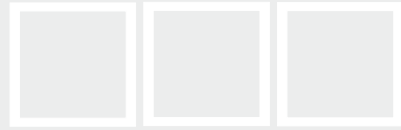


Zähler- und  
Schrittmotor  
Versuche





# Lectron

## Anleitungsbuch zum Ausbausystem Digitaltechnik Zähler & Schrittmotor

Autor  
Gerd Kopperschmidt

Herausgeber  
Reha Werkstatt Oberrad

Lectron

Buchrainstraße 18

60599 Frankfurt

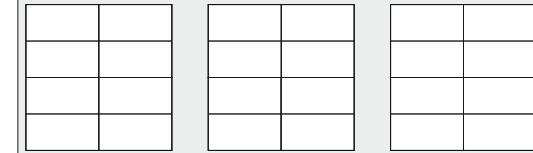
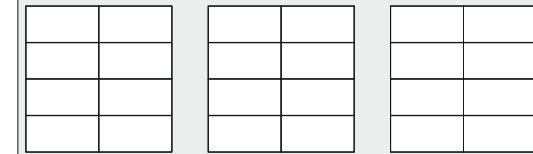
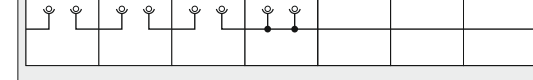
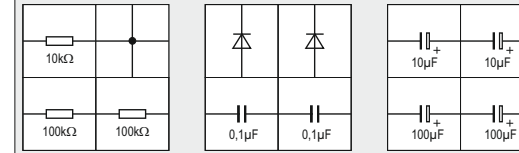
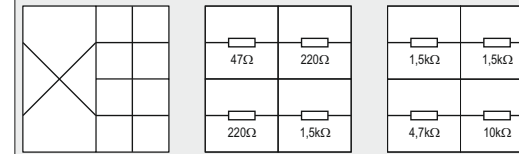
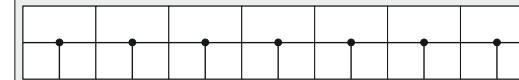
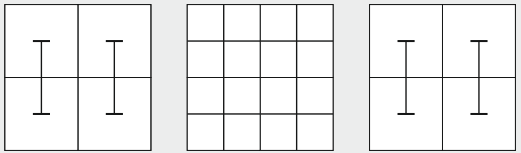
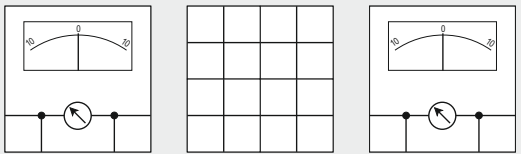
