise mit einer Glühlampe, belasten. Es sind keine stromempfindlichen Bauelemente oder hochohmigen Vorwiderstände vorhanden. Das Anzeigeelement mit seinem  $100\text{ k}\Omega$  Vorwiderstand wird einfach durch einen Glühlampenzaustausch ersetzt. Das Versuchsergebnis gleicht dem des Versuchs 15. Die Glühlampe leuchtet bei angelegter Batterie, wenn man die Taste NICHT betätigt, am Eingang also das Signal »0« vorliegt. Beim Niederdrücken der Taste verlischt die Lampe.





## Versuch 17 NICHT - Funktion mit Transistor

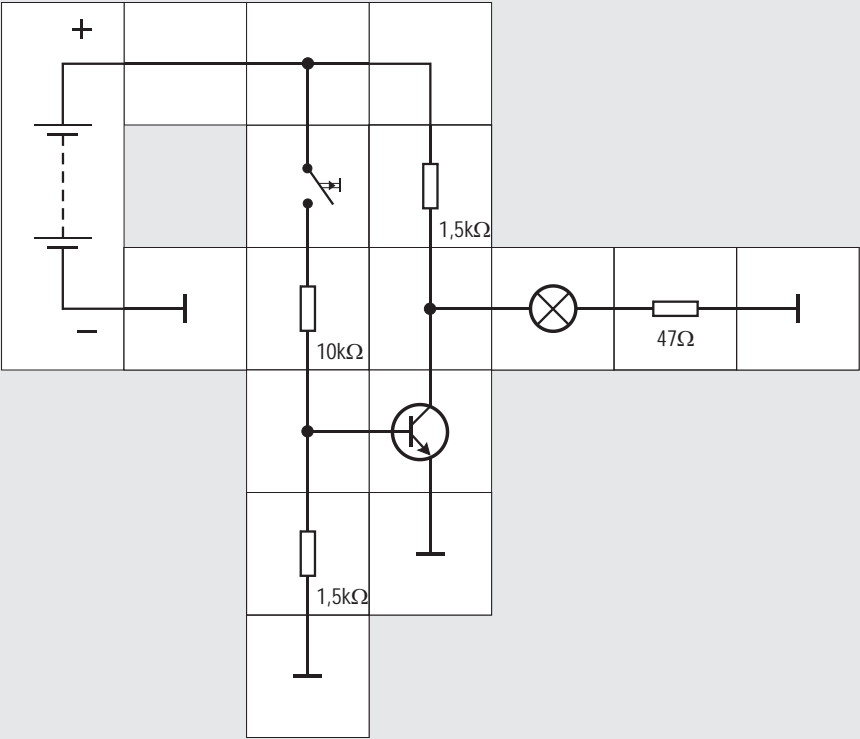
Die NICHT - Funktion lässt sich natürlich auch durch Halbleiter verwirklichen. Der Relaisbaustein als Umkeurglied ist bei dieser Schaltung durch einen Transistorbaustein ersetzt worden. Er ist in der sogenannten Emitterschaltung angeordnet. Im Kollektorkreis liegt ein  $1,5\text{k}\Omega$  Arbeitswiderstand. In der Basisleitung ist ein Vorwiderstand von  $10\text{k}\Omega$  angeordnet. Vom Basisanschluss führt ein weiterer Widerstand mit  $1,5\text{k}\Omega$  nach Masse. Damit werden definierte Verhältnisse geschaffen, wenn der Transistoreingang nicht angesteuert wird. Auch können Restspannungen aus Schaltungen, die der NICHT - Schaltung voran gesetzt werden, infolge der Spannungsteilung zwischen dem  $10\text{k}\Omega$  und dem  $1,5\text{k}\Omega$

Widerstand keine Ansteuerung des Eingangs der NICHT - Schaltung bewirken.

Der Ausgang wird durch den Kollektoranschluss gebildet. Er wird durch das Instrument mit  $100\text{k}\Omega$  Vorwiderstand angezeigt.

Nach dem Anlegen der Betriebsspannung zeigt das Instrument sogleich einen Ausschlag; der Ausgang befindet sich also im Betriebszustand »1«. Am Eingang herrscht dagegen noch der Betriebszustand »0«, da die geöffnete Taste einen Stromfluss verhindert und über den  $1,5\text{k}\Omega$  Widerstand der Transistor definiert gesperrt wird. Betätigt man die Taste, dann gelangt Spannung zum Eingang der Schaltung, er nimmt den Betriebszustand »1« an. Dagegen verschwindet die Spannung am Ausgang, der Instrumentenzeiger geht auf »0« zurück. Der Transistor in Emitterschaltung kehrt das Signal genauso um wie das Relais mit Ruhekontakt. Damit ist der Transistor in Emitterschaltung ebenfalls zur Darstellung der NICHT - Funktion geeignet. Man erhält somit auch wieder die gleiche Funktionstabelle wie bei Versuch 16:

E	A
0	1
1	0

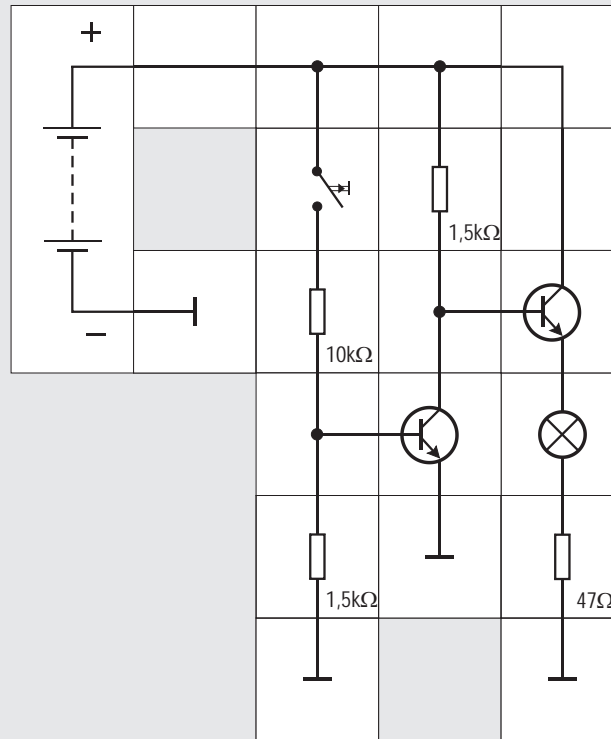




## Versuch 18

### Belastung der Halbleiter NICHT-Schaltung mit Glühlampe

Anstelle des Anzeigeelements wurde bei dieser Schaltung eine Glühlampe zur Kontrolle des Ausgangs verwendet. Der Versuchsablauf ist wieder der gleiche wie bei Schaltung 17. Es ist jedoch in keinem Falle ein Aufleuchten der Glühlampe zu erreichen. Das ist leicht daraus zu erklären, dass immer in Reihe mit der Glühlampe der Arbeitswiderstand von  $1,5 \text{ k}\Omega$  liegt. Steuert man den Eingang der Schaltung über den Taster an, dann wird der Transistor leitend. Damit ist die Glühlampe kurzgeschlossen und kann ohnehin nicht aufleuchten. Bleibt der Taster dagegen in seiner Ruhelage, dann befindet sich der Transistor im Sperrzustand und schließt die Lampe nicht mehr kurz. Der im Verhältnis zum Widerstand der Glühlampe hohe Vorwiderstand von  $1,5 \text{ k}\Omega$  verhindert jedoch einen zum Aufleuchten der Lampe ausreichenden Stromfluss. Die NICHT - Schaltung mit Transistor darf also am Ausgang nur hochohmig belastet werden.



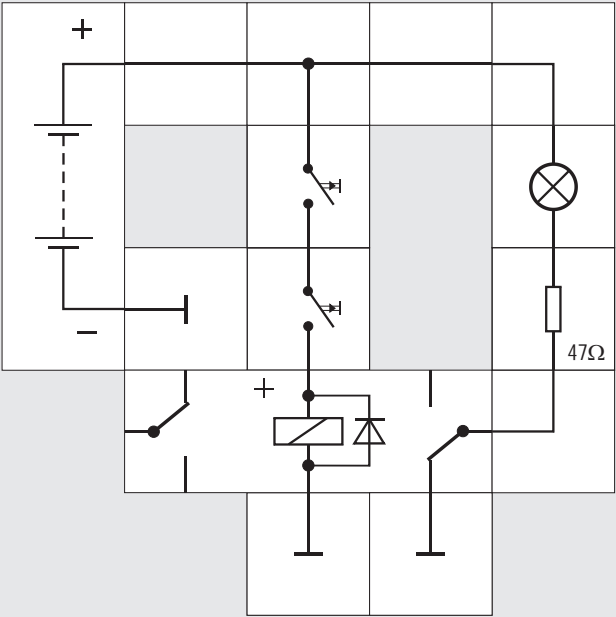


## Versuch 19 NICHT - Schaltung mit Glühlampen- anzeige und Impedanzwandler

Fügt man zwischen dem Ausgang der NICHT - Schaltung und der Glühlampe einen Impedanzwandler (Transistor in Kollektorschaltung) ein, dann erhält man wieder eine genügend hochohmige Belastung des Ausgangs. Die Schaltung arbeitet dann einwandfrei und zeigt die gleichen Ergebnisse wie im Versuch 17. Bleibt der Taster in Ruhe (Eingang »0«), dann leuchtet die Glühlampe auf (Ausgang »1«). Bei gedrückter Taste (Eingang »1«), verlischt die Lampe und zeigt damit am Ausgang den Betriebszustand »0« an.

Die drei Grundschaltungen sind nun bekannt. Es wurde schon anfangs erwähnt, dass sich aus diesen Grundschaltungen weitere logische Schaltungen ableiten lassen. Die beiden wichtigsten kombinierten Schaltungen wollen wir nachfolgend noch kurz untersuchen. Es handelt sich dabei um die Darstellung der NAND - Funktion und der NOR - Funktion. Diese Bezeichnungen stammen aus dem Englischen und stellen Abkürzungen dar. NAND ist aus den englischen Worten NOT AND (NICHT UND) zusammengesetzt. Der Ausdruck NOR kommt von NOT OR (NICHT ODER). Aus der Bezeichnung kann man schon etwa entnehmen, welche Eigenschaften eine NAND - bzw. eine NOR - Schaltung hat: Sie geben das umgekehrte Ausgangssignal der schon bekannten UND - und ODER - Schaltungen ab.

20



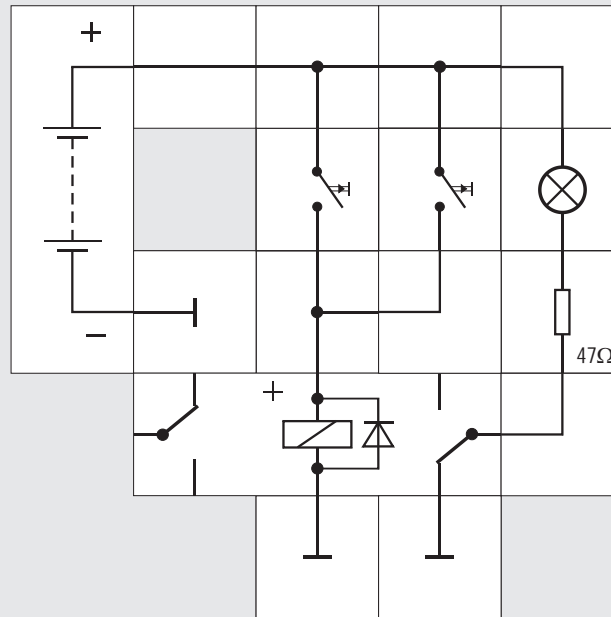




Diese Schaltung ähnelt sehr der des Versuchs 3. Die Spule des Relais wird über zwei in Reihe liegende Tasten mit Arbeitskontakt mit der Batteriespannung verbunden. Im Gegensatz zum Versuch 3 ist der Glühlampenbaustein in der Schaltung 20 über einen Relaisruhekontakt angeschlossen. Bei betriebsbereiter Schaltung - Batterie angelegt - leuchtet die Glühlampe sogleich auf, da über den Relaisruhekontakt der Lampenstromkreis zur Batterie geschlossen ist. Durch Drücken einer Taste allein lässt sich an diesem Zustand nichts ändern. Erst wenn man beide Taster mit Arbeitskontakt gleichzeitig drückt, erhält die Relaispule Strom. Der Anker zieht dann an und unterbricht den Relaisruhekontakt im Stromkreis der Glühlampe, die somit verlöscht. Am Ausgang der Schaltung herrscht damit der Betriebszustand »1« NICHT, wenn am Eingang E1 UND am Eingang E2 (oberer und unterer Taster) der Betriebszustand »1« auftritt. Wir haben also hier eine NAND - Schaltung vor uns. Die Funktionstabelle für diese Schaltung sieht dann so aus:

E1	E2	A
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Versuch 20  
NAND - Funktion mit Relais und Glühlampe





## Versuch 21

### NOR - Funktion mit Relais und Glühlampe

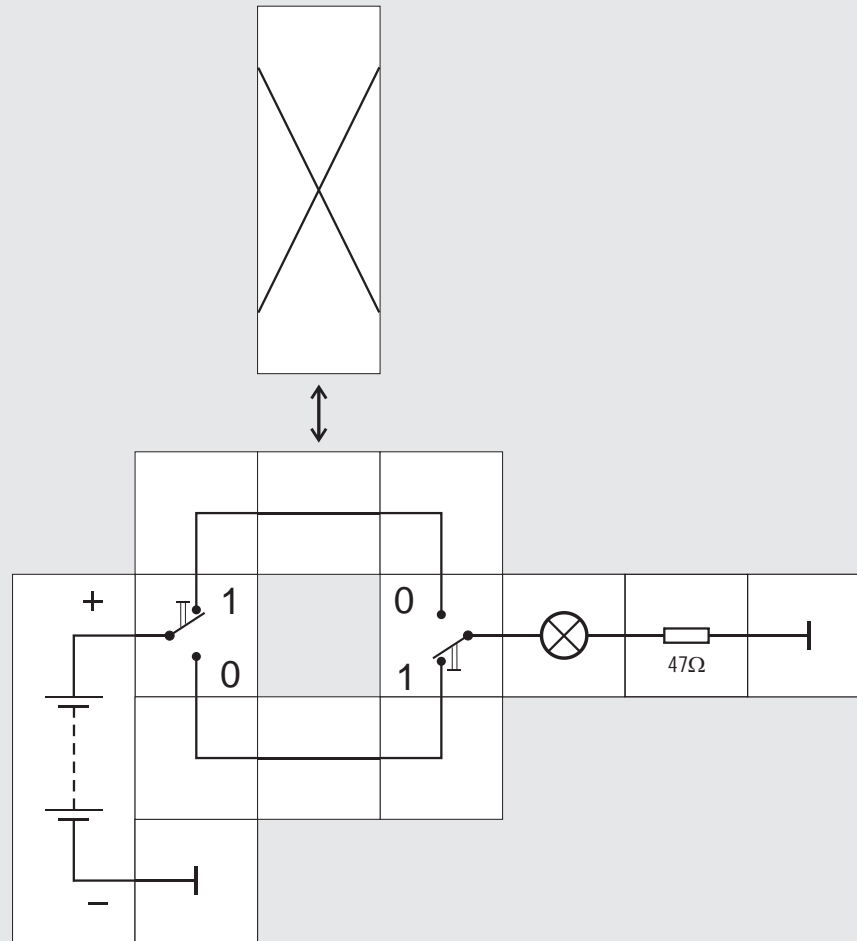
Mit der Schaltung 21 wird erstmals die NOR - Funktion realisiert. Auch hier verwendet man zunächst wieder das Relais, dessen Ruhekontakt im Stromkreis einer Glühlampe angeordnet ist. Die Relaispule wird über zwei Taster geschaltet, die in die-

sem Falle parallel liegen. Wie beim Grundversuch zur NAND - Schaltung leuchtet auch bei diesem Versuch die Lampe auf, wenn man die Batterie anlegt. Durch Drücken eines beliebigen Tasters allein oder beider Taster gemeinsam erhält die Relaispule Strom, und der Relaisanker zieht an. Der Relais-Ruhekontakt unterbricht den Glühlampenstromkreis, und die Lampe verlischt. Damit tritt am Ausgang der Schaltung der Betriebszustand »1« NICHT auf, wenn der obere ODER der untere Eingang ODER beide Eingänge gleichzeitig mit dem Signal »1« angesteuert werden. Es ergibt sich folgende Funktionstabelle:

E1	E2	A
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Natürlich lassen sich NAND - und NOR - Funktionen auch mit Dioden (siehe z.B. Versuch 12) und jeweils einem nachgeschalteten Transistor in Emitterschaltung für die Invertierung realisieren. Wir verzichten hier auf den Aufbau und wollen uns noch einer speziellen OR - Funktion, der EXOR - Funktion, zuwenden.

22





## Versuch 22 EXOR - Funktion mit Glühlampe

Die EXOR - Funktion ist eine besondere ODER - Funktion; sie unterscheidet sich von ihr dadurch, dass ihr Ausgang den Zustand »0« führt, wenn beide Eingänge gleichzeitig »1« sind. Es ist also eine exclusive (entweder oder) ODER - Funktion; man kann es auch so sehen: Nur wenn beide Eingangssignale unterschiedlich sind, ist der Ausgang »1«. Diese Funktion spielt im täglichen Leben eine wichtige Rolle,

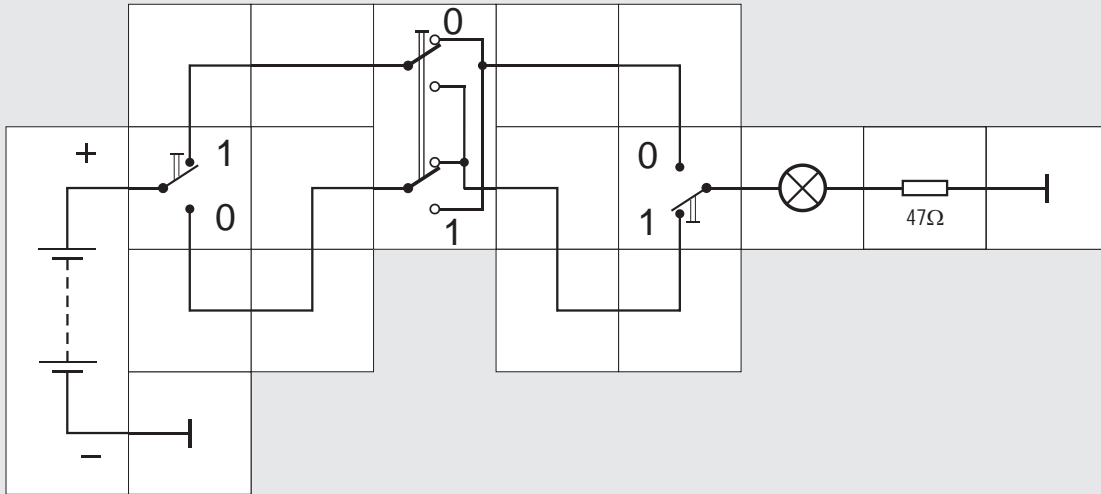
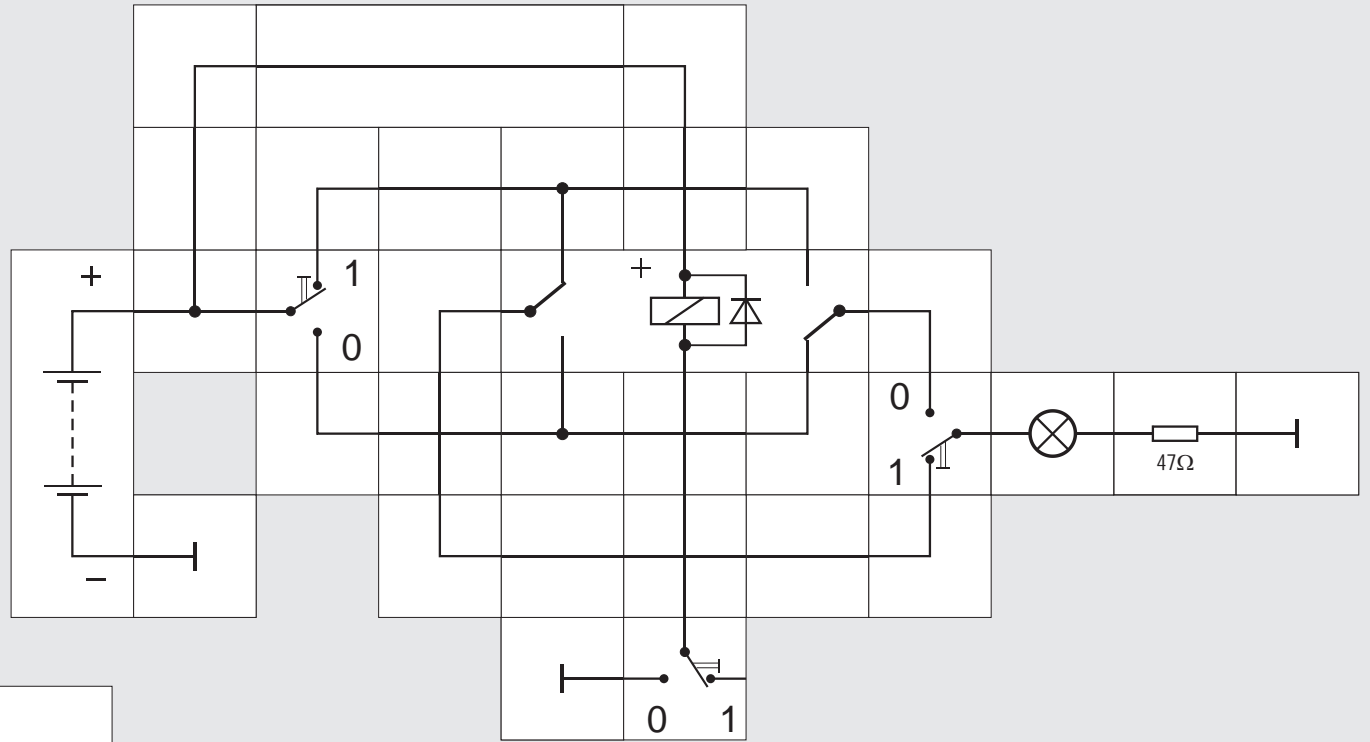
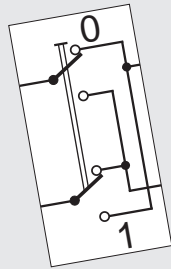
ohne dass wir uns dessen vielleicht bewusst sind: Die Wechselschaltung in der Wohnung ist bei passender Signalzuordnung eine EXOR - Schaltung. Mit Hilfe der Umschalter lässt sich leicht eine solche Schaltung aufbauen. Die Glühlampe kann unabhängig von jedem Schalter einzeln an- und ausgeschaltet werden.

Bei einer UND - Schaltung kann man immer mit einem Schalter unabhängig von dem anderen eine »0« erzwingen, bei einer ODER - Schaltung immer eine »1«. Das gilt auch, wenn mehr als zwei Schalter vorhanden sind. Die entsprechenden Funktionstabellen haben immer nur eine einzige Zeile mit einer »1« (UND - Verknüpfung) bzw. »0« (ODER) in der Ausgangsspalte.

Die EXOR -Funktion zeichnet sich durch ihre Symmetrie aus. Man sowohl mit einem Schalter eine »0« als auch eine »1« unabhängig von dem anderen Schalter erzwingen. Daraus folgt, dass in der Ausgangsspalte der EXOR - Funktion jeweils die eine Hälfte »1« und die andere Hälfte »0« ist. Es ergibt sich folgende Funktionstabelle:

E1	E2	A
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

23





## Versuch 23 Erweiterung der EXOR - Funktion mit Re- lais

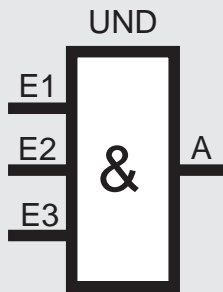
Natürlich lässt sich auch eine EXOR - Funktion auf mehr als zwei Variable erweitern. Die Erweiterung einer Wechselschaltung auf drei oder noch mehr Schalter ist das Gegenstück aus dem Alltagsbereich. Sieht man sich die Schaltung aus dem vorherigen Versuch genau an, so erkennt man vielleicht, dass der Austausch von zwei geraden Verbindern im mittleren Bereich gegen eine Kreuzung genau die Er-

weiterung ist, die wir benötigen. Nun ist es allerdings nicht praktikabel so zu verfahren, sondern dieser Austausch muss durch zwei gleichzeitig betätigte Umschalter realisiert werden.

In dem Lectron Erweiterungskasten »Elektronik AG« gibt es einen solchen »Kreuzschalter« oder »Polwender«. Wer ihn nicht einzeln von Lectron beziehen möchte (Bestell-Nr. 2506), kann dafür das Relais nehmen, das auch zwei Umschalter bietet und dann mit einem Schalter angesteuert wird.

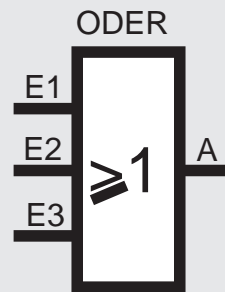
Es können beliebig viele dieser Gebilde eingefügt werden; am Anfang und Ende der Schaltung befindet sich jeweils ein einfacher Umschalter. Die Funktionstabelle liefert bei passender Zuordnung von »0« und »1« immer dann eine »1«, wenn eine ungerade Anzahl von Eingangssignalen ebenfalls eine »1« führt. Sie bleibt also symmetrisch und sieht für drei Eingangssignale wie folgt aus:

E1	E2	E3	A
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1



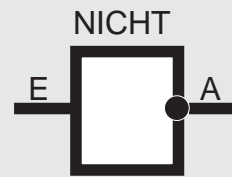
E1	E2	E3	A
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

$$A = E1 \wedge E2 \wedge E3$$

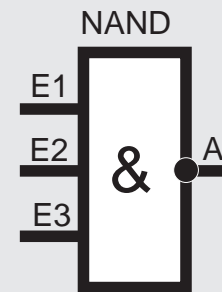


E1	E2	E3	A
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

$$A = E1 \vee E2 \vee E3$$

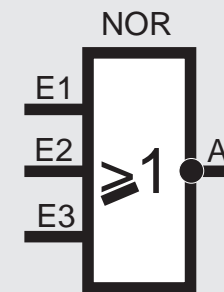


E	A
0	1
1	0

$$A = \bar{E}$$


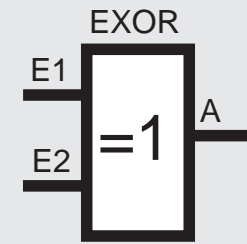
E1	E2	E3	A
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0

$$A = \overline{E1 \wedge E2 \wedge E3}$$



E1	E2	E3	A
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	0

$$A = \overline{E1 \vee E2 \vee E3}$$



E1	E2	A
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

$$A = (\bar{E1} \wedge E2) \vee (E1 \wedge \bar{E2})$$





## Zusammenfassung bisheriger Ergebnisse

Bevor wir nun ein weiteres Gebiet der digitalen Elektronik kennen lernen, wollen wir die bisherigen Erkenntnisse noch einmal kurz zusammenfassen: In der digitalen Elektronik gibt es grundsätzlich nur die zwei Schaltzustände »ein« und »aus«, die in der Fachsprache mit »1« und »0« bezeichnet werden. Zwischenstellungen sind nicht möglich. Die Schaltzustände werden als Signalspannungen gegen »Masse« angegeben. »1« bedeutet demnach »volle Spannung gegen Masse«, und »0« heißt »keine Spannung gegen Masse«. Diese theoretischen Begriffe sind in der Praxis jedoch nicht immer zu erreichen, da die verwendeten Bauelemente zumeist mit Verlusten (Restspannungen, Restströme) behaftet sind. Es wurde daher für die Versuche des vorliegenden Baukastens festgelegt, dass Spannungen von 0 bis 3 V als Signal »0« und Spannungen über 6 V als Signal »1« zu gelten haben. Die bisher beschriebenen »logischen Schaltungen« ermöglichen die Verknüpfung verschiedener Eingangssignale zu einem bestimmten Ausgangssignal. Als Grundschaltungen

gelten die UND - die ODER - und die NICHT - Schaltung. Kombinationen daraus stellen die NAND - und die NOR - Schaltung dar. Bei der UND - Schaltung tritt am Ausgang A nur dann das Signal »1« auf, wenn alle Eingänge E1 UND E2 bis UND En mit dem Signal »1« angesteuert werden. Fehlt bei beliebig vielen Eingängen nur an einem einzigen Eingang das Signal »1«, dann verbleibt der Ausgang im Betriebszustand »0«.

Bei der ODER - Schaltung nimmt der Ausgang A schon dann das Signal »1« an, wenn nur ein Eingang mit dem Signal »1« angesteuert wird. Es genügt also, dem Eingang E1 ODER E2 bis ODER En das Signal »1« zuzuführen, um auch den Ausgang A in den Betriebszustand »1« zu versetzen. Auch mehrere Eingänge gleichzeitig können angesteuert werden, um den gleichen Betriebszustand am Ausgang zu erreichen.

Die NICHT - Schaltung hat nur einen Eingang E und einen Ausgang A. Diese Schaltung kehrt das Signal um. Am Ausgang A erhält man also den Betriebszustand »1« NICHT, wenn am Eingang der Betriebszustand »1« auftritt, und umgekehrt.

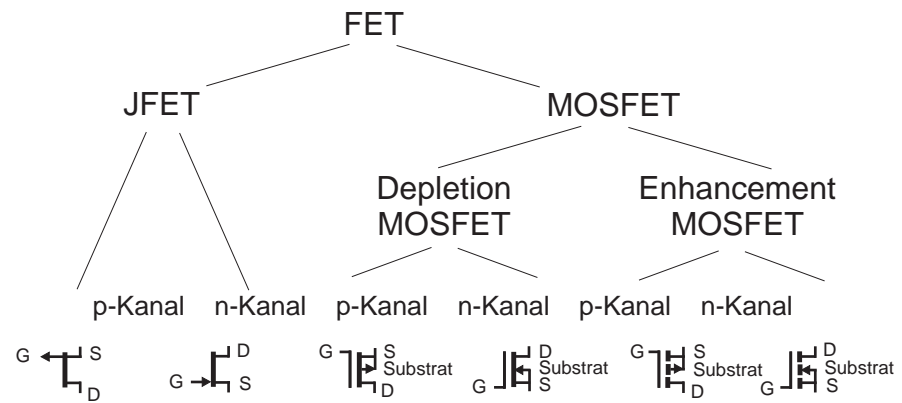
Die NAND - Schaltung ist die Kombination einer UND - Schaltung mit einer nachgeschalteten NICHT Schaltung. Der Ausgang zeigt dann das Signal »1« NICHT, wenn an den Eingängen E1 UND E2

bis UND En das Signal »1« zugeführt wird. Das Symbol für die NAND - Schaltung haben wir bisher noch nicht kennen gelernt, da diese in den Versuchen aus anderen Bausteinen zusammengesetzt wurde. Wir wollen es aber in dieser Zusammenstellung mit auführen.

Bei der NOR - Schaltung sind eine ODER - und eine NICHT Schaltung kombiniert. Dann ergibt sich am Ausgang A das Signal »1« NICHT, wenn am Eingang E1 ODER am Eingang E2 bis ODER am Eingang En das Signal »1« zugeführt wird. Auch hier lernen wir erstmalig das Symbol für die NOR Schaltung kennen, da diese bisher aus Einzelteilen zusammengesetzt wurde.

Die EXOR - Schaltung (mit den beiden Eingängen E1 und E2) schließlich ist eine besondere ODER - Schaltung. Hier ist der Ausgang nur dann »1«, wenn ENTWEDER E1 gleich »1« ODER E2 gleich »1« ist, aber nicht beide zusammen. Die negierte EXOR - Schaltung ist eine »Äquivalenzschaltung«. Nur wenn beide Eingangssignale gleich sind, ist der Ausgang »1«.

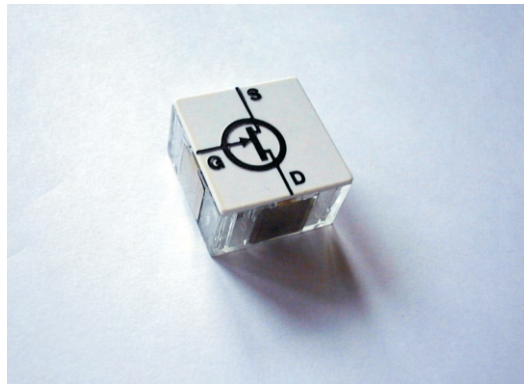
Erweitert man die EXOR - Schaltung auf drei und mehr Eingänge, so zeigt der Ausgang immer dann eine »1«, wenn eine ungeradzahlige Anzahl von Eingangssignalen ebenfalls »1« ist. Die Schaltung wird deswegen auch für Paritätsprüfungen eingesetzt.





Logische Verknüpfungen lassen sich auch erweitern, indem man mehrere Verknüpfungsschaltungen in Reihe legt. Dann kann man das Ausgangssignal von sehr vielen Eingangssignalen abhängig machen und dabei Zwischenergebnisse auswerten. Mit Halbleiter - Dioden kann man die Eingänge der logischen Grundschaltungen gegenseitig entkoppeln. Die Ansteuerung eines beliebigen Eingangs muss dann nicht zwangsläufig die anderen Eingänge beeinflussen. Wir haben aber auch festgestellt, dass mit Halbleitern bestückte Verknüpfungsschaltungen im allgemeinen an ihrem Ausgang nicht zu niederohmig belastet werden dürfen. Als Trennstufe wurde daher der sogenannte Impedanzwandler eingeführt, der am Eingang hochohmig ist und am Ausgang eine niederohmige Last, zum Beispiel eine Glühlampe, ansteuern kann.

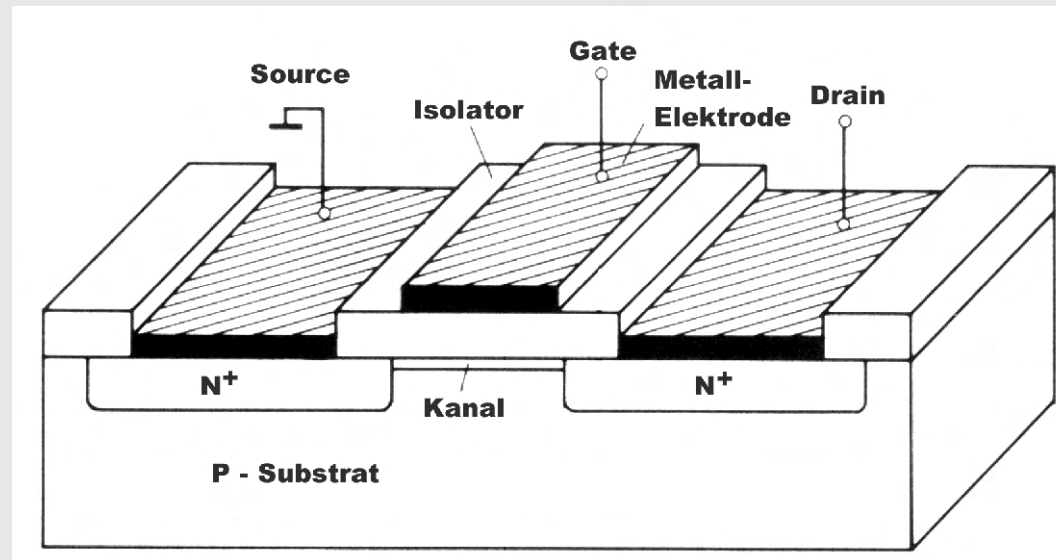
Wir werden nun eine Schaltungstechnik kennen lernen, deren charakteristische Eigenschaft es ist, am Eingang extrem hochohmig zu sein und trotzdem relativ niedrige Ausgangswiderstände zu haben: Die CMOS -TECHNIK, die aus komplementären Feldeffekttransistoren aufgebaut ist. Dazu soll zunächst der Feldeffekttransistor eingeführt werden.



## Klassifizierung der Feldeffekttransistoren

Feldeffekttransistoren sind Halbleiter, die im Gegensatz zu bipolaren pnp- und npn-Transistoren nicht mit einem Strom, sondern mit einem elektrischen Feld, d.h. leistungslos gesteuert werden. Man

unterscheidet sechs verschiedene Typen von Feldeffekttransistoren (Abkürzung »FET«). Ihre Schaltsymbole sind in der Abbildung zusammengestellt. Das GATE G ist die Steuerelektrode. Mit ihm lässt sich der Widerstand zwischen DRAIN D und SOURCE S steuern; die Steuerspannung ist  $U_{GS}$ . Viele FETs sind symmetrisch, d. h. sie ändern ihre Eigenschaften nicht, wenn man S und D vertauscht. Bei SPERRSCHICHTFETS JFETs (JUNCTION FET) ist das Gate durch einen pn- bzw. np-Übergang vom Kanal DS getrennt. Bei richtiger Polung von  $U_{GS}$  sperrt diese Diode und isoliert das Gate, in diesem Bereich werden die Sperrschichtfets normalerweise betrieben; bei umgekehrter Polung wird sie leitend und es fließt ein unerwünschter Strom. Bei MOSFETs (METAL-OXID-SEMICONDUCTOR) isoliert eine dünne  $SiO_2$ -Schicht das Gate vom Kanal DS. Daher kann bei ihnen nie ein Gatestrom fließen, unabhängig von der Polung des Gates. Die im Betrieb auftretenden Gateströme liegen bei JFETs zwischen 10 pA und 10nA; bei MOSFETs sind die Gateströme um einen Faktor 1000 kleiner. Damit verbunden sind Eingangswiderstände von  $10^{10}$  bis  $10^{12}$  Ohm bei JFETs und  $10^{13}$  bis  $10^{15}$  Ohm bei MOSFETs.





ENHANCEMENT-MOSFETs sperren dagegen bei  $U_{GS} = 0$ , sie heißen daher selbstsperrend. Ein Drainstrom fließt bei n-Kanal-Enhancement-MOSFETs erst, wenn  $U_{GS}$  positiv wird. Zwischen Enhancement- und Depletion-MOSFETs gibt es Übergangstypen, z.B. auch solche, bei denen bei  $U_{GS} = 0$  ein mittlerer Drainstrom fließt. Bei n-Kanal-FETs ist die Source-Elektrode auf negativeres Potential zu legen als die Drainelektrode. Bei symmetrischen n-Kanal-FETs wirkt jeweils die Kanal-Elektrode mit dem niedrigeren Potential als Source. Bei p-Kanal-FETs liegt die Source-Elektrode auf positiverem Potential als die Drain-Elektrode.

Bei den selbstleitenden Typen wird die Spannung, die erforderlich ist um den Transistor zu sperren, als Abschnürspannung (PINCHOFF VOLTAGE)  $U_p$  bezeichnet. Bei selbstsperrenden Typen heißt dagegen die Gatespannung, bei der der Transistor beginnt leitend zu werden, Schwellenspannung (THRESHOLD VOLTAGE)  $U_T$ .

Bei MOSFETs ist häufig ein vierter Anschluss, das Substrat (BODY), herausgeführt. Diese Elektrode hat ähnlich steuernde Wirkung wie das Gate. Sie ist jedoch nur durch eine Sperrschicht vom Kanal isoliert. Im allgemeinen nützt man ihre Steuerwirkung nicht aus und verbindet sie wie das auch beim Lectron - Transistorarray und in den anderen integrier-

ten Vernüpfungs - und Flipflop - Bausteinen geschehen ist, mit der Source-Elektrode. Benötigt man zwei Steuerelektroden, verwendet man MOSFET - Tetroden, die zwei gleichberechtigte Gates besitzen. Im folgenden werden wir uns nur mit selbstsperrenden n - und p - Kanal - MOSFETs und den aus ihnen aufgebauten Schaltungen beschäftigen.

## Aufbau des MOSFETs

Das Bild zeigt die schematische Darstellung eines n - Kanal MOSFETs mit Halbleitersubstrat. Das Ausgangsmaterial ist schwach p - dotiertes einkristallines Silizium. In geringem Abstand voneinander werden zwei stark n - dotierte Inseln eindiffundiert; die dazwischen liegende Zone ist mit einem Isolator abgedeckt. Auf den Isolator wird eine Metallschicht, die Gate-Elektrode, aufgedampft. Der Isolator wird meist durch thermische Oxydation des Siliziums zu Siliziumdioxid ( $SiO_2$ ) erzeugt. Seit einiger Zeit wird auch Siliziumnitrid ( $Si_3N_4$ ) oder Aluminiumoxyd ( $Al_2O_3$ ) entweder allein oder in Verbindung mit  $SiO_2$  als Isolator verwendet. Die Isolierschicht deckt als Schutzschicht nicht nur die Gatezone, sondern die ganze Siliziumoberfläche, ausgenommen die Elektroden von Source und Drain, ab. Neben Source und Drain ist auch das Substrat kontaktiert.

Genauso wie es pnp- und npn-Transistoren gibt, gibt es auch p- und n-Kanal-FETs. Bei den n-Kanal-FETs wird der Kanalstrom um so kleiner, je weiter das Gatepotential sinkt; umgekehrt ist es bei p-Kanal-FETs. Ebenso wie sich in Schaltungen npn-Transistoren durch pnp-Transistoren ersetzen lassen, kann man n-Kanal-FETs durch p-Kanal-FETs ersetzen, wenn man die Betriebsspannungen der Schaltung umpolt; eventuell vorhandene Dioden und Elektrolytkondensatoren müssen dann natürlich ebenfalls umgepolt werden.

Bei JFETs fließt der größte Drainstrom bei der Spannung  $U_{GS} = 0$ . Sie werden daher als selbstleitend bezeichnet. Dasselbe Verhalten zeigen die DEPLETION-MOSFETs.





## Schutzmaßnahmen

Bei FETs und ganz besonders bei MOSFETs ist das Gate sehr gefährdet. Die maximal zulässigen Gate-Spannungen  $U_{GS}$  und  $U_{GD}$  dürfen bei diskreten Transistoren im allgemeinen 20 bis 100 V nicht überschreiten. Sonst schlägt die Gate-Kanal-Isolation durch, und der Transistor ist irreversibel geschädigt. Nun kommen im Lectron System zwar nur 9 V/12 V vor, trotzdem können solche Spannungen wegen des hohen Eingangswiderstandes und der niedrigen Eingangskapazität von wenigen Picofarad leider sehr leicht auf andere Weise auftreten: Besonders gefährlich sind statische Ladungen, die den FET und den MOSFET schon beim Berühren der Anschlüsse zerstören können. Beim Einbau von MOSFETs sind daher das Gerät, der LötKolben und die Person zu er-

den. Um MOSFETs zu schützen, werden bei der Herstellung zum Teil Z-Dioden zwischen Gate und Source und eingebaut. Dadurch verschlechtert sich der Eingangswiderstand aber beträchtlich und kommt in die Größenordnung von JFETs. Der einzige verbleibende Vorteil solcher MOSFETs ist die nach wie vor gute Gate-Kanal-Isolation.