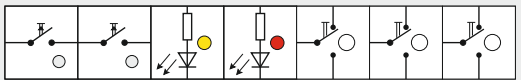
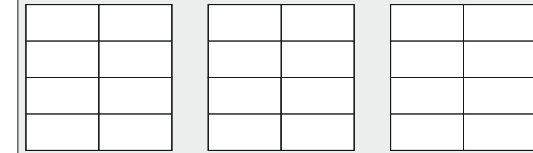
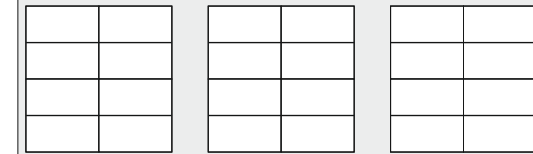
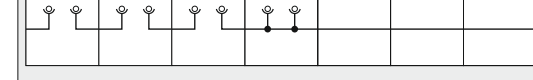
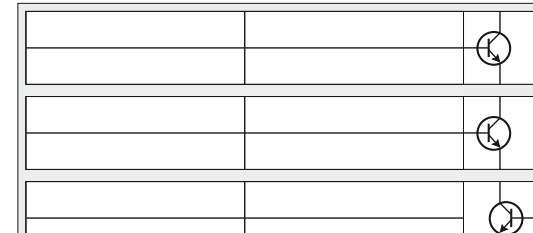
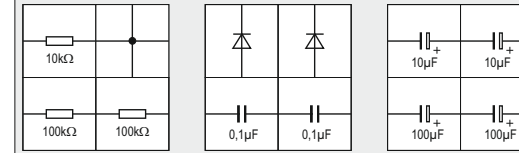
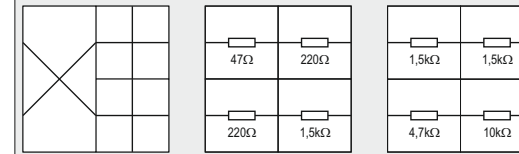
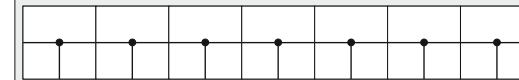
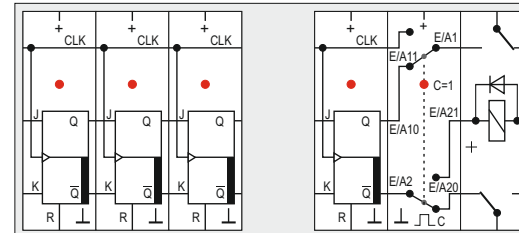
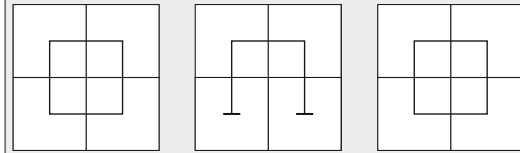
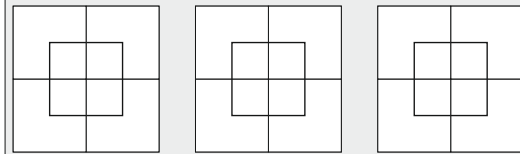
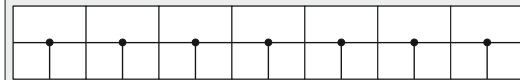
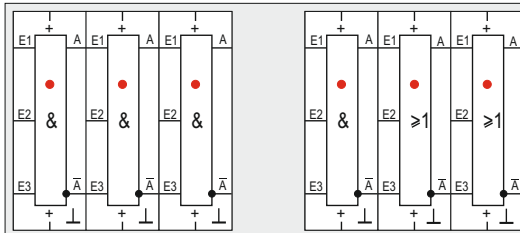
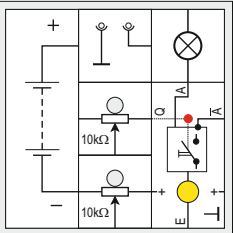
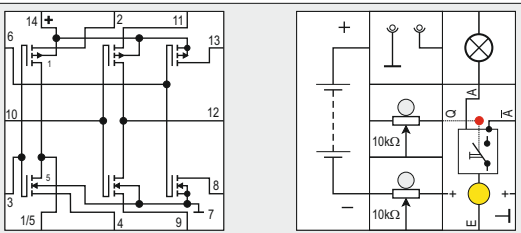
Tel.: +49 (0)69 90 50 12 82