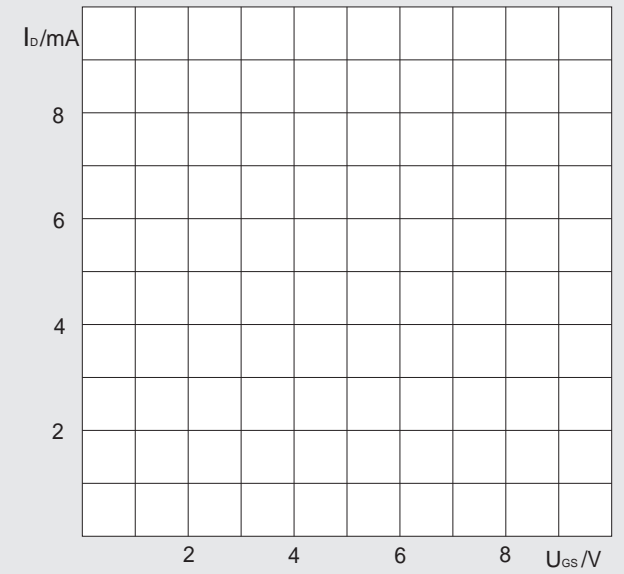
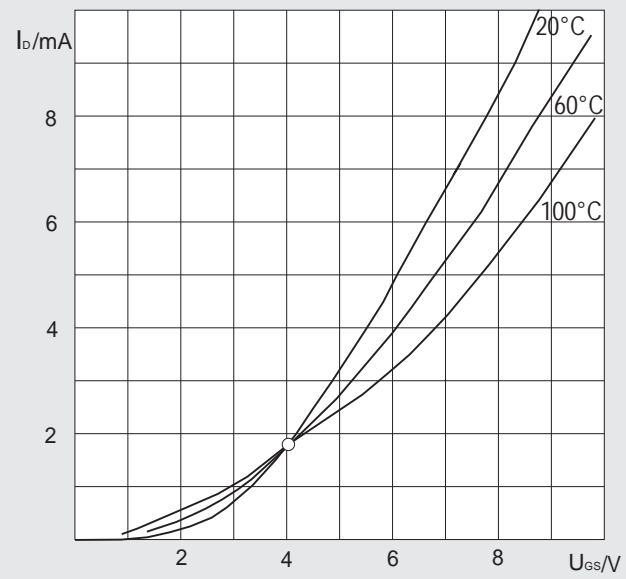
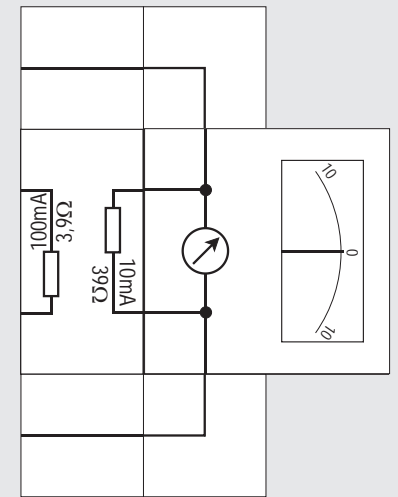
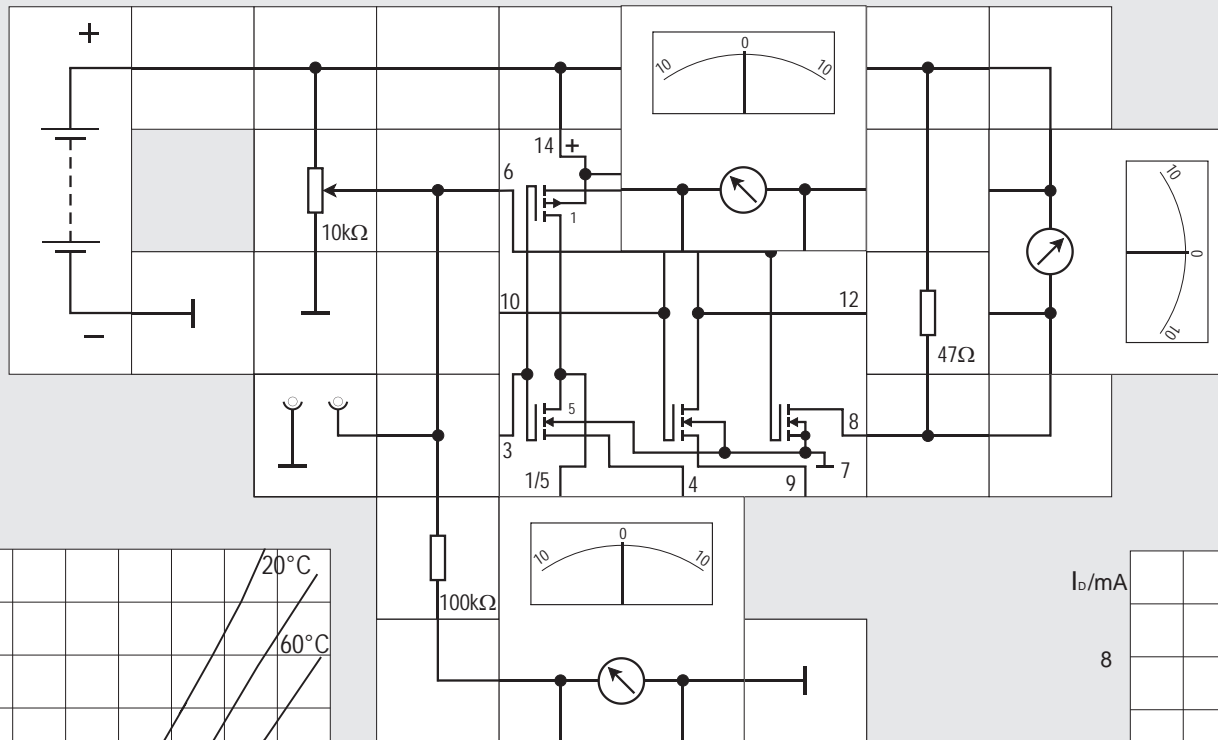
Beim Experimentieren mit den Lectron Bausteinen muss man sich vor dem Anfassen der Bausteine, die MOSFETs enthalten, unbedingt entladen, indem man die (schwach) leitende Bausteinpalette und die Grundplatte berührt, um einen Potentialausgleich herbei zu führen; trotzdem sollte man vermeiden, die Kontakte der Bausteine zu berühren. Grundsätzlich gehören zum jeweiligen Versuchsaufbau nicht benötigte Bausteine wieder in die Bausteinpalette, wo ihre Kontakte über den leitenden Kunststoff miteinander verbunden sind. Die Abbildung zeigt die weltweit eingeführten Warnungsschilder für derart empfindliche Bauelemente.

## Zusatzbeschaltung

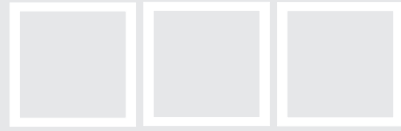
Zusätzlich zu den Schutzmaßnahmen, die der Hersteller bereits eingebaut hat, also Z-Dioden und Dioden vom Masse-Anschluss zum Gate und von dort über eine weitere Diode zum Versorgungsspannungsanschluss sind die Gate - Kontakte bei den

Lectron Bausteinen über einen Widerstand von  $1\text{k}\Omega$  mit dem Gate verbunden. Außerdem sind sie über einen weiteren  $47\text{k}\Omega$  Widerstand mit dem Versorgungsspannungs- oder dem Masseanschluss verbunden. Das hat den Vorteil, dass ein (noch) nicht beschalteter Gateanschluss stets potentialmäßig festgelegt ist und statische Ladungen im gewissen Maße rasch abgebaut werden können. Bei AND-Verknüpfungen ist z. B. jeder Eingang intern über einen Widerstand mit Versorgungspotential verbunden; nicht benutzte Eingänge brauchen deswegen extern auch nicht beschaltet zu werden. Entsprechendes gilt für die OR-Verknüpfung und die Flip-flops; alle Eingänge (Gateanschlüsse) sind mit dem nicht aktiven Potential über Widerstände verbunden. Beim Vorstellen der Bausteine wird darauf im einzelnen noch einmal eingegangen.

Die Schutzbeschaltung des Gates (Diode von Masse und nach Versorgungsspannung) ist manchmal der Anlass für Irritationen. Wenn ein Schaltkreis keine Versorgungsspannung erhält, kann er sich häufig über ein auf »1« - Potential liegendes Eingangssignal und eine Schutzdiode damit versorgen: Die Schaltung funktioniert einwandfrei. Ändert jedoch das Signal sein Potential, arbeitet die Schaltung nicht mehr. Tritt so etwas auf, sollten zuerst die Versorgungsspannungs - Anschlüsse geprüft werden.







## Versuch 24 Eingangskennlinie eines n - Kanal - MOSFETs

Um ein Gefühl für das Verhalten eines MOSFETs zu bekommen, sollen als nächstes seine Kennlinien aufgenommen werden. Im Lectron Digitalbaukasten gibt es einen Großbaustein, der drei Paare, gebildet aus je einem p - Kanal und einem n - Kanal - MOSFET, enthält. Die Gateanschlüsse eines Paares sind bereits miteinander verbunden und über die Stifte 3, 6 und 10 an die Kontakte geführt. Die Bezeichnungen wurden von dem im Inneren des Kunststoffkästchens befindlichen integrierten Schaltkreis (CD 4007) übernommen. Neben den Gateverbindungen sind noch weitere Verbindungen zwischen den Transistoren vorhanden, die uns später zugute kommen werden. Der n - Kanal - Transistor mit dem Gateanschluss 6, der Source an Masse 7 und dem Drain an Stift 8 ist für die Aufnahme seiner Eingangskennlinie noch unbeschaltet genug. Die Eingangskennlinie gibt den Zusammenhang zwischen der Gate - Source - Spannung  $U_{GS}$  und dem

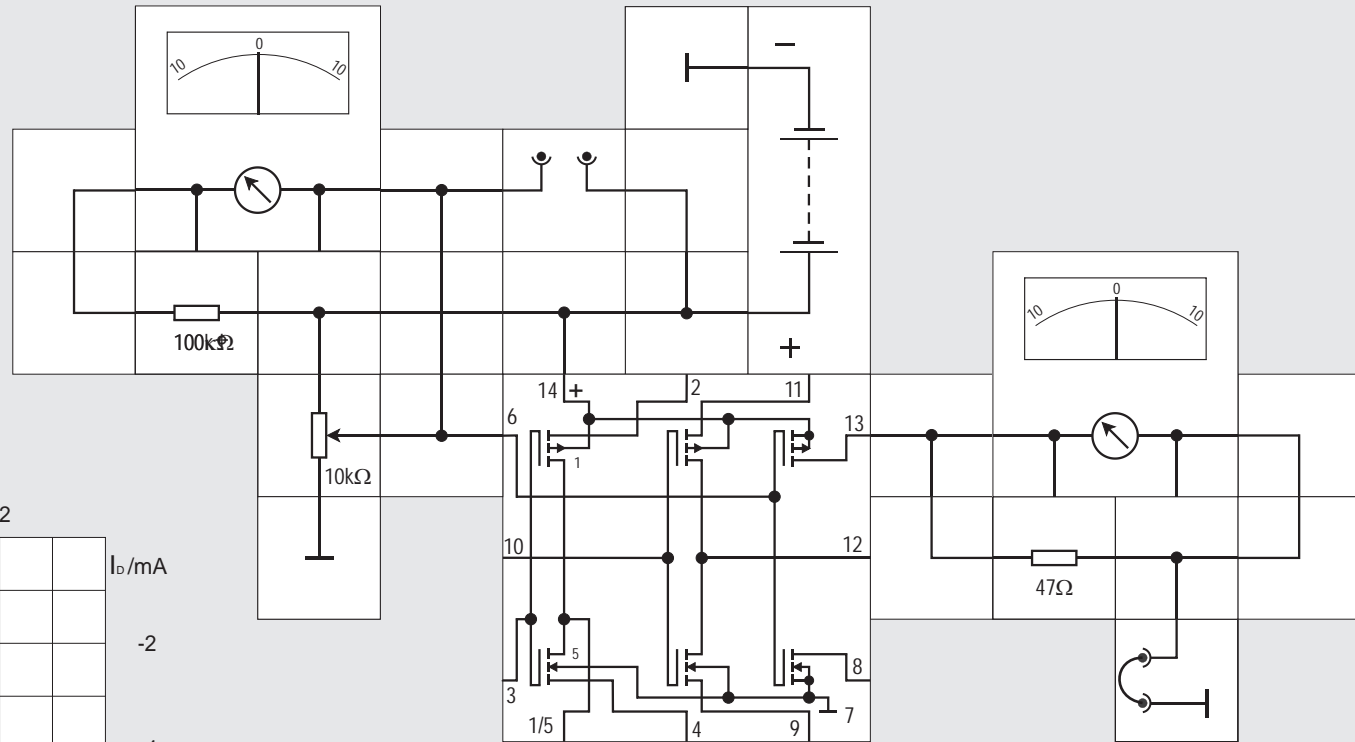
Drainstrom  $I_D$  bei festgehaltener Drain - Source - Spannung  $U_{DS}$  an. Die Schaltung wird nach nebenstehendem Bild aufgebaut. Zum ersten Messinstrument ( $U_{GS}$ ) wird ein 100 k $\Omega$  Widerstand in Reihe gelegt (Vollausschlag ist dann 10 V), das zweite Messinstrument ( $I_D$ ) bekommt einen 47  $\Omega$  Parallelwiderstand zur Messbereichserweiterung auf 10 mA Vollausschlag. Besitzt man den Nebenschlusswiderstands - Baustein, verwendet man die rechte Schaltung. Besser ist es jedoch, gleich mit zwei Digitalmultimetern zu messen, damit die Ergebnisse genauer werden. Man fängt mit  $U_{GS} = 0$  an und dreht am Potentiometer die Spannung langsam hoch. Dabei ist zu erkennen, dass unterhalb der Schwellenspannung  $U_T$  überhaupt kein Drainstrom fließt. Oberhalb von  $U_{GS} = U_T$  steigt der Drainstrom nach der folgenden Beziehung an:

$$I_D = I_{DS} (1 - U_{GS}/U_T)^2$$

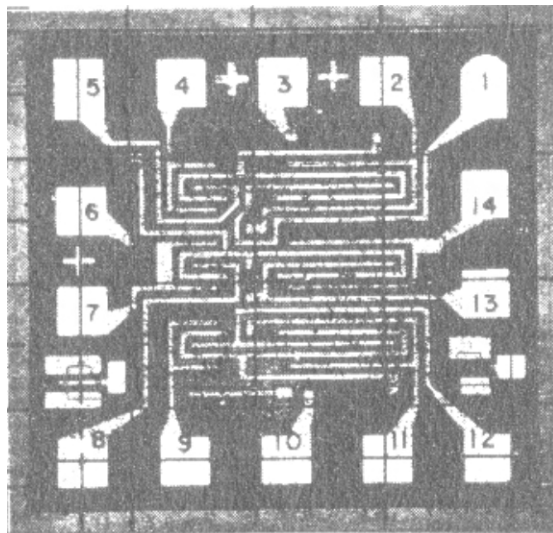
$I_{DS}$  ist bei selbstsperrenden FETs der Drainstrom, der bei  $U_{GS} = 2U_T$  fließt.

Mit dem Versuchsaufbau kann nicht so gut gezeigt werden, dass die Eingangskennlinie temperaturabhängig ist; deswegen ist das Ergebnis qualitativ in einem Diagramm dargestellt. Man erkennt, dass es einen Arbeitspunkt gibt, in dem  $I_D$  temperaturunabhängig ist.

25



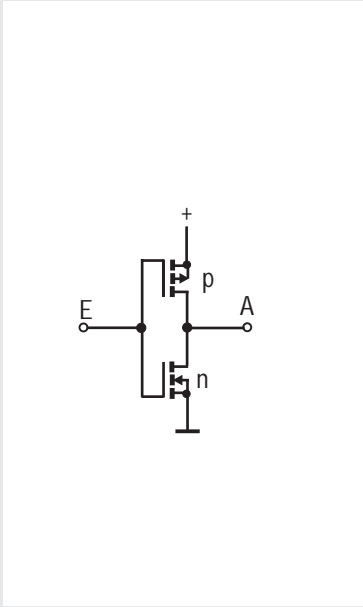
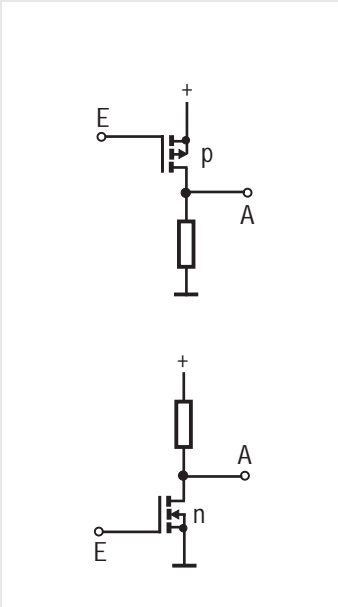
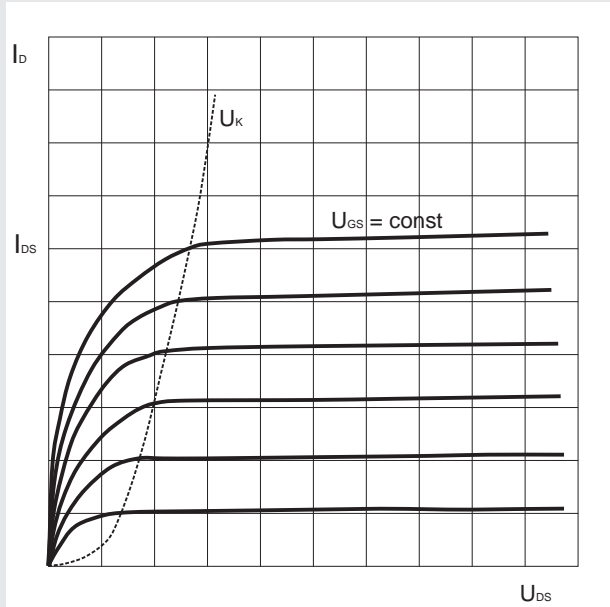
$U_{GS}/V$	-8	-6	-4	-2	
$I_b/mA$					
-2					
-4					
-6					
-8					



## Versuch 25

### Eingangskennlinie eines p - Kanal - MOSFETs

Die gleiche Kennlinie soll nun für einen p - Kanal - MOSFET aufgenommen werden. In dem Lectron Transistor Array ist der MOSFET mit seinem Gate an Stift 6, seiner Source an Stift 14 und seinem Drain an Stift 13 dafür geeignet. Die Versuchsschaltung ist in der Abbildung angegeben. Zu beachten ist, dass  $U_{GS}$  negativ gezählt wird, da das Gatepotential kleiner ist als das Sourcepotential; auch  $I_D$  wird negativ angegeben, weil er aus dem Transistor herausfließt. Im Prinzip ergibt sich eine ähnliche Kennlinie wie beim n - Kanal - MOSFET. Erwähnenswert ist, dass die Leitfähigkeit des p - Kanals durch sogenannte Löcher zustande kommt; im Gegensatz zu den Elektronen im n - Kanal sind jene nicht so beweglich, so dass die p - Kanal Strukturen ungefähr dreimal so groß sind wie die n - Kanal Strukturen (siehe auch das Chipfoto), um gleiche Widerstandswerte zu bekommen.





## Ausgangskennlinie eines n - Kanal - MOSFETs

Die Ausgangskennlinie gibt den Zusammenhang zwischen dem Drainstrom  $I_D$  und der Drain - Source - Spannung  $U_{DS}$  bei festgehaltener Gate - Source - Spannung  $U_{GS}$  an. Wir können mit dem Transistor Array diese Kurven nicht aufnehmen, da die Dioden - Schutzbeschaltung nicht zulässt, dass  $U_{GS}$  größer als  $U_{DS}$  wird. Deswegen werden gleich die Kennlinien qualitativ angegeben: Lässt man  $U_{DS}$  von kleinen Werten her ansteigen, so steigt  $I_D$  zunächst proportional zu  $U_{DS}$  an. Der MOSFET verhält sich in diesem Bereich wie ein ohmscher Widerstand. Oberhalb der KNIESPANNUNG  $U_K$  bleibt der Drainstrom  $I_D$  dann jedoch weitgehend konstant. Zwischen der Knie Spannung  $U_K$  und der Schwellenspannung kann man die Näherungsbeziehung  $U_K = U_{GS} - U_T$  angeben; beim vorher erwähnten Drainstrom  $I_{DS}$  (Versuch 24) wird also  $U_K = U_T$ .

## CMOS - Inverter

Um mit einem MOSFET einen Inverter aufzubauen, könnte man ihn mit einem Widerstand in der Drainleitung beschalten, genauso wie man es mit einem bipolaren Transistor und einem Kollektorwiderstand machen würde. Dies geht gleichermaßen mit einem n - Kanal oder mit einem p - Kanal MOSFET. Nachteilig ist bei dieser Konfiguration, dass der Transistor im leitenden Zustand den Querstrom durch den Widerstand aufnehmen muss und dass im gesperrten Zustand der Ausgangswiderstand relativ hochohmig ist. Letzteres lässt sich zwar mit einem kleineren Arbeitswiderstand vermindern, allerdings nur um den Preis eines noch höheren Querstroms im leitenden Zustand.

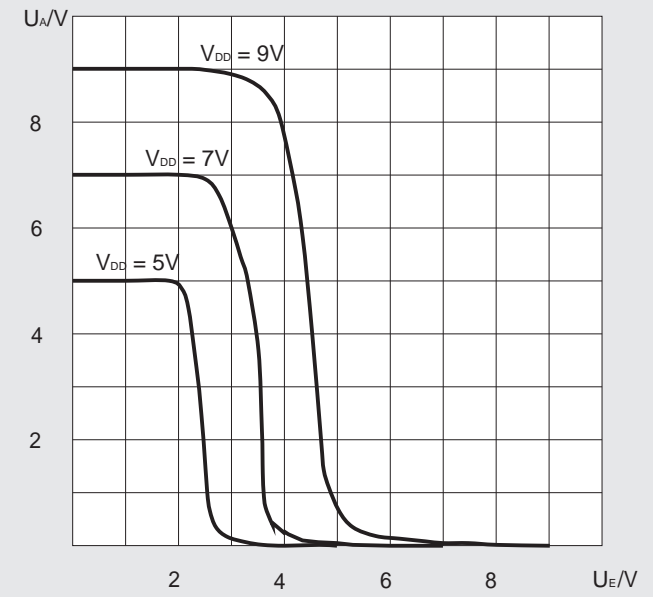
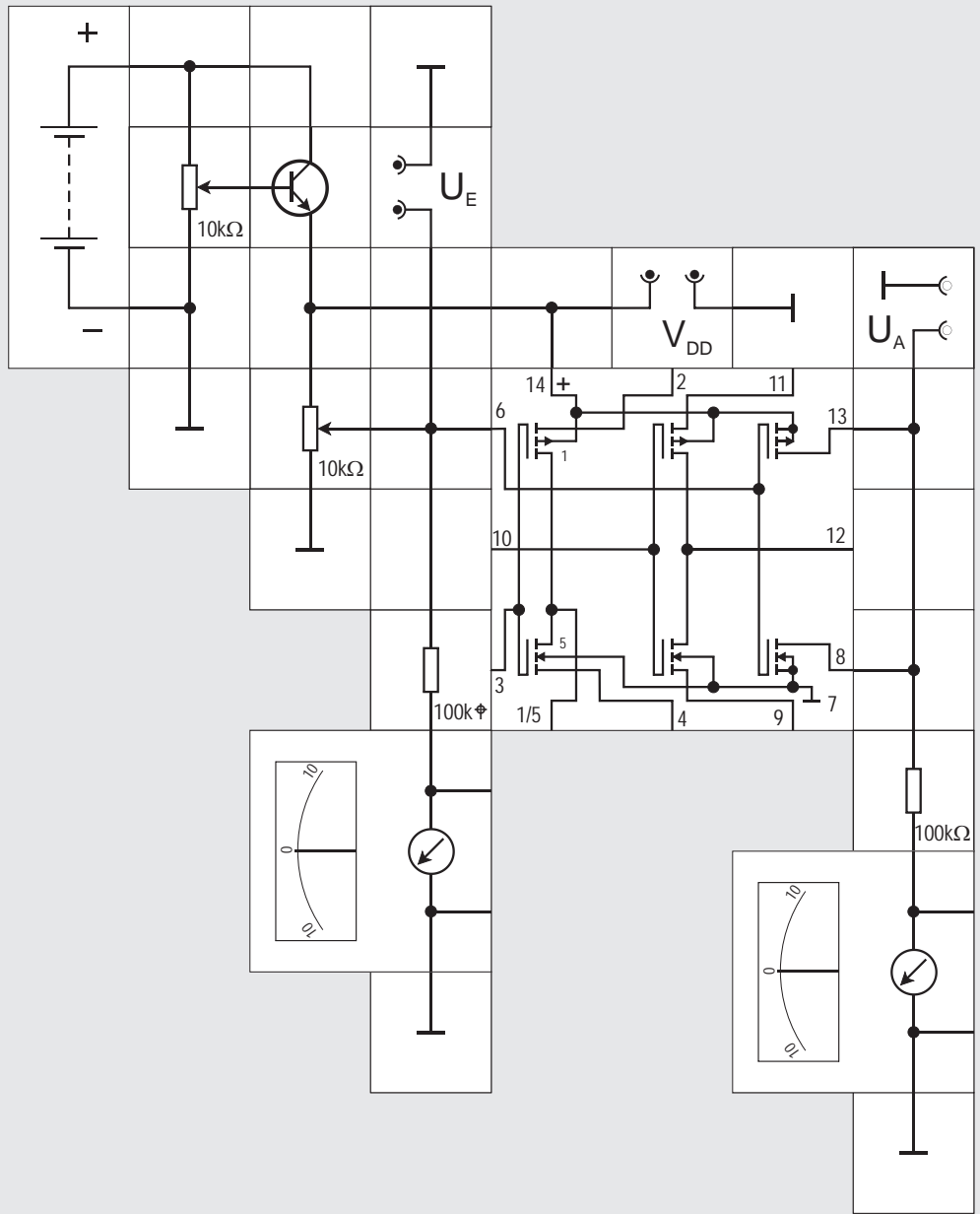
Die komplementären MOSFETs gestatten nun den Aufbau eines viel besseren Inverters (s. Abbildung). Schaltet man einen p - Kanal und einen n - Kanal MOSFET mit ihren Drain - Anschlüssen zusammen, so erhält man einen Inverter, der niederohmig in beiden Zuständen ist und bei dem, sieht man vom Augenblick des Umschaltens ab, überhaupt kein Querstrom fließt und damit auch keine störende Verlustleistung entsteht, zumal für die Ansteuerung auch kein Strom, sondern nur ein Potential erforderlich

ist. Seine Ruheverlustleistung ist buchstäblich Null, er hat einen extrem hohen Eingangswiderstand und sein niederohmiges Ausgangspotential liegt entweder sehr nahe an seiner Versorgungsspannung oder sehr nahe an Masse, abhängig davon, wie viel Strom er an einen angeschlossenen Verbraucher abgeben oder von diesem aufnehmen muss. Ist der Verbraucher ebenfalls in CMOS aufgebaut, sind diese Ströme Null und das Versorgungs- bzw. das Massepotential wird erreicht.

Da der Inverter aus komplementären MOSFETs zusammengesetzt ist, heißt er CMOS (COMPLEMENTARY MOS) - Inverter. Er ist das Grundelement für alle Schaltkreise der digitalen CMOS Logik, einer Schaltkreisfamilie, die es überhaupt erst ermöglichte, hoch und höchst integrierte verlustleistungsarme Schaltkreise zu bauen.

Die Funktion ist nach dem bisher bekannten Verhalten von MOSFETs leicht einzusehen: Legt man tiefes (Masse - ) Potential an das gemeinsame Gate, so leitet der p - Kanal MOSFET und legt das Versorgungspotential an den Ausgang; legt man dagegen hohes (Versorgungsspannung - ) Potential ans Gate, leitet der n - Kanal MOSFET und legt Massepotential an den Ausgang.

26





# Lectron

## Versuch 26 Übertragungskennlinie eines CMOS - Inverters

Dieses Verhalten soll jetzt mit dem Lectron Transistor Array nachgeprüft werden. Dazu werden die Drainanschlüsse Stift 8 und 13 der beiden bisher schon benutzten Transistoren zu dem gemeinsamen Ausgang zusammen geschaltet, Eingang des Inverters ist Stift 6, Stift 7 ist Masse, die über den Bodenkontakt automatisch mit dem Minuspol der Batterie verbunden ist, der Pluspol wird an Stift 14 gelegt. Wir nehmen jetzt die Übertragungskennlinie für verschiedene Versorgungsspannungen auf und tragen sie in das Diagramm ein. Dazu wird vor der eigentlichen Messung jeweils die Versorgungsspannung am Potentiometer eingestellt; für die 9 V entfernt man den Emitterfolger und geht direkt an die Batterie oder das Netzgerät. Wie schon bei Aufnahme der anderen Kennlinien sind Digitalmultimeter wegen ihrer höheren Ablesegenauigkeit von Vorteil. Man sieht leicht, dass der Inverter jeweils ungefähr bei der halben Versorgungsspannung umschaltet und die Kennlinie dort relativ steil ist; weiter wird

unsere Erwartung, dass die Ausgangssignale im unbelasteten Zustand potentialmäßig nahe bei Masse bzw. bei der jeweiligen Versorgungsspannung liegen, bestätigt. Es ist im übrigen in der CMOS - Technik üblich, das positive Potential (also die Versorgungsspannung) mit  $V_{DD}$  und das negative Potential (meistens Masse) mit  $V_{SS}$  zu bezeichnen.

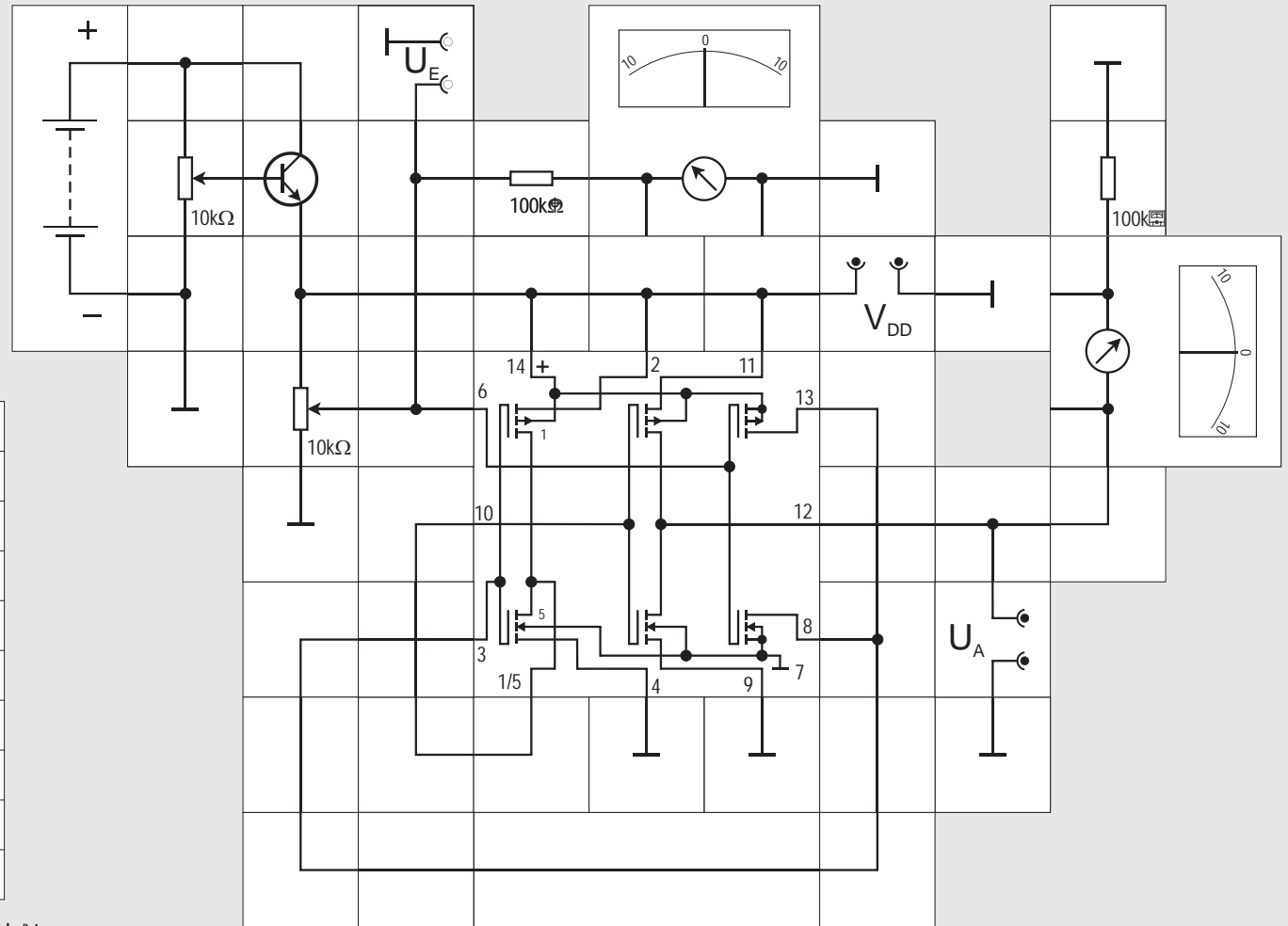
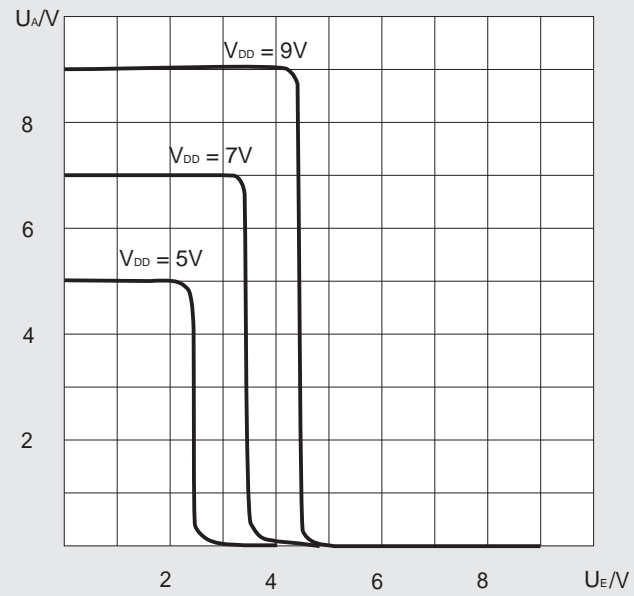
Zur Verlustleistung von CMOS noch folgende Anmerkung:

Bei CMOS fließen zwar keine Ruhestrome, aber es wird Strom benötigt, wenn beim Schalten interne und externe Kapazitäten umgeladen werden müssen. Da die in einem Kondensator gespeicherte Energie  $\frac{1}{2}CU^2$  ist und die gleiche Menge Energie im ansteuernden Kreis in Wärme umgesetzt wird, ist die gesamte Verlustleistung nach der Formel

$$P = (V_{DD} - V_{SS})^2 f C$$

zu berechnen. Beispielsweise kommen bei einer Frequenz von 1 MHz und 10 V Betriebsspannung  $100\mu W$  pro pF zusammen. Ein Eingang eines Bausteins hat circa 5 pF Kapazität, der Ausgang abhängig von seiner Niederohmigkeit entsprechend mehr, so dass bei einem größeren Schaltwerk Verlustleistung entsteht, die nicht mehr zu vernachlässigen ist.

27





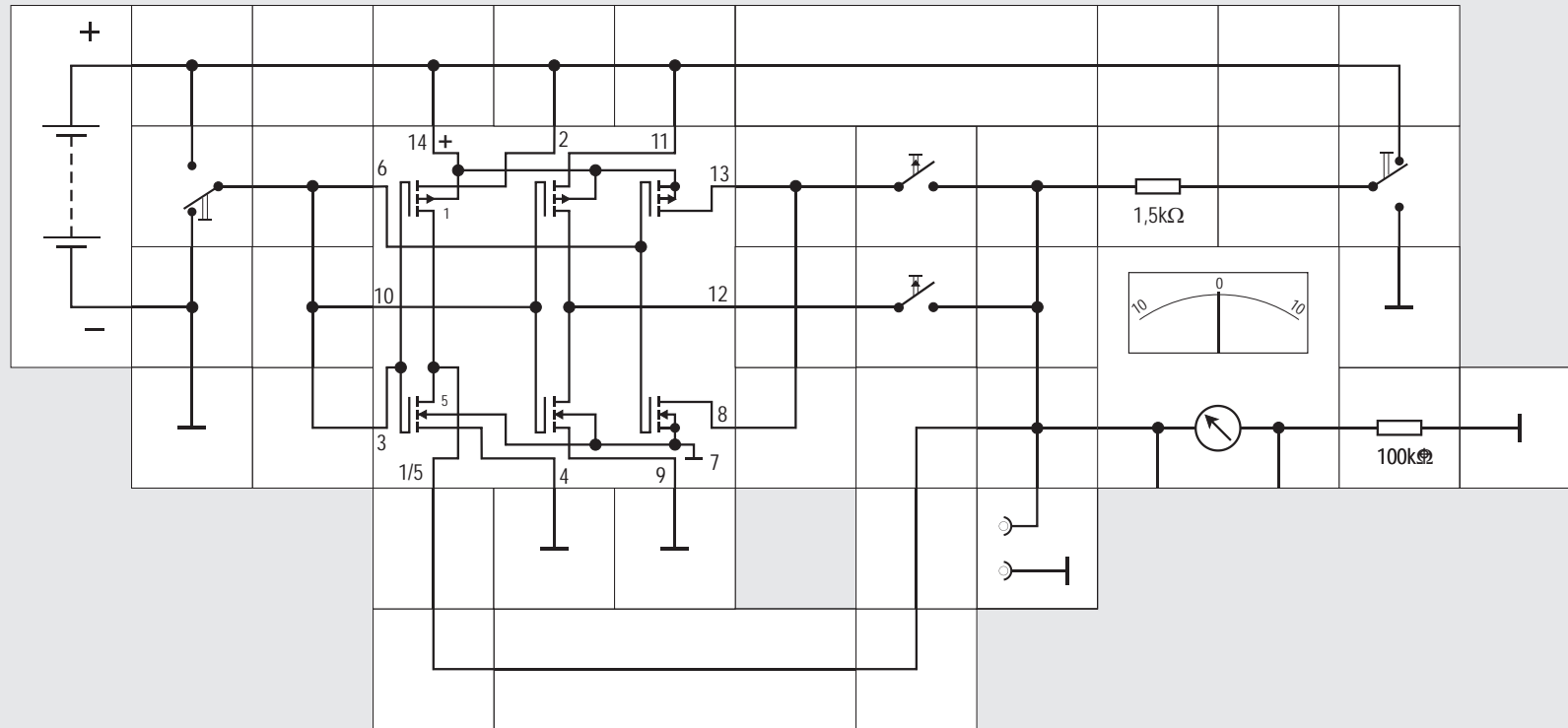


## Versuch 27

### Übertragungskennlinie hintereinander geschalteter Inverter

Möchte man noch steilere Übertragungskennlinien, muss man drei Inverter hintereinander schalten. Dies ist auch manchmal erforderlich, weil man aus Geschwindigkeitsgründen Transistoren mit kleinen Strukturen und entsprechend kleinen Eingangskapazitäten ( $<5$  pF) anstrebt, bei einstufigen Invertern aber dieselben Transistoren Lasten ansteuern, die niederohmige Ausgangswiderstände, und damit größere Transistoren mit entsprechend größeren Kapazitäten, verlangen. Man nimmt dann dreistufige Inverter, wobei die Strukturen von Inverter zu Inverter um den Faktor drei vergrößert werden, was bezogen auf die Signallaufzeit optimal ist.

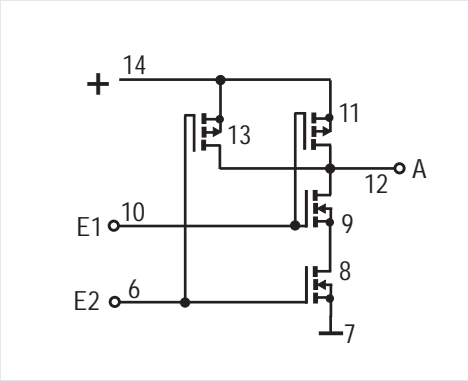
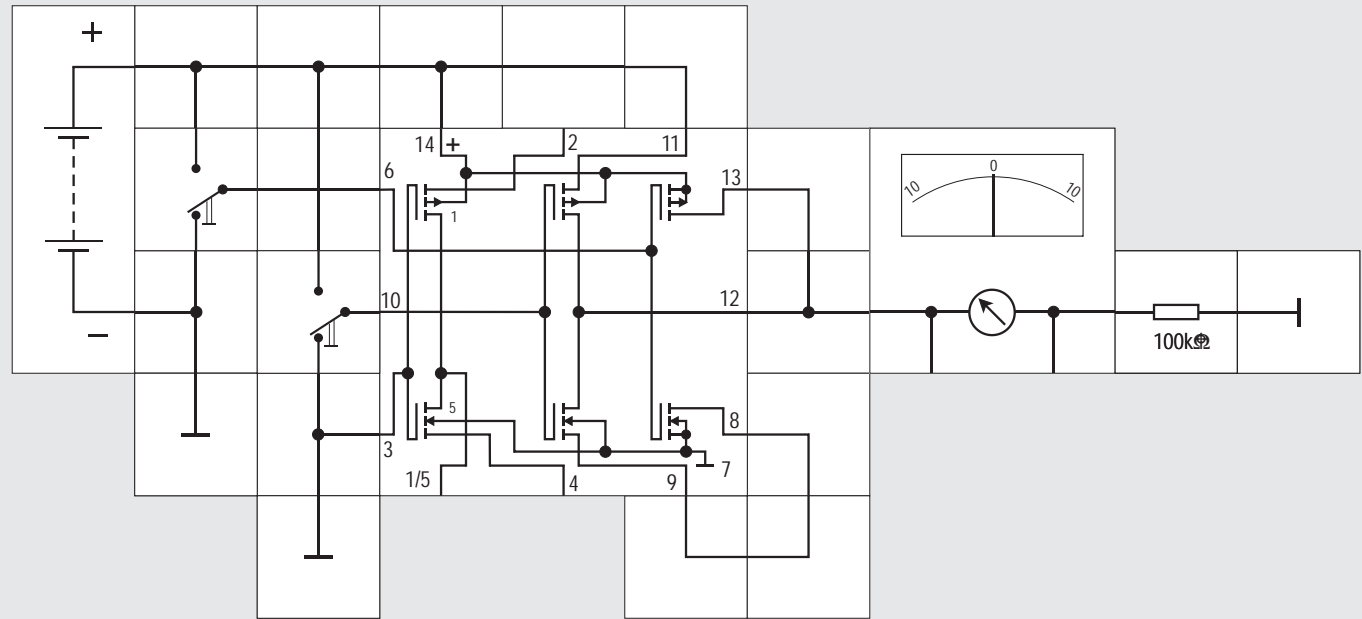
Das Lectron Transistor - Array enthält drei (allerdings gleich große) Transistor Paare; wir müssen nur noch ein paar Verbindungen vornehmen und können dann die Kennlinien bei verschiedenen Versorgungsspannungen aufnehmen. Erwartungsgemäß sind sie im Umschaltbereich sehr steil.





## Versuch 28 Übertragungskennlinie parallel geschalteter Inverter

Reicht für manche Anwendungsfälle die Stromaufnahme bzw. -abgabe eines Inverters nicht aus, was insbesondere dann vorkommt, wenn systemfremde Lasten angesteuert werden, kann man problemlos zwei oder drei Inverter parallel schalten, um sie zu erhöhen. Dies ist auch leicht mit dem Lectron Transistor Array möglich. Lässt man zunächst nur einen Inverter (Ausgang 1/5) die Last von  $1,5 \text{ k}\Omega$  ansteuern, so sieht man, dass bei hohem Ausgangspotential und Last gegen  $V_{SS}$  (Masse) bzw. tiefem Ausgangspotential und Last gegen Versorgungsspannung  $V_{DD}$  das Ausgangspotential  $U_A$  das Versorgungsspannungs- bzw. Massepotential nicht mehr erreicht. Erst wenn man einen Taster betätigt und den zweiten Inverter (Ausgang 8/13) hinzu schaltet, werden die Verhältnisse besser, noch näher an die gewünschten Potentiale kommt man nach Hinzuschalten des dritten Inverters (Ausgang 12). Ersetzt man den  $1,5 \text{ k}\Omega$  durch einen kleineren Widerstand, so wird der Effekt noch deutlicher. Mit mehr als  $4 \text{ mA}$  für einen n - Kanal und mehr als  $3 \text{ mA}$  für einen p - Kanal MOSFET sollte man die Transistoren bei  $V_{DD} - V_{SS} = 9 \text{ V}$  nicht belasten. Die maximale Versorgungsspannung  $V_{DD} - V_{SS}$  darf im Übrigen  $15 \text{ V}$  nicht überschreiten.





## Versuch 29 Die NAND - Verknüpfung

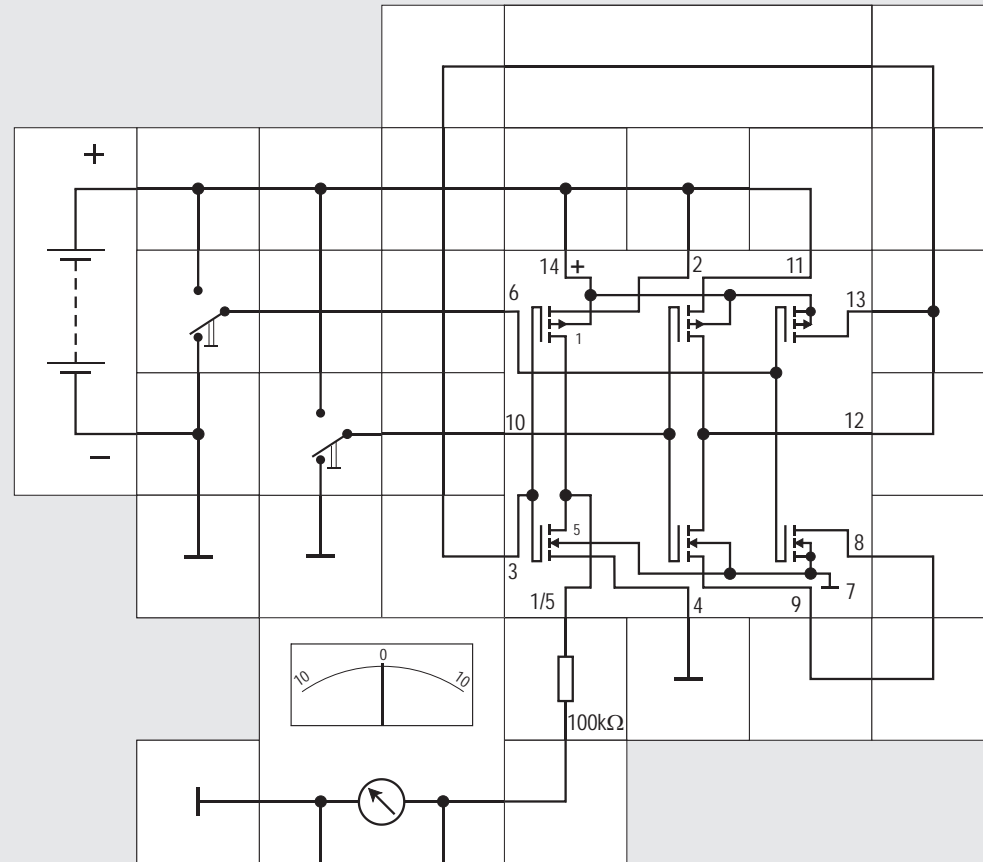
Wir wollen uns nun überlegen, wie man auf Basis des CMOS Inverters logische Verknüpfungen verwirklichen kann, so wie wir es anfangs mit Schaltern und dann mit Dioden und Transistoren bewerkstelligt haben. Wenn wir diese Aufgabe mit Invertern lösen wollen, ist es naheliegend, zunächst zu versuchen, eine Verknüpfungsfunktion mit Negierung z.B. die NAND - Funktion, zu konstruieren. Für zwei Eingangssignale, E1 und E2, werden wir wenigstens zwei Inverter benötigen, aber wie müssen sie geschaltet werden?

Die NAND - Funktion zeichnet sich dadurch aus, dass sie nur dann tiefes Ausgangspotential  $U_L$  liefert, wenn beide Eingangssignale hohes Potential  $U_H$  führen. Für die Anordnung der n - Kanal MOSFETs, die das tiefe Potential an den Ausgang legen,

bedeutet dies, dass der Ausgang des Verknüpfungsbausteins über zwei in Reihe geschaltete Transistoren mit Masse verbunden werden sollte. Andererseits liefert die NAND - Funktion immer dann hohes Ausgangspotential  $U_H$ , wenn wenigstens eins der Eingangssignale tiefes Potential  $U_L$  führt. Dieses Verhalten erreicht man, wenn der Ausgang über zwei parallel geschaltete p - Kanal MOSFETs mit  $V_{DD}$  verbunden wird. Und dies ist tatsächlich schon die Struktur einer NAND - Verknüpfung mit zwei Eingängen. Sie tut genau das, was wir von ihr wollen, ohne dass bei allen möglichen Eingangssignalkombinationen ein störender Querstrom fließt.

Das Lectron Transistor Array gestattet den Aufbau der eben gefundenen Struktur. Da die Verdrahtung mit den Verbindungsbausteinen etwas unübersichtlich aussieht, ist noch eine Übersicht mit den Stiftnummern angegeben. E1 (Stift 10) und E2 (Stift 6) sind die beiden Eingänge, Stift 3 als dritter Gateanschluss des Arrays wird potentialmäßig festgelegt, damit sich das Gate nichts einfängt. Mit den beiden Schaltern kann sowohl hohes als auch tiefes Potential an beide Eingänge gelegt werden, das Messinstrument dient zur Anzeige des Ausgangspotentials. Nur wenn beide Eingänge mit Versorgungspotential verbunden sind, zeigt es 0V an; dies ist genau das Verhalten einer NAND -Verknüpfung.

30



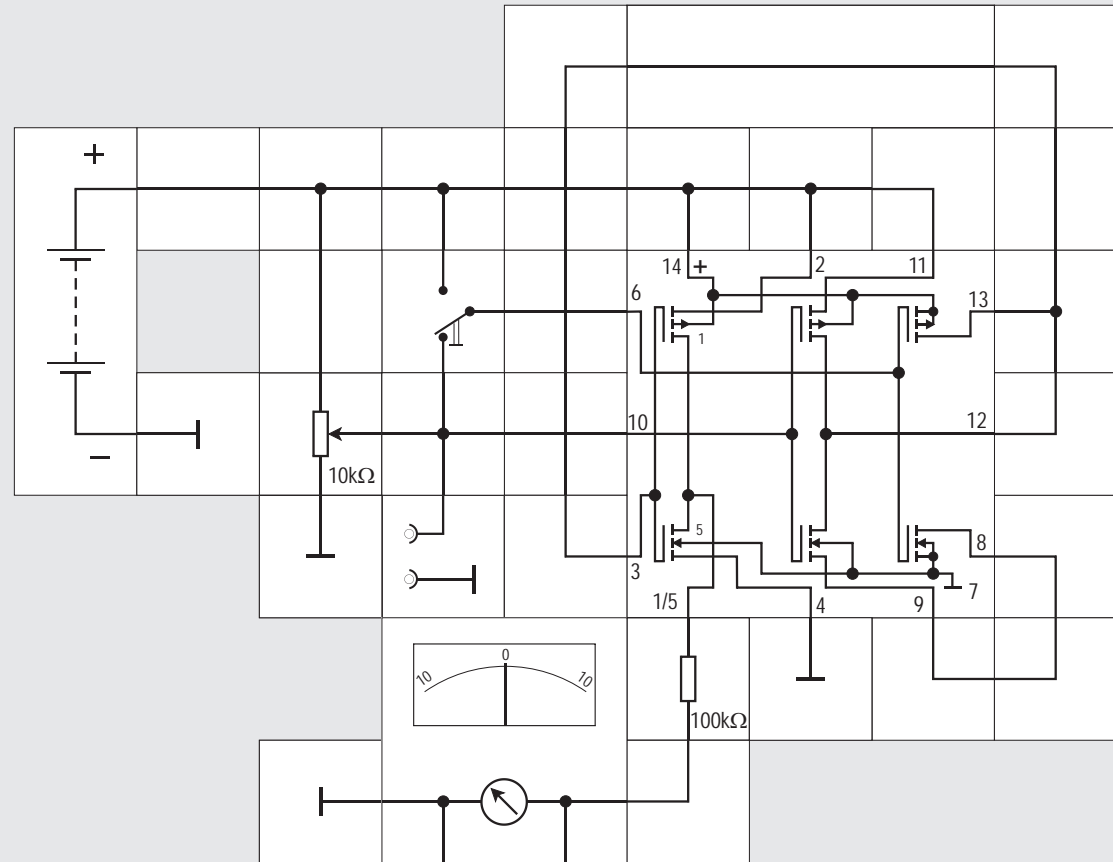
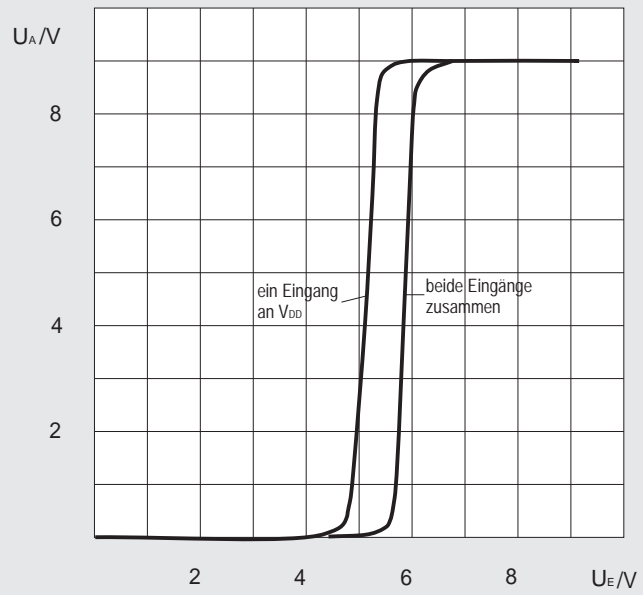


## Versuch 30

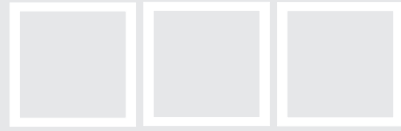
### Die AND - Verknüpfung

Nachdem es uns gelungen ist, mit dem Lectron Array eine NAND - Verknüpfung zusammenzubauen, können wir mit einer nachgeschalteten Invertierung leicht eine AND - Verknüpfung erzeugen. Dazu wird der Ausgang (Stifte 12 und 13) mit dem Eingang (Stift 3) des bisher nicht genutzten Inverters verbunden. An seinem Ausgang (Stift 1/5) steht die AND - Verknüpfung der beiden Schalter - Eingangssignale zur Verfügung; sie wird mit dem Messinstrument angezeigt.

31



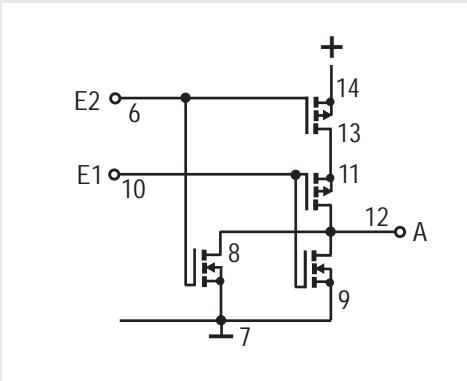
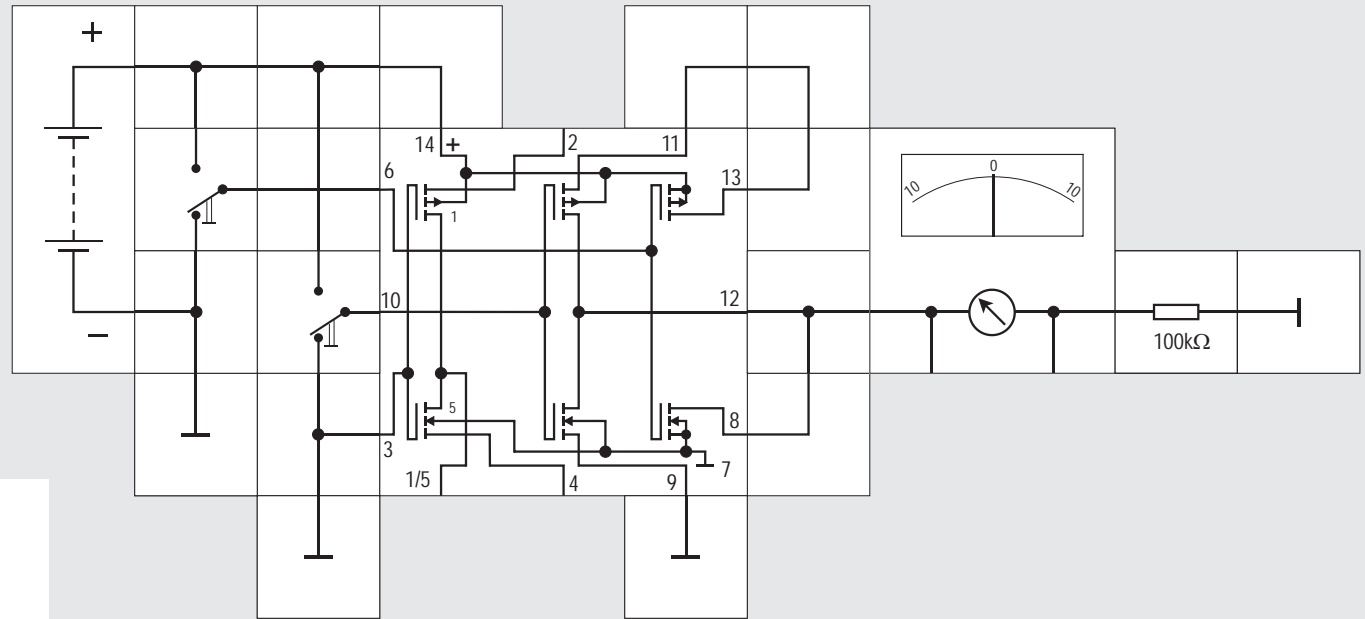




## Versuch 31 Übertragungskennlinien eines AND/NAND - Bausteins

Nachdem man die Schaltung aufgebaut und die Verdrahtung überprüft hat, wird bei 9 V Versorgungsspannung die Übertragungskennlinie der AND - Verknüpfung wieder aufgenommen, und zwar einmal mit zusammen geschalteten Eingängen und dann mit einem Eingang fest an  $V_{DD}$  und nur der zweite mit einer variablen Eingangsspannung. Wir sehen, dass die Kennlinien wieder sehr steil im Umschalt-

bereich sind, was der nachgeschaltete Inverter bewirkt; wir erkennen aber auch, dass es zwei verschiedene Umschaltkennlinien gibt: Wenn ein Eingang fest an  $V_{DD}$  liegt, schaltet das Verknüpfungsglied bei niedrigerer Eingangsspannung des anderen Eingangs (mit variablem Potential) als wenn beide Eingänge zusammen geschaltet sind. Außerdem liegen beide Kennlinien oberhalb des halben Versorgungspotentials  $V_{DD}/2$ . Dies ist darauf zurückzuführen, dass wir im Umschaltbereich der NAND - Verknüpfung einen Spannungsteiler gebildet aus je zwei p - und n - Kanal MOSFETs haben, wobei die n - Kanal MOSFETs in Reihe, die p - Kanal MOSFETs jedoch parallel liegen. Der Widerstand vom Ausgang zu  $V_{SS}$  (Masse) ist sehr viel größer als der Widerstand vom Ausgang zu  $V_{DD}$ . Diese Erscheinung führt dazu, dass sich bei NAND - Verknüpfungen mit drei, vier oder noch mehr Eingängen die Kennlinie immer weiter verschiebt: In der Praxis baut man deswegen nur Verknüpfungen mit maximal vier Eingängen; müssen noch mehr Eingangssignale berücksichtigt werden, arbeitet man mit Zwischenverknüpfungen und mehreren Stufen. Wir werden in späteren Versuchen aber auch noch eine Schaltung, nämlich den Schmitt-Trigger, kennen lernen, bei der wir die unterschiedlichen Schaltschwellen vorteilhaft ausnutzen können.

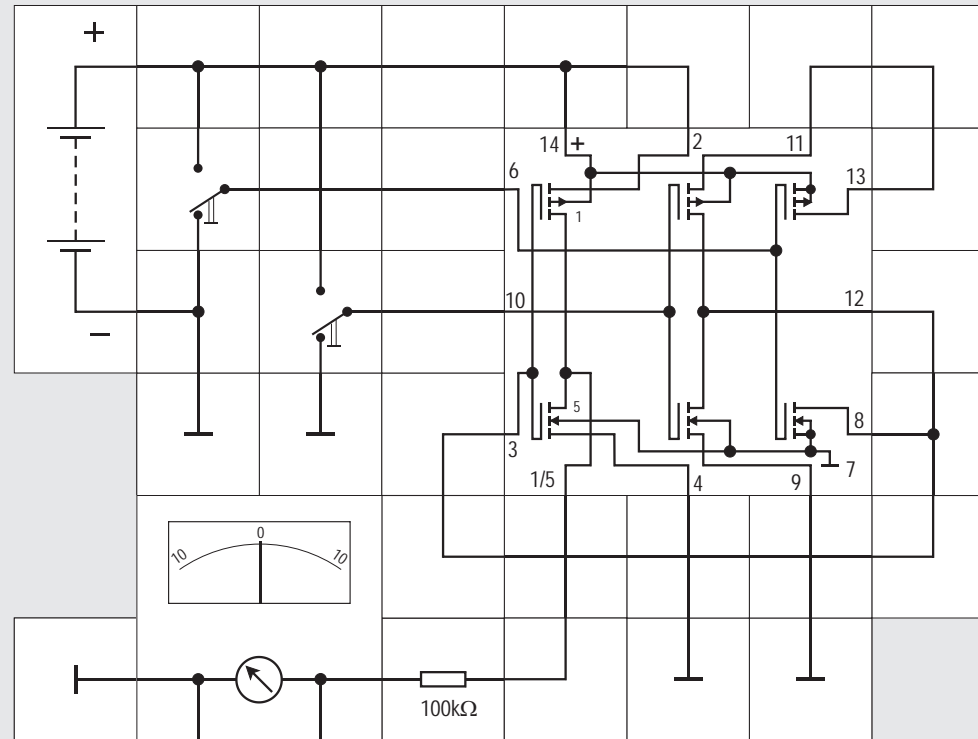




## Versuch 32

### Die NOR - Verknüpfung

Zum Aufbau einer NOR - Verknüpfung aus der Basisstruktur »Inverter« gehen wir mit entsprechenden Überlegungen wie bei der Konstruktion der NAND - Verknüpfung vor: Die NOR - Funktion liefert nur dann »1« Ausgangspotential  $U_H$ , wenn beide Eingangssignale »0« Potential  $U_L$  führen. Für uns bedeutet das eine Serienschaltung der p - Kanal MOSFETs von  $V_{DD}$  zum Ausgang. Führt dagegen mindestens ein Eingang »1« Potential  $U_H$ , gibt der Ausgang bereits »0« Potential  $U_L$  ab: Die n - Kanal MOSFETs müssen vom Ausgang zu  $V_{SS}$  (Masse) parallel geschaltet werden. Die Struktur eines NOR - Verknüpfungsbausteins ist fertig und wir wollen ihn mit dem Transistor Array aufbauen. Auch hier ist wieder eine zusätzliche Übersichtsschaltung mit den Stiftbezeichnungen angegeben.



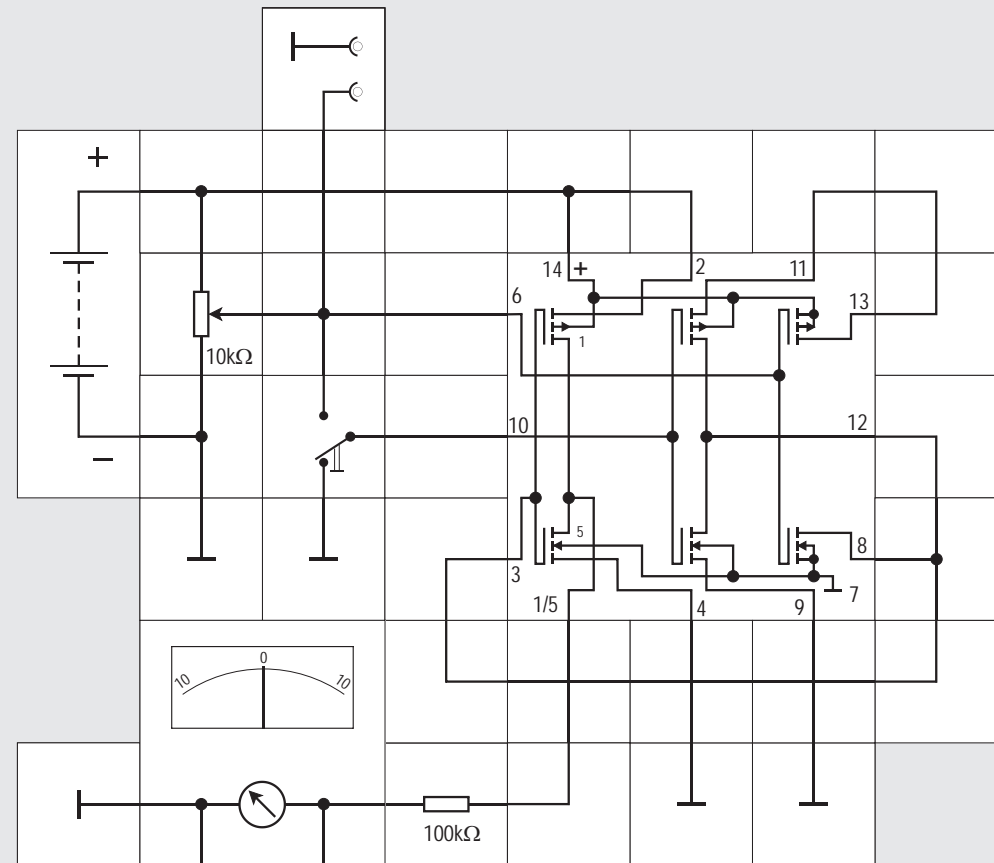
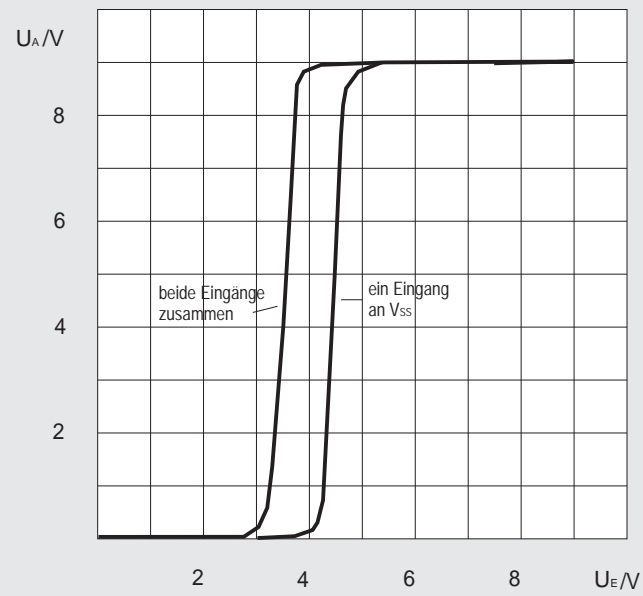


## Versuch 33

### Die OR - Verknüpfung

Wenn wir der NOR - Verknüpfung den bisher stillgelegten Inverter (Eingang Stift 3, Ausgang Stift 1/5) nachschalten, erhalten wir die zweistufige OR - Verknüpfung. Bereits ein »1« Potential  $U_H$  an einem Eingang reicht aus, das Messinstrument ausschlagen zu lassen. Das ist die bekannte OR - Funktion.

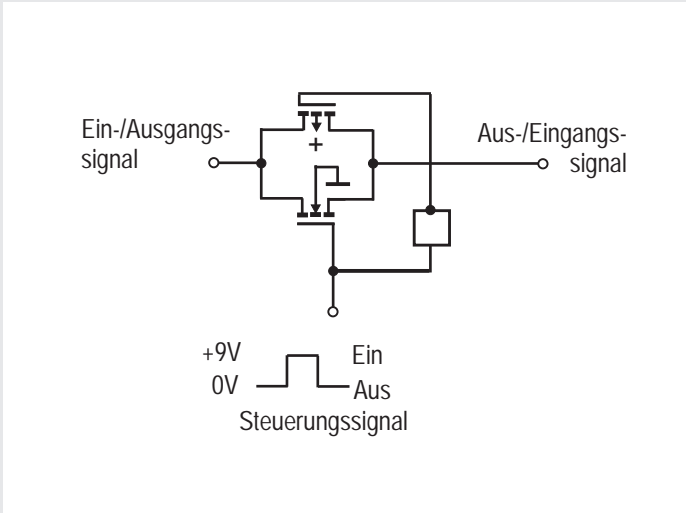
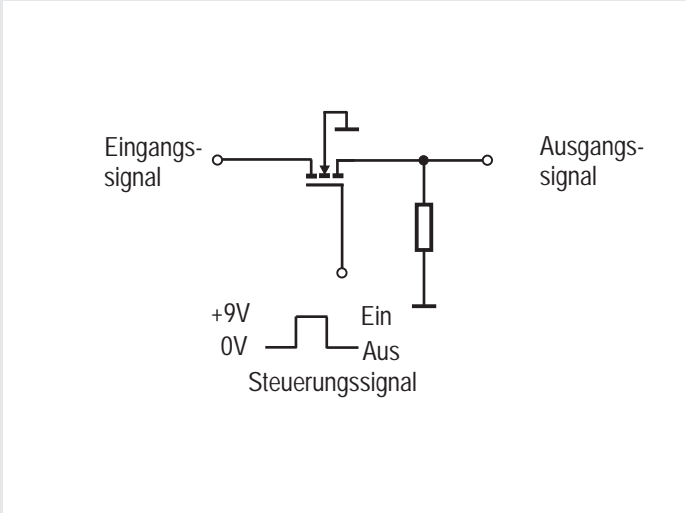
34



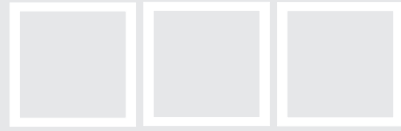


## Versuch 34 Übertragungskennlinien eines OR/NOR - Bausteins

Auch bei dieser Verknüpfung nehmen wir wieder die Übertragungskennlinien auf. Dieses Mal wird ein Eingang entweder fest mit  $V_{SS}$  (Masse) oder mit dem anderen Eingang verbunden. Nach den Erkenntnissen aus Versuch 30 sind wir nicht überrascht, zwei verschiedene Umschaltkennlinien zu erhalten, und zwar jetzt zu niedrigeren Eingangsspannungen hin verschoben, was wiederum aus der Unsymmetrie des Spannungsteilers von parallel geschalteten n - Kanal MOSFETs und in Serie geschalteten p - Kanal MOSFETs herrührt.







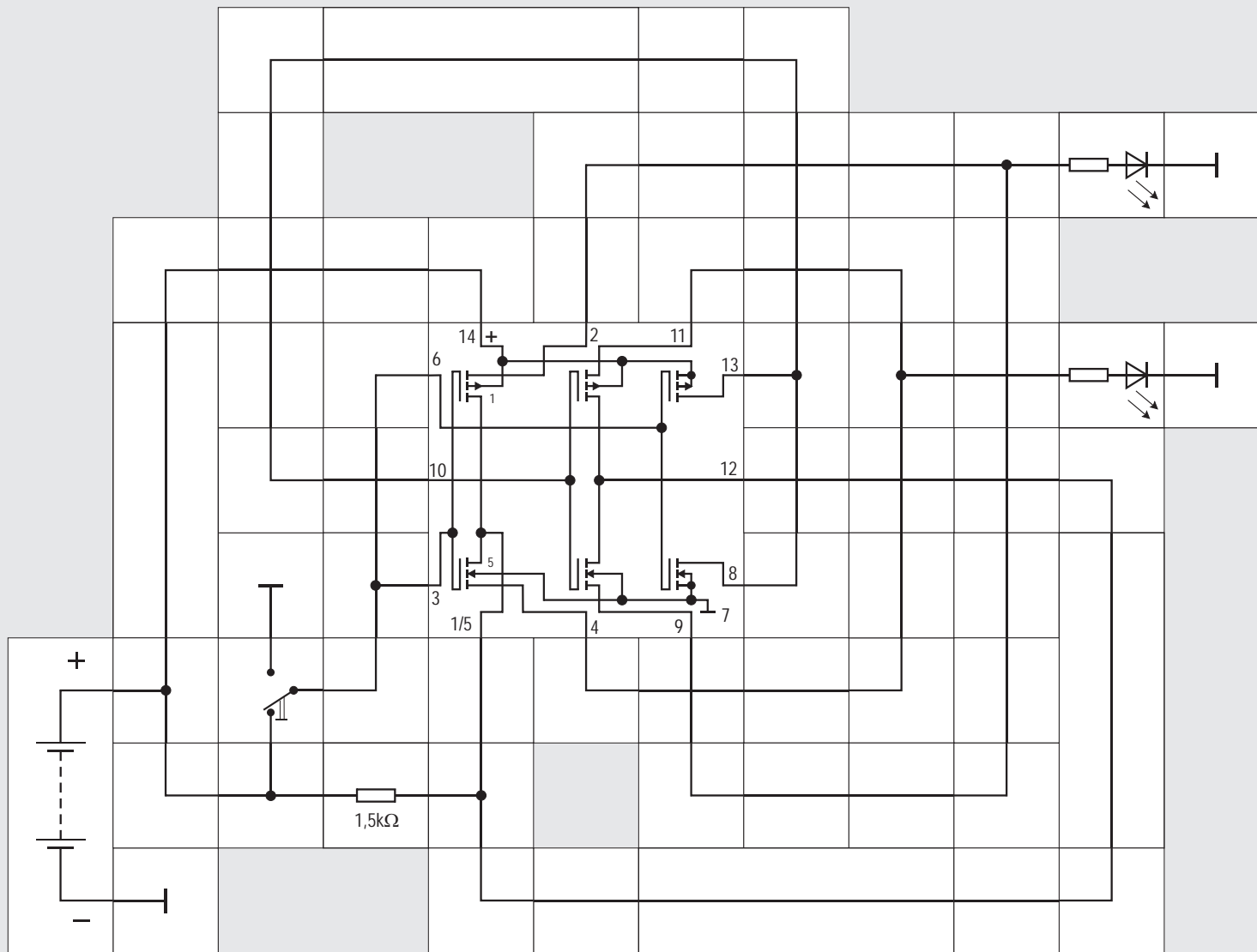
## MOSFET - Analogschalter

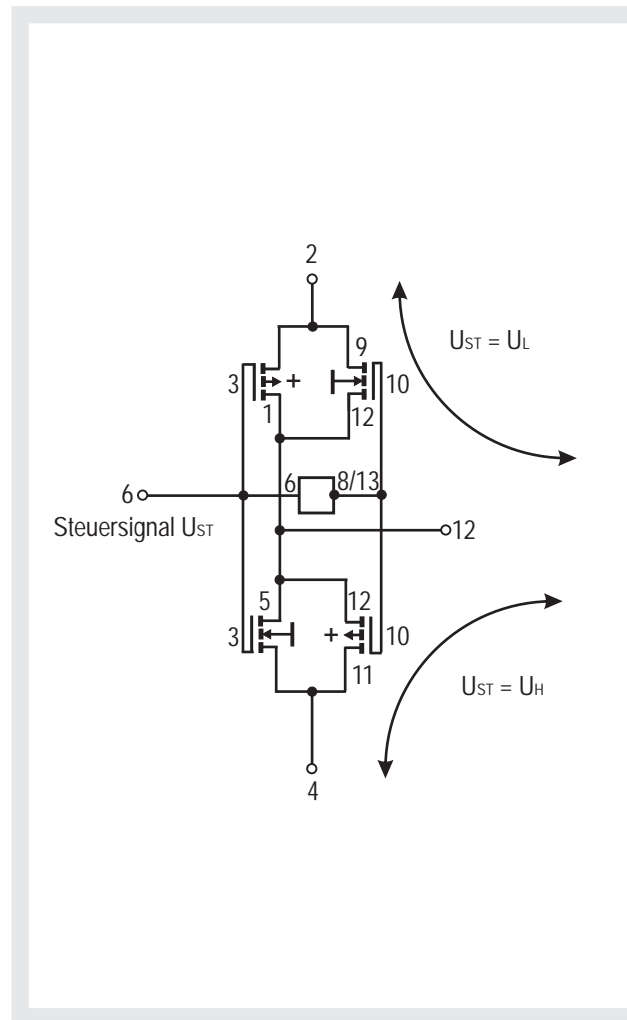
Mit MOSFETs lassen sich sehr gut Analogschalter aufbauen. Diese elektronischen Schalter besitzen einen niedrigen EIN - Widerstand und einen extrem hohen AUS-Widerstand; kombiniert mit sehr geringen Leckströmen und niedrigen Kapazitäten sind sie ideale spannungsgesteuerte Schaltelemente für Analogsignale. Sie verhalten sich wie ein perfekter mechanischer Schalter: Im EIN - Zustand leiten sie ein Signal ohne Abschwächung oder Verzerrung in beiden Richtungen, im AUS-Zustand verhalten sie sich wie ein offener Kreis, wobei die kapazitive Verkopplung zu Masse oder dem Steuersignal vernachlässigbar ist.

Um die Funktion des Analogschalters zu verstehen, betrachten wir zunächst die einfache Schaltung mit einem n - Kanal MOSFET. Wenn das Gate Massepotential hat oder gar negativ ist, leitet der Transistor nicht und der Drain - Source - Widerstand ( $R_{OFF}$ ) liegt typisch bei 10 G $\Omega$ . Legt man jedoch an

das Gate Versorgungsspannungspotential von 9 V, so bildet sich ein gut leitender Drain - Source - Kanal mit einem Widerstand ( $R_{ON}$ ) zwischen 25 und 100 Ohm aus. Der Gate - Signal - Pegel ist nicht kritisch, solange er nur hinreichend höher ist als das höchste Potential des zu übertragenden Signals. Kommt dieses Potential jedoch in die Nähe der Versorgungsspannung, so wird der Kanal immer hochohmiger und sperrt schließlich, ein Verhalten, das natürlich für einen Schalter unerwünscht ist. Abhilfe schafft hier der Einsatz eines parallel geschalteten p - Kanal MOSFETs, dessen Gate mit einem Steuersignal entgegengesetzter Polarität angesteuert werden muss. Um dieses invertierte Steuersignal zu erhalten, benötigt man einen Inverter, so dass letztlich die abgebildete Konfiguration entsteht. Hat das Steuersignal hohes Potential  $U_H$ , so ist die Anordnung leitend, wobei je nach Potential des zu schaltenden Signals der n - oder der p - Kanal den Hauptteil des Stromes übernimmt. Bei  $U_L$  - Potential sperrt die Anordnung. Dieser Analogschalter wird auch TRANSMISSION - GATE genannt; mit bipolaren Transistoren lässt sich nichts Entsprechendes so einfach aufbauen. Er ist, wie beschrieben, in der Lage, Signale, die potentialmäßig zwischen Masse und Versorgungsspannung liegen, ohne mechanische Teile zu schalten.

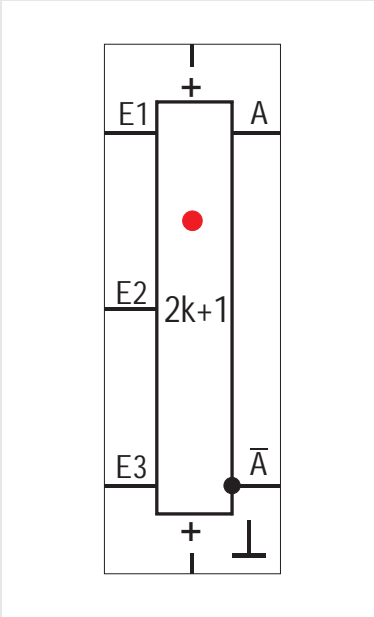
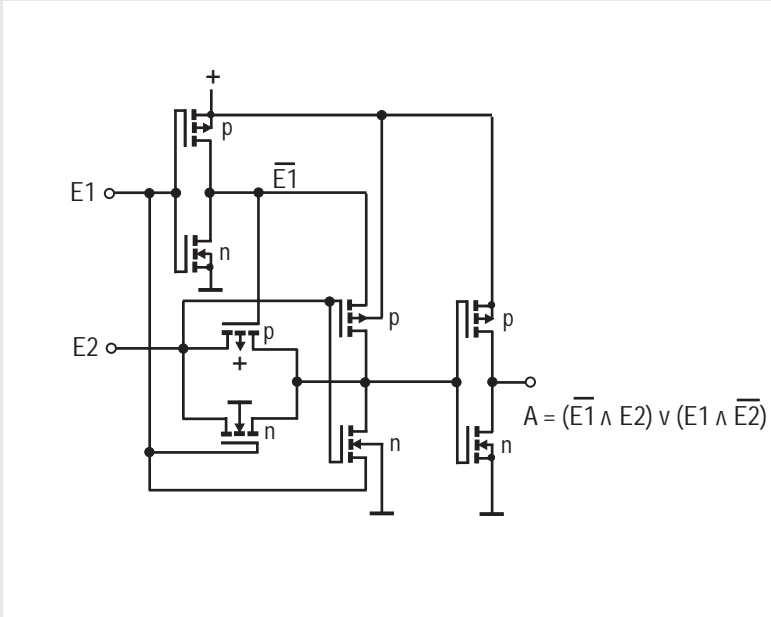
35





## Versuch 35 Transmission Gate

Mit Hilfe des Lectron Transistor Arrays ist es möglich, gleich zwei solcher Schalter, die zu einem Umschalter zusammen geschaltet sind, aufzubauen. Ein Transistorpaar wird für die Invertierung des Steuersignals benötigt, die restlichen beiden Paare für die eigentlichen Schalter. Da die Verdrahtung des Arrays etwas unübersichtlich ist, soll die zusätzliche Zeichnung die Funktion verdeutlichen: Bei  $U_H$  - Potential des Steuersignals ist der Weg von Stift 12 nach Stift 2 BIDIREKTIONAL durchgeschaltet, bei  $U_L$  - Potential der Weg von Stift 12 nach Stift 4, wie man mit den Leuchtdioden leicht zeigen kann, wenn man 9 V an Stift 12 legt. Der 1,5 k $\Omega$  Widerstand dient zur zusätzlichen Strombegrenzung. Ersetzt man den Umschalter durch das 10 k $\Omega$  Potentiometer und dreht vorsichtig am Stellknopf, so stellt man fest, dass unser aus Transmission - Gates aufgebauter elektronischer Umschalter »überlappend« schaltet.





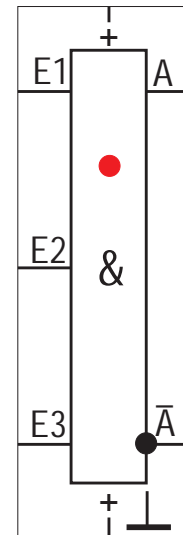
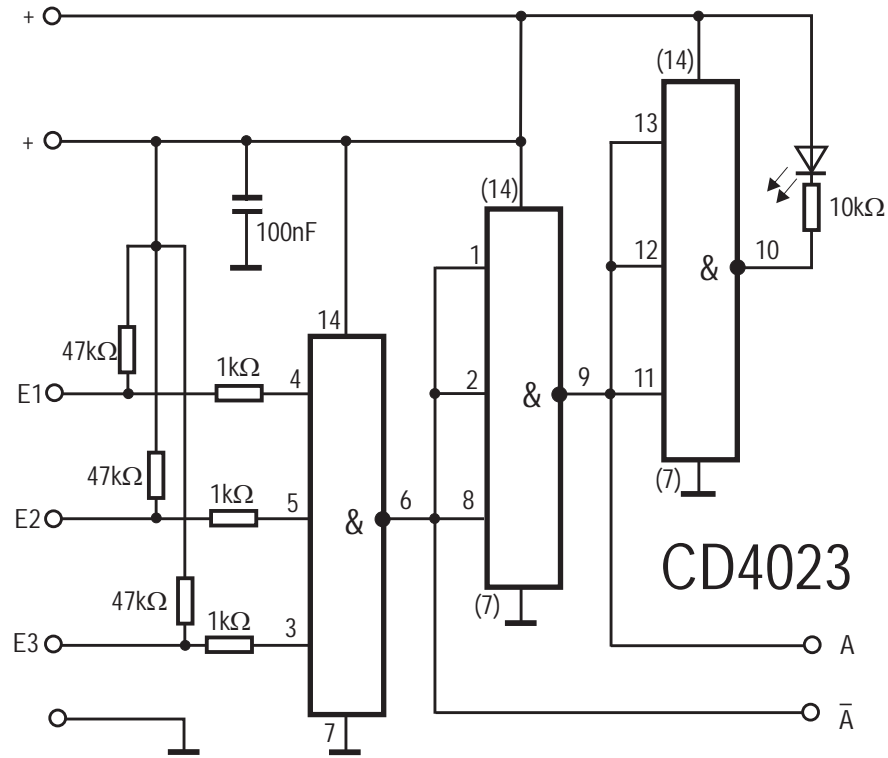
## Die EXOR - Verknüpfung

Im Zusammenhang mit dem Transmission - Gate ist interessant zu sehen, wie eine EXOR - Verknüpfung damit realisiert werden kann. Die Verknüpfung mit den beiden Eingängen E1 und E2 hat die angegebene Form  $A = (\overline{E1} \wedge E2) \vee (E1 \wedge \overline{E2})$ . Die beiden Eingangssignale werden unterschiedlich behandelt: Der obere Inverter bildet ständig  $\overline{E1}$ ; dieses Signal und E1 selbst werden als Steuersignale für das unterhalb des Inverters liegende Transmission - Gate

verwendet. Das Gate ist nur dann für E2 durchlässig, wenn  $E1 = U_H$  ist. E2 wird dann im letzten Inverter invertiert und somit aus der Gleichung der zweite Term  $E1 \wedge \overline{E2}$  gebildet. Der vorletzte Inverter ist undurchlässig, da er wegen der Polarität von E1 keine Versorgungsspannung bekommt. Das ändert sich ins Gegenteil, wenn  $E1 = U_L$  ist; dann sperrt das Transmission - Gate und dieser Inverter wird durchlässig. Damit gelangt E2 zweimal invertiert zum Ausgang, womit der erste Term  $\overline{E1} \wedge E2$  nachgebildet wird.

Wir wollen diese Schaltung allerdings nicht mit den Bausteinen aufbauen, da wir im letzten Versuch bereits gesehen haben, wie eine relativ einfache Schaltung, mit dem Array aufgebaut, schnell unübersichtlich wird. Für die weiteren Versuche greifen wir auf die im Baukasten befindlichen Funktionsbausteine zurück, auf die wir im folgenden näher eingehen wollen.