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

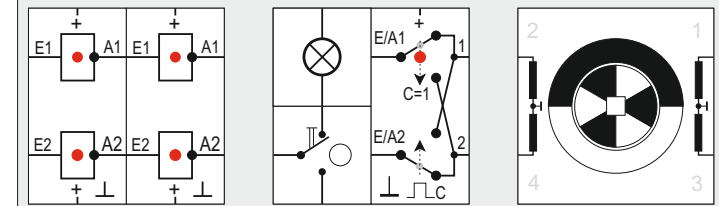
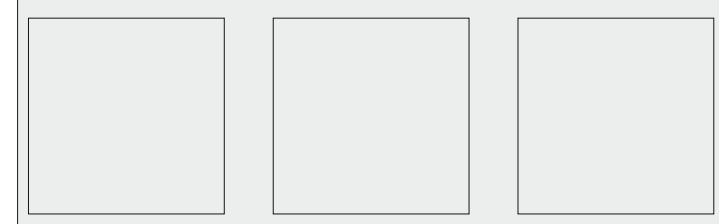
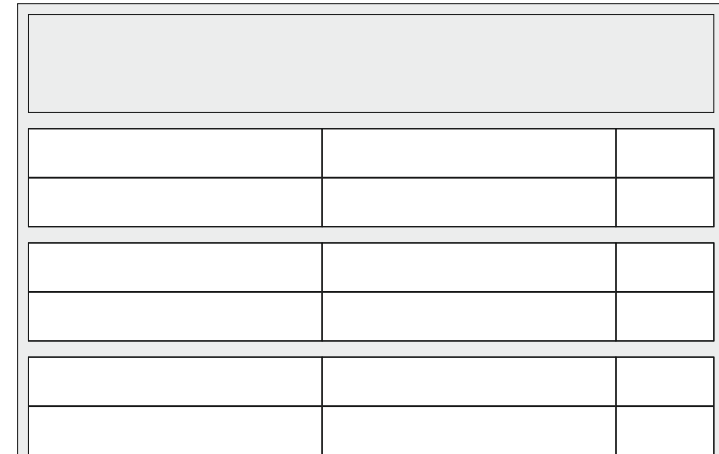
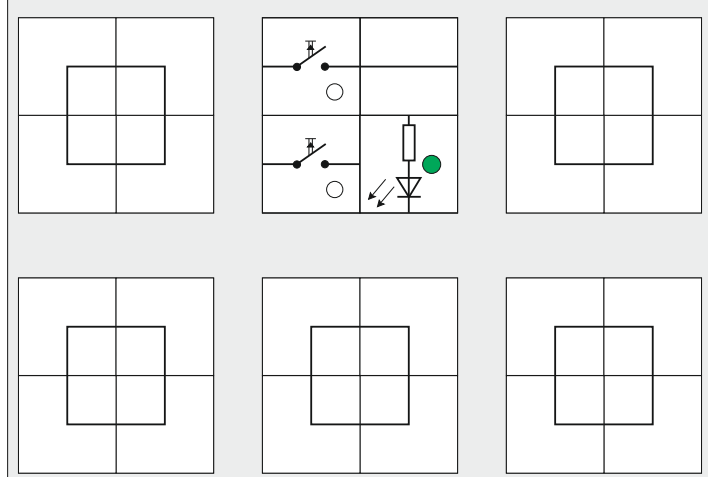
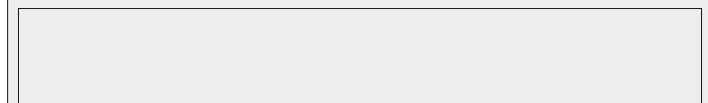
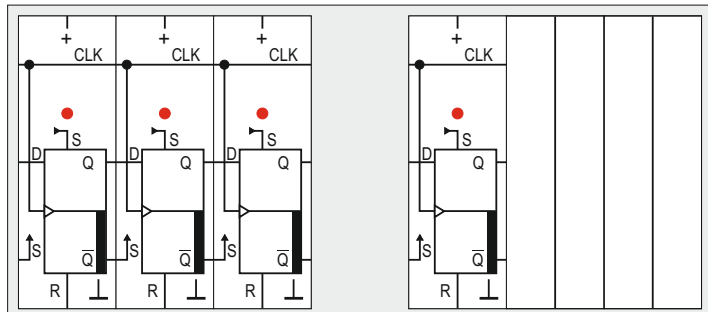
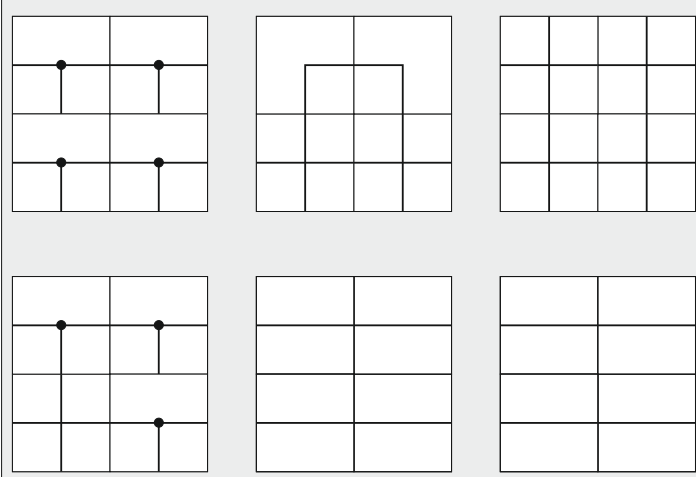
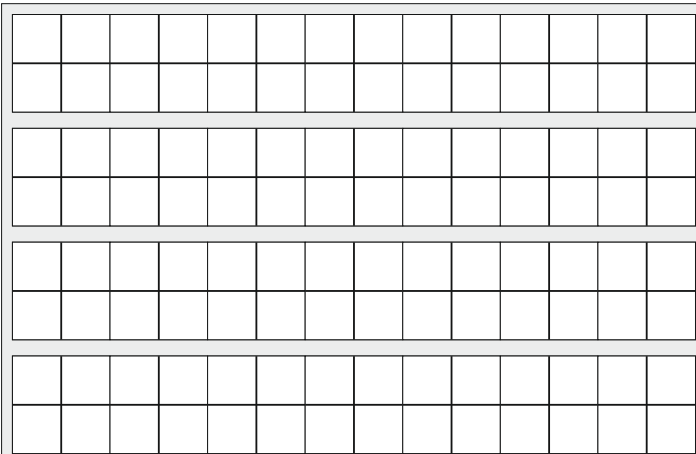
Email: [lectron@frankfurter-verein.de](mailto:lectron@frankfurter-verein.de)