In einem zukünftigen Ausbaukasten zu »Digitaltechnik« wird ein EXOR / EXNOR - Funktionsbaustein mit drei Eingängen enthalten sein. Der Ausgangs A gibt immer dann hohes Potential  $U_H$  ab, wenn eine ungerade Anzahl von Eingängen (1 oder 3) ebenfalls diese Potential führt. Der Baustein kann bereits jetzt als Zukaufteil (Bestell-Nr.2465 ) von Lectron bezogen werden.





komplizierterer Schaltungen. Damit diese nicht zu umfangreich werden, enthält der Experimentierbaukasten 4 Funktionsbausteine (mit den drei Eingängen E1, E2 und E3), die entsprechend aufgebaut sind, wie wir uns das in den Versuchen 29 und 30 überlegt haben. In dem Kunststoffkästchen, das die Größe von drei normalen Bausteinen hat, befindet sich eine integrierte Schaltung (CD4023), welche drei NAND - Verknüpfungen mit jeweils drei Eingängen enthält. Die erste wird als NAND - Verknüpfung verwendet, die zweite invertiert das Ergebnis, so dass wir zusätzlich eine AND - Verknüpfung zur Verfügung haben und die dritte dient zur Ansteuerung der roten Leuchtdiode. Die Diode leuchtet immer dann, wenn  $A = »1« (U_{\mu})$  ist.

Das Versorgungspotential ist mit + gekennzeichnet und muss mit der Batterie verbunden werden; es ist sowohl an der oberen als auch an der unteren Schmalseite des Bausteins vorhanden; die beiden Anschlüsse sind miteinander verbunden, was für einige Versuchsaufbauten vorteilhaft ist. Die Masseverbindung wird über den Bodenkontakt hergestellt.

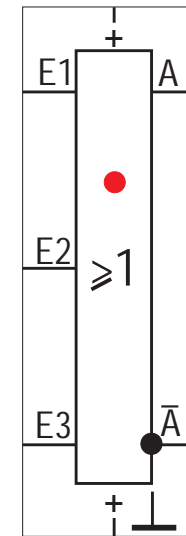
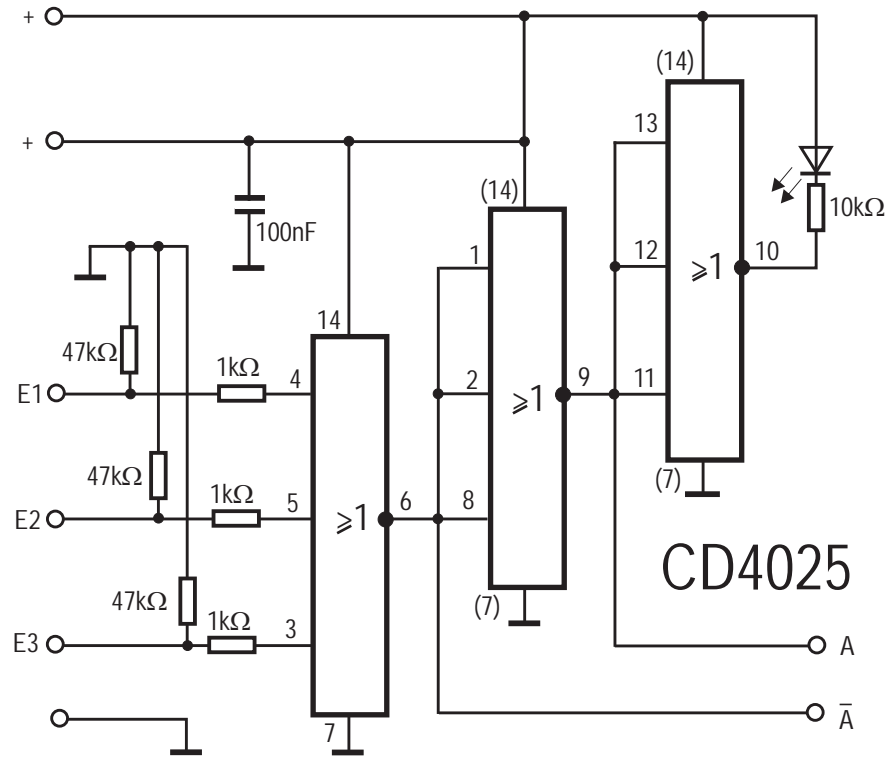
Damit wir unbenutzte Eingänge nicht extra mit zusätzlichen Bausteinen beschalten müssen, sind die Eingänge über jeweils  $47\text{ k}\Omega$  Widerstände mit + ( $V_{DD}$ ) verbunden. Ferner sind die Eingänge der inte-

grierten Schaltung nicht direkt, sondern über  $1\text{ k}\Omega$  Schutz - Widerstände mit den Kontaktplättchen des Bausteins verbunden; dies hat folgende Bedeutung: In dem Kapitel über Schutzmaßnahmen wurde bereits darauf hingewiesen, dass die integrierten CMOS - Schaltungen zum Schutz des Gates vor Durchschlag Dioden von  $V_{SS}$  zum Gate und vom Gate zu  $V_{DD}$  besitzen, die gesperrt sind, da die zu verarbeitenden Signale normalerweise  $V_{DD}$  nicht übersteigen und  $V_{SS}$  nicht unterschreiten. Nun kann es in ungünstigen Fällen jedoch vorkommen, dass die Signale von extern zugeführt werden und sie schon vorhanden sind, aber die Versorgungsspannung noch nicht. Dann werden die Schutzdioden leitend und können leider, wenn der Strom zu groß wird ( $>20 - 200\text{ mA}$ ), eine parasitäre Vierschichtstruktur (Thyristor) zum Zünden bringen und den Baustein zerstören. Die Schutzwiderstände sollen diesen sogenannten LATCH - UP - Effekt verhindern, indem sie den Strom auf unkritische Werte begrenzen.

Die Leuchtdiode schließlich ist ein low - current Typ, sie wird mit circa  $700\mu\text{A}$  betrieben, wenn der Ausgang A auf hohem Potential liegt. Ein Blockkondensator von  $100\text{ nF}$  zwischen  $V_{DD}$  und  $V_{SS}$  stützt die Versorgungsspannung bei Schaltvorgängen. Der komplette Stromlaufplan ist angegeben.

## Der AND/NAND - Funktionsbaustein

In den weiteren Versuchen benötigen wir häufig AND - und NAND - Verknüpfungen zum Aufbau



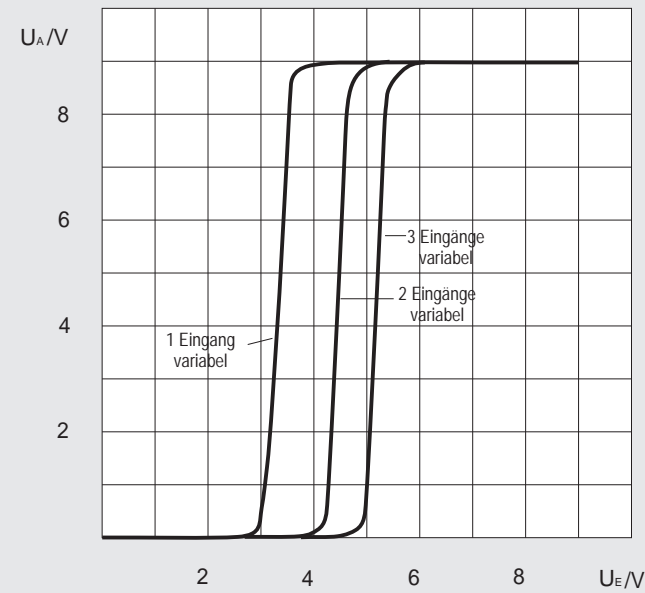
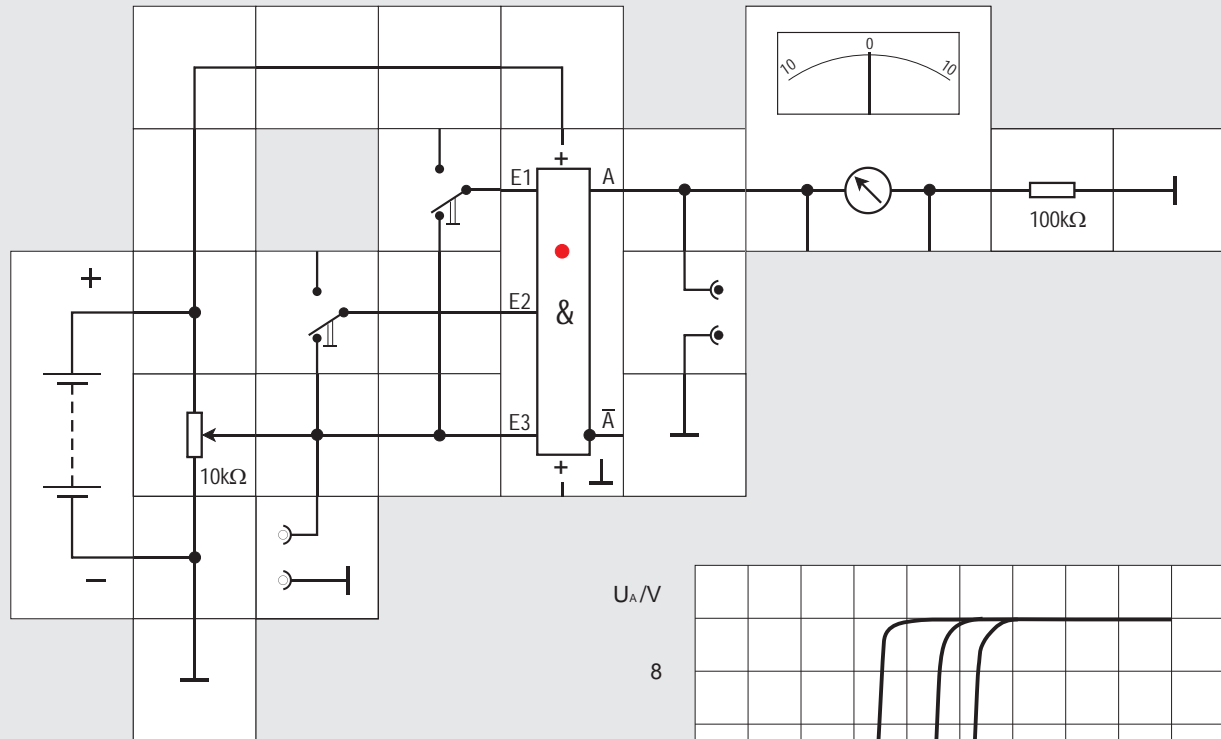




# Lectron

## Der OR/NOR - Funktionsbaustein

Neben dem AND/NAND - Baustein finden wir im Lectron Experimentierbaukasten noch einen weiteren Verknüpfungsbaustein. Dieser enthält die schon bekannte OR/NOR - Funktion. Er ist prinzipiell genauso aufgebaut wie der AND/NAND -Baustein, es sind lediglich die  $47\text{ k}\Omega$  Widerstände an Masse statt Versorgungspotential gelegt, da  $U_L$  bei einem OR/NOR das inaktive Potential ist. Die Innenschaltung des Bausteins und die Bedruckung der Deckplatte sind ebenfalls angegeben.

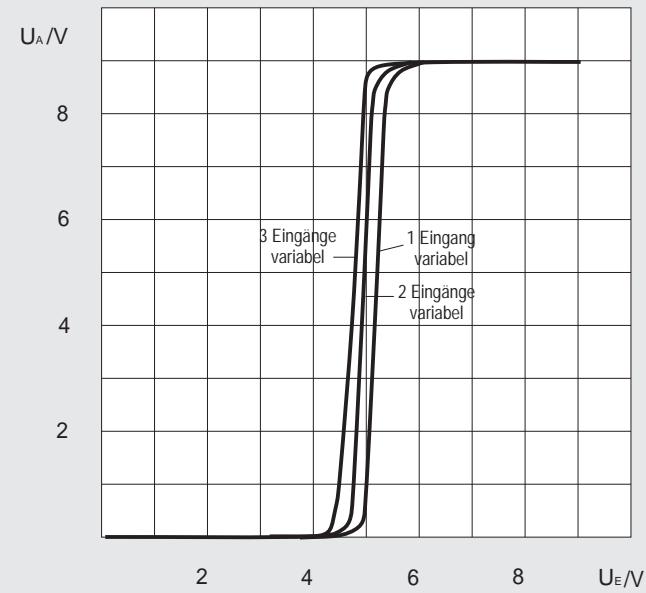
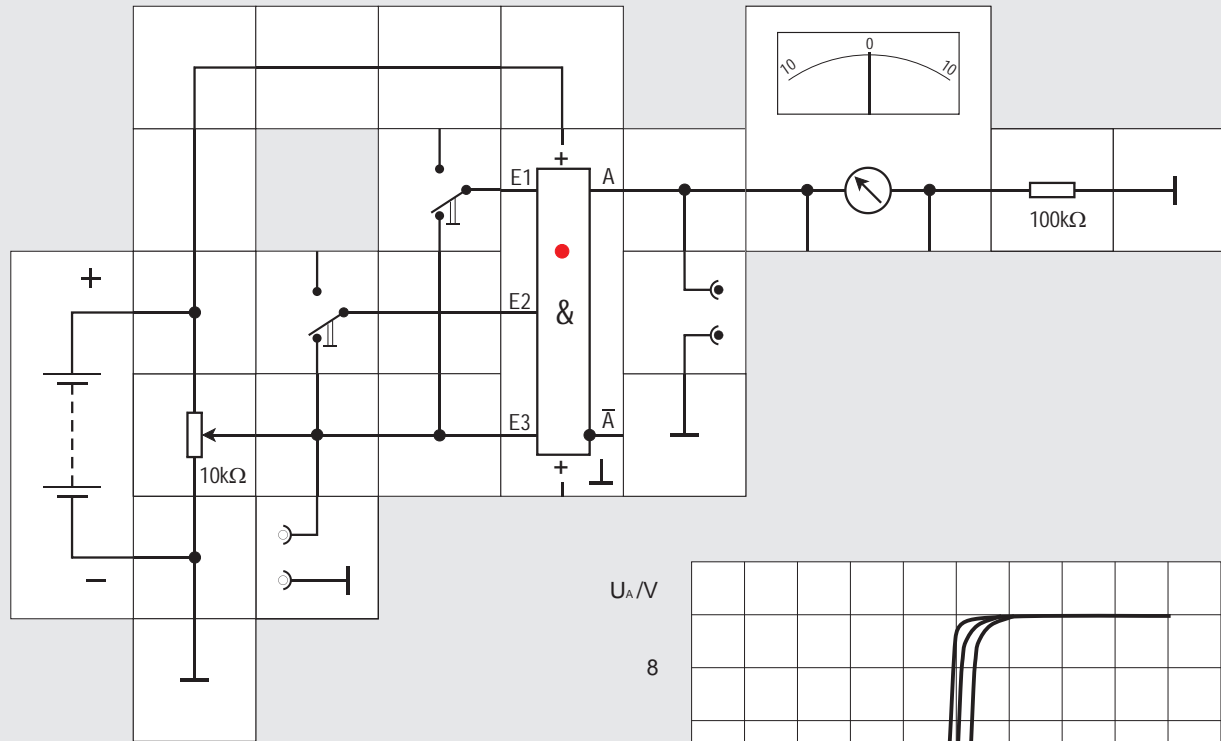




## Versuch 36

### Umschaltkennlinien des AND/NAND - Funktionsbausteins

Wir legen zunächst nur Versorgungsspannung an den Baustein; wenn er in Ordnung ist, muss die Leuchtdiode aufleuchten, da die unbeschalteten Eingänge E1 bis E3 intern hochohmig mit Versorgungsspannung verbunden sind. Nach Aufbau der Schaltung stellen wir die Umschaltpunkte der Kennlinien bei den drei verschiedenen Eingangsbedingungen (1 Eingang variabel, 2 Eingänge variabel, 3 Eingänge variabel) schon am Aufleuchten der Diode fest. Das Messinstrument am Ausgang ist eigentlich nicht mehr erforderlich; dagegen sollte man die Eingangsspannung besser mit einem Digitalmultimeter messen, da es doch erheblich genauer als das Lectron Instrument ist. Wie wir es erwarten, unterscheiden sich die drei Umschaltkennlinien etwas voneinander. Es ist jedoch zu erkennen, dass es der Halbleiterhersteller durch die Transistorgeometrie erreicht hat, dem Baustein eine Umschaltkennlinie zu geben, die auf der Hälfte der Versorgungsspannung liegt und deren Streuung kleiner ist als die unseres Eigenbau - NANDs.



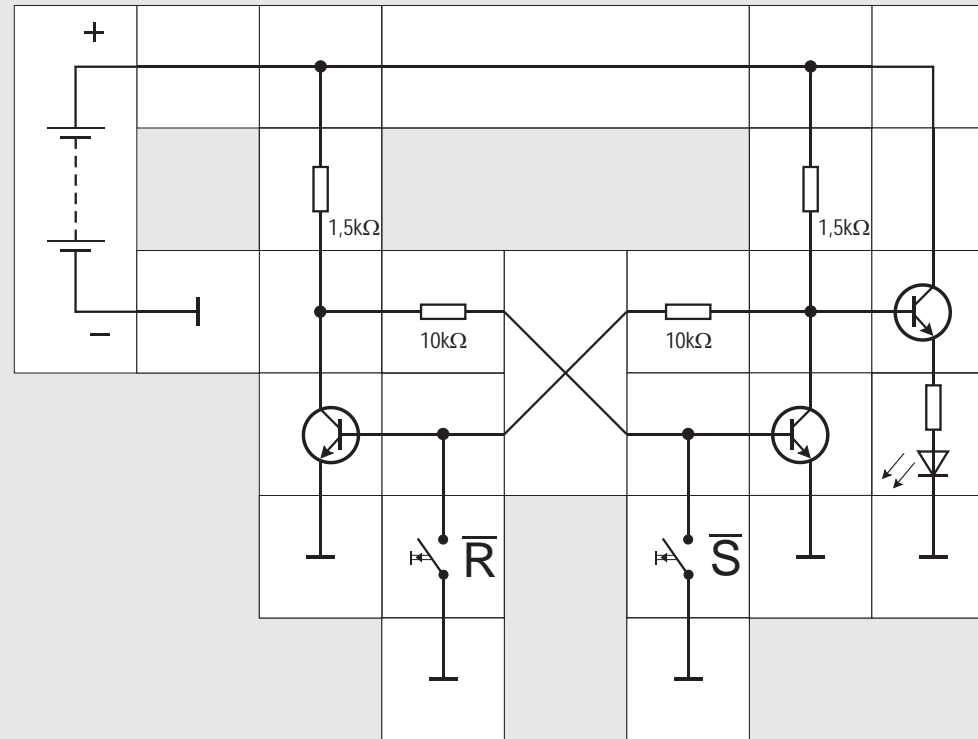


## Versuch 37

### Umschaltkennlinien des OR/NOR - Funktionsbausteins

Bevor wir in der Schaltung den AND/NAND - Baustein durch den OR/NOR - Baustein ersetzen, legen wir letzteren nur erst einmal an die Versorgungsspannung. Die Leuchtdiode darf nicht aufleuchten, da die drei Eingänge intern hochohmig mit Masse verbunden sind und somit der A - Ausgang  $U_L$  - Potential führen muss, wenn der Baustein in Ordnung ist. Die Aufnahme der Umschaltkennlinien führen wir in gewohnter Weise durch; das Ergebnis ist abgebildet.

Wir sind nun in der Lage, mit den Funktionsbausteinen jede logische Verknüpfungsfunktion aufzubauen, da sich jede bereits nur aus NOR - oder nur aus NAND - Bausteinen realisieren lässt. Für einfache Invertierungen sind unsere Bausteine auch geeignet. Was uns noch fehlt, sind speichernde Elemente, also Flipflops. Von den Grundbaukästen kennen wir Transistorschaltungen, die diese Aufgabe erfüllen. Wir wollen deswegen im nächsten Versuch eine einfache Speicherzelle aufbauen.

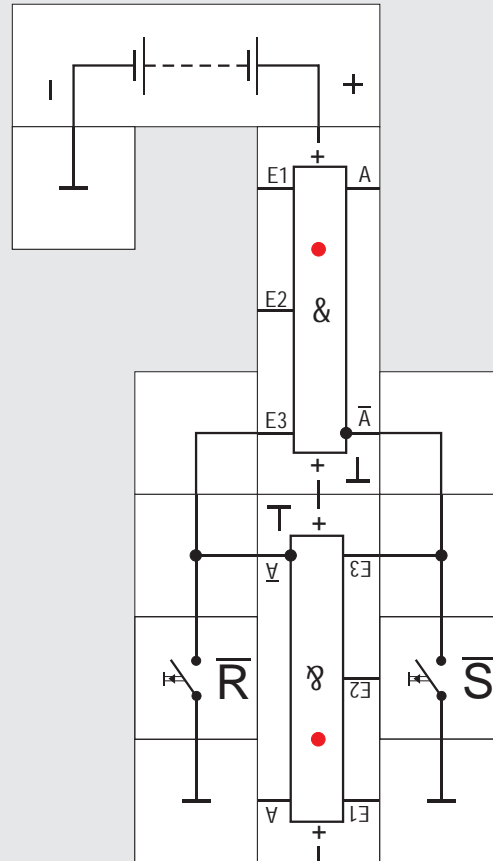




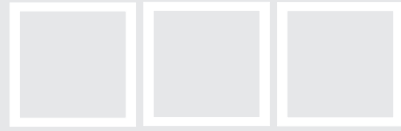
## Versuch 38 Eine einfache Speicherzelle

Die Speicherzelle besteht aus zwei Transistoren in Emitterschaltung, die über Kreuz gekoppelt sind. Der Kollektor des rechten Transistors soll der Ausgang der Speicherzelle sein; das Ausgangssignal (Inhalt der Speicherzelle) wird über einen weiteren Transistor in Kollektorschaltung (siehe Versuch 6) niederohmig zur Verfügung gestellt und mit einer Leuchtdiode angezeigt. Bis auf diese Auskopplung ist die Schaltung symmetrisch aufgebaut. Beim Anlegen der Versorgungsspannung wird ein Transistor

leiten, der andere nicht; welcher das sein wird, hängt von den Toleranzen der Bauteile ab. Der leitende Transistor hat an seinem Kollektor die Restspannung  $U_{CE} = 0,2V$ , welche über den  $10\text{ k}\Omega$  Kopplwiderstand auf die Basis des anderen Transistors gegeben, diesen sperrt. Als Resultat leuchtet die Diode oder sie leuchtet nicht d. h., die Zelle hat entweder eine »1« oder eine »0« zufällig gespeichert. Um definierte Verhältnisse zu schaffen, betätigen wir die rechte Taste, wodurch der rechte Transistor gesperrt wird und die Leuchtdiode aufleuchtet. Leuchtete sie vorher schon, passiert weiter nichts, sie wird nach Tastendruck weiter leuchten. In der Speicherzelle ist nun eine »1« gespeichert, sie ist »gesetzt«. Da wir das durch Betätigen der rechten Taste erreicht haben, heißt diese Taste »Setztaste« (engl. SET); die linke Taste ist entsprechend die »Rücksetztaste« (engl. RESET). Die Kurzbezeichnungen lauten S und R; die Querstriche sind deshalb vorhanden, weil die jeweilige Aktivität mit  $U_L$  - und nicht mit  $U_H$  - Potential ausgelöst wurde. Wir haben uns also ein RS - Flipflop mit Transistoren aufgebaut, bei dem R und S nicht gleichzeitig logisch »1« sein dürfen, da sonst nach Wegnahme der Signale der Inhalt undefiniert ist. Wir werden nun im nächsten Versuch diese Schaltung mit unseren Funktionsbausteinen aufbauen.







# Lectron

suchs wollen wir nun eine Speicherzelle aus Funktionsbausteinen aufbauen. Dazu übersetzen wir einfach die Schaltung: Wir haben Transistoren in Emittererschaltung verwendet, d.h. wir arbeiteten mit invertierenden Verstärkern; weiter benutzten wir  $U_L$ -Potential als auslösendes (dominierendes) Signal und schließlich war jeweils der Ausgang des einen Verstärkers mit dem Eingang des anderen verbunden. So erscheint es nicht abwegig, als invertierende Verstärker NAND - Bausteine über Kreuz zu koppeln und die Eingänge über Tasten gegen Masse zu schalten. Es entsteht die abgebildete Schaltung. Bevor wir Spannung anlegen, sollten wir überlegen, was passieren kann:

Gibt das obere NAND - Glied am A - Ausgang  $U_L$ -Potential aus, wird das untere gezwungen, an seinem Ausgang A  $U_H$ -Potential abzugeben, was wiederum zu  $U_L$ -Potential am oberen A - Ausgang führt. Es ergibt sich also eine stabile Lage. Die gleiche Betrachtung gilt, wenn das untere NAND - Glied  $U_L$ -Potential abgibt. Mit  $U_H$ -Potential am oberen oder unteren Ausgang kommen wir zum selben Resultat. Geben beide Glieder  $U_L$ -Potential ab, könnte die Schaltung schlimmstenfalls schwingen, bis sich aufgrund von Toleranzen ein Baustein mit seinem Ausgangspotential durchsetzt.

Wir legen also Spannung an die Schaltung und sooft wir es auch probieren, es leuchtet immer nur eine Leuchtdiode auf; die Schaltung ist stabil und speichert ein Bit.

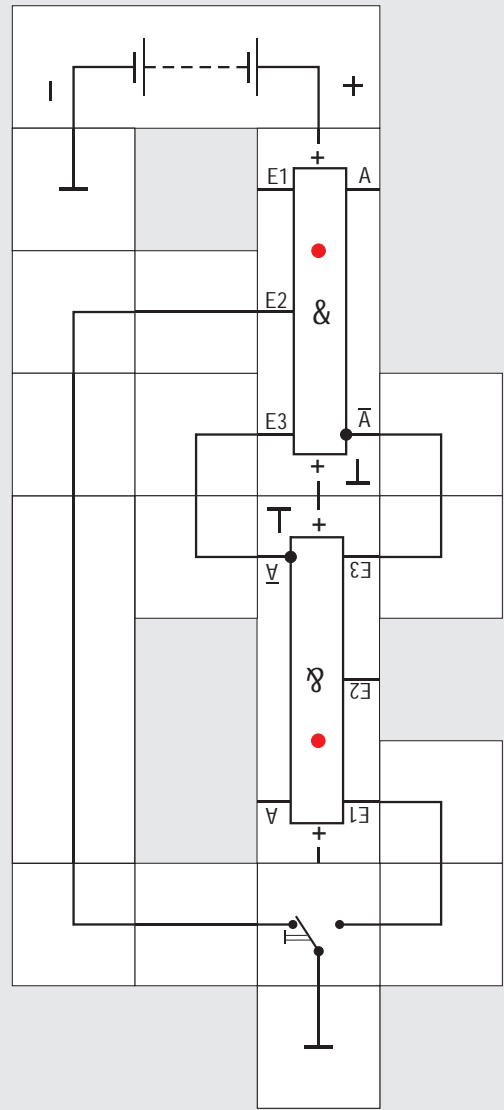
Wir legen fest, dass wenn die obere Leuchtdiode leuchtet, die Speicherzelle gesetzt sein soll. Ihr Ausgang A und ihr Eingang E3 haben dann  $U_H$ -Potential. Bevor wir die linke  $\bar{R}$  - Taste betätigen und so die Speicherzelle zurücksetzen, sollten wir wieder überlegen, was passiert; schließlich verbinden wir mit dem Tastendruck den  $U_H$ -Potential führenden Ausgang A des unteren NAND - Bausteins direkt mit Masse: E3 des oberen Bausteins bekommt beim Betätigen der Taste  $U_L$ -Potential, sein Ausgang A gibt  $U_H$ -Potential ab, was wiederum zu  $U_L$ -Potential am Ausgang A des unteren NAND -Bausteins führt. Dieses Potential geben wir ihm allerdings schon mit der Taste, so dass für zwei Signal - Durchlaufzeiten (ungefähr 100ns) der Ausgang gegen Masse arbeitet. Damit wird der Baustein nicht überlastet und wir können die Taste betätigen. Für die rechte  $\bar{S}$  - Taste gelten die gleichen Überlegungen. Unsere Speicherzelle arbeitet so, wie wir es geplant haben, das Ausgangssignal kann in nicht invertierter Form vom Ausgang A des oberen Bausteins abgenommen werden.

## Versuch 39

### Einfache Speicherzelle aus Funktionsbausteinen

Ausgehend von der Speicherzelle des letzten Ver-

40



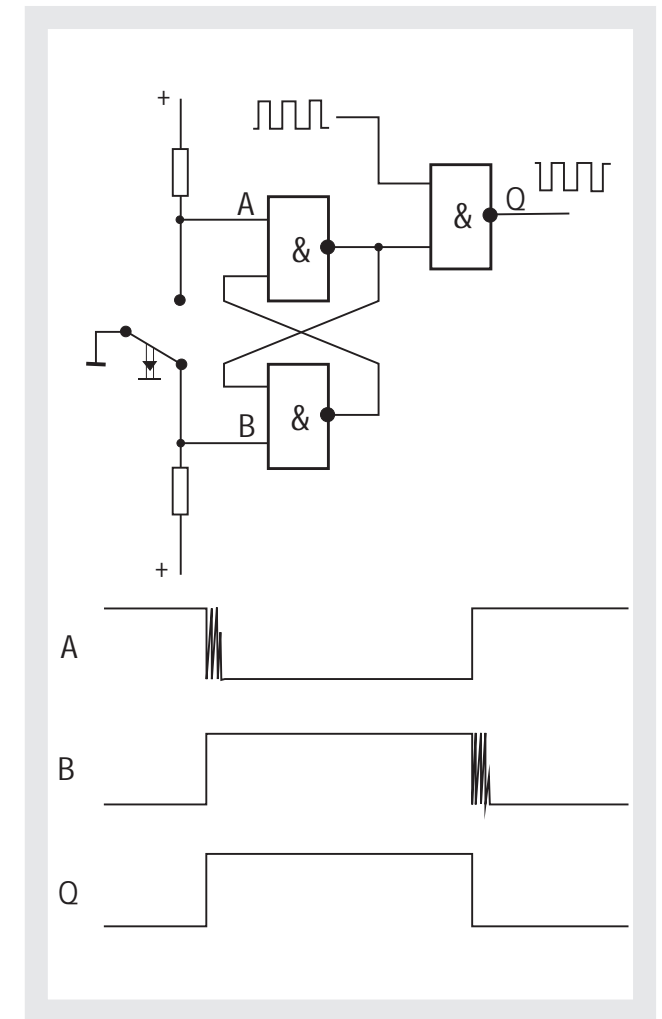


## Versuch 40

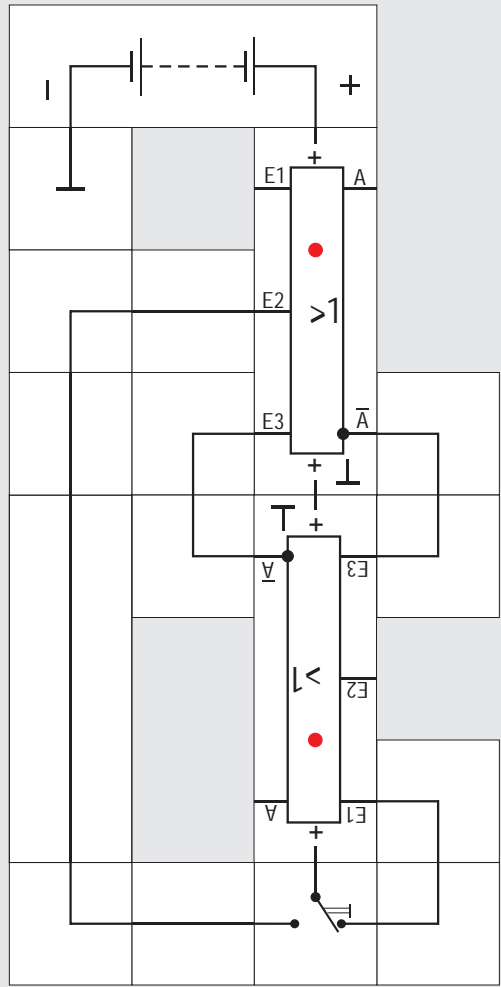
### Speicherzelle aus AND/NAND - Funktionsbausteinen

Als Erweiterung der Speicherzelle aus dem letzten Versuch können wir statt der Inverter auch zwei NAND - Bausteine verwenden. Ihre Ausgänge  $\bar{A}$  werden wieder auf einen Eingang des jeweils anderen Bausteins geführt. Die Taster ersetzen wir durch einen Umschalter, der je nach Stellung  $U_L$  - Potential, also »0«, auf einen der freien Eingänge der beiden NAND - Bausteine legt. Die Ausgänge werden beim Betätigen des Umschalters nicht mehr gegen Masse geschaltet, sondern das Flipflop wird ganz normal über Eingänge gesetzt und rückgesetzt: Schalter links bedeutet das Flipflop ist rückgesetzt (Diode des oberen Bausteins ist dunkel), Schalter rechts:

das Flipflop ist gesetzt, (Diode des oberen Flipflops leuchtet). Diese Art Flipflop hat eine große praktische Bedeutung bei der »Entprellung« mechanischer Schalter: Wenn man einen mechanischen Schalter betätigt, löst sich das schaltende Element von einem Kontakt, bewegt sich auf den anderen Kontakt zu, berührt ihn und prallt wieder zurück (die Verbindung ist wieder geöffnet) schließt erneut und öffnet wieder. Dies kann 10 bis 100 mal in 1 ms passieren und stört normalerweise nicht. Wird aber mit diesem Schalter ein Taktsignal freigegeben oder ist das Signal selbst der Takt für einen angeschlossenen elektronischen Zähler, so führt das PRELLEN des Schalters zu unerwünschten Fehlzählungen. Die vorliegende Schaltung verhindert dies. Ist erst einmal der Kontakt hergestellt, so darf er wieder unterbrochen werden, die Rückführung vom Ausgang  $\bar{A}$  des Bausteins, dessen Eingang (kurzzeitig) auf Masse gelegt wurde, schaltet den anderen Baustein, von dessen Ausgang wiederum der erste Baustein in der neuen Lage festgehalten wird; ein erneutes Kontaktieren bewirkt nichts mehr. Da wir in späteren Versuchen auf entprellte Signale angewiesen sind, gibt es im Baukasten einen Funktionsbaustein ENTPRELLTE TASTE. Das Bild zeigt noch einmal die Wirkungsweise beim Freigeben eines Signals mit mechanischem Schalter und Entprellung.



41

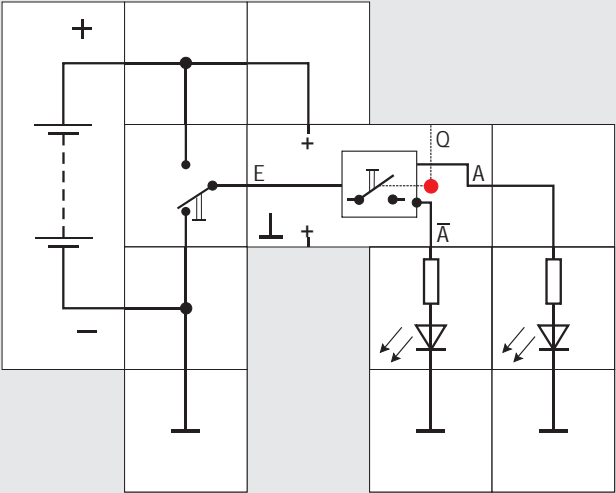


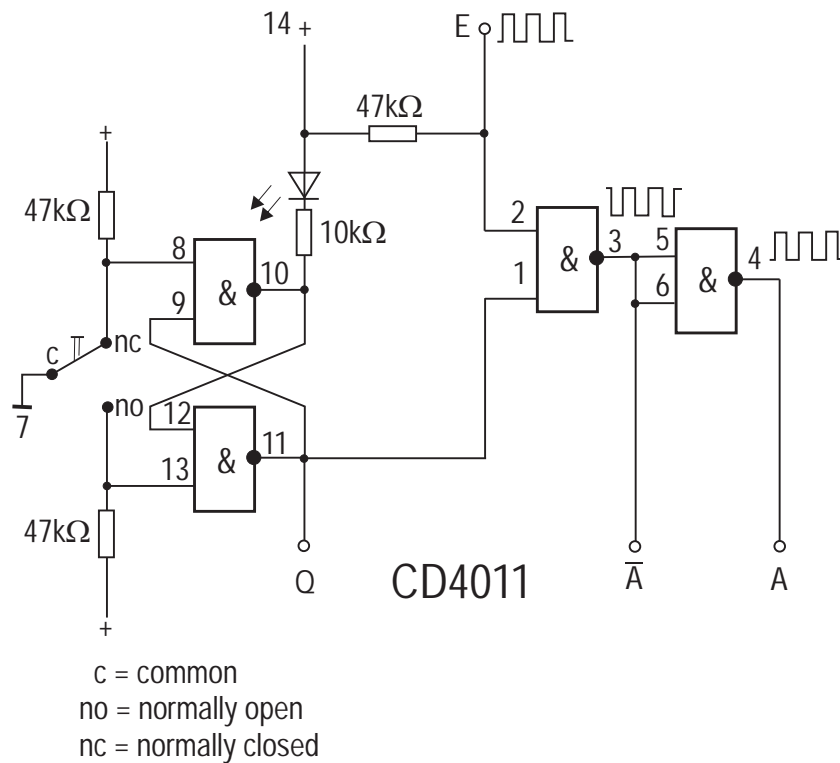


## Versuch 41 Speicherzelle aus OR/NOR - Funktionsbausteinen

Bevor wir uns näher mit dem Funktionsbaustein »Entprellte Taste« beschäftigen, soll noch gezeigt werden, dass sich die bisher aus NAND - Bausteinen aufgebaute Speicherzelle in gleicher Weise auch mit NOR - Bausteinen realisieren lässt. Da bei der NOR - Funktion das »1« Signal den Ausgang festlegt, muss der Schalter gegen Versorgungsspannung statt gegen Masse geschaltet werden.

42





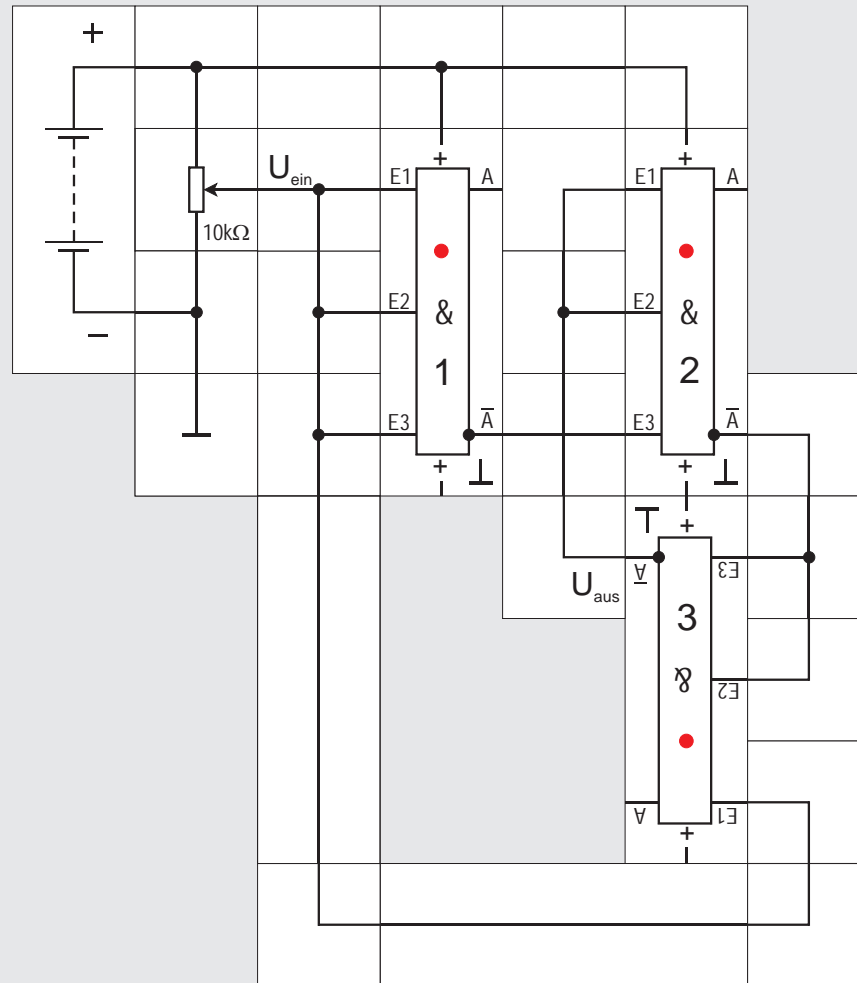
## Versuch 42

### Funktionsbaustein »Entprellte Taste«

Die Tastenentprellung mit NAND - Bausteinen aus Versuch 40 ist noch etwas erweitert worden. Das digitale Eingangssignal E gelangt nur dann zu dem Ausgang A, wenn die Taste gedrückt wird. Gleichzeitig ist auch das nicht invertierte Signal  $\bar{A}$  vorhanden. Benötigt man auf Tastendruck lediglich ein Taktsignal, so kann das intern benutzte Freigabesignal Q ebenfalls verwendet werden; ohne Zusatzbeschaltung sind in gleicher Weise A und  $\bar{A}$  erhältlich, da der Eingang E intern hochohmig mit Versorgungsspannung verbunden ist. Das Freigabesignal Q wird zusätzlich über Leuchtdiode angezeigt, sie leuchtet bei Tastendruck; die Versorgungsspannung ist an zwei Kontakte gelegt, die miteinander verbunden sind, Masse wird über den Bodenkontakt zugeführt.

Mit Hilfe der einzelnen Leuchtdioden kann man sich im Versuch überzeugen, dass der Baustein in der beschriebenen Weise arbeitet.

43







## Versuch 43 Schmitt - Trigger

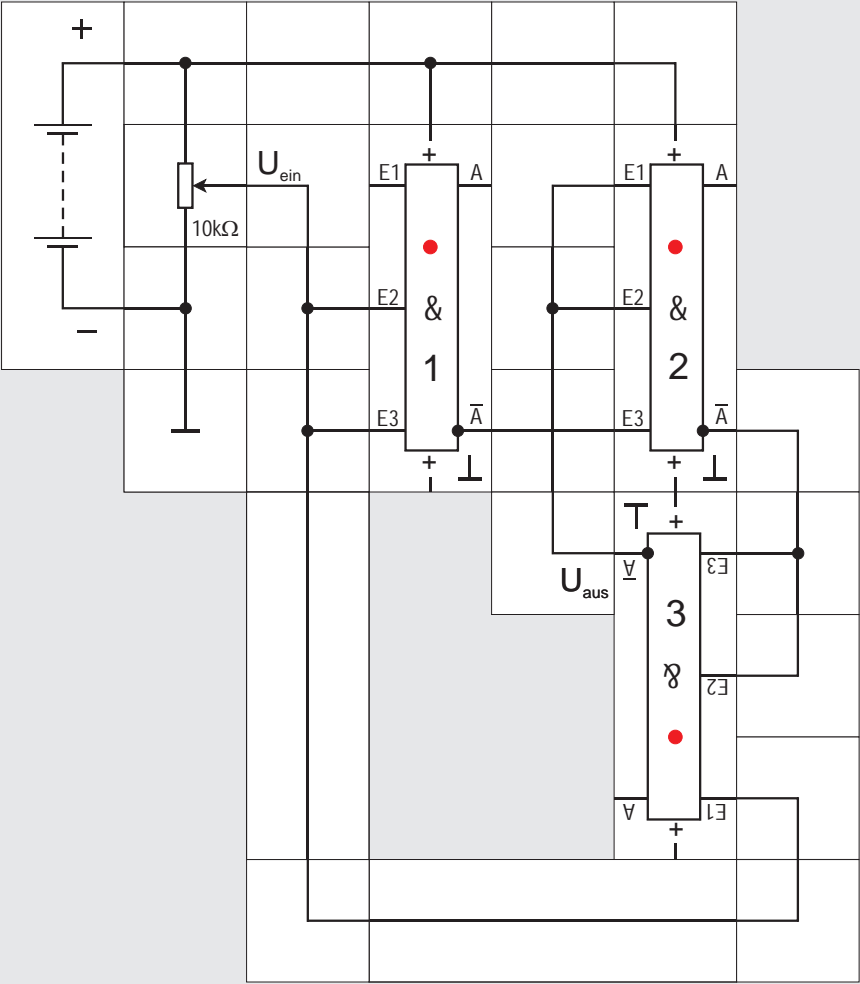
Die kreuzweise gekoppelten NAND - Funktionsbausteine bilden eine Speicherzelle. Wir können aus ihnen mit der Erkenntnis aus Versuch 31, dass die Lage der Umschaltkennlinie nicht konstant ist, einen SCHMITT - TRIGGER aufbauen.

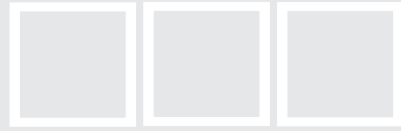
Ein Schmitt-Trigger wird immer dann benötigt, wenn eine Eingangsspannung beliebiger Kurvenform in eine rechteckförmige Ausgangsspannung mit definierter Amplitude sowie definierter Anstiegs- und Abfallzeit verwandelt werden soll. Merkmal des Schmitt-Triggers ist, dass die Schaltung bei ganz bestimmten Ein- und Ausschaltpegeln jeweils in den anderen stabilen Zustand kippt. Ein- und Aus-

schaltpegel sind unterschiedlich, ihre Differenz heißt SCHALTHYSTERESE. Diese Hysterese sorgt dafür, dass bei einem sich langsam verändernden Eingangssignal (beispielsweise von einem Fotowiderstand) im Schaltschwellenpunkt auf Grund kleiner Veränderungen leistungsstarke Verbraucher (Straßenbeleuchtung) nicht ständig ein- und ausgeschaltet werden.

Die Bausteine 2 und 3 bilden in unserer Schaltung die Speicherzelle.  $U_{\text{ein}}$  ist das Eingangs-,  $U_{\text{aus}}$  das Ausgangssignal. Für die obere Schaltschwelle (Einschaltpegel) des Schmitt - Triggers ist die Schaltschwelle des Bausteins 1 maßgebend, für die untere (Ausschaltpegel) die des Bausteins 3. Da bei Baustein 1 alle drei Eingänge zusammen geschaltet sind, ist zum Schalten eine größere Eingangsspannung nötig als bei Baustein 3, bei dem die Eingangsspannung lediglich auf einen Eingang geführt ist. Wir erhalten also eine Schaltung mit der gewünschten Hysterese; sie kann bis zu 30% der Versorgungsspannung betragen, streut allerdings stark mit der Toleranz des gerade verwendeten Bausteins. Wenn wir also durch Drehen am Potentiometer die Eingangsspannung hochfahren, wird irgendwann der Ausgang  $U_{\text{aus}} = U_L$  - Potential abgeben. Wir müssen jetzt den Drehknopf weiter zurückdrehen, damit der Ausgang wieder auf  $U_H$  springt.

44



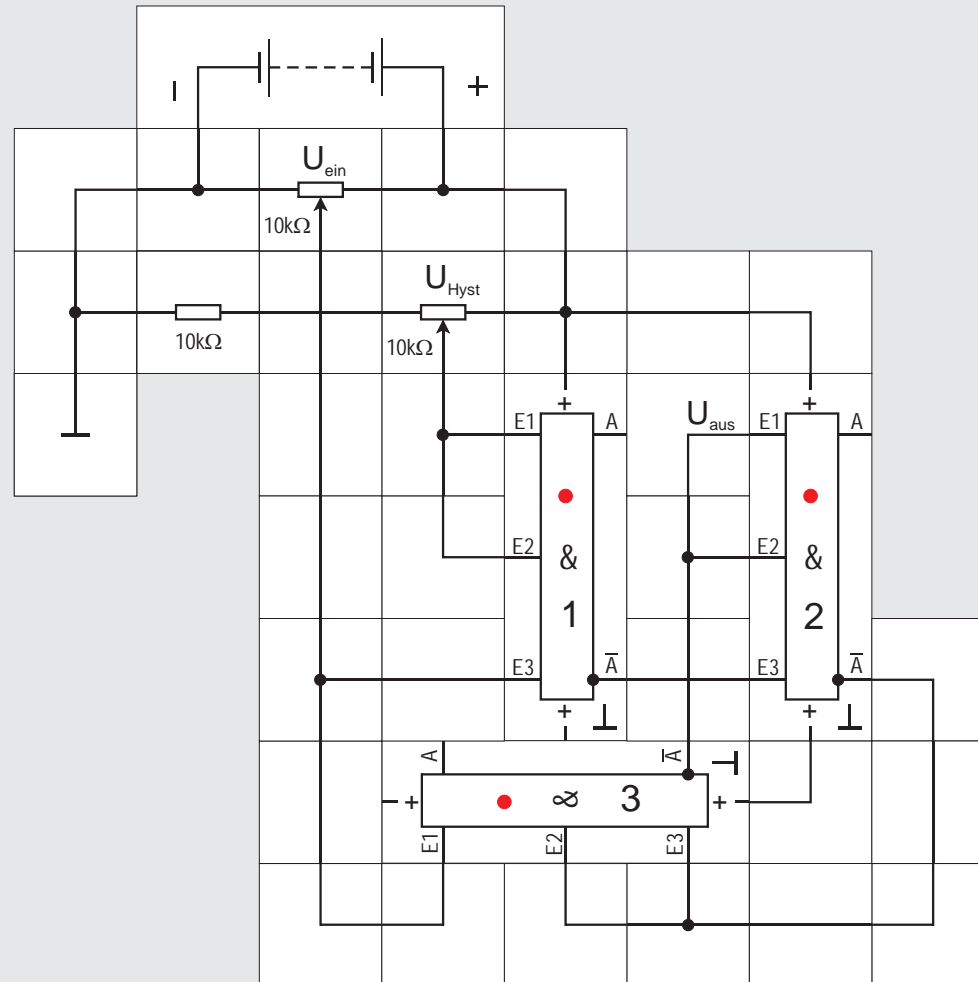


## Versuch 44

### Schmitt - Trigger mit kleiner Hysterese

Eine kleine Änderung in unsere Schaltung bewirkt, dass die Hysterese kleiner wird. Verbinden wir nämlich einen Eingang des Bausteins 1 fest mit Versorgungsspannung statt mit dem Eingangssignal, so sinkt die Schaltschwelle und die Hysterese verringert sich auf ungefähr auf die Hälfte derjenigen vom vorherigen Versuch. Wir brauchen dazu nur das Eingangssignal von einem Eingang zu nehmen, da er bausteinintern bereits hochohmig mit Versorgungsspannung verbunden ist.

45



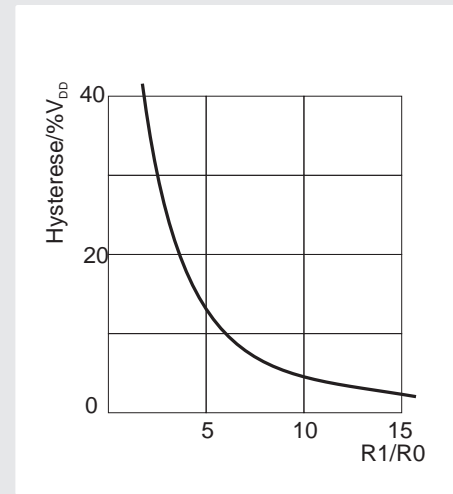
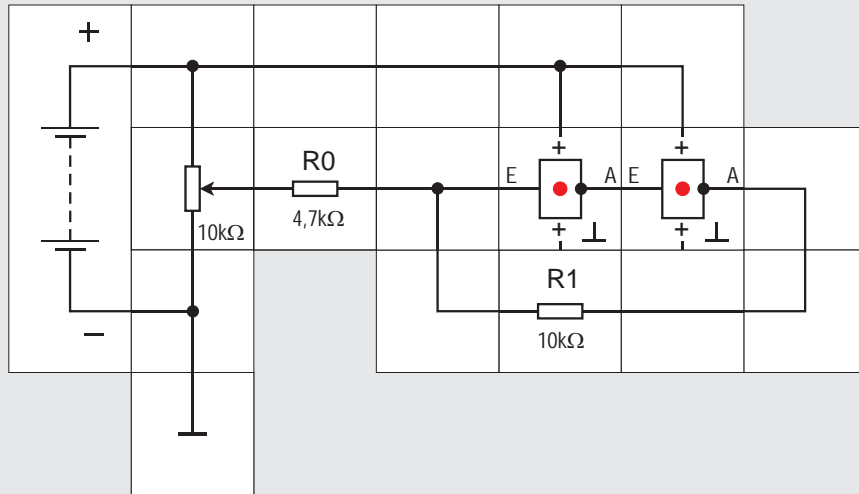


## Versuch 45

### Schmitt - Trigger mit einstellbarer Hysterese

Die Schaltung des letzten Versuchs lässt sich verallgemeinern: Über ein zweites Potentiometer können wir die Spannung an den verbundenen Eingängen des Bausteins 1 variabel gestalten und damit die Größe der Hysterese einstellen. Da hierfür nur Spannungen oberhalb der halben Versorgungsspannung infrage kommen, liegt ein  $10\text{ k}\Omega$  Festwiderstand in Reihe zu dem Hyst - Potentiometer. Bei  $U_{\text{Hyst}} \gg 5\text{V}$  kann die Hysterese bis zu 40% der Versorgungsspannung betragen, sie kann mit dem Potentiometer und höheren  $U_{\text{Hyst}}$  - Spannungen kontinuierlich auf Null zurück gestellt werden.

46\*



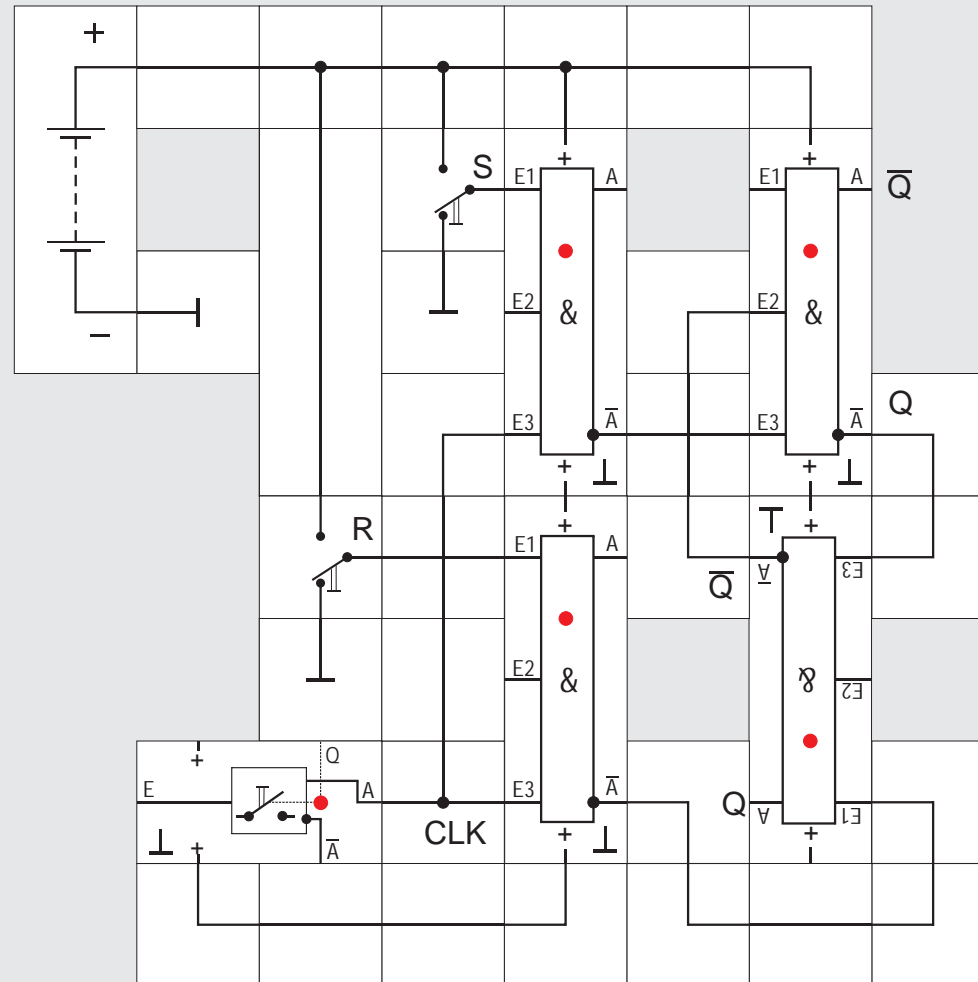


## Versuch 46\*

### Schmitt - Trigger aus Invertern

Besitzt man zwei Inverter - Bausteine durch Zukauf (Bestell-Nr. 2450 ) oder aus dem Ausbau - System «Schwellwert- und Majoritätslogik», so ist der Aufbau eines Schmitt - Triggers mit einstellbarer Hysterese ganz einfach. Der Versuchsaufbau zeigt, wie es gemacht wird. Durch die Rückkoppelung kommt die Hysterese zustande; ihre Größe hängt vom Verhältnis des Spannungsteilers  $R1/R0$  ab, wobei zu beachten ist, dass der Inverter-Eingang bausteinintern über einen  $100\text{ k}\Omega$  Widerstand mit Versorgungsspannung verbunden ist was beim Teilverhältnis berücksichtigt werden muss.

47







## Versuch 47

### Das getaktete RS - Flipflop

Flipflops aufgebaut aus zwei Verknüpfungsbausteinen heißen RS-Flipflops. Wie wir gesehen haben, kann man sie durch Anlegen eines geeigneten Signals in den einen oder den anderen Zustand bringen. Sie sind für Schalter - Entprellung und andere Anwendungsfälle gut geeignet; die in Logikschaltungen benutzte Form sieht jedoch ein klein wenig anders aus. Statt des Signalpaars R und S haben diese Flipflops einen oder zwei Daten - Eingänge und einen Takt - Eingang (CLK). Die Ausgänge können nur dann ihren Zustand in Abhängigkeit von

den Eingangssignalen wechseln, wenn der Taktimpuls erscheint.

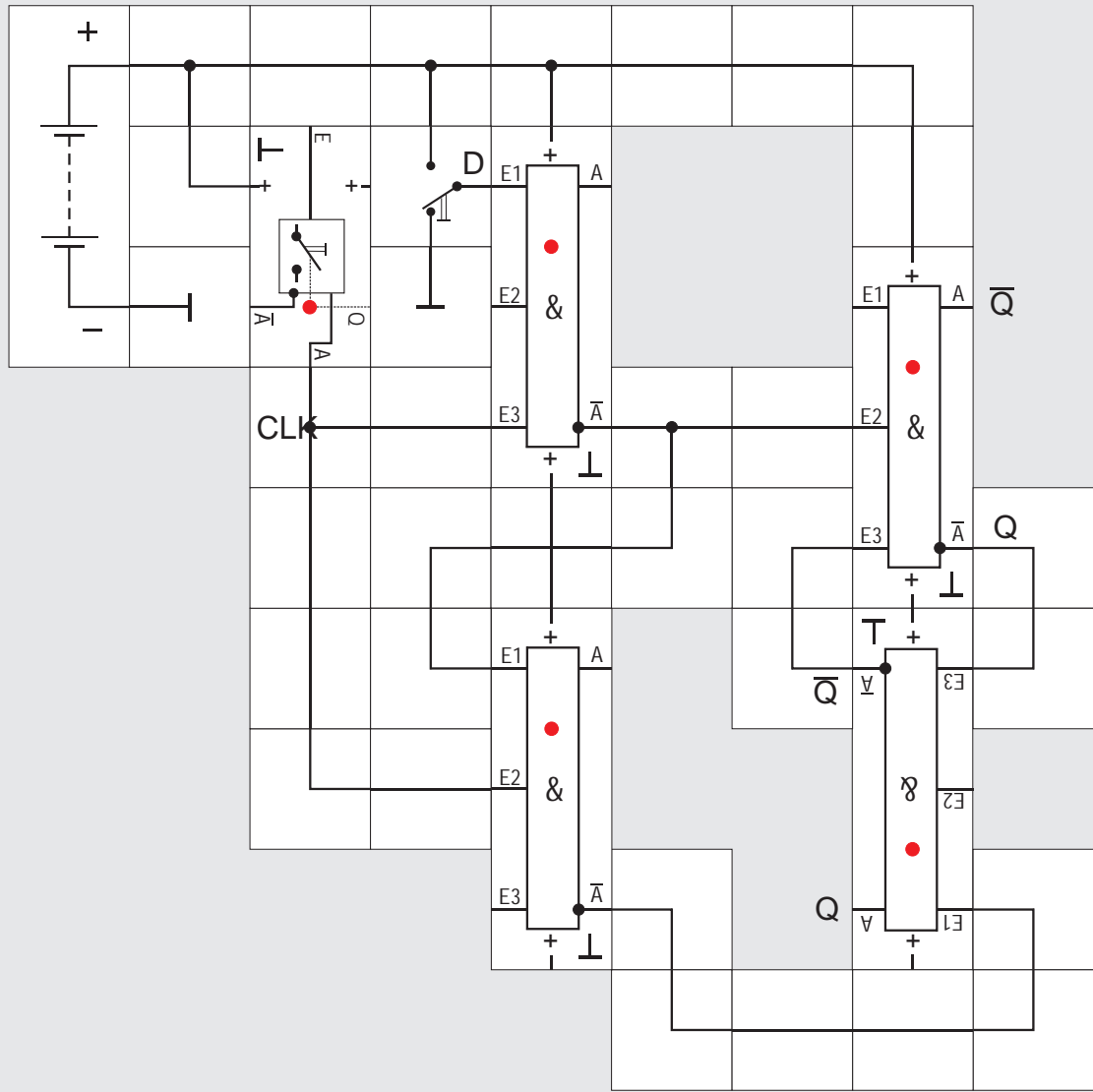
Das aufgebaute Flipflop benutzt die uns bekannte Struktur aus Versuch 40. Zusätzlich gibt es jedoch noch eine vom Takt gesteuerte Torschaltung; das Verhalten des Flipflops wird durch die folgende Wahrheitstafel beschrieben:

S	R	$Q_{n+1}$
0	0	$Q_n$
0	1	0
1	0	1
1	1	undefiniert

$Q_{n+1}$  ist der Zustand des Q - Ausgangs nach und  $Q_n$  der Zustand vor Erscheinen des Taktimpulses. Der Unterschied zum RS - Flipflop liegt in der Betrachtungsweise: R und S sind nun die Dateneingänge, die festlegen, welchen Zustand Q hat, nachdem der Taktimpuls erschienen ist.

Dieses getaktete Flipflop hat allerdings immer noch eine kleine Unschönheit. Der Zustand des Ausgangs kann wechseln, solange der Takt auf  $U_H$  - Potential liegt; damit ist das Flipflop »transparent«, d.h., der Zustand der Eingänge kann sich direkt auf den Zustand des Ausgangs auswirken. Bevor wir in den nächsten Versuchen ein in dieser Hinsicht verbessertes Flipflop kennen lernen, soll zunächst noch das D - Flipflop vorgestellt werden.

48





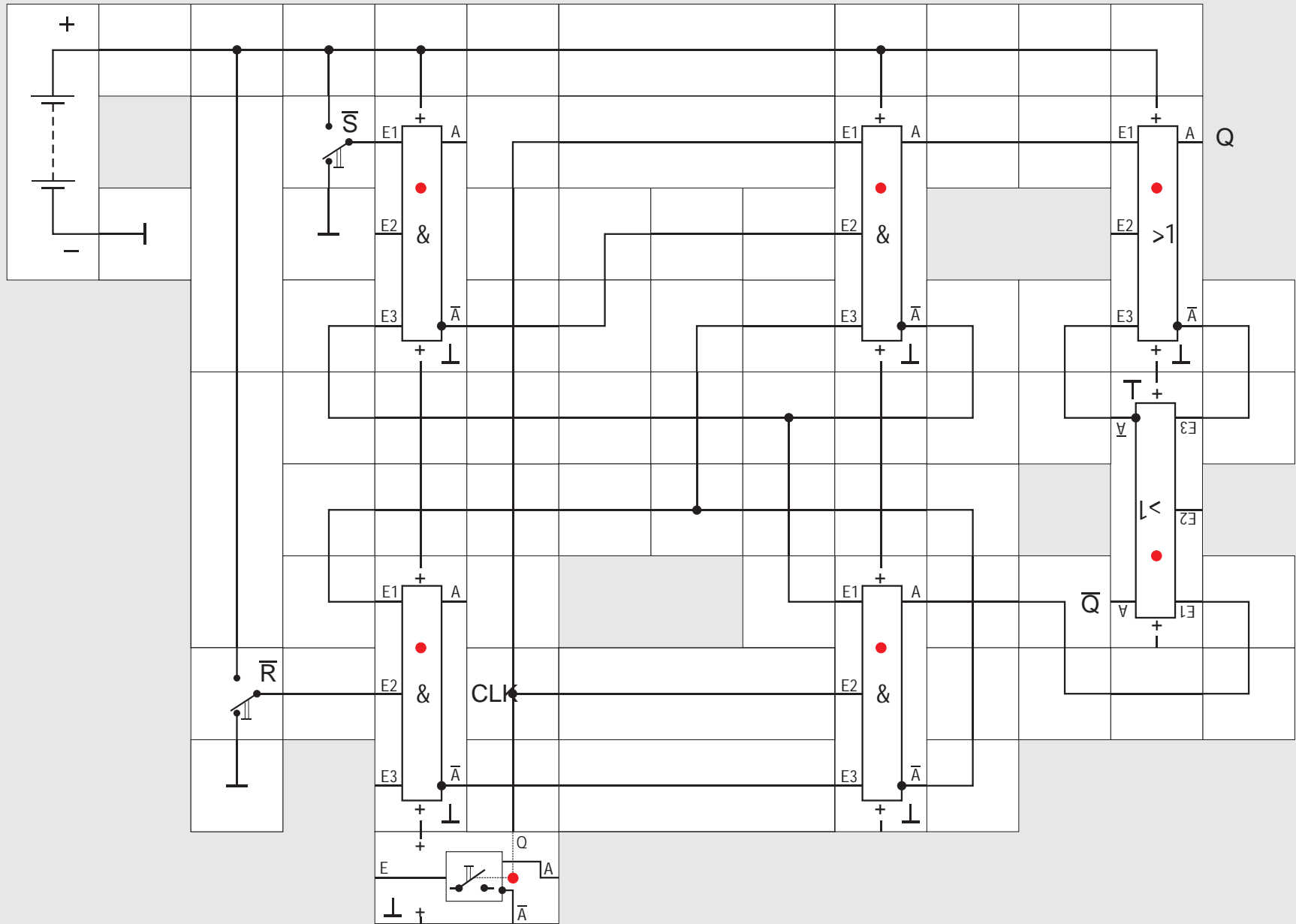
## Versuch 48

### Das D - Flipflop

Ein D - Flipflop (engl. DELAY) entsteht aus einem RS - Flipflop, wenn man an den R - Eingang das invertierte S - Signal ( $R = \bar{S}$ ) legt. Die bisherige Einschränkung  $R = S \Rightarrow 1$  ist damit hinfällig. Die Schaltung zeigt, dass für die Invertierung kein eigener Inverter in der Ansteuerschaltung nötig ist. Das Verhalten des D - Flipflops wird durch die folgende Wahrheitstafel beschrieben:

D	$Q_{n+1}$
0	0
1	1

Das bedeutet, der Wert des Eingangs D wird an den Ausgang Q übernommen, wenn der Takt CLK den Wert »1« hat. Bei  $CLK = 0$ , ist das Flipflop gesperrt; es gehört somit ebenfalls zu den transparenten Flipflops.





Am Beispiel des  $\overline{RS}$  - Flipflops wird das Prinzip erläutert. Das Flipflop besteht aus der Eingangstorschaltung, dem Zwischenspeicher und dem Ausgangsspeicher. Normalerweise sind alle Teile mit NAND - oder NOR - Strukturen aufgebaut. Da wir nur 4 NAND - Bausteine im Experimentierkasten haben, wird der Ausgangsspeicher mit NOR - Bausteinen realisiert. Seine Ansteuerung erfolgt vom Zwischenspeicher aus deswegen über dessen A - (statt der  $\overline{A}$  -) Ausgänge.

Liegt der Takt CLK auf »0«, ist der Zwischenspeicher gesperrt, seine beiden  $\overline{A}$  - Ausgänge haben »1« - Potential, womit die Eingangstorschaltung offen ist. Die an  $\overline{R}$  und  $\overline{S}$  anliegende Information gelangt (invertiert) an die Eingänge des Zwischenspeicher - Flipflops. Der Ausgangsspeicher ist in Ruhelage in einer seiner beiden stabilen Lagen.

Mit dem Ansteigen der Taktflanke wird dann der Zwischenspeicher gesetzt. Dabei erhält einer seiner beiden  $\overline{A}$  - Ausgänge »0« -Potential und sperrt sowohl das entsprechende Eingangsschaltglied als auch das andere Schaltglied des Zwischenspeichers, so dass nach Ablauf dieses Vorgangs eine Veränderung von  $\overline{R}$  und  $\overline{S}$  keine Wirkung mehr auf den Zwischenspeicher hat, auch dann nicht, wenn CLK weiter auf »1« bleibt.

Der Zwischenspeicher liefert an den Ausgangsspei-

cher ebenfalls einen Setzimpuls von der Breite des Taktimpulses, was man an den Leuchtdioden sehr schön sehen kann. Wenn der Takt wieder auf »0« geht, wird in der Torschaltung und im Zwischenspeicher die Anfangssituation wieder hergestellt, ohne dass sich am Ausgang Q etwas ändert.

Zwei Dinge sind bei einem taktflankengesteuerten Flipflop zu beachten: Wenn die Taktflanke eintrifft, muss die von der Torschaltung kommende Information bereits am Zwischenspeicher anliegen, d.h. die an  $\overline{R}$  und  $\overline{S}$  anliegende Information muss schon eine Schaltglied - Verzögerungszeit vor Eintreffen der Taktimpulsflanke stabil sein. Das Flipflop benötigt also eine Vorbereitungszeit  $t_s$  (engl. SET UP TIME).

Nach dem Anstieg der Taktflanke darf sich für eine Schaltglied - Verzögerungszeit die an  $\overline{R}$  und  $\overline{S}$  liegende Information ebenfalls nicht ändern. So lange dauert es, bis der Zwischenspeicher gesetzt ist und die Torschaltung sperrt. CLK muss während dieser Haltezeit  $t_h$  (engl. HOLD TIME) auf »1« bleiben; es besteht sonst die Gefahr, dass der Zwischenspeicher wieder zurück kippt. Die Haltezeit  $t_h$  ist daher auch gleichzeitig die minimale Taktimpulsbreite.

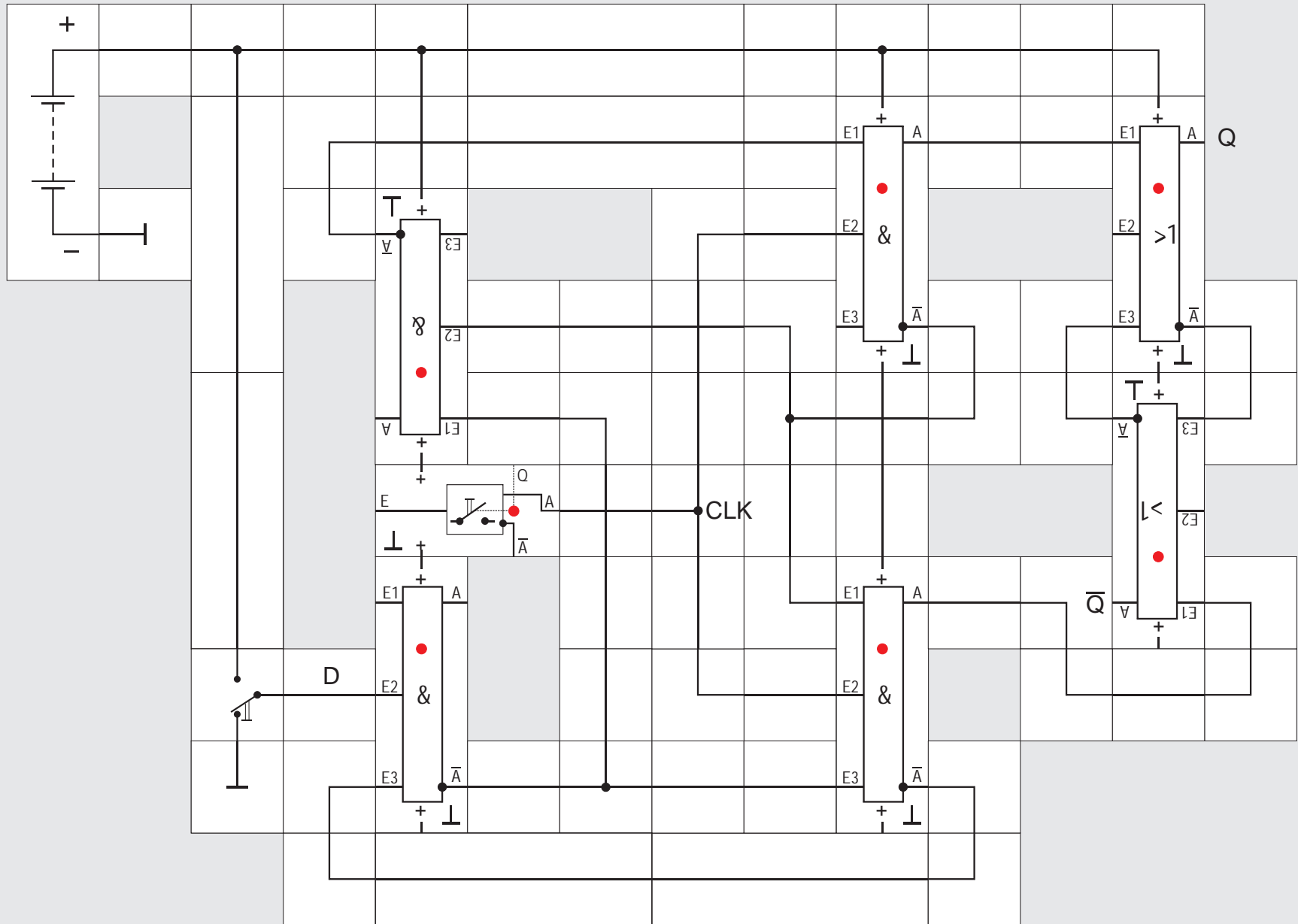
Das aufgebaute  $\overline{RS}$  - Flipflop wird durch die ansteigende Taktflanke geschaltet; man kann natürlich auch Flipflops aufbauen, die mit der fallenden Taktflanke gesetzt oder rückgesetzt werden.

## Versuch 49

### Das taktflankengesteuerte $\overline{RS}$ - Flipflop

Wir wollen nun Flipflops kennen lernen, die nicht transparent sind: Flankengesteuerte und Master - Slave - Flipflops.

50





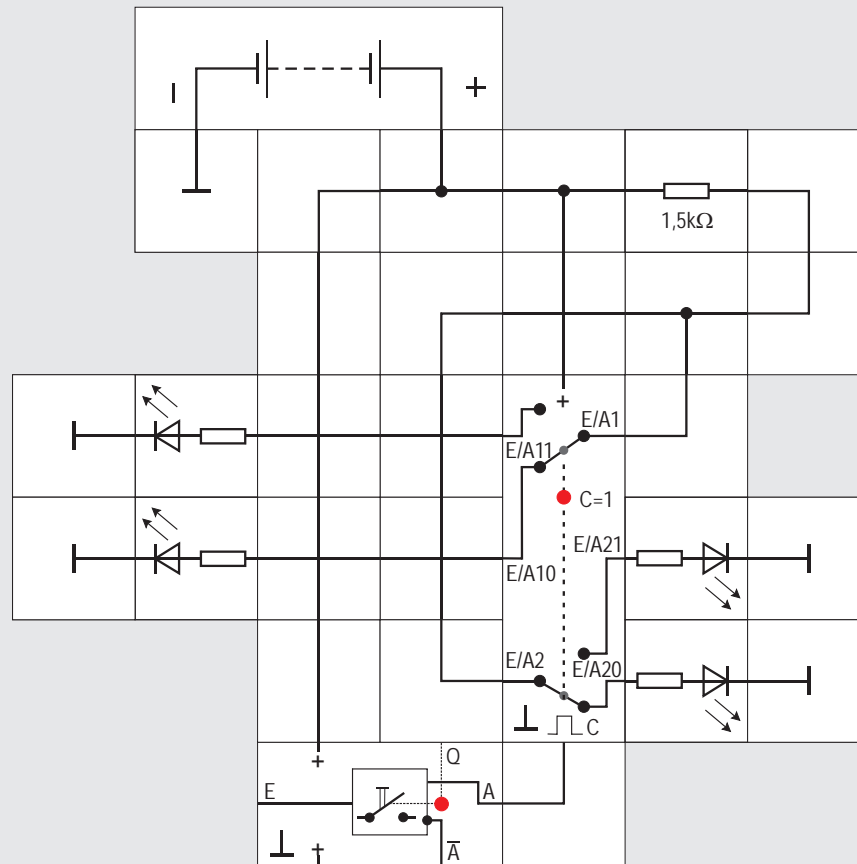
## Versuch 50

### Das taktflankengesteuerte D- Flipflop

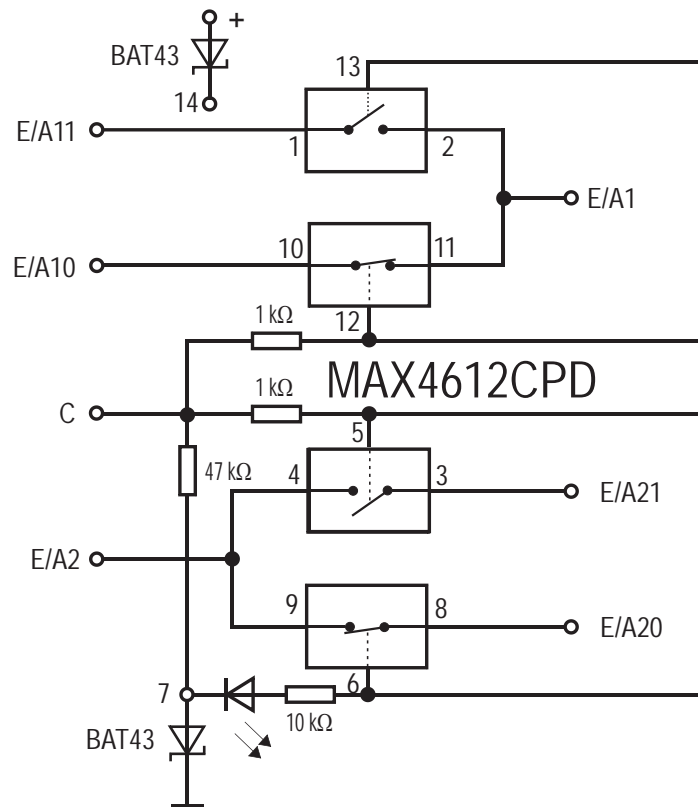
Wenn wir  $R = \bar{S}$  machen, erhalten wir wieder das schon bekannte D - Flipflop, diese Mal jedoch taktflankengesteuert. Vereinfachungen ergeben sich dadurch, dass  $\bar{S}$  durch Invertieren des Eingangs D (R) in der Torschaltung erzeugt und die Rückführung vom unteren Ausgang  $\bar{A}$  des Zwischenspeichers zu einem seiner oberen Eingänge hinfällig wird; es muss ja nur noch der eine Eingang D verriegelt werden und das entweder am unteren Schaltglied des Eingangstores oder an seinem oberen bzw. am unteren Schaltglied des Zwischenspeichers. Wir erhalten die abgebildete Schaltung und können uns mit Hilfe der Leuchtdioden überzeugen, das die Schaltung so arbeitet, wie wir das erwarten.

Bevor wir uns dem Master- Slave - Prinzip bei Flipflops zuwenden, wollen wir uns noch einmal an eine CMOS - spezifische Schaltung, nämlich an das Transmission - Gate, (Versuch 35) erinnern. Wir haben mit dem Transistor Array einen Umschalter aufgebaut, der uns jetzt gute Dienste leisten soll. Allerdings nehmen wir nicht den aus dem Array aufgebauten, sondern einen fertigen Funktionsbaustein, der im nächsten Versuch näher vorgestellt wird.

51





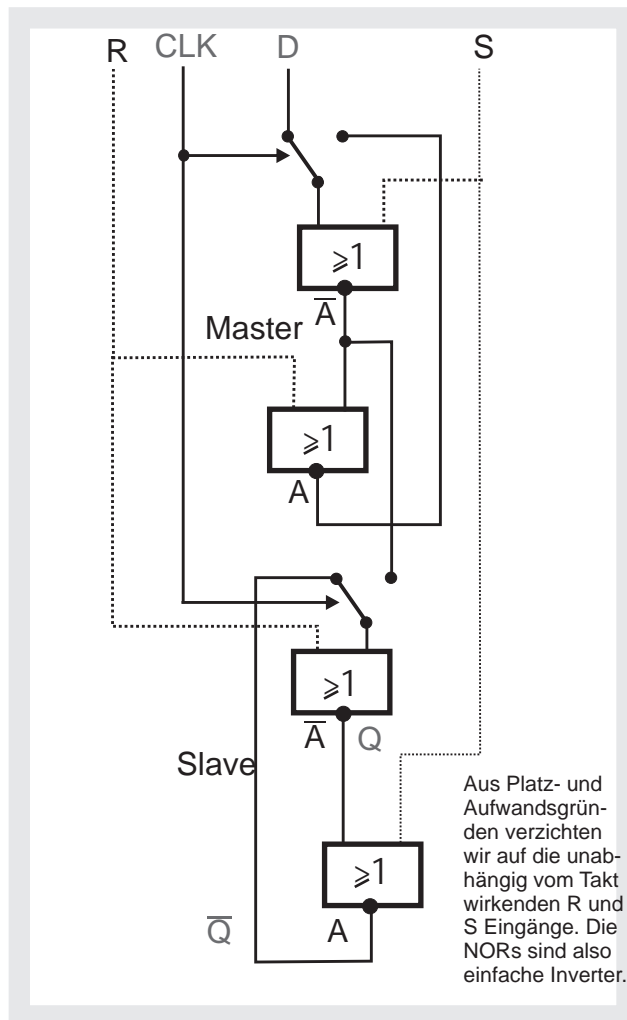


## Versuch 51

### Der Funktionsbaustein »Transmission Gate«

Auf Basis des CMOS Bausteins MAX4612, der vier-bilaterale Schalter, zwei Öffner und zwei Schließer, enthält, sind im vorliegenden Funktionsbaustein zwei Umschalter aufgebaut; sie arbeiten natürlich auch bilateral. Geschaltet werden sie mit dem Steuersignal C, dessen Zustand von einer Leuchtdiode angezeigt wird. Sie leuchtet, wenn C = »1« ist, die Schalter sich also in der Arbeitsstellung befinden. Die nebenstehende Zeichnung gibt die Ruhestellung mit C = »0« und dunkler LED wieder. Zwei zusätzliche Schottky - Schutzdioden in den Versorgungsleitungen verhindern, dass über nicht gezeichnete Schutzstrukturen ein unzulässig hoher Strom fließt, wenn der Baustein bereits ein niederohmiges Eingangssignal erhält, ohne dass die Versorgungsspannung anliegt. Mit der kleinen Testschaltung kann man sich von der Funktion des Bausteins überzeugen. Das Paar Leuchtdioden wird zur Kontrolle des einen Schalters rechts und zur Kontrolle des anderen links angeschlossen. Der 1,5 kΩ Widerstand dient zur zusätzlichen Strombegrenzung des Leuchtdiodenstroms.





## Versuch 52 Das »Master - Slave -Flipflop«

Das Transmission Gate wollen wir nun benutzen, um damit Torschaltungen für das Master-Slave-Flipflop aufzubauen.

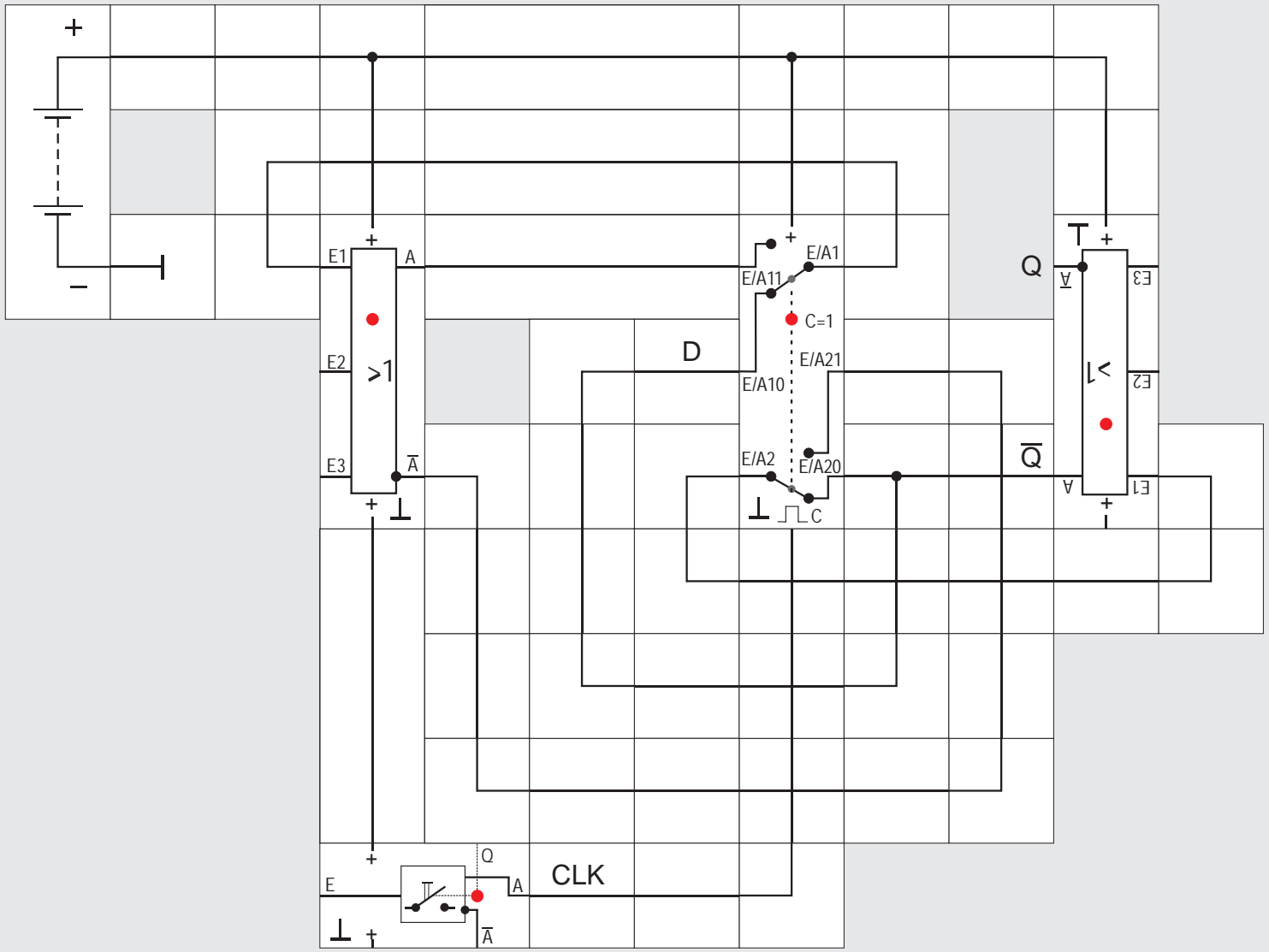
Ein MASTER - SLAVE -FLIPFLOP besteht aus zwei hintereinander geschalteten Speicherzellen, die über ein taktgesteuertes Tor miteinander verbunden sind. Die vordere Zelle heißt MASTER, die hintere SLAVE. Die Eingänge (in unserem speziellen Fall nur der D -Eingang) sind über ein weiteres Tor mit dem Master verbunden, die Ausgänge des Slave sind gleichzeitig die Ausgänge des gesamten Flipflops. Aus Versuch 39 ist bekannt, wie man aus zwei Invertern mit Rückführung eine einfache Speicherzelle aufbaut. Wir verwenden hier je einen OR/NOR - Funktionsbaustein als hintereinander geschaltete Inverter für Master und Slave, wobei uns bewusst sein sollte, dass der A - Ausgang als weitere Invertierung des  $\bar{A}$  - Ausgangs entsteht. Neu ist, dass die Rückführung innerhalb der Master und Slave Zelle ebenfalls über ein je ein Tor geleitet wird. Alle Tore sind taktgesteuert und zwar ist bei  $CLK = »0«$  der Ein-

gang mit dem Master verbunden, dessen interne Rückführung getrennt ist; weiter ist die Verbindung zwischen Master und Slave getrennt, die interne Rückführung im Slave jedoch wirksam. Das bedeutet einerseits folgt der Master ständig der Eingangsinformation, andererseits wird das im Slave Gespeicherte am Ausgang  $\bar{A}$  abgegeben ( $Q$  ist  $\bar{A}$ ,  $\bar{Q}$  ist  $A$  beim Slave).