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

# Digitaltechnik



# Zähler & Schrittmotor

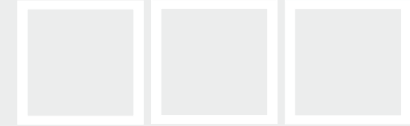


# Verzeichnis der Versuche

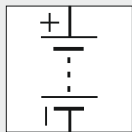
Versuch	Thema	Seite	Versuch	Thema	Seite	Versuch	Thema	Seite
	Versuche	6						
	Lectron Spannungsquellen	7	19	Der Frequenzteiler 1:3	50	42*	Der Differenzverstärker	96
1	Das JK-Flipflop	8	20	Der Frequenzteiler 1:5	52	43*	Der »rund« laufende Schrittmotor	98
2	Schieberegister aus JK-Flipflops	10	21	Ein 1:5 Teiler ohne zusätzliche Verknüpfungsglieder	54		Bauteile	100
3	Das D-Flipflop	12	22	Der Teiler 1:9	56		Segmentscheiben (Kopiervorlagen)	102
4	Ringschieberegister mit D-Flipflops	14	23	Der Teiler 1:13	58			
	Schaltungsoptimierung mit Karnaugh-Tafel	16	24	Der Teiler 1:50	60			
5	Die 3-von-4-Funktion	18	25*	Ein Sekundenimpuls Generator	62			
6	Erkennen von Pseudotetraden	20	26*	Ein sehr empfindlicher Empfänger	64			
7	Der Gray-Code	22	27	Der 1:15 Teiler	66			
8	Die Karnaugh-Tafel einer Wechselschaltung	24	28	Die Faktorenzerlegung	68			
9	Der synchrone modulo-16-Zähler	28	29	Ein anderer 1:15 Teiler	70			
10	Der synchrone modulo-10-Zähler	30	30	Der 1:129 Teiler	72			
	Formelsammlung	32	31	Der Schrittmotor	74			
11	Der synchrone modulo-13-Zähler	34	32	Der Aufbau des Schrittmotors	76			
12	Ein synchroner modulo-16-Vorwärts-Rückwärts-Zähler	36	33	Der Halbschrittbetrieb mit Taster	78			
13	Übertragsbildung	38	34	Der CMOS Inverter	80			
14	Eine einfache Ampelsteuerung	40	35	Der Schrittmotor im Vollschrittbetrieb	82			
15	Der asynchrone Dualzähler	42	36	Ansteuerung des Schrittmotors vom Binärteiler	84			
16	Der asynchrone Rückwärts-Dualzähler	44	37	Der Polwender	86			
17	Der asynchrone Dezimalzähler	46	38	Richtungsumschaltung	88			
18	Der asynchrone Rückwärts-Dezimalzähler	48	39	Ansteuerschaltung für Halbschrittbetrieb	90			
			40	Zähleransteuerung für Halbschrittbetrieb	92			
			41	Eine Nachführsteuerung				

\*) Für die Versuche Nr. 25 und 42 sind Bauteile aus »Optoelektronik und Solartechnik«, sowie ein Differenzverstärker-Baustein, der im Baukasten »Operationsverstärker« enthalten ist, erforderlich. Einige Versuche benötigen Wechselspannung, hierfür wird das Lectron Netzgerät empfohlen.