Wechselt nun der Takt von »0« auf »1«, so wird auf der steigenden Flanke der Master vom Eingang getrennt, seine interne Rückführung geschlossen (er speichert also seine letzte Information vom Eingang) und seine Ausgänge werden mit dem Slave verbunden; dessen interne Rückführung wird unterbrochen, so dass er die Information vom Master aufnehmen und über seine Ausgänge abgeben kann. Geht  $CLK$  wieder auf »0« zurück, wird der Slave vom Master getrennt und seine interne Rückführung wieder aktiv, so dass der neue Inhalt gespeichert wird. Nach der Trennung vom Slave wird der Master wieder mit dem Eingang verbunden und kann neue Informationen aufnehmen.

In unserem Versuch verwenden wir für die insgesamt vier Tore die beiden Umschalter des Transmission Gates. An den Leuchtdioden kann man die Funktionsweise sehr gut erkennen (Diode hell:  $Q = »0«$  beim Slave).

53





# Lectron

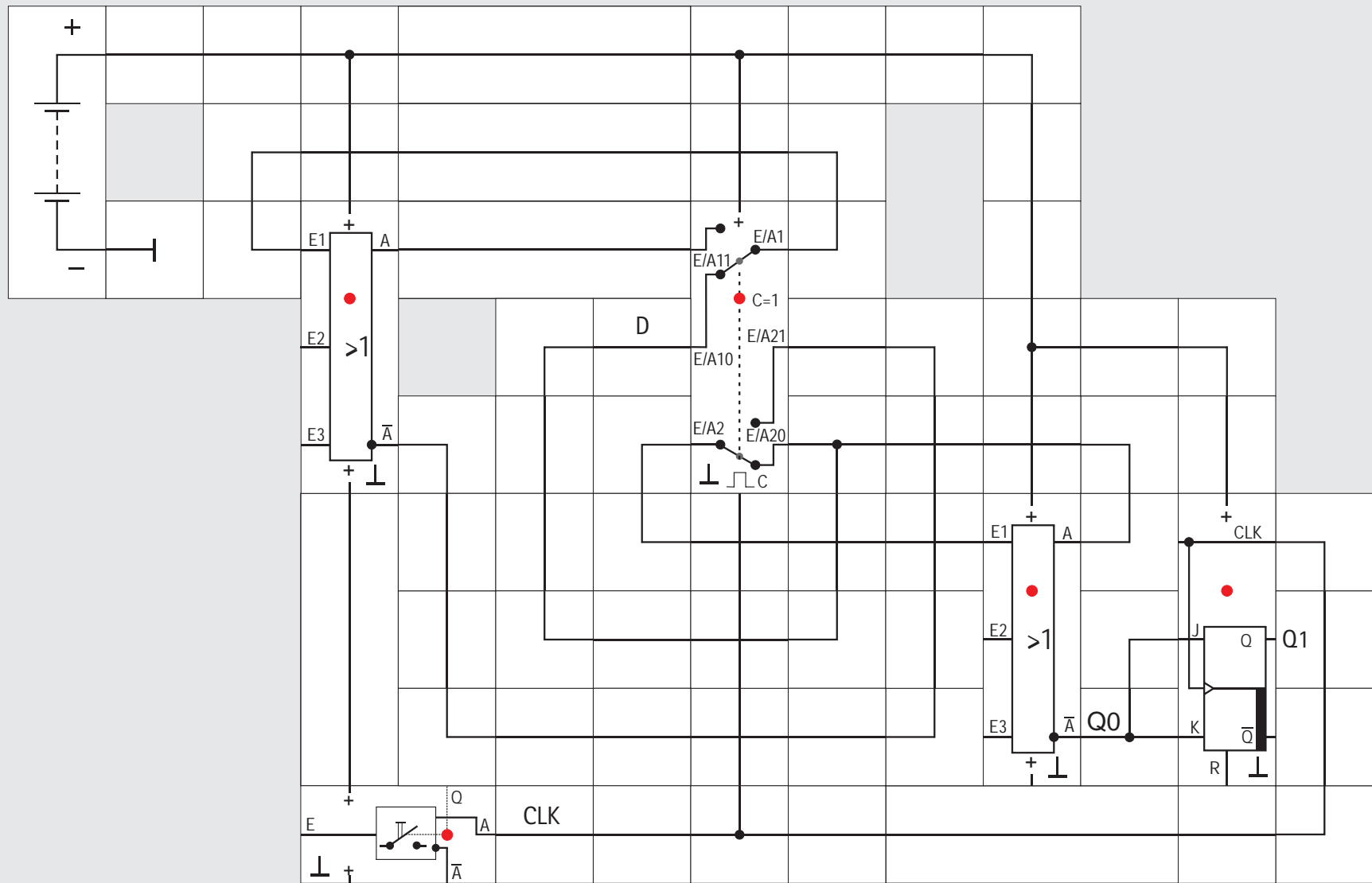
## Versuch 53 Frequenzteiler

Verbindet man beim D -Flipflop den  $\bar{Q}$  - Ausgang

mit dem D - Eingang, so wechselt bei jeder ansteigenden Taktflanke der Speicherinhalt, denn es wird jedesmal der invertierte Inhalt neu übernommen. Das Flipflop schaltet also ständig hin und her (engl. TO TOGGLE). Diese Eigenschaft lässt sich als aufwandsarme Frequenzteilung des Taktes verwenden. Die erste Stufe dividiert durch zwei, verwendet man den Ausgang für die jeweils nächste Stufe als Takt, hat die zweite Stufe die Taktfrequenz bereits durch vier dividiert; das Ausgangssignal der dritten Stufe hat nur noch ein Achtel der Taktfrequenz usw.

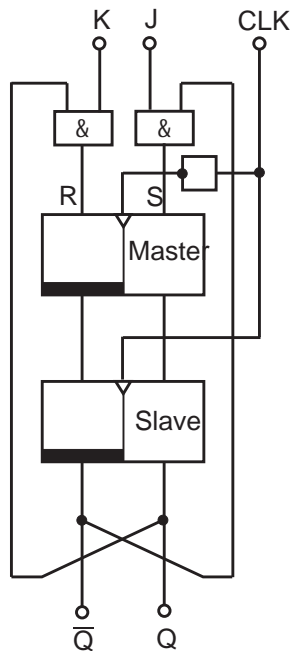
Fasst man das Ganze als Zähler auf, so hat man einen ASYNCHRONEN BINÄRZÄHLER aufgebaut. Asynchron deshalb, weil die einzelnen Zählstufen nicht gleichzeitig, sondern nacheinander schalten. Dieser Zähler heißt auch RIPPLE COUNTER, weil sich das Fortschalten wie eine Welle durch den Zähler bewegt. So lange man nur an dem herunter geteilten Ausgangssignal interessiert ist, stört diese Eigenschaft nicht weiter; möchte man jedoch Zählerstände ablesen, kann es insbesondere bei langen Zählketten und hohen Taktfrequenzen Probleme geben, da zu keiner Zeit alle Ausgänge stabil sind.

Das D - Flipflop eignet sich also nur bedingt zum Aufbau von Zählern. Wir werden im nächsten Versuch eine verbesserte Zählstufe kennen lernen, bei der diese Probleme nicht auftreten.



LED leuchtet,  
wenn  $\overline{Q0} = 1$

LED leuchtet,  
wenn  $Q1 = 1$



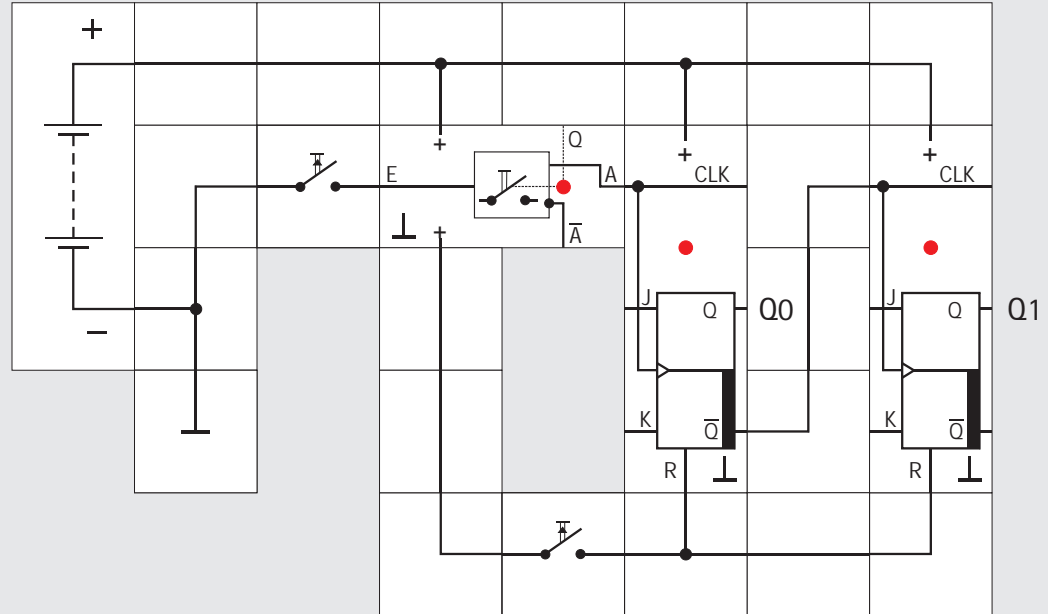
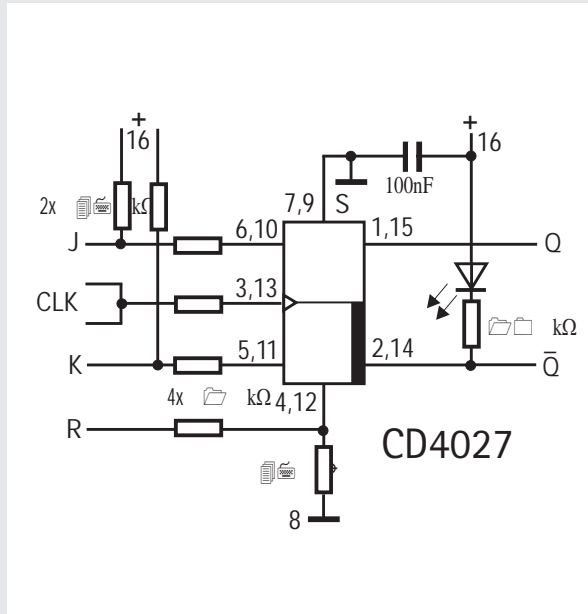
## Versuch 54 Das JK - Master - Slave - Flipflop

Wir sind vom taktflankengesteuerten RS - Flipflop über das D - Flipflop und das Master - Slave -Prinzip zum asynchronen Zähler gekommen. Ohne dass wir es aufbauen wollen, kann man natürlich auch ein RS - Flipflop (Versuch 49) mit dem Master - Slave Prinzip kombinieren. Solch ein Flipflop hat dann die Eingänge R und S und die Ausgänge Q und  $\bar{Q}$ . Führt man bei ihm den Ausgang Q auf den Eingang R und den Ausgang  $\bar{Q}$  auf den Eingang S zurück, so kippt das Flipflop bei jeder ansteigenden Taktflanke in die entgegengesetzte Lage, wie wir das vom D - Flipflop (D mit  $\bar{Q}$  verbunden) bereits kennen. Diese Verbindungen braucht man nicht fest auszuführen; man kann sie wie im Bild durch UND - Verknüpfungen gesteuert herstellen lassen und erhält dadurch ein JK - Flipflop. Die Buchstaben J und K haben anders als R und S keine tiefere Bedeutung, sie sind ursprünglich willkürlich gewählt und dann beibehalten worden. Wenn J und K auf »1« liegen, lassen beide Tore die

von  $\bar{Q}$  und Q kommende Information passieren, jede steigende Taktflanke bringt das Flipflop in die jeweils entgegengesetzte Lage. Bei J und K gleich »0«, passiert gar nichts. Neu ist, dass bei J = »1« und K = »0« das Flipflop nach Erscheinen eines Taktimpulses auf jeden Fall anschließend eine »1« gespeichert hat; bei J = »0« und K = »1« ist anschließend eine »0« gespeichert, ganz gleich welchen Inhalt die Speicherzelle vorher hatte. Es gilt die folgende Wahrheitstafel:

J	K	$Q_{n+1}$
0	0	$Q_n$
0	1	0
1	0	1
1	1	$\bar{Q}_n$

Wir können versuchsweise einen unserer Funktionsbausteine JK -Master - Slave -Flipflop an den Q - Ausgang unserer ersten Zählstufe legen, und zwar werden J und K mit Q verbunden. Der CLK - Eingang kommt an den Ausgang der entprellten Taste, R bleibt offen. Wenn wir Taktimpulse mit der Taste erzeugen, sehen wir, dass bei unserer ersten Zählstufe die Leuchtdiode (wie bisher) bei jedem Takt wechselt, die Leuchtdiode der zweiten Zählstufe dagegen bei jedem zweiten Takt. Im folgenden wollen wir uns den neuen Baustein näher ansehen.







lel geschaltet sind. Die J und K Eingänge sind über den bekannten Schutzwiderstand von 1 kW an die Kontaktplättchen geführt. Außerdem sind beide Eingänge hochohmig mit  $V_{DD}$  verbunden, wir sparen dadurch Bausteine und Platz bei aufwendigen Schaltungen. Der Takteingang CLK ist nur mit dem Schutzwiderstand versehen, er wird immer angeschlossen und braucht deswegen nicht hochohmig festgelegt zu werden; er ist auf zwei Kontaktplättchen geführt. Der Rücksetzeingang R hat ebenfalls den Schutzwiderstand und ist hochohmig mit  $V_{SS}$  verbunden. Der Setzeingang S wird aus Mangel an Kontaktplättchen nicht benutzt und liegt an  $V_{SS}$ . Die Leuchtdiode leuchtet, wenn  $\bar{Q} = »0«$ , also  $Q = »1«$  ist. Wir bauen den Zähler bis vier aus dem vorherigen Versuch mit zwei Flipflops auf. Der Takt wird aus der entprellten Taste genommen, der eine »normale« Taste vorgeschaltet ist. Er wird zunächst auf die erste Zählstufe gegeben. Die Rücksetzeingänge können über eine weitere Taste mit  $V_{DD}$  verbunden werden.

Wir wissen bereits, dass wenn J und K an »1« liegen, die Zählerstufe beim Takten hin- und herschaltet. Das ist genau das, was wir für die erste Stufe brauchen: Beide Eingänge bleiben also unbeschaltet und liegen damit auf »1«. Was benötigt nun aber die zweite Stufe als Eingangssignal, damit sie weiter

teilt? Sie soll schalten, wenn die erste von »1« nach »0« geht. Da liegt es nahe, den  $\bar{Q}0$  - Ausgang der ersten Stufe auf den CLK -Eingang der zweiten zu legen und ebenfalls ihre J und K Eingänge unbeschaltet zu lassen.

Leuchtet beim Einschalten der Versorgungsspannung bereits eine Leuchtdiode, so betätigen wir die Rücksetztaste und stellen die Grundstellung her. Diese Taste muss nicht entprellt sein, da nach dem ersten Impuls alles rückgesetzt ist und weitere Impulse nichts mehr bewirken. Beim Drücken der CLK - Taste sehen wir, dass unser Zähler tatsächlich so zählt, wie wir das wollten. Hält man die CLK - Taste gedrückt und betätigt die vorgeschaltete »normale« Taste, so scheint der Zähler nicht richtig zu arbeiten. Das täuscht jedoch, er zählt nur die vielen Impulse der nicht entprellten Taste und wir erkennen, dass eine Entprellung unbedingt nötig ist.

Obwohl unser Zähler wunschgemäß zählt, hat er immer noch den Nachteil, dass bei mehreren Zählstufen diese nacheinander schalten, er damit asynchron arbeitet und sein Zählerstand insbesondere bei hoher Stufenanzahl und Taktfrequenz schlecht ablesbar ist. Im nächsten Versuch werden wir deswegen den SYNCHRONZÄHLER kennen lernen, bei dem die Eigenschaften des JK - Master Slave - Flipflops erst so richtig ausgeschöpft werden.

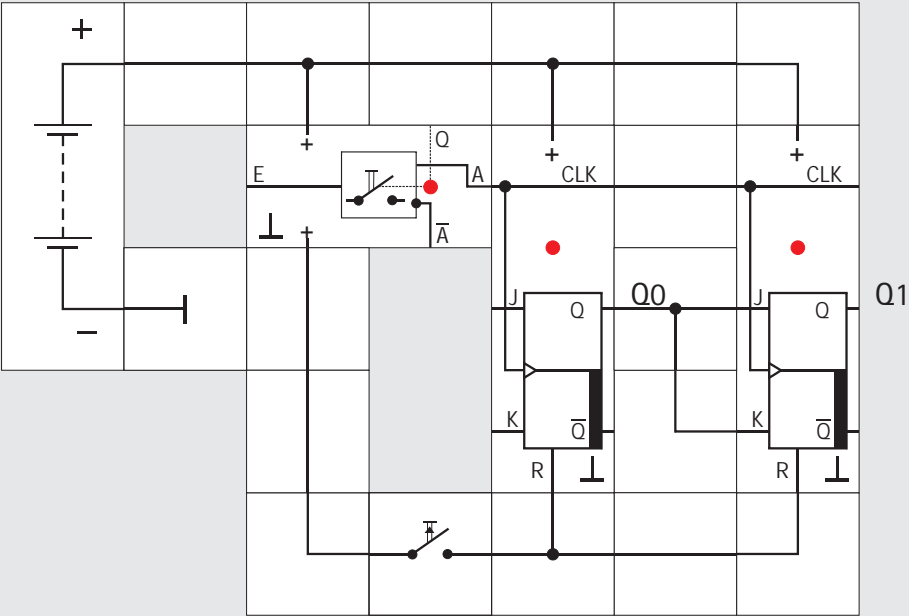
## Versuch 55

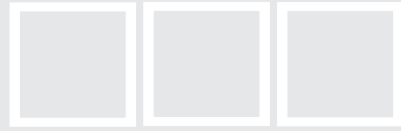
### Binärzähler aus

### JK - Master -Slave - Flipflops

Kern unseres Funktionsbausteins ist der integrierte CMOS Schaltkreis CD4027; er enthält zwei Flipflops, deren Eingänge und Ausgänge jeweils paral-

56





## Versuch 56 Synchroner Binärzähler aus JK - Master -Slave - Flipflops

Wir wollen nun einen Zähler aufbauen, bei dem beide Zählstufen (und alle möglichen folgenden) zur gleichen Zeit, also synchron, schalten. Offensichtlich muss dazu der Takt CLK an alle Kippstufen parallel geführt werden. Die erste Stufe tat im vorherigen Versuch bereits genau das, was wir von ihr erwarteten: Sie teilte den Takt durch zwei. Wir lassen deswegen ihre J und K Eingänge unbeschaltet. Womit beschalten wir aber die J und K Eingänge der zweiten Stufe? Hier hilft die Überlegung weiter, dass diese Stufe immer dann schalten muss, wenn die erste von »1« nach »0« springt, sie also eine »1«

gespeichert hat. Es ist deswegen bestimmt eine gute Idee, den Q(0) Ausgang der ersten Stufe auf die J(1) und K(1) Eingänge der zweiten Stufe zu legen; aus der Wahrheitstafel des JK - Flipflops wissen wir, dass bei dieser Eingangsbeschaltung das Flipflop hin- und herschaltet, die Stufe dagegen nichts tut, wenn eine »0« an J und K liegt. Das aber genau brauchen wir auch.

Mit der Rücksetztaste bringen wir den Zähler nach Anlegen der Versorgungsspannung in die Grundstellung und geben anschließend mit der CLK - Taste Impulse auf den Zähler. Nach dem ersten Impuls leuchtet die LED der ersten Stufe, Q0 ist »1«, der zweite Impuls macht Q1 zu »1« und Q0 zu »0«, beim dritten Impuls ist Q0 = Q1 = »1« und beim vierten schließlich die Ausgangsstellung Q0 = Q1 = »0« wieder erreicht. Unsere Überlegung war also richtig und der synchrone Zähler zählt von 0 bis 3. Zum Schluss des Versuchs noch eine Bemerkung zur Bezeichnungsweise der Zählstufenanschlüsse: Die erste Stufe eines Binärzählers zählt die Impulse mit der Wertigkeit  $2^0$ , die zweite die mit der Wertigkeit  $2^1$ , usw.; wir nennen daher ab jetzt die Ein- und Ausgänge der ersten Stufe J0, K0, Q0, und die der zweiten J1, K1, Q1 usw.

Als nächstes wollen wir einen Zähler mit drei Zählstufen aufbauen.

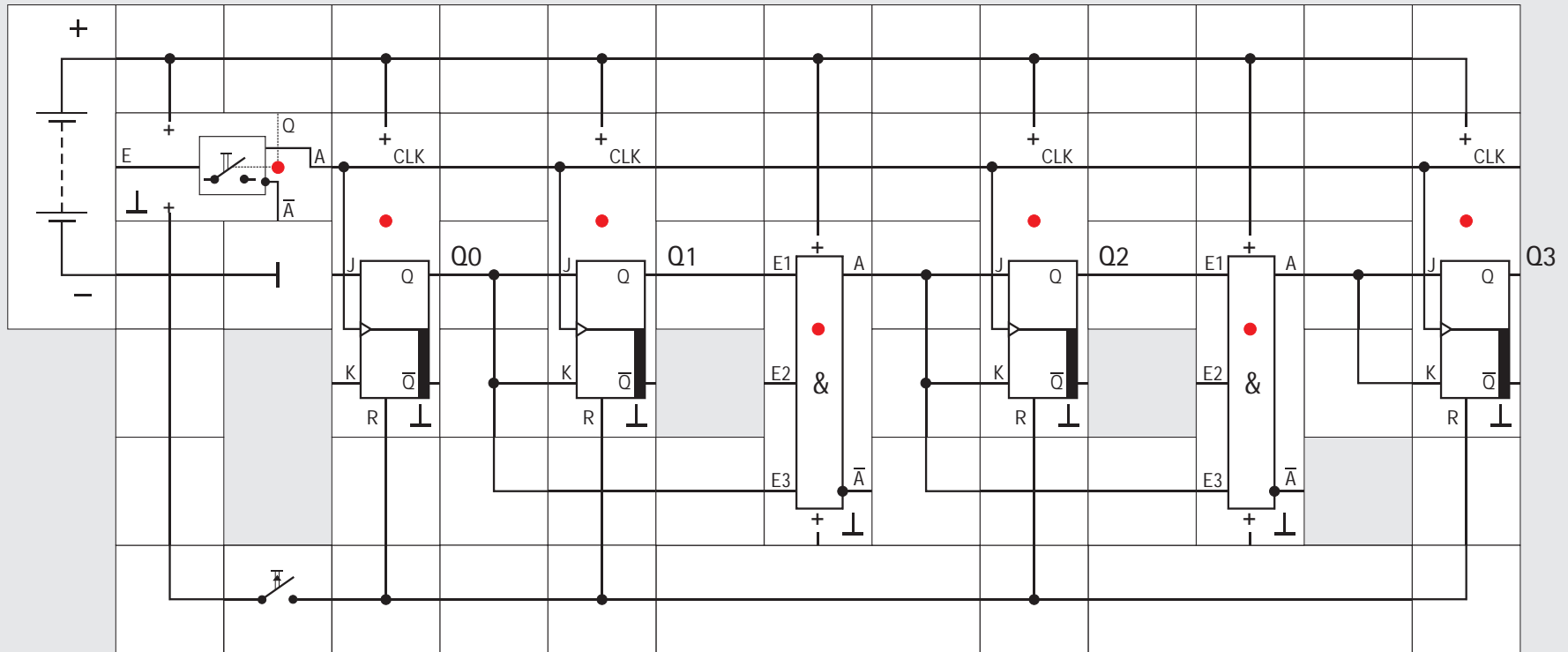




## Versuch 57

### Synchroner modulo-8-Zähler

Der im vorherigen Versuch aufgebaut Zähler soll nun um eine Stufe erweitert werden. Er zählte von 0 bis 3 und wird auch synchroner modulo-4-Zähler genannt. Wir bauen also jetzt einen synchronen modulo-8-Zähler. Die beiden ersten Stufen übernehmen wir unverändert, schließen die dritte an CLK und R an und überlegen, welche Signale sie an J und K benötigt: Die neue Stufe muss immer dann schalten, wenn beide vorhergehenden Stufen eine »1« enthalten, d.h. die UND -Verknüpfung von Q0 und Q1 ist das geeignete Signal; es passt auch für alle anderen Zählzustände: dort ist es »0« und die dritte Stufe soll auch nichts machen. Wir können also dieses Signal auf J2 und K2 geben. Nach Anlegen der Versorgungsspannung erhalten wir die Grundstellung durch Betätigen der Rücksetztaste und können uns anschließend mit Hilfe der LEDs davon überzeugen, dass der Zähler wie gewünscht arbeitet.



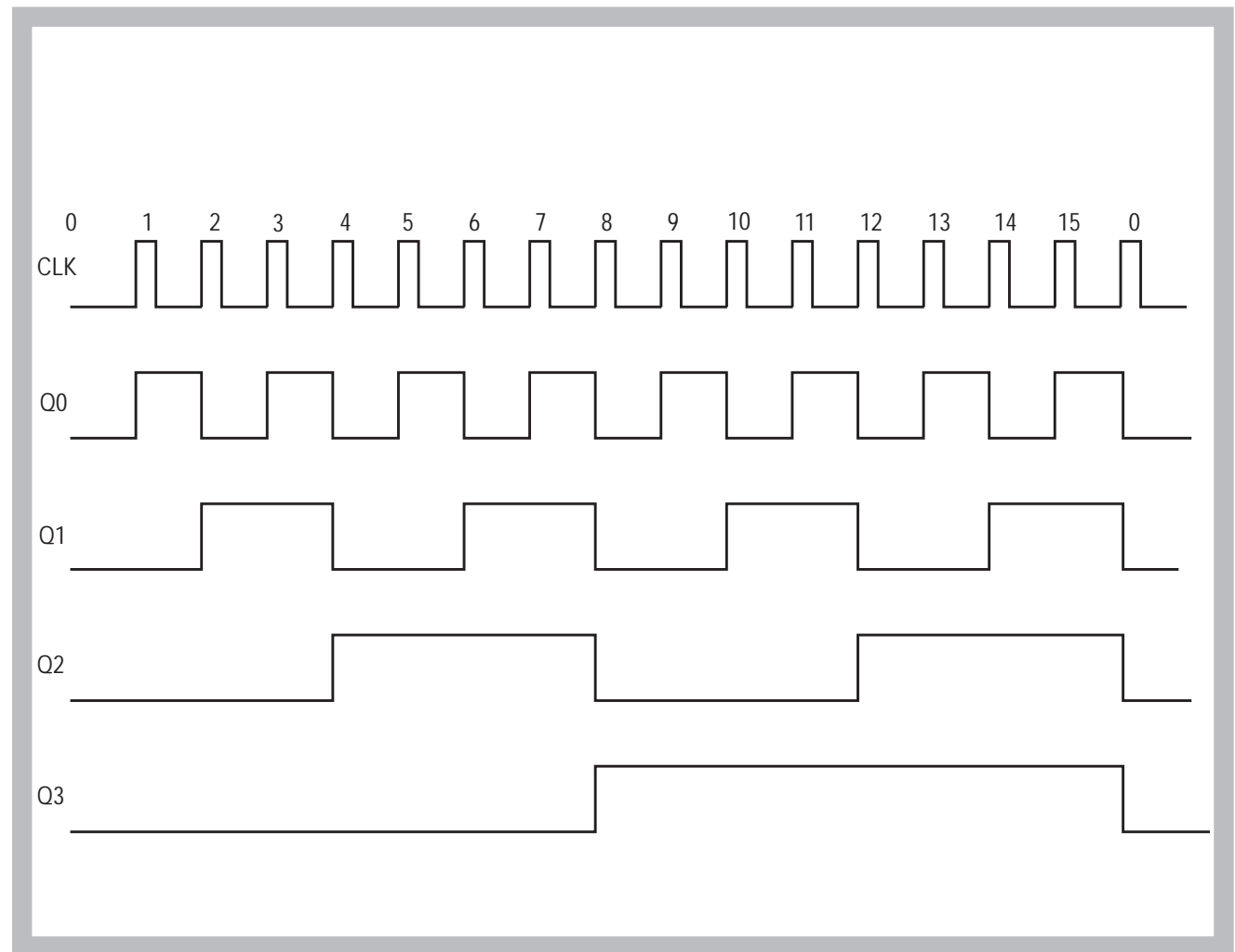


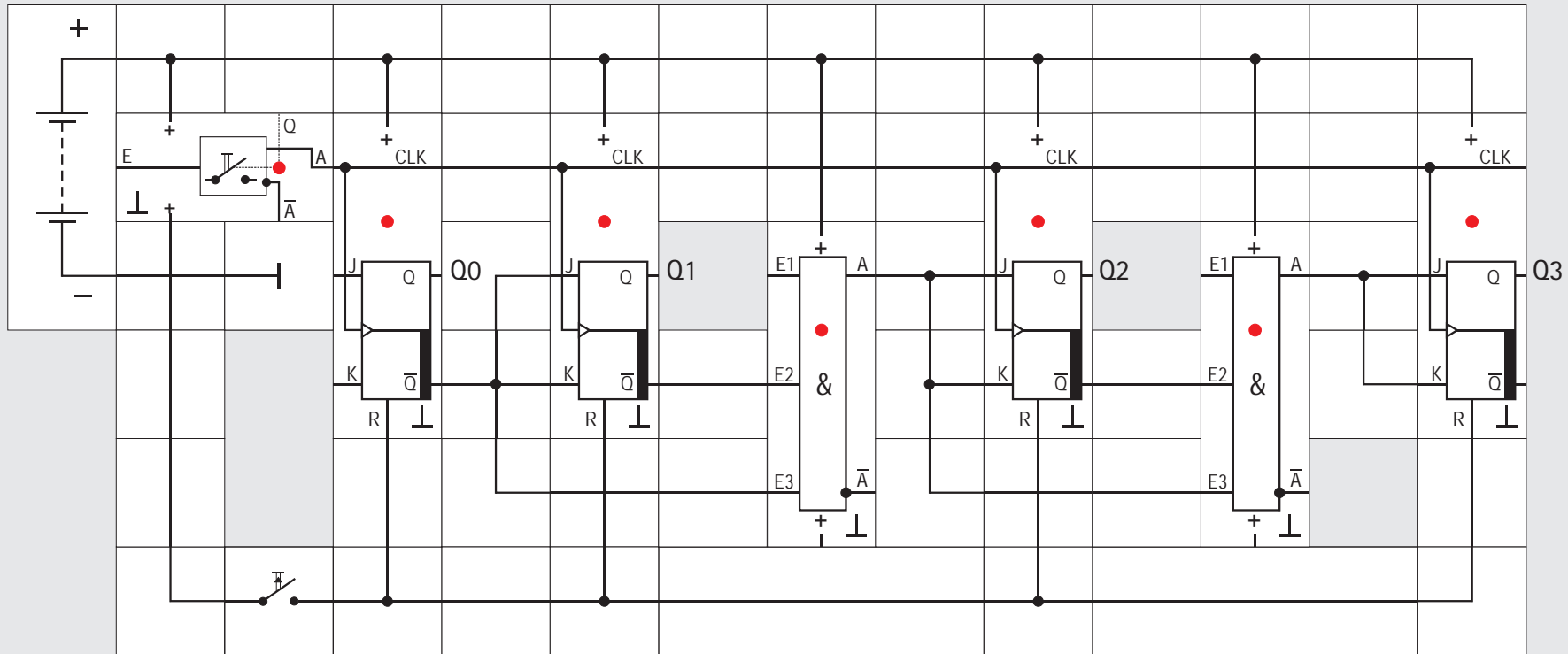
## Versuch 58

### Synchroner modulo-16-Zähler

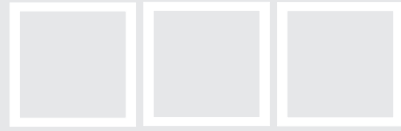
Wir haben herausgefunden, wie man leicht synchrone modulo- $2^n$ -Zähler aufbaut und wollen nun noch die vierte Zählstufe anschließen, so dass wir einen Zähler bis 15 haben. Für deren J und K Eingänge benötigen wir wieder die UND-Verknüpfung der Q-Ausgänge aller vorangegangener Stufen. Q0 und Q1 haben wir bereits im ersten AND/NAND-Baustein verknüpft, weil wir es für J2 und K2 brauchten; wir können nun dieses Signal in einem weiteren AND/NAND-Baustein mit Q2 verknüpfen und erhalten dann das Signal für J3 und K3. Das ist sehr aufwandsarm und wir könnten für noch längere Zähler mit diesem Muster fortfahren. Nachteilig ist dabei jedoch, dass bei längeren Zählketten die Summe der Signallaufzeiten durch die Verknüpfungsglieder immer größer wird und die maximal mögliche Zählfrequenz herabgesetzt wird. Deswegen werden in solchen Anwendungsfällen die benötigten Signale für die J und K Eingänge in parallelen Strukturen gewonnen.

Für den vorliegenden Zähler ergibt sich das nebenstehende Impulsdiagramm.





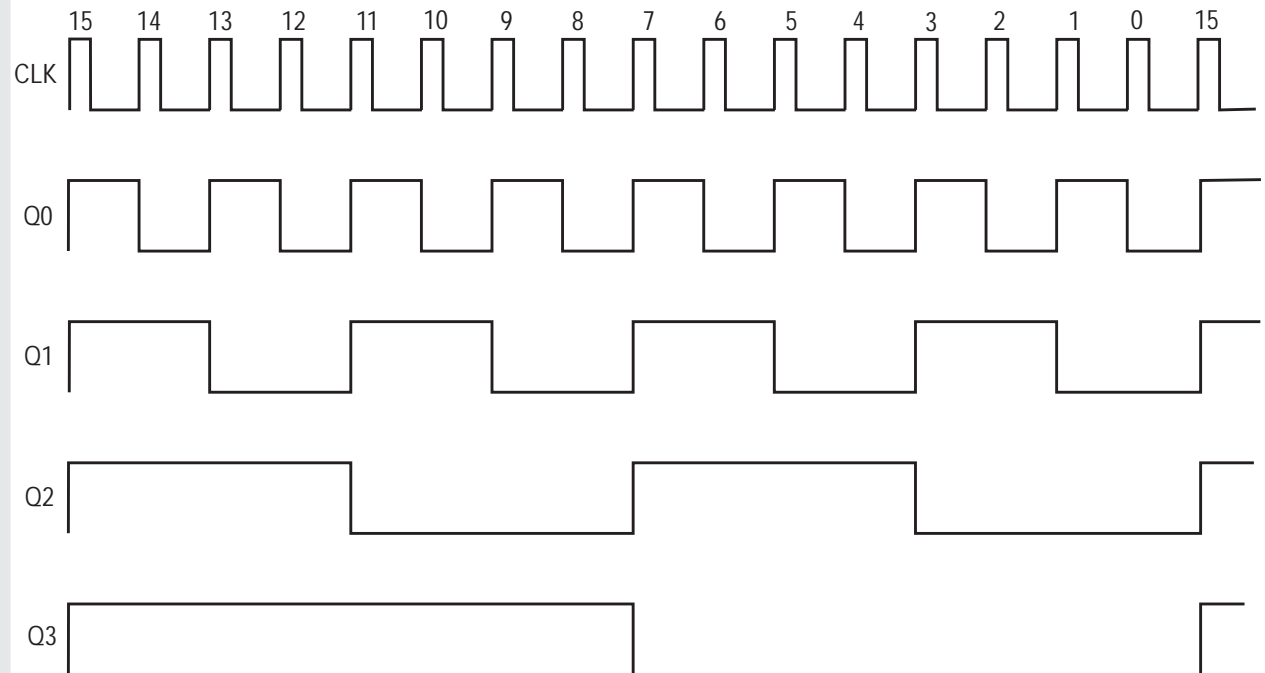




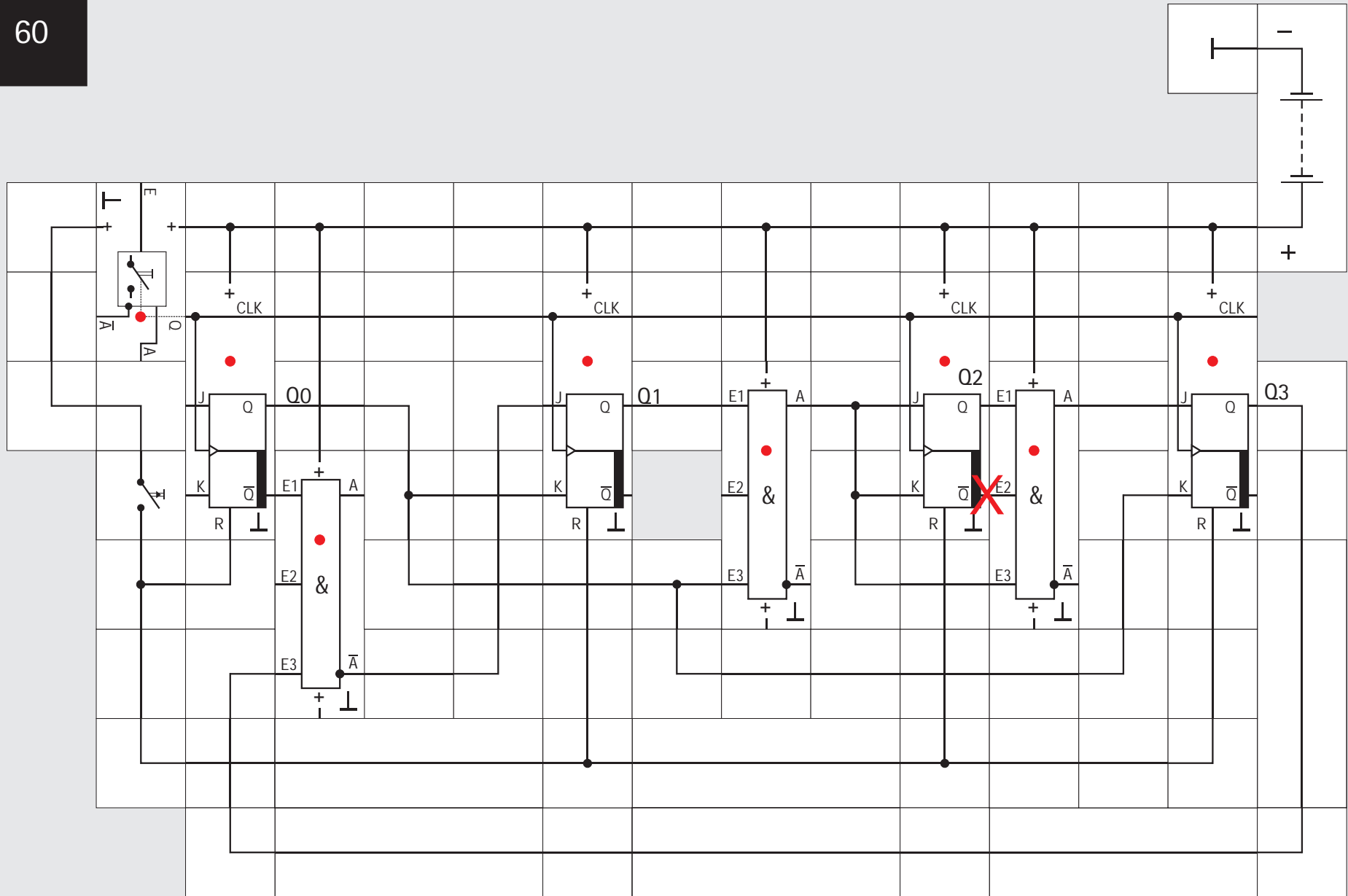
## Versuch 59

### Synchroner modulo-16-Rückwärts-Zähler

Wir wollen nun versuchen, die Struktur für einen modulo- $2^n$ -Rückwärtszähler zu finden. Dazu betrachten wir das nebenstehende Impulsdiagramm. Nach dem Rücksetzen geben alle Zählstufen eine »0« ab; wenn der Zähler rückwärts zählen soll, müssen nach dem ersten Zählimpuls (Nr.15) alle Stufen auf »1« schalten, die weiteren 7 Impulse dürfen Q3 nicht bewegen, die nächsten 3 dürfen Q2 und der nächste darf Q1 nicht bewegen. Für J3 und K3 könnte die UND - Verknüpfung aus  $\overline{Q0}$ ,  $\overline{Q1}$  und  $\overline{Q2}$  dafür sorgen, dass nur die Impulse Nr.15 und Nr.7 etwas bewirken. Wir vermuten, dass dieser Zähler ähnlich strukturiert ist wie der entsprechende Vorwärtszähler und schließen weiter, dass J2 und K2 mit der UND - Verknüpfung aus Q0 und Q1 beschaltet werden müssen, usw. Nach dem Aufbau des Zählers finden wir unsere Vermutung bestätigt: Der Zähler zählt rückwärts.



60





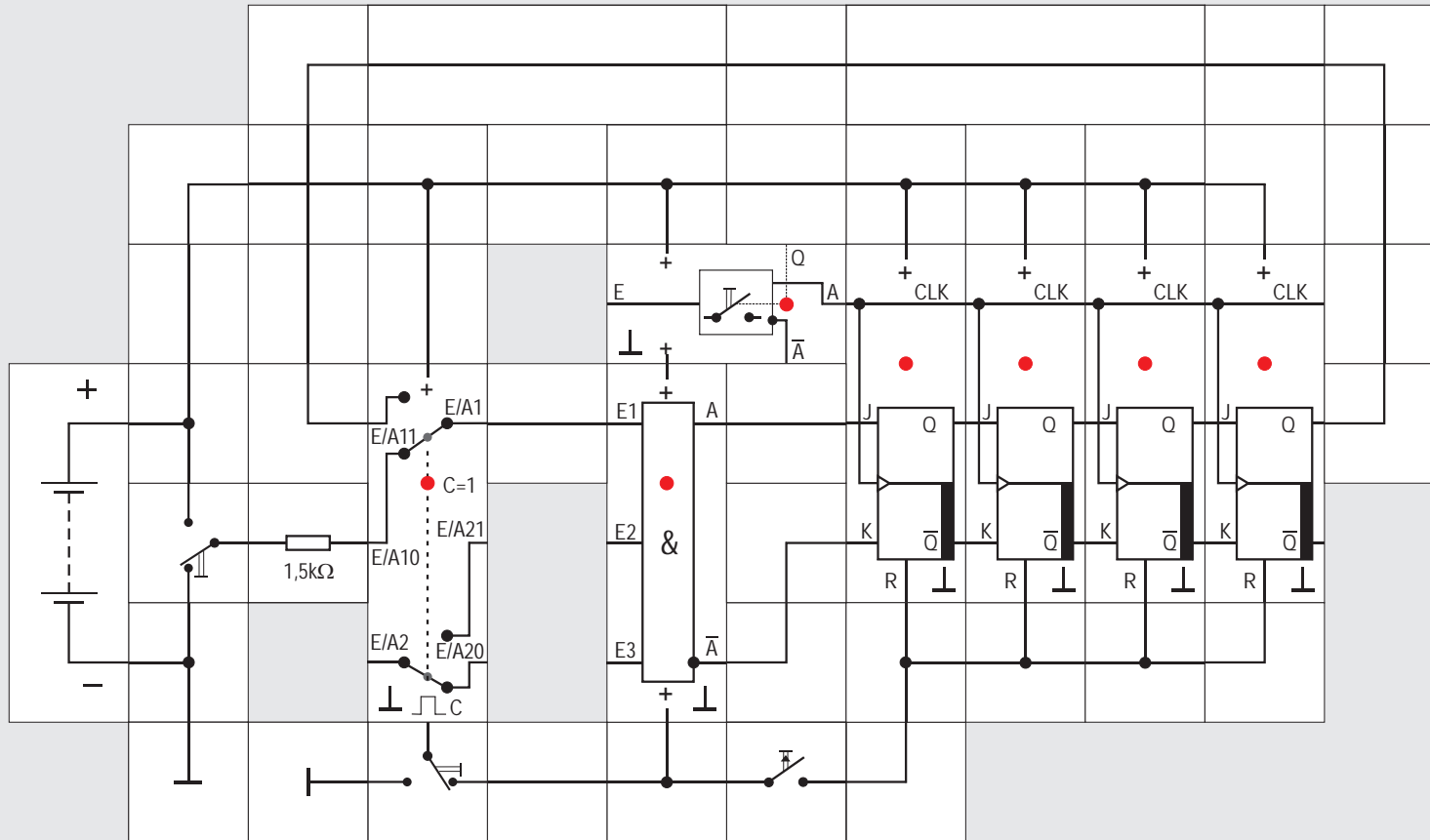
hen; das geschah durch etwas Raten und Probieren. Natürlich ist das keine effektive Vorgehensweise, Zähler zu entwerfen. Es gibt dafür bessere Methoden, die in dem LECTRON - Ausbausystem »Zählerentwurf und Schrittmotor« ausführlich vorgestellt werden. Mit einem graphischen Hilfsmittel, den KARNAUGH - TAFELN, kann man leicht die erforderlichen Verknüpfungen für die J und K Eingänge der einzelnen Zählstufen ermitteln. Für einen Dekadenzähler, der große praktische Bedeutung hat, liefert das Verfahren z. B. die folgenden Verknüpfungen:

$$\begin{array}{ll} J_0 = 1 & K_0 = 1 \\ J_1 = Q_0 \wedge \overline{Q_3} & K_1 = Q_0 \\ J_2 = Q_0 \wedge Q_1 & K_2 = Q_0 \wedge Q_1 \\ J_3 = Q_0 \wedge Q_1 \wedge Q_2 & K_3 = Q_0 \end{array}$$

Beim Aufbau des Zählers haben wir die  $J_1$  - Verknüpfung  $Q_0 \wedge \overline{Q_3}$  in eine NOR - Verknüpfung aus  $\overline{Q_0}$  und  $Q_3$  umgewandelt, da sich die Bausteine dann günstiger anordnen und sich die Verbindungen platzsparender legen lassen. Aus Platzgründen mussten wir auch die mit X bezeichnete Verbindung am  $\overline{Q_2}$  - Ausgang mit einem Stückchen Papier gegen den E2 - Eingang des NAND - Bausteins isolieren; wir sparen dadurch dringend benötigten Platz und Bausteine auf der Platte.

## Versuch 60 Synchroner Dekadenzähler

Wir haben bis jetzt herausgefunden, wie die Strukturen von modulo- $2^n$ -Vor/Rückwärtszählern ausse-

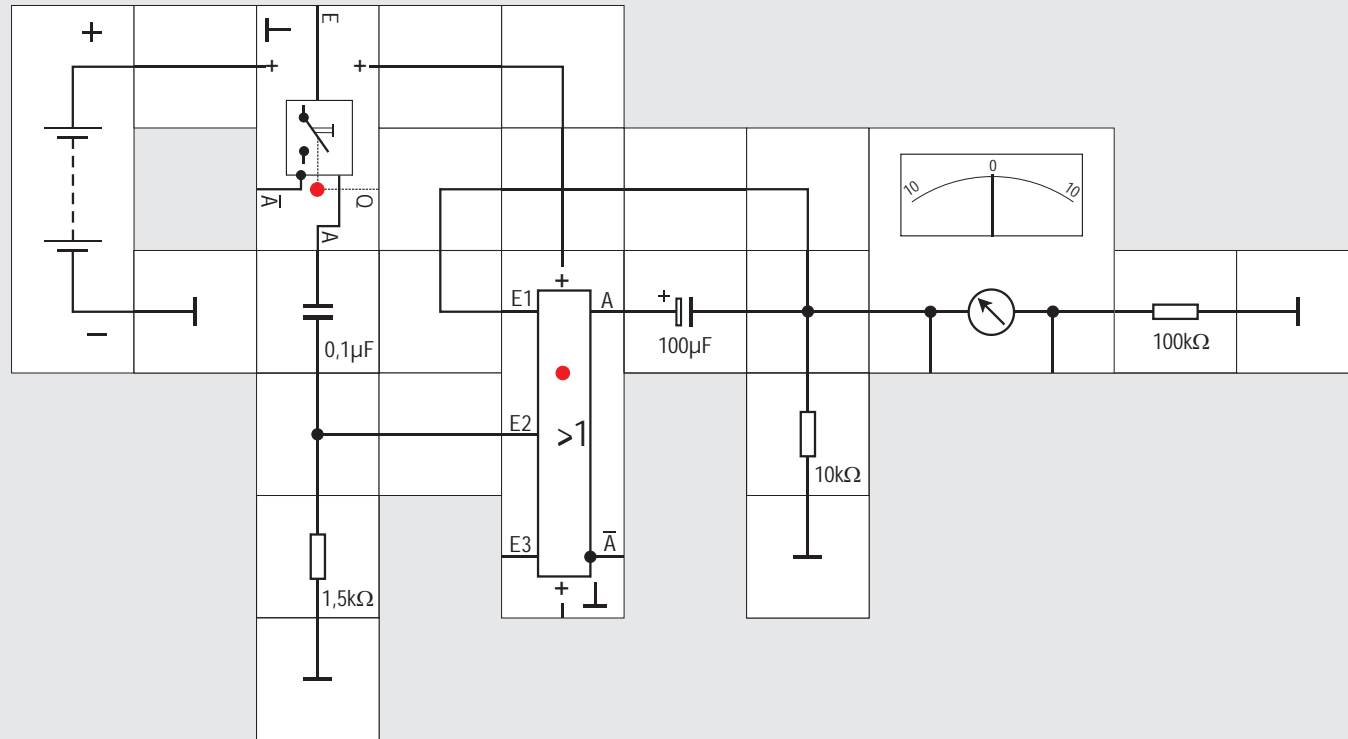




## Versuch 61

### Vierstufiges Schieberegister

Neben der Verwendung in Zählern ist ein weiteres Anwendungsgebiet von JK - Master - Slave Flipflops der Aufbau von Schieberegistern. Wir können mit unseren Flipflops ein vierstufiges Schieberegister nach folgendem Plan zusammenlegen. Das erste Flipflop in der Kette ist als D - Flipflop geschaltet; ein D - Flipflop entsteht aus einem JK - Flipflop, wenn man  $K = \bar{J}$  macht. Es übernimmt auf Tastendruck die Information vom Ausgang E/A1 des Transmission Gates, dessen zweiter Schalter nicht benötigt wird. Abhängig von der Stellung des unteren Umschalters kommt die Information vom linken Umschalter oder vom Ausgang der vierten Stufe in die erste Stufe; im letzteren Fall ist das Schieberegister als Ringschieberegister geschaltet. Nach Einschalten der Versorgungsspannung können auf Tastendruck alle Registerzellen rückgesetzt werden. Mit dem linken Umschalter bestimmt man die Eingangsinformation, die in das Register mit der entprellten Taste geschoben wird. Die Leuchtdioden zeigen an, wie in den verschiedenen Arbeitsweisen die Information durch die Zellen wandert.





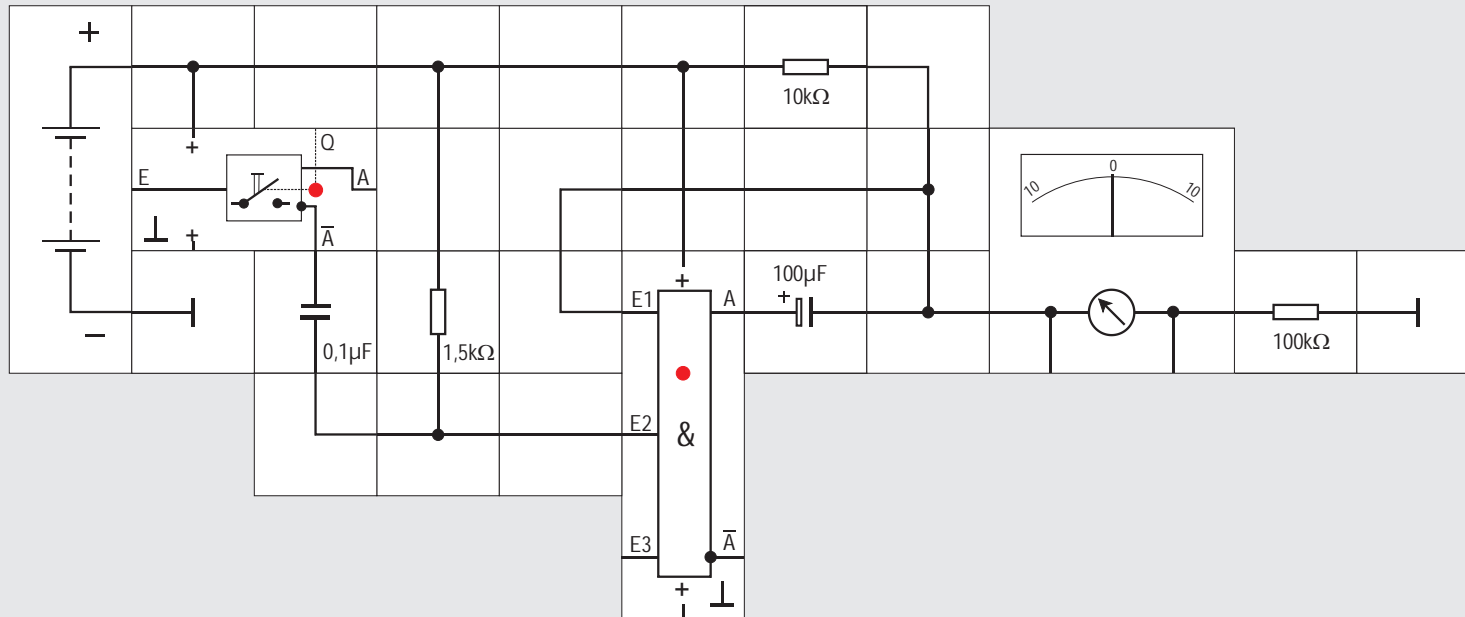
## Versuch 62 Monostabile Kippstufe mit OR/NOR - Funktionsbaustein

In Versuch 39 haben wir gezeigt, wie durch Koppeln jeweils des Ausgangs eines Inverters mit dem Eingang eines weiteren Inverters eine Schaltung entsteht, die zwei stabile Zustände kennt; diese Schaltung kann als Speicherzelle genutzt werden. Nun muss man nicht unbedingt zwei galvanische Kopplungen nehmen, sondern kann auch eine Kopplung kapazitiv mit einem Kondensator ausführen. Man erhält dann eine monostabile Kippstufe. Obwohl die digitalen Schaltkreise nicht primär dafür gebaut sind, kann man sie doch auch zum Aufbau derartiger Schaltungen verwenden. Wir nehmen dazu den OR/NOR - Funktionsbaustein und erinnern uns daran, dass er bereits zwei invertierende Schaltelemente enthält: Ein NOR mit drei Eingängen und ein nachgeschaltetes NOR als Inverter zur Bildung der OR - Funktion. Die direkte Kopplung zwischen den beiden Verknüpfungen ist intern und nicht mehr auftrennbar. Deswegen kommt der  $100\mu\text{F}$  Kondensator zwischen A und E1. Ein  $10\text{ k}\Omega$  Widerstand nach Masse vervollständigt das RC - Glied. Das zwei-

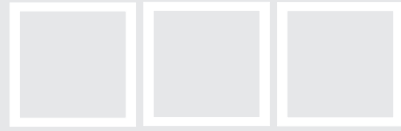
te RC - Glied ( $0,1\mu\text{F} / 1,5\text{ k}\Omega$ ) ist dem Eingang vorzuschalten, wenn die Impulsdauer  $t_E$  des Eingangsimpulses größer ist als die Impulsdauer  $t_A$  des von der Kippstufe erzeugten Ausgangsimpulses. Im Ruhezustand muss der Eingang E2 auf »0« liegen, der  $10\text{ k}\Omega$  Widerstand hält E1 auf »0«, so dass auch  $A = \text{»0«}$  ist. Durch einen kurzen »1« - Impuls am Eingang E2 geht der Ausgang A sofort auch auf »1«, die über die kapazitive Rückführung an E1 gelangt und so den (instabilen) Zustand zunächst aufrecht erhält, auch wenn E2 nun wieder auf »0« zurückkehrt. Die Spannung am Fußpunkt des Kondensators springt zunächst auf einen hohen positiven Wert, sinkt dann langsam infolge der Kondensatoraufladung bis die Schaltschwelle erreicht wird und springt dann auf einen leicht negativen Wert, bis sie schließlich auf Null ankommt. Am Messinstrument ist dieser Vorgang gut zu erkennen.

Durch die Hochohmigkeit der Schaltglieder ist die Impulsdauer  $t_A$  normalerweise in weiten Grenzen variierbar, bei unseren Bausteinen durch die Schutzbeschaltung jedoch eingengt. Der interne  $47\text{ k}\Omega$  Widerstand gegen Masse kann nicht überschritten werden, der externe  $10\text{ k}\Omega$  Widerstand ist deswegen auch nicht unbedingt nötig, wie man durch einen Versuch schnell nachweist.

63





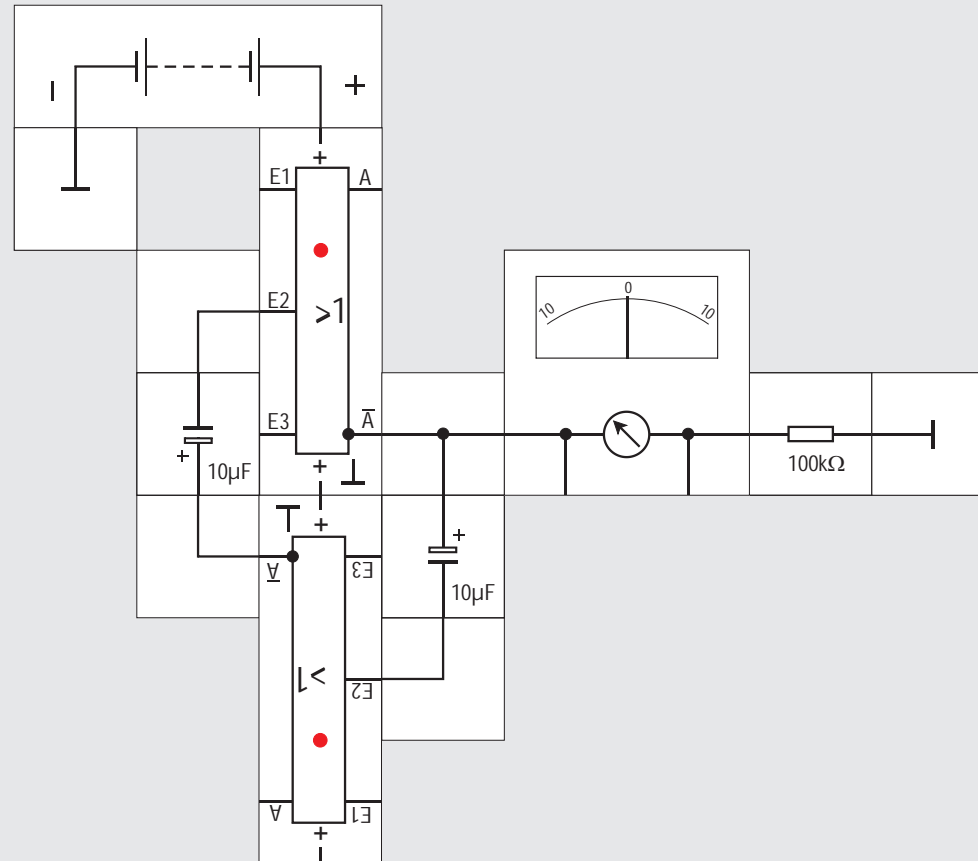


## Versuch 63

### Monostabile Kippstufe mit AND/NAND - Funktionsbaustein

Der Versuch lässt sich auch mit einem AND/NAND - Baustein aufbauen, dann muss der auslösende Impuls eine fallende Flanke haben und die Widerstände müssen gegen Versorgungsspannung geschaltet werden.

64

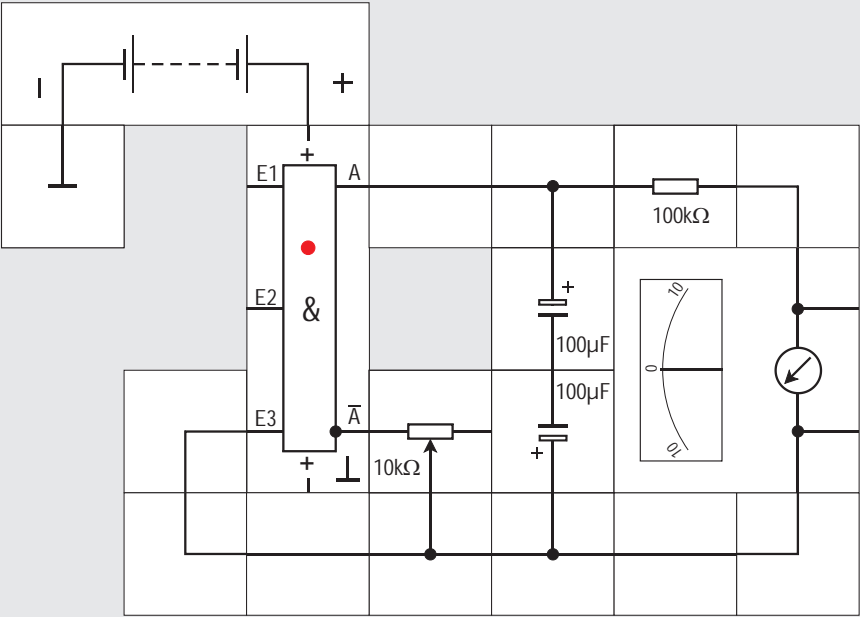




## Versuch 64 Astabiler Multivibrator aus OR/NOR - Funktionsbausteinen

Sind bei unserer Schaltung aus Versuch 62 beide Rückführungen kapazitiv, so hat die Schaltung keinen stabilen Zustand, sie schwingt hin und her. Zum Aufbau müssen wir zwei OR/NOR - Bausteine verwenden, da wir die internen Verbindungen nicht auftrennen können. Auf Widerstände gegen Masse verzichten wir von vornherein, die internen  $47\text{ k}\Omega$  Widerstände erfüllen den gleichen Zweck. Nach Anlegen der Spannung schwingt die Schaltung von selbst an, wie wir an den LEDs erkennen können. Das Messinstrument zeigt uns wieder die Lade- und Entladevorgänge am Kondensator an. Auch diese Schaltung lässt sich mit zwei AND / NAND - Bausteinen aufbauen.

65

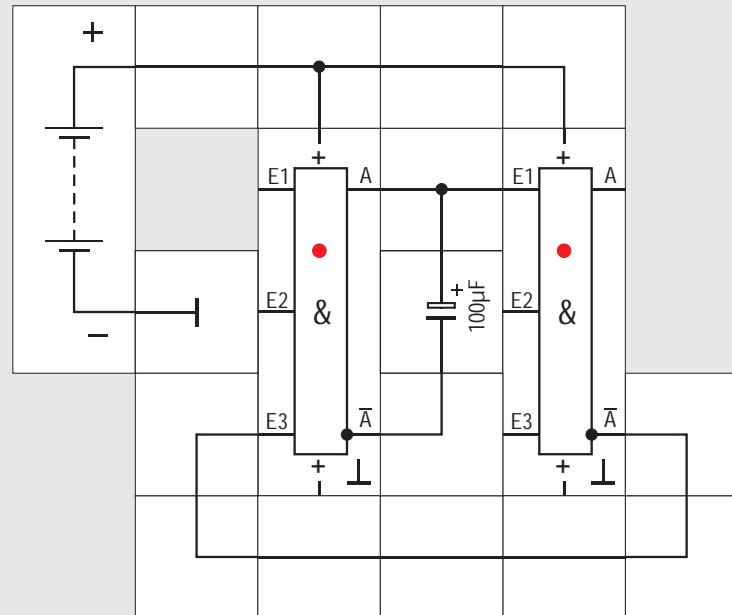




## Versuch 65

### Einfacher astabiler Multivibrator

Es ist auch möglich, mit nur einem Kondensator und einem Widerstand einen astabilen Multivibrator aufzubauen. Im Prinzip besteht diese Schaltungsvariante aus einem Inverter, dessen Ausgang  $\bar{A}$  und Eingang E3 über den Widerstand verbunden sind, gefolgt von einem zweiten Inverter. Sein Ausgang A ist über den Kondensator mit dem Eingang E3 des ersten Inverters verbunden. Das Instrument zeigt die Spannung über dem Kondensator an. Wir erkennen, dass für ihn ein bipolarer Typ erforderlich ist, weswegen wir zwei Elektrolytkondensatoren gegeneinander schalten müssen. Die beiden verbundenen Inverter liefert uns ein AND/NAND - Funktionsbaustein. Wichtig ist bei dieser Schaltung, dass ein Widerstand zwischen Kondensator und dem Eingang E3 liegt, sonst würden die IC-internen Schutzdioden von Masse und gegen Versorgungsspannung die Auf- und Entladezeiten des Kondensators stark beeinflussen. Dieser Widerstand (1 k $\Omega$ ) ist aber in dem Funktionsbaustein bereits enthalten.

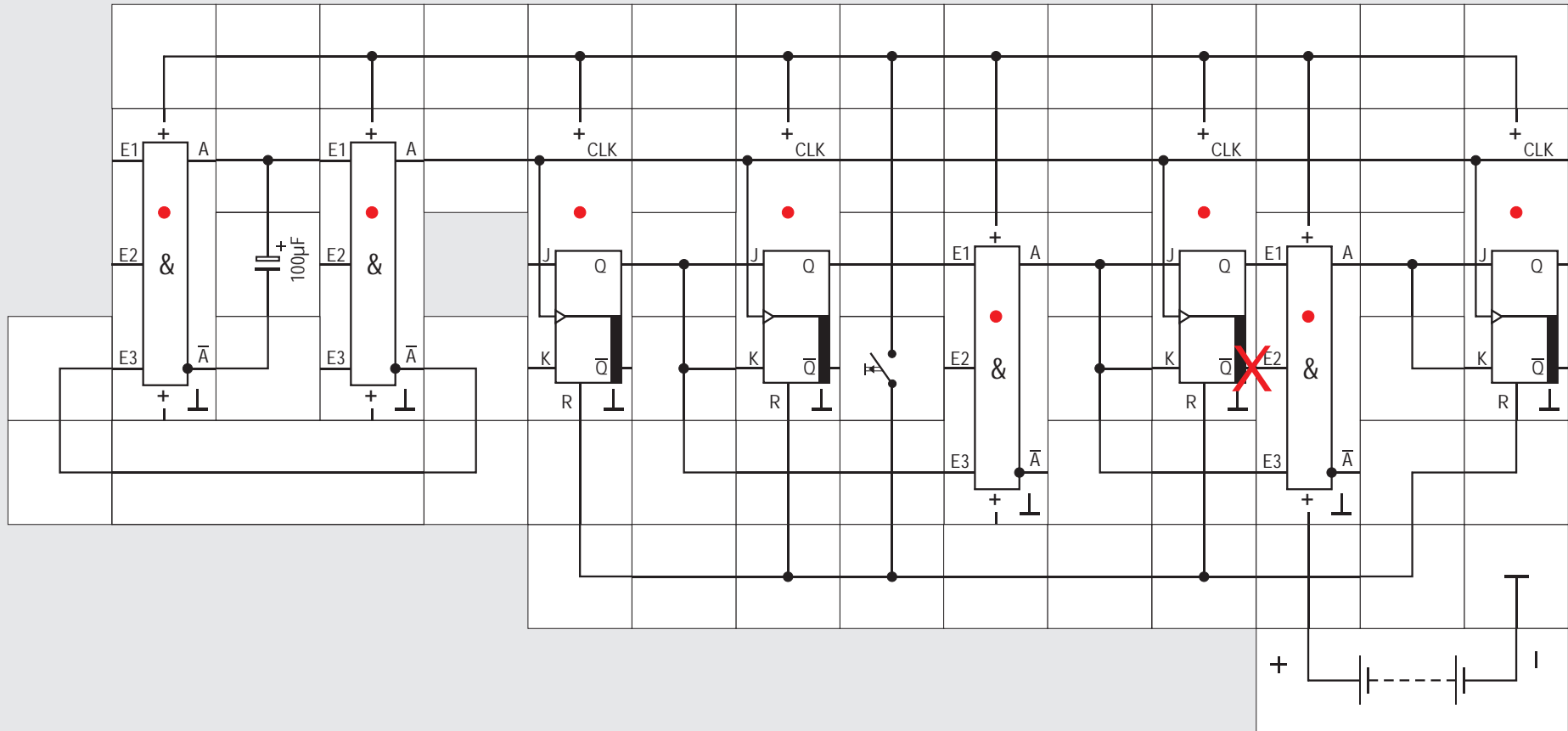




## Versuch 66 Ringoszillator

Zum Abschluss der astabilen Multivibratorschaltungen wollen wir noch den RINGOSZILLATOR vorstellen. Er besteht im Wesentlichen aus drei Invertern, die im Ring geschaltet sind. In dieser Konfiguration kann sich kein stabiler Signalzustand einstellen, die Schaltung beginnt zu schwingen, und zwar mit hoher Frequenz. Bestimmend für die Frequenz sind hauptsächlich die relativ kleinen Signaldurchlaufzeiten der Bausteine. Zum Aufbau der Schaltung verwenden wir aus einem AND/NAND - Funktionsbaustein die beiden Inverter und aus dem anderen den dritten. Legen wir über einen Inverter von seinem Ausgang zu seinem Eingang einen Kondensator mit großer Kapazität, z. B. unseren  $100\mu\text{F}$  Kondensator, so wird die Schwingfrequenz erheblich kleiner, da jedes Mal der Kondensator über die p- und n-Kanal Transistoren umgeladen werden muss; es ergibt sich eine Frequenz von circa 20 Hz, die immer noch zu schnell für unser Auge ist, beide Leuchtdioden scheinen ständig zu leuchten. Legen wir noch den zweiten  $100\mu\text{F}$  Kondensator parallel, sind unsere Chancen besser, beim flüchtigen Hinsehen ein schnelles Blinken der Leuchtdioden zu erkennen.

67



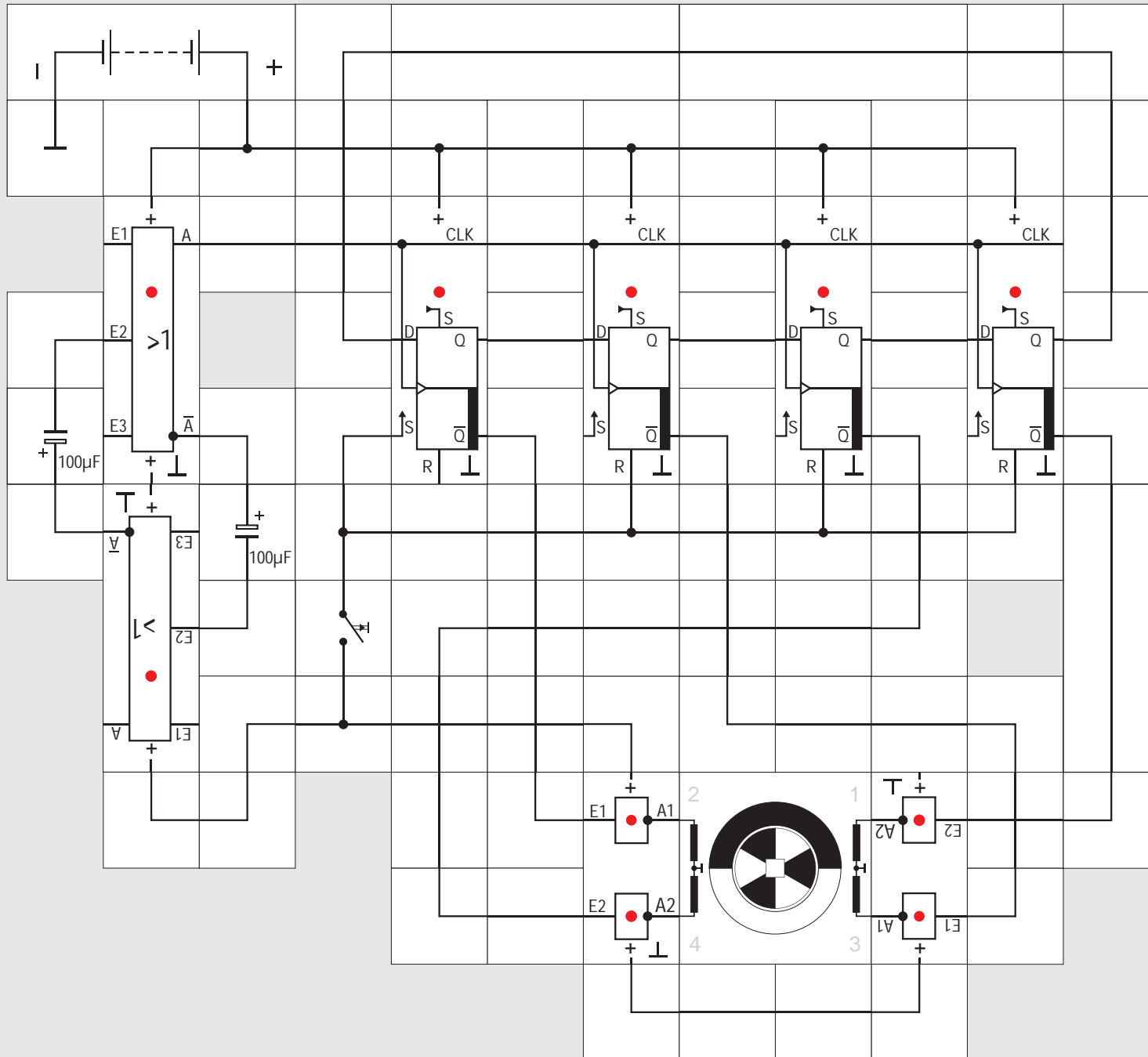


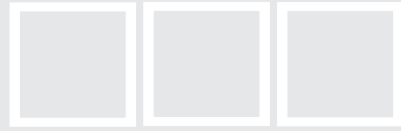


## Versuch 67

### Ringoszillator mit modulo-16-Zähler

Um zu zeigen, dass tatsächlich Impulse erzeugt werden, können wir den Oszillator über den vierten bisher freien Inverter an unseren modulo-16-Zähler anschließen. Damit die gesamte Schaltung auf die Aufbauplatte passt, ist es nötig, bei der vorletzten Zählstufe wieder mit einem Stückchen Papier den  $\overline{Q_2}$  - Ausgang vom E2 - Eingang des folgenden AND/NAND - Funktionsbausteins zu trennen. Der Zähler teilt durch 16 und die Leuchtdiode der letzten Stufe wird ungefähr im Sekundentakt aufleuchten. Der Taster dient dazu, den Zähler in die Grundstellung zu bringen. Wir können jetzt statt des  $100\mu\text{F}$  - Kondensators auch einmal kleinere Kapazitäten verwenden und werden sehen, dass die Frequenz dann tatsächlich höher wird.





# Lectron

Wie geht es weiter?

## Ausbau-System Zähler und Schrittmotor

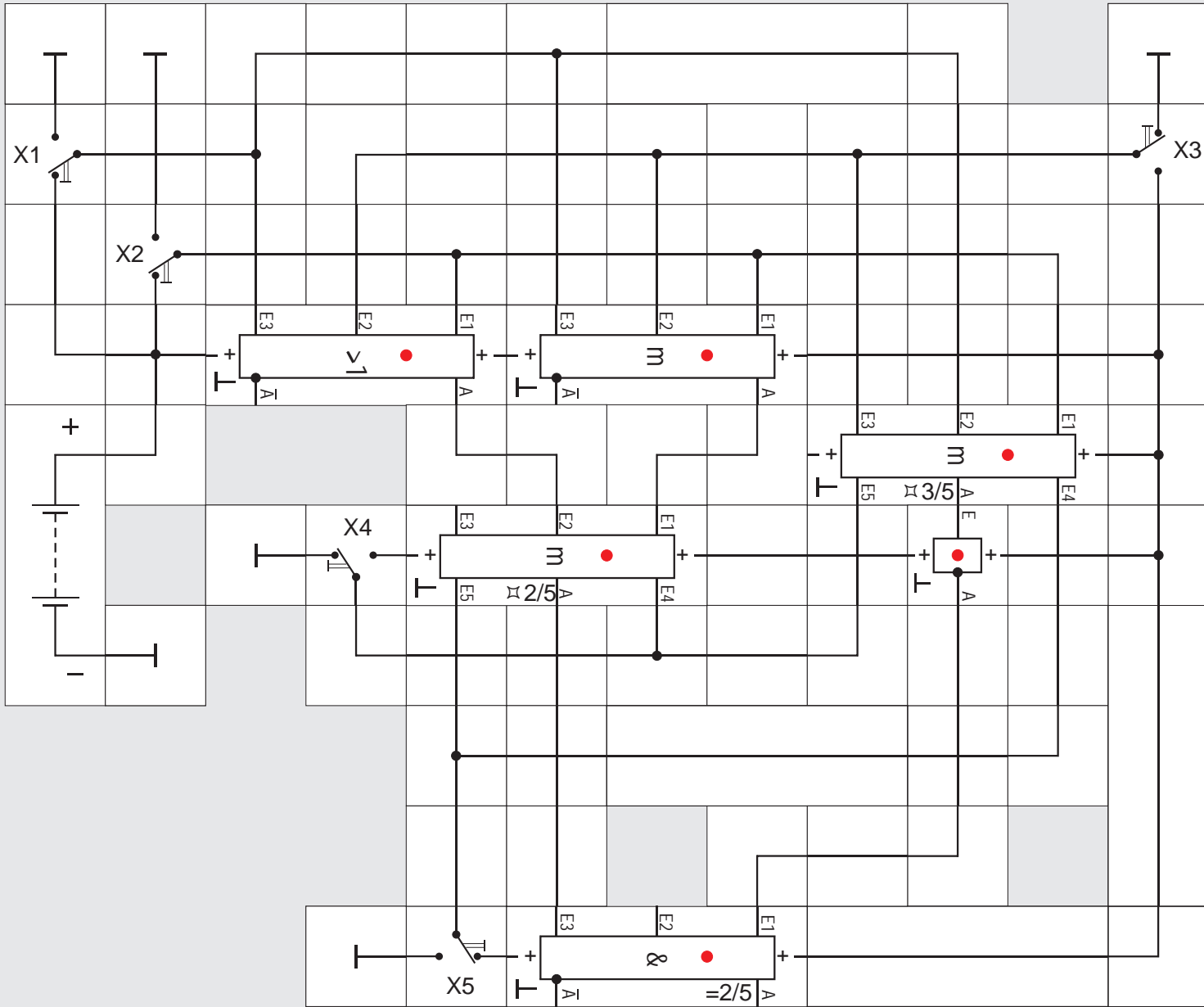
Mit Versuch 67 sind wir am Ende des Lectron Kurses »Digitaltechnik« angekommen. Wir sind von den einfachsten logischen Verknüpfungen über Speicherzellen zu den verschiedenen Flipfloptypen gelangt und wissen nun, wie man Zähler und Schieberegis-

ter aus ihnen aufbaut, auch wenn wir manchmal etwas intuitiv dabei vorgegangen sind. Wer gerne wissen möchte, wie man zu einem konkreten Anwendungsfall einen passenden Zähler oder Teiler konstruiert, dem sei das Ausbausystem »Zähler und Schrittmotor« (Bestell-Nr.1008 ) empfohlen. In 43 Versuchen vermittelt es den systematischen Entwurf von Zählern. Mit Hilfe von Karnaugh - Tafeln und Zustandsdiagrammen entwickelt man die nötigen Verknüpfungen der einzelnen Stufen und baut anschließend daraus synchrone oder asynchrone Zähler oder einfache Teiler auf.

Genauso wie man von Grund auf eine Ampelsteuerung entwickelt, findet man auch geeignete Schaltungen zur Ansteuerung eines Schrittmotors; das ist ein Motor, der in vielen modernen Geräten, wie Scanner, CD-Spieler, usw. vorkommt, und dessen Eigenschaften nach Durchführen der Experimente kein Geheimnis mehr sind. Das Aufbaubeispiel zeigt den Schrittmotor mit einer Ansteuerschaltung, die ihn im so genannten Vollschrittbetrieb arbeiten lässt.

Das Ausbau - System enthält neben dem Schrittmotor und sehr vielen Verbindungselementen vier Funktionsbausteine D - Flipflops, zwei duale Leistungsinverter und einen elektronischen Polwender.

31





## Ausbau-System Schwellwert- und Majoritätslogik

Ein weiteres von der Theorie her anspruchsvolles Ausbausystem zu »Digitaltechnik« ist »Schwellwert- und Majoritätslogik« (Bestell-Nr.1013 ). Wir haben mit »Digitaltechnik« gesehen, dass logische Verknüpfungen von Signalen mit NAND - und NOR - Bausteinen durchgeführt werden, wobei das Ergebnis allgemein davon abhängt, an welchem Eingang welches Signal liegt. Nun gibt es auch Aufgabenstellungen, bei denen das Ausgangssignal davon abhängig sein soll, wie viele 1 - Signale an

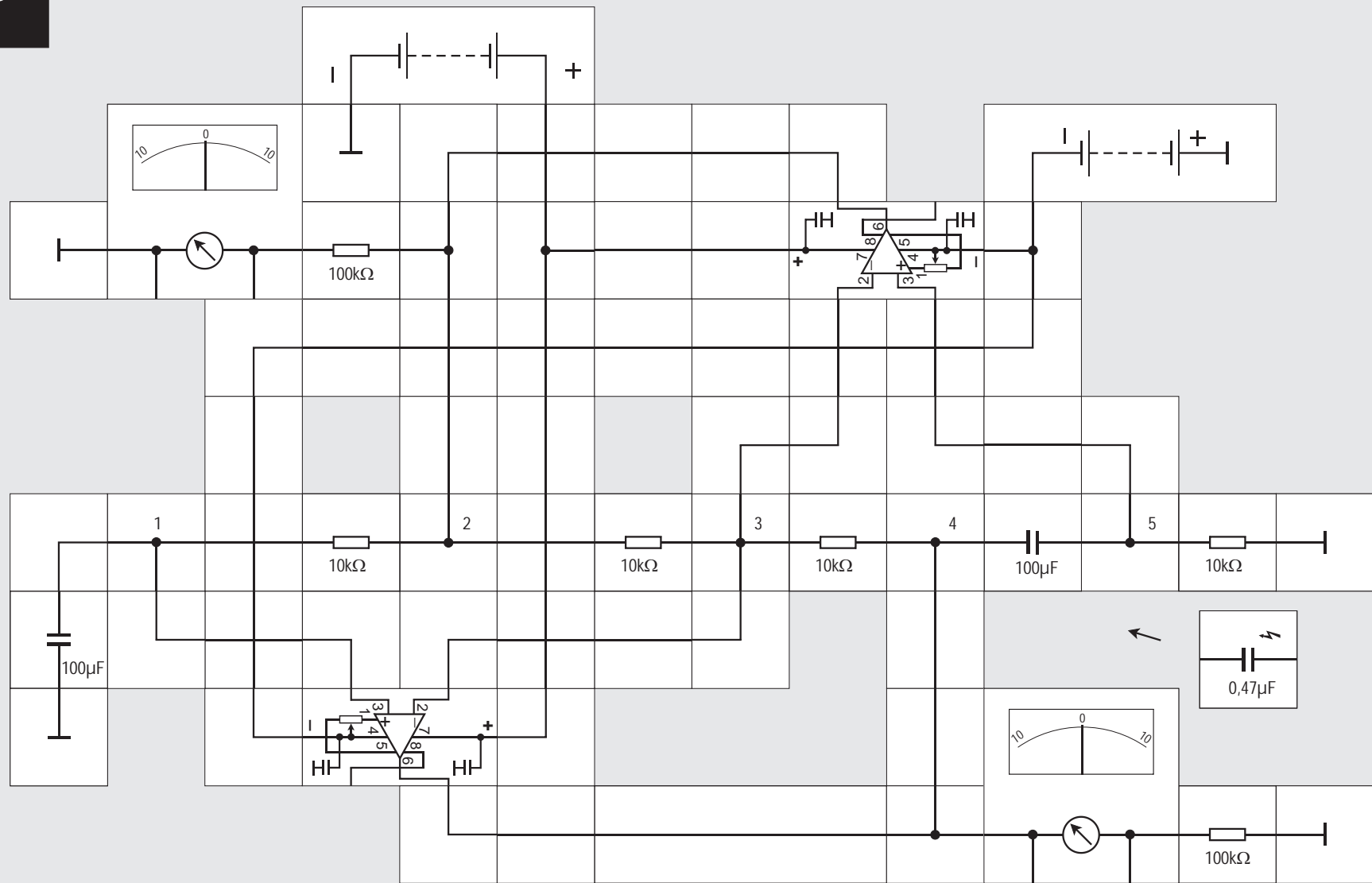
den Eingängen gleichzeitig auftreten. Die Zuordnung eines Signals zu einem bestimmten Eingang ist dabei unwichtig, wichtig ist für das Ausgangssignal nur ihre Anzahl. Aufgaben dieser Art kommen vor allem bei Mustererkennungen in der statistischen Informationsverarbeitung vor und können mit den Elementen der Schwellwertlogik eleganter gelöst werden als mit konventioneller Schaltungsbauweise.

Hier setzt nun die Schwell- und Majoritätslogik an. Praktisch wird man Schritt für Schritt in 60 Versuchen mit Spezialbausteinen in die Eigenheiten dieser Logik eingeführt und erhält tiefere Einsichten über das Wesen logischer Verknüpfungen und der Mustererkennung. Ein Syntheseverfahren rundet den Lehrgang ab.

Das Aufbaubeispiel zeigt eine Prüfschaltung für den 2 aus 5 - Code. Nur wenn an genau zwei der fünf Schalter eine 1 liegt, gibt der Ausgang (=2/5) eine 1 als Zeichen für ein gültiges Codewort ab.

Die Schaltung enthält neben den bereits bekannten AND/NAND und OR/NOR Funktionsbausteinen auch ein 3 - Eingangs - und ein 5 - Eingangs Majoritätsglied. Das Ausbau-System ist großzügig mit diesen universell einsetzbaren und weiteren neuen Funktionsbausteinen, wie Koinzidenzflipflops, ausgestattet.

56





# Lectron

## Ausbau-System Operationsverstärker

Wer nach so viel Digitaltechnik nun den Eindruck gewonnen hat, in moderner Elektronik läuft alles digi-

tal ab, der täuscht sich. Natürlich arbeiten Bauelemente, wie Transistoren, weiterhin auch analog, es gibt aber ein aus ihnen zusammen gesetztes Bauteil, dessen Stärke darin liegt analog zu arbeiten, nämlich den Operationsverstärker. Wahrscheinlich ist er das am weitesten verbreitete Bauelement der modernen Elektronik. Deswegen gibt es bei LECTRON ein eigenes Ausbau - System, das sich ausschließlich ihm widmet. Es enthält alle Spezialbauteile, mit denen man in 83 Versuchen nicht nur die Anwendungen dieses wichtigen Bauteils, sondern auch seinen genauen inneren Aufbau kennen lernt. Neben fünf Operationsverstärkern enthält der Baukasten als »Highlight« einen vielseitig einsetzbaren Funktionsgenerator.

Dieses Ergänzungssystem ist thematisch eigentlich eine Erweiterung des LECTRON »Start- und Ausbausystems«. Da man mit »Digitaltechnik« bereits relativ viel Material für die Versuche mit ihren vielen Verbindungs- und Funktionsbausteinen besitzt und nur noch die Spezialbausteine benötigt, ist er hier als Ausbaustufe angeführt.

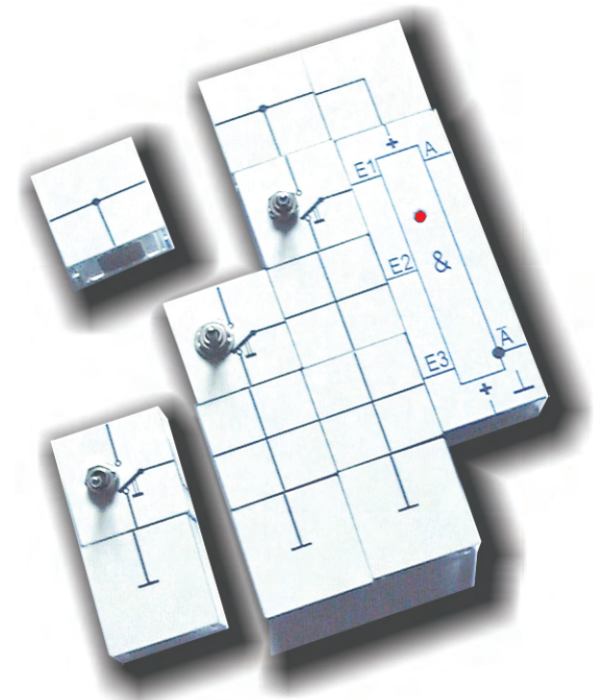
Das Aufbaubeispiel zeigt einen Gyator. Das ist eine Schaltung, die eine kleine Kapazität in eine unglaublich große Induktivität transformiert und es so erlaubt, beispielsweise Schwingkreise für sehr niedrige Frequenzen aufzubauen.

# Bauteile



# Lectron

2103 Verbindung Gerade	27 Stück	2401 Hochspannungsdiode	2 Stück
2104 Verbindung T-Stück	14 Stück	2620 Drehspulmessgerät	2 Stück
2105 Verbindung Winkel	22 Stück	2410 Leuchtdiode rot	1 Stück
2101 Verbindung Masse	10 Stück	2411 Leuchtdiode gelb	1 Stück
2106 Verbindung Kreuzung verbunden	1 Stück	2504 Relais	1 Stück
2107 Verbindung Kreuzung isoliert	10 Stück	2124 Batteriebaustein zweipolig	1 Stück
2109 Verbindung Kreuzung isoliert 2-fach	1 Stück	2432 AND/NAND-Verknüpfungsbst.	4 Stück
2108 Verbindung Gerade 3-fach	6 Stück	2433 OR/NOR-Verknüpfungsbst.	2 Stück
2501 Taster Arbeitskontakt	2 Stück	2434 Transistor Array	1 Stück
2503 Schalter SKS	3 Stück	2438 Transmission Gate	1 Stück
2201 Widerstand 47 $\Omega$	1 Stück	2505 Entprellte Taste	1 Stück
2203 Widerstand 220 $\Omega$	2 Stück	2435 JK-Master-Slave Flipflop	4 Stück
2206 Widerstand 1,5 k $\Omega$	3 Stück	3106 Anleitung »Digitaltechnik«	1 Stück
2209 Widerstand 4,7 k $\Omega$	1 Stück		
2211 Widerstand 10 k $\Omega$	2 Stück		
2214 Widerstand 100 k $\Omega$	2 Stück		
2219 Potentiometer 10 k $\Omega$	2 Stück		
2302 Kondensator 0,1 $\mu$ F	2 Stück		
2304 Elektrolyt-Kondensator 10 $\mu$ F	2 Stück		
2305 Elektrolyt-Kondensator 100 $\mu$ F	2 Stück		
2431 Transistor npn rechts	1 Stück		
2430 Transistor npn links	2 Stück		
2112 Trennbaustein	3 Stück		
2113 Anschlussbaustein	1 Stück		
2114 Messbaustein	1 Stück		
2801 Glühlampenbaustein mit. Birnchen	1 Stück		





## Anhang

Messbereichserweiterung für das Lectron Messinstrument

Hat man zum Messen nur das Lectron Messinstrument zur Verfügung, steht man vor dem Problem, dass der Messbereich der Messaufgabe angepasst werden muss. Das Instrument selbst ist nicht hochpräzise und Anzeige- und Ablesefehler addieren sich. Durch die Messbereichsanpassung wird die Anzeigegenauigkeit des Instruments zwar nicht verbessert, manche Messaufgabe oder Tendenzanzeige kann aber besser gelöst bzw. erkannt werden. Zur Aufnahme von Kennlinien sind in jedem Fall digitale Multimeter oder präzise Zeigerinstrumente geeigneter.

Durch das Lectron Messinstrument fließen bei Vollausschlag  $100\mu\text{A}$  Strom; da sein Innenwiderstand  $R_i$  (hauptsächlich der Spulenwiderstand)  $4\text{ k}\Omega$  beträgt, fällt dann an ihm eine Spannung von  $U = I R_i$ , also  $0,4\text{ V}$  ab. Diese Strom- und Spannungswerte sollte man bei jeder Messaufgabe vor Augen haben, um entscheiden zu können, ob das Instrument überhaupt für die jeweilige Messaufgabe in Frage kommt oder ob durch seinen Einsatz die Verhältnisse in der Schaltung unzulässig stark verändert werden.

Das Instrument lässt sich mit hochohmigen Vorwiderstand als Spannungs- und mit niederohmigen Parallelwiderstand (Shunt) als Strommesser einsetzen. Wir wollen beide Fälle nacheinander behandeln.

## Spannungsmesser

Wenn bei Vollausschlag am Instrument mit  $R_i$  gleich  $4\text{ k}\Omega$   $0,4\text{ V}$  abfallen, erzeugt derselbe Strom von  $100\mu\text{A}$  am Vorwiderstand  $R_v$  einen Spannungsabfall von  $100\mu\text{A} \cdot R_v$ . Der Spannungsabfall der Gesamtanordnung ist also:

$$U_{\text{ges}} = 0,4\text{ V} + 100\mu\text{A} \cdot R_v$$

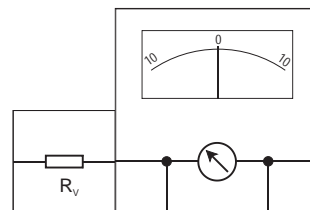
Nach Umformung erhält man für  $R_v$

$$R_v = 4\text{ kW} \cdot (U_{\text{ges}} / 0,4\text{ V} - 1)$$

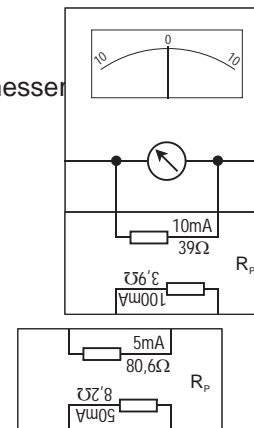
Die Tabelle zeigt für gängige Messbereiche die  $R_v$ -Werte.

Messbereich / V	$R_v / \Omega$
0,4	0
1	6k (5,6k)
2	16k (15k)
5	46k (47k)
10	96k (100k)
20	196k (200k)

Spannungsmesser



Strommesser



## Strommesser

Bei Vollausschlag fließen durch das Instrument  $100\mu\text{A}$ , dabei fallen  $0,4\text{ V}$  an ihm ab; derselbe Spannungsabfall ist auch an einem Parallelwiderstand  $R_p$  messbar. Durch ihn fließt dabei der Strom  $0,4\text{ V} / R_p$ . Der Gesamtstrom durch die Anordnung ist also:

$$I_{\text{ges}} = 100\mu\text{A} + 0,4\text{ V} / R_p$$

Nach Umformung erhält man für  $R_p$

$$R_p = 0,4\text{ V} / (I_{\text{ges}} - 100\mu\text{A})$$

Die Tabelle gibt für einige Messbereiche die passenden Parallelwiderstände an.

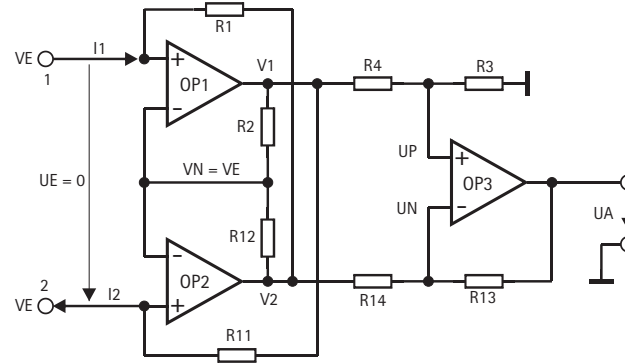
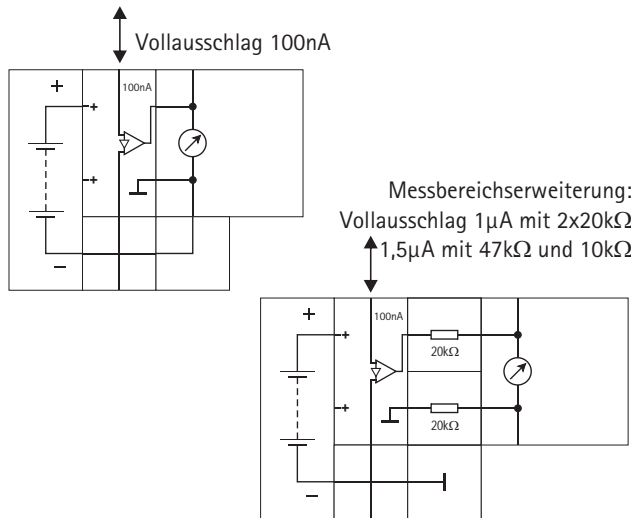
Messbereich / mA	$R_p / \Omega$
0,1	-
1	404 (390)
5	81,6 (82)
10	40,4 (39)
50	8,15 (8,2)
100	4 (3,9)

Neu zur Auslieferung kommende Instrumente haben zwei zusätzliche Kontaktplättchen (auch wenn es auf dem Deckelbild noch nicht angegeben ist), an die die ebenfalls neuen Nebenschlusswiderstände für vier gängige Messbereiche platzsparend angeschlossen werden können (s. Abb.).

Außerdem sind die Instrumente mit zwei antiparallel geschalteten Dioden über dem Messwerk ausgestattet, die bei Überlast die Spannung auf  $0,7\text{ V}$  begrenzen und das Messwerk schützen. Trotzdem sollte bei Vollausschlag die Stromzufuhr zum Instrument unterbrochen und die Fehlerursache beseitigt werden, denn die Schutzdioden halten auch nur für gewisse Zeit dem hohen Strom stand.

## Der Nanoamperemeter – Baustein

Bei den meisten Messproblemen stört es nicht, dass am Lectron – Messinstrument bei Vollausschlag 0,4V Spannungsabfall entstehen. Will man jedoch kleine Ströme oder kleine Spannungen messen, ist es oft unmöglich, brauchbare Messergebnisse zu erzielen. Lectron hat deswegen einen Baustein, nämlich das Nanoamperemeter (2483), entwickelt, der in Verbindung mit dem Messinstrument dieses Problem vermeidet. Der Baustein enthält drei Operationsverstärker und muss von der 9V Spannungsversorgung gespeist werden. Sein Vollausschlag wird bei 100nA erreicht, wobei zwischen Eingangs- und Ausgangsanschluss kein Spannungsabfall auftritt. Seine genaue Funktionsweise ist nebenstehend beschrieben. Zu deren Verständnis sollten Grundkenntnisse des Operationsverstärkers vorhanden sein; praktisch wird er ganz einfach – wie nachstehend gezeigt – eingesetzt.



Im Prinzip könnte man die Strommessung mit zwei Elektrometerversärkern, die die Spannungen über einen sehr niederohmigen Messwiderstand abgreifen, bewerkstelligen. Ein Subtrahierer müsste anschließend noch die Differenz bilden, die dann verstärkt auf das Instrument zur Anzeige gebracht wird. Das Problem mit dem Spannungsabfall ist damit vermindert, aber nicht vollständig beseitigt. Das gelingt, wenn man den Strommesswiderstand in den Gegenkopplungszweig der Verstärker legt. Man erhält dann ein Amperemeter ohne Spannungsabfall. Lässt man zunächst die Widerstände R1 und R11 sowie den dritten Operationsverstärker OP3 mit seiner Beschaltung weg, so stellt sich durch die Gegenkopplungswiderstände R2 und R12 das Potenzial VN auf den Wert VE ein, womit die Potentialdifferenz UE zwischen den Eingängen 1 und 2 gleich dem gewünschten Wert Null wird. Nimmt man jetzt an, dass in den Anschluss 1 über R1 der Strom I1 einfließt, dann stellt sich V2 am Ausgang von OP2 durch die Gegenkopplung auf den Wert  $V2 = VE - I1R1$  Für V1 folgt mit  $VN = VE$  daraus:  
 $(V1 - V2) / (R2 + R12) = (VE - V2) / R12$  oder nach V1 aufgelöst

$$V1 = V2 + (VE - V2) (1 + R2/R12)$$

$$V1 = VE + I1R1R2 / R12$$

Damit wird der aus dem Anschluss 2 herausfließende Strom I2

$$I2 = (V1 - VE) / R11 = I1 \cdot R1R2 / R11R12$$

Wenn die beiden Eingänge wie die einer erdfreien Schaltung wirken sollen, muss  $I1 = I2$  sein, woraus folgt

$$R1 / R11 = R12 / R2.$$

Zur Berechnung des Subtrahierers OP3 nimmt man der Einfachheit halber an, dass  $R3 = kR4$  und  $R13 = kR14$  ist.

Dann gilt:

$$V1 / (R4 + kR4) = UP / kR4$$

$$UP = V1 \cdot k / (k + 1)$$

Und weiter:

$$(V2 - UA) / (R14 + kR14) = (UN - UA) / kR14$$

$$(V2 - UA) / (1 + k) = (UN - UA) / k$$

$$UN = UA + (V2 - UA)k / (1 + k)$$

Wegen der riesengroßen Leerlaufverstärkung des Operationsverstärkers stellt sich UA so ein, dass  $UP - UN = 0$ , also  $UP = UN$  ist:

$$kV1 / (k + 1) = UA + k(V2 - UA) / (k + 1)$$

$$UA = k(V1 - V2)$$

OP3 bildet also tatsächlich die gewünschte Differenz  $V1 - V2$  und verstärkt sie mit dem Faktor k. Macht man alle vier Widerstände des Subtrahierers gleich groß, wird  $k = 1$ . UA wird letztlich nach dem Einsetzen der zunächst berechneten Ausdrücke für V1 und V2:

$$UA = V1 - V2$$

$$UA = (VE + I1R1R2 / R12) - (VE - I1R1)$$

$$UA = I1R1 (1 + R2/R12)$$

$$UA = I1(R1 + R1R2/R12)$$

$$UA = I1(R1 + R11)$$

Mit  $R1 = R11 = R2 = R12 = 2M\Omega$  ergibt das  $UA = I1 \cdot 4M\Omega$ , d. h. bei  $I1 = 100nA$  wird  $UA = 0,4V$ , was gerade der Vollausschlag des Lectron Messinstruments ist.

## Der Timer-Baustein 555 (2480)

Seit 1972 ist der Timer-Baustein NE555 auf dem Markt, zunächst in der bipolaren Ausführung und später in der CMOS-Version. Er ist der Industriestandard geworden für alle Arten von Zeitschaltungen. Obwohl der astabile / monostabile Kippstufen Baustein 2466 von Lectron im Prinzip dasselbe leistet, gibt es für »555-Anhänger« auch einen Lectron Baustein mit dem Zeitgeber - IC in der CMOS-Version als Kernstück.

Wir werden im Folgenden den Baustein nur grob beschreiben und einige Versuchsaufbauten für die Grundsaltungen zeigen. Wer sich genauer mit dem 555-Baustein beschäftigen will, dem sei das hervorragend geschriebene **ELektronik - Kompendium ELKO** von Thomas Schaerer und Patrick Schnabel »Timer 555«, das über

[www.elektronik-kompendium.de/](http://www.elektronik-kompendium.de/)

für 24,90 Euro + Porto (Stand 03.2011) zu beziehen ist, empfohlen. Es lässt keine Wünsche offen, was Grundlagen und Applikationen betrifft.

Das Deckelschaltbild des Lectron-Bausteins zeigt uns in gewohnter Weise die wesentlichen Schaltkomplexe:

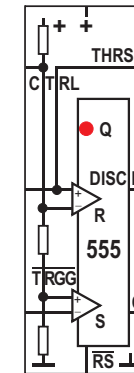
Ein Flipflop, dessen Ausgang Q herausgeführt ist

und das von jeweils einem als Komparator geschalteten Operationsverstärker gesetzt oder rückgesetzt werden kann.

Unabhängig davon kann das Flipflop mit tiefem Potenzial am  $\overline{RS}$ -Eingang rückgesetzt werden. Der Eingang ist intern hochohmig mit der Versorgungsspannung verbunden und kann deswegen unbeschaltet bleiben, wenn er nicht benötigt wird.

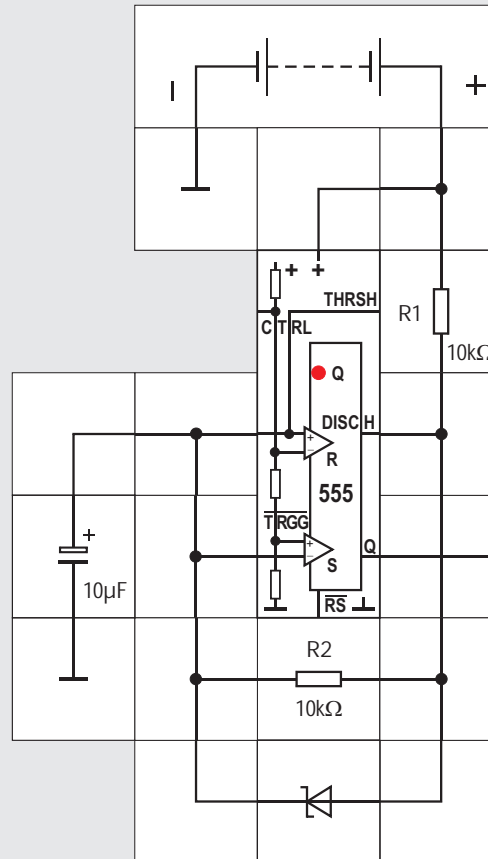
Die beiden Operationsverstärker erhalten jeweils auf einem ihrer Eingänge ein festes (Referenz-) Potenzial aus einem bausteininternen Spannungsteiler. Da dessen drei Widerstände gleich groß sind, ergeben sich für die beiden geteilten Potenziale  $2/3$  und  $1/3$  der anliegenden Versorgungsspannung. Der Plus Eingang des Rücksetz - Operationsverstärkers **THRSH** (=Threshold) und der Minuseingang  $\overline{TRGG}$  (=Trigger) des Setz - Operationsverstärkers sind über die Anschlussplättchen frei zugänglich. Das **THRSH** - Signal liegt an zwei Plättchen, was bei Versuchsaufbauten Verbindungsbausteine zu sparen hilft.

Frei zugänglich ist auch der  $2/3$ - Teilerpunkt **CTRL** (=Control). Über ihn können die Potenziale des Teilers in gewissen Grenzen verändert werden. Der in 555-Applikationen dringend empfohlene Kondensator von  $0,22\mu\text{F}$  gegen Masse an diesem Punkt ist bausteinintern bereits vorhanden, genauso wie ein



weiterer  $0,1\mu\text{F}$  zur Abblockung der Versorgungsspannung.

Neben dem in CMOS Schaltungen üblichen Gegentaktausgang Q des Flipflops gibt es einen weiteren Ausgang **DISCH** (=Discharge). Dies ist ein so genannter »Open-Drain« Ausgang eines kräftigen n-Kanal MOSFETs. Er dient zum schnellen Entladen eines angeschlossenen Kondensators, wie wir in den Versuchen noch sehen werden. Gibt Q tiefes Potenzial UL ab (LED ist dunkel), so ist gleichzeitig der MOSFET leitend und zieht DISCH auf Massepotential. Entsprechend ist der MOSFET bei  $Q = \text{UH}$  gesperrt und somit der Ausgang **DISCH** hochohmig. Die LED leuchtet dann.





## Astabiler Multivibrator

Bei diesem Versuchsaufbau sind die Werte von Kondensator und Widerstand – also dem zeitbestimmenden RC – Glied – so gewählt worden, dass wir nach Anlegen der Versorgungsspannung am Blinken der Leuchtdiode das Arbeiten der Schaltung sofort erkennen können. An ihrem Ausgang Q gibt sie ein Rechtecksignal ab.

Das kommt wie folgt zustande: Im Einschaltaugenblick ist der Kondensator leer und damit das Signal  $\overline{\text{TRGG}} = U_L$ . Der »untere« als Komparator geschaltete Operationsverstärker erzeugt deswegen ein Setzsignal für das Flipflop, Q gibt  $U_H$  – Potenzial ab und die LED leuchtet. DISCH ist hochohmig. Der Kondensator lädt sich nach einer e – Funktion über R1 und die Schottky – Diode, welche R2 überbrückt, langsam auf.

Hat seine Spannung  $2/3$  der Versorgungsspannung erreicht, erzeugt der »obere« Komparator ein Rücksetzsignal für das Flipflop. Damit wird  $Q = U_L$ , die LED verlöscht und der interne MOSFET leitet. DISCH

hat demzufolge nahezu Massepotential und der Kondensator entlädt sich über R2.

Unterschreitet die Kondensatorspannung  $1/3$  der Versorgungsspannung, wird der untere Komparator aktiv und schaltet mit seinem Setzsignal den Ausgang Q auf  $U_H$  – Potenzial; die LED leuchtet, DISCH wird wieder hochohmig und das Spiel beginnt von Neuem.

Bis auf ihr erstmaliges Hochlaufen nach Anlegen der Versorgungsspannung bewegt sich die Kondensatorspannung in der Folge zwischen  $2/3$  und  $1/3$  der Versorgungsspannung und die angeschlossenen Komparatoren erzeugen abwechselnd Rücksetz- und Setzsignale. Das Flipflop gibt deswegen ein rechteckförmiges Signal mit dem Tastverhältnis  $t/T$  von ungefähr 0,5 ab. Bei den gewählten Bauteilwerten ist  $T = 140\text{ms}$ .

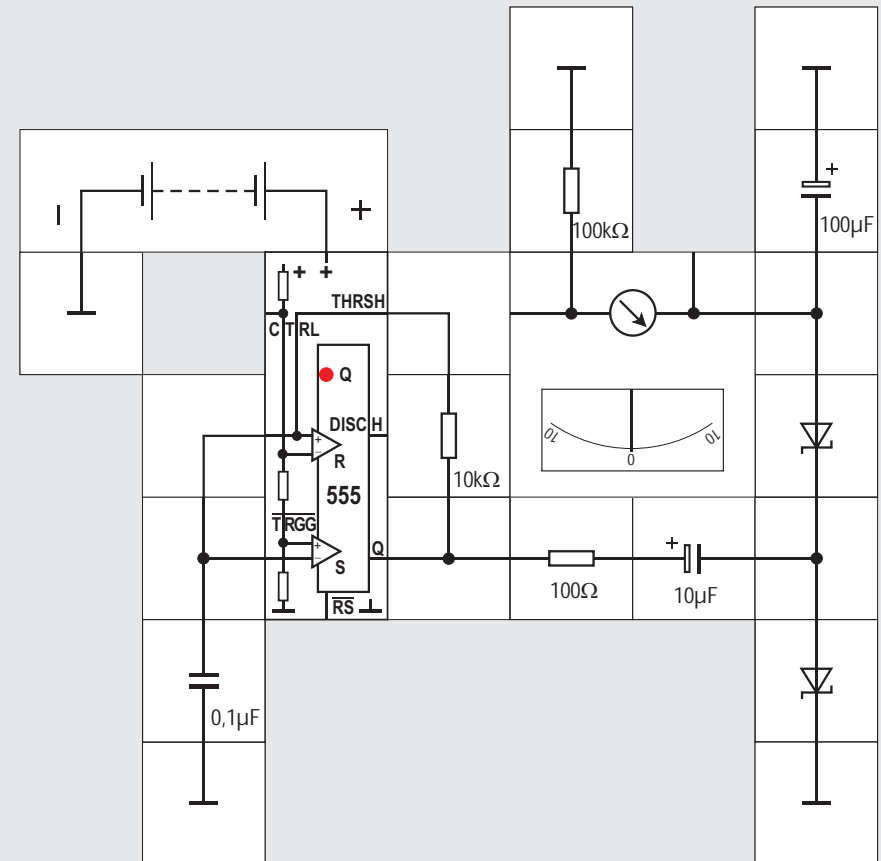
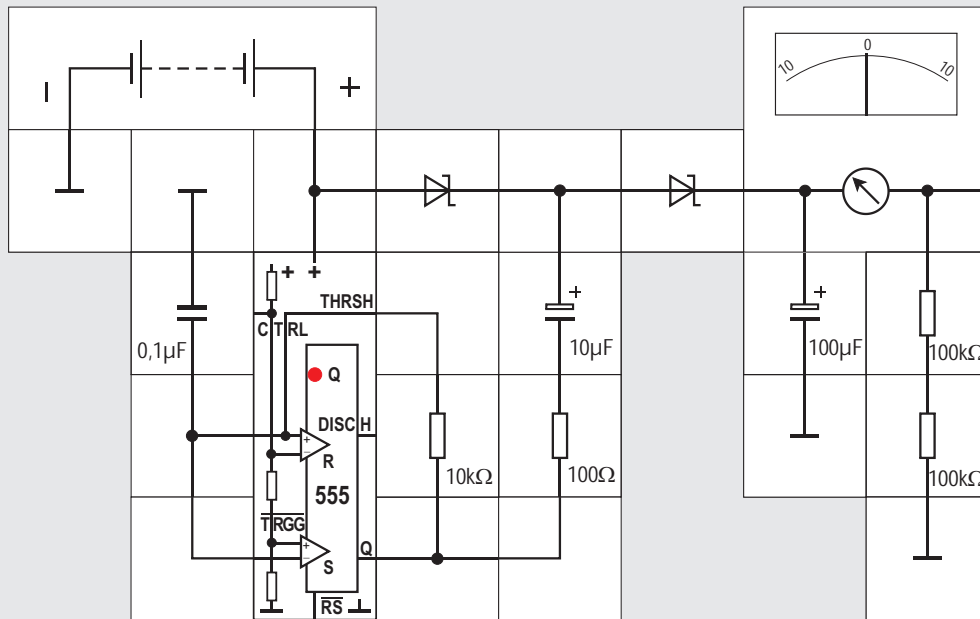
Die Diode ist wichtig: Ohne sie könnte ein Tastverhältnis von nahezu 0,5 nicht erreicht werden, da sich der Kondensator dann über  $R1 + R2$  laden, sich aber nur über R2 entladen würde.

Allgemein (ohne Diode) betragen die Anschaltzeit  $t_{an}$  und die Abschaltzeit  $t_{ab}$ :

$$t_{an} = 0,69 \cdot (R1 + R2) \cdot C$$

$$t_{ab} = 0,69 \cdot R2 \cdot C$$

Mit Diode ist R2 in der ersten Formel gleich Null zu setzen.





## Spannungsverdoppler

Zur Demonstration einer Anwendung für den im vorigen Versuch aufgebauten frei schwingenden Taktgenerator wollen wir einen Spannungsverdoppler (Villard - Schaltung) aufbauen. Als Schaltungsvariante verwenden wir das Q - Ausgangssignal direkt und laden bzw. entladen über einen  $10\text{k}\Omega$  Widerstand den ganz linken zeitbestimmenden Kondensator von  $0,1\mu\text{F}$ .

Steuern wir die aus zwei Dioden und zwei Kondensatoren bestehende Villard - Schaltung mit dem rechteckförmigen Ausgangssignal des Timer - Bausteins an, so beginnt sich der zunächst leere linke Kondensator bei  $Q = U_L$  über die linke Diode und den  $100\ \Omega$  Widerstand aufzuladen. Die Aufladung dauert so lange, bis das Q - Ausgangssignal auf  $U_H$  - Potenzial wechselt. Der dabei entstehende Spannungssprung von  $12\text{V}$  hebt über den  $100\ \Omega$  Widerstand den Fußpunkt des linken  $10\mu\text{F}$  Kondensators. Da an einem Kondensator die Spannung nicht »springen« kann, wird auch die andere Seite des Kondensators (Verbindungspunkt der beiden Dioden)

um diesen Betrag angehoben. Als Folge davon sperrt die linke Diode und die rechte wird leitend, wodurch Ladung vom linken auf den rechten  $100\mu\text{F}$  Kondensator fließt.

Beim nächsten Wechsel des Q - Ausgangssignals auf  $U_L$  - Potenzial gibt es einen negativen Potentialsprung von  $12\text{V}$  sowohl am Fußpunkt des linken Kondensators als auch an dem vorher betrachteten Verbindungspunkt der beiden Dioden. Dadurch wird wieder die linke Diode leitend, die rechte sperrt und der linke Kondensator wird nachgeladen.

Nach wenigen Schaltzyklen stellt sich - insbesondere wenn der Schaltung kein Strom entnommen wird - am rechten Kondensator die doppelte Versorgungsspannung abzüglich der beiden Diodenflussspannungen  $2U_F$  ein. Die Schaltung eignet sich nur zur Erzeugung der doppelten Spannung, wenn sie nicht durch einen angeschlossenen Verbraucher zu stark belastet wird. In diesem Fall können die Kondensatoren nicht schnell genug nachgeladen werden und es entsteht eine Brummspannung  $U_{\text{BrSS}}$ , die ungefähr  $U_{\text{BrSS}} = I_a/C \cdot f$  groß ist;  $C$  ist die Kapazität des rechten Kondensators,  $f$  die Schwingfrequenz des Taktgebers und  $I_a$  der abgegebene Strom. Wir erkennen aus der Formel, dass die unerwünschte Brummspannung umgekehrt proportional zur Taktfrequenz  $f$  ist und haben deswegen auch den

taktbestimmenden Kondensator auf  $0,1\mu\text{F}$  verkleinert.

Um die doppelte Versorgungsspannung anzeigen zu können, benötigen wir als Vorwiderstand für das Messinstrument  $2 \times 100\text{k}\Omega$ , wodurch sein Vollausschlag  $20\text{V}$  beträgt.

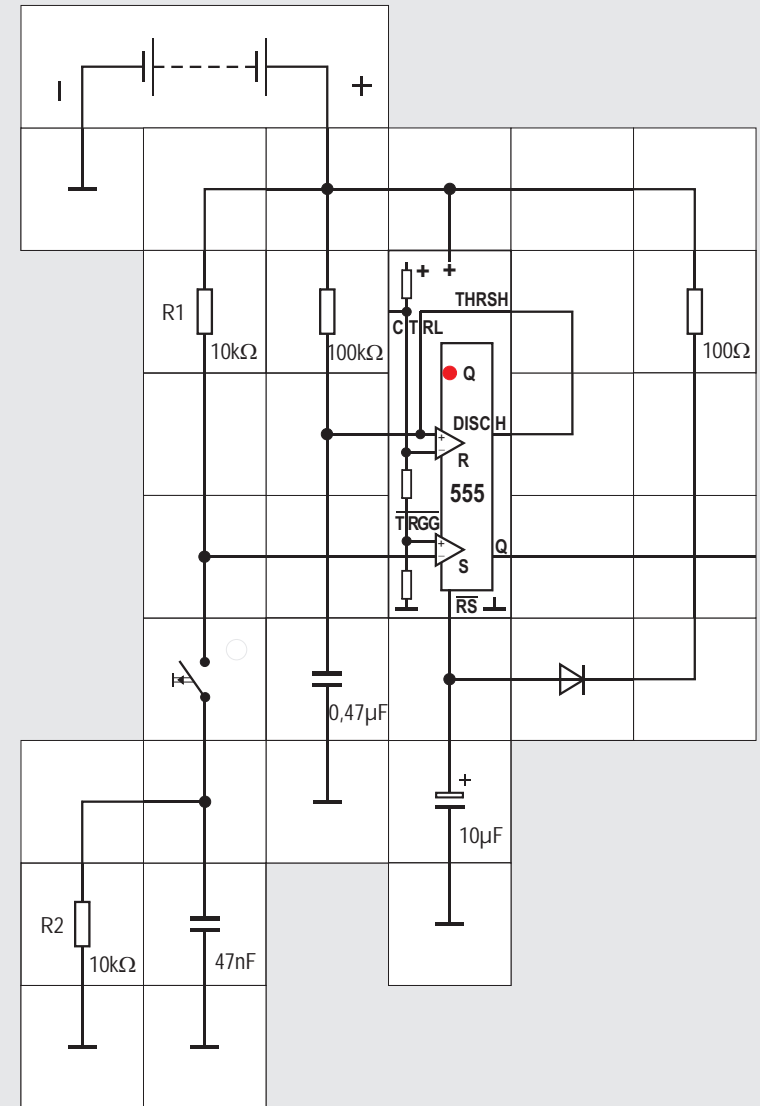
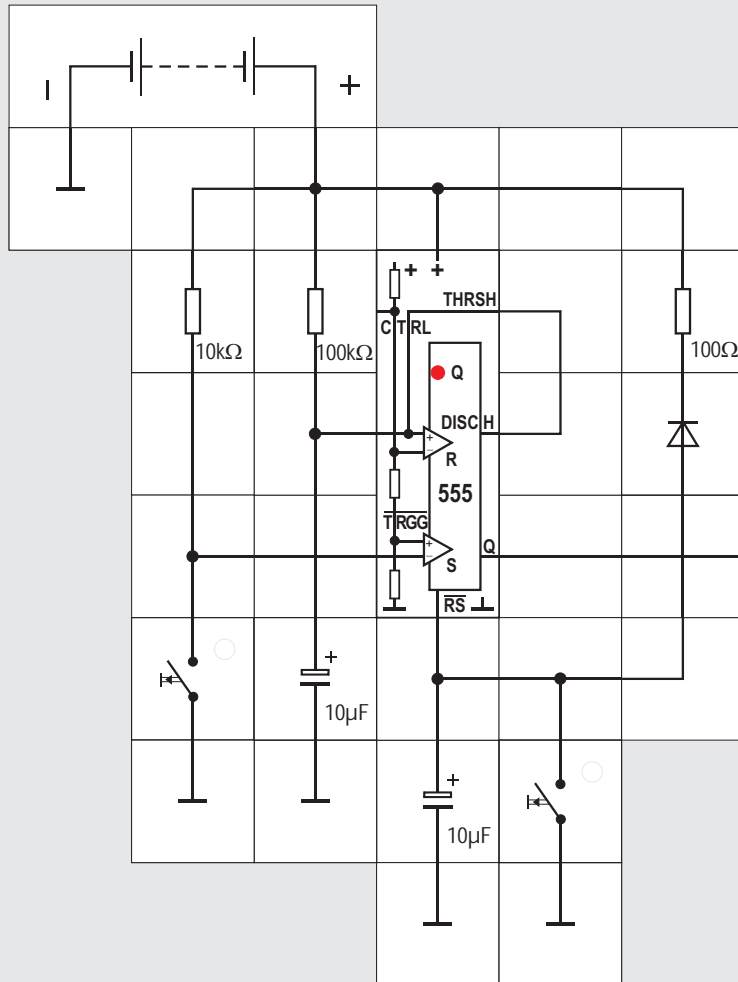
## Spannungsinvertierer

Durch eine veränderte Anordnung der beiden Dioden und der beiden Kondensatoren ist es auf ähnliche Weise auch möglich, eine negative Spannung zu erzeugen, für die das bisher Ausgeführte entsprechend gilt (rechter Versuchsaufbau):

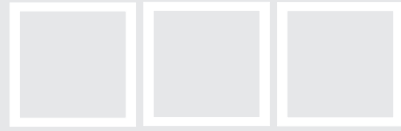
Beim Wechsel des Q - Ausgangssignals von  $U_L$  auf  $U_H$  entsteht ein positiver Spannungssprung von  $12\text{V}$  am unteren Kondensator, welcher sich über die untere Diode gegen Masse auf nahezu diesen Wert lädt. Beim anschließenden Spannungssprung von  $U_H$  auf  $U_L$  sperrt diese Diode und die obere wird leitend, wodurch der untere Kondensator entladen und der obere negativ geladen wird. Das Instrument zeigt die negative Spannung vermindert um die beiden Diodenflussspannungen an; sie beträgt:

$$-U_a = U_{\text{Batt}} - 2 \cdot U_F$$

Die Polarität der beiden Elektrolytkondensatoren ist zu beachten.







## Monostabile Kippstufe

Unser nächster Versuchsaufbau zeigt die Grundschaltung einer monostabilen Kippstufe mit dem Timer - Baustein.

Nach Anlegen der Versorgungsspannung lädt sich der untere  $10\mu\text{F}$  Kondensator über einen baustein-internen Widerstand langsam auf. Solange die dortige Schaltschwelle ( $\approx 0,5 \cdot \text{Versorgungsspannung}$ ) nicht überschritten wird, entsteht am  $\overline{\text{RS}}$  - Eingang ein aktives Rücksetzsignal und der Baustein wird im

rückgesetzten Zustand gehalten. Durch diese Maßnahme wird vermieden, dass bereits beim Anlegen der Versorgungsspannung ein Impuls abgegeben wird, was bei manchen angeschlossenen Schaltungen sich störend auswirken könnte. Verschwindet die Versorgungsspannung wird der Kondensator über die Diode und den  $100\Omega$  Widerstand rasch entladen.

Der linke zeitbestimmende  $10\mu\text{F}$  Kondensator ist nicht geladen und wird durch das im Ruhezustand aktive  $U_L$  - Potenzial des DISCH - Signals (über das durchgeschleifte THRSH - Signal) in diesem Zustand gehalten.

Durch **kurzzeitiges** Betätigen des linken Tasters erzeugt der untere Komparator einen Setzimpuls für das Flipflop, dessen Ausgang Q auf  $U_H$  - Potenzial wechselt; gleichzeitig wird DISCH hochohmig und die Aufladung des  $10\mu\text{F}$  Kondensators über den  $100\text{k}\Omega$  Widerstand beginnt.

Erreicht das Kondensatorpotenzial  $2/3$  der Versorgungsspannung, erzeugt der obere Komparator ein Rücksetzsignal, Q wird  $U_L$  und der Kondensator schlagartig über das aktive  $U_L$  - Potenzial am Ausgang DISCH entladen; lediglich der relativ kleine Widerstand des internen MOSFETs begrenzt den Entladestrom.

Die Dauer des erzeugten  $U_H$  - Impulses an Q beträgt  
 $t_Q = 1,1 RC$

Möchte man (besonders bei Langzeitanwendungen) das Ausgangssignal vor seinem regulären Ablauf auf  $U_L$  bringen, muss man mit einem  $U_L$  - Signal an  $\overline{\text{RS}}$  eingreifen, beispielsweise mit Hilfe eines weiteren (rechten) Tasters wie in unserem Versuchsaufbau gezeigt.

Weiter ist zu beachten, dass das vom Taster oder aus einer Schaltung gelieferte Triggersignal  $\overline{\text{TRGG}}$  kürzer sein muss als die Dauer des  $t_Q$  - Signals und zwar aus folgendem Grund:

Das  $t_Q$  - Signal startet mit der negativen Flanke von  $\overline{\text{TRGG}}$ ; ist  $\overline{\text{TRGG}}$  beim Ablauf von  $t_Q$  noch auf einem Potenzial, welches kleiner als  $1/3$  der Versorgungsspannung ist, so bleibt  $t_Q$  ebenfalls so lange auf  $U_H$  - Potenzial, weil der untere Komparator immer noch ein Setzsignal liefert. Gerade bei kleinen Zeiten von  $t_Q$  empfiehlt es sich deswegen, den Taster mit einer RC - Kombination auszustatten. Der Triggerimpuls durch das Laden des  $47\text{nF}$  Kondensators wird dann sehr kurz; über den parallelen Widerstand R2 (der größer als  $1/2 \cdot R1$  sein muss, damit bei gedrückt gehaltenem Taster das Potenzial an  $\overline{\text{TRGG}}$  größer ist als  $1/3$  des Versorgungspotenzials) entlädt sich der Kondensator bei offenem Taster.