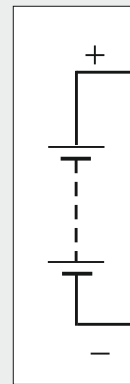
# Spannungsquellen



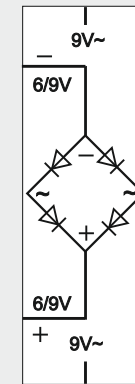
Die Lectron Schaltungen können aus verschiedenen Spannungsquellen versorgt werden



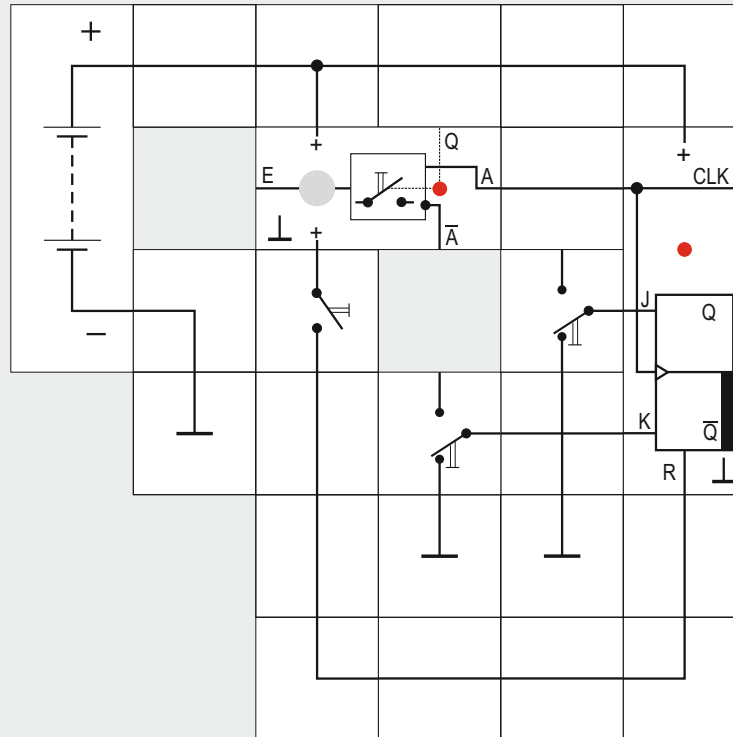
Batterie - Anschlussbaustein 2 - polig für 9V Batterie oder 6 Stück Mignon im Batteriekasten



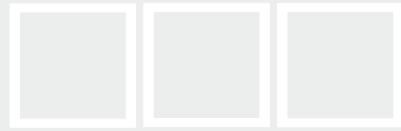
9V Batterie im Batteriebaustein



Netzteil LN 500 220/6-9V= stabilisiert 3-12V AC, für einige Versuche erforderlich







das Ausgangssignal erst schaltet, wenn der Eingang schon wieder gesperrt ist. Daraus folgen zwei wichtige Eigenschaften:

- ☞ In einer langen Kette von Flipflops, die alle vom selben Takt gesteuert werden, kann eine am Eingang des ersten Flipflops liegende Information mit dem ersten Taktimpuls auch nur in dieses Flipflop übernommen werden; das zweite Flipflop ist bereits gesperrt, wenn sich die Ausgänge des ersten ändern. Diese Eigenschaft ist zum Aufbau von Schieberegistern wichtig.
- ☞ Die Ausgänge eines Zählflipflops können über Verknüpfungsglieder oder direkt wieder an seine eigenen Eingänge geführt werden, eine für Zählschaltungen notwendige Eigenschaft.

Für das JK-Flipflop gilt die folgende Wahrheitstafel:

J	K	$Q_{n+1}$
0	0	$Q_n$
0	1	0
1	0	1
1	1	$\overline{Q_n}$

Wenn J und K auf »1« sind, bringt jede steigende Taktflanke das Flipflop in die jeweils entgegengesetzte Lage. Bei J = K = »0« passiert gar nichts, bei

J = »1« und K = »0« hat das Flipflop nach Erscheinen eines Taktimpulses auf jeden Fall anschließend eine »1« gespeichert; bei J = »0« und K = »1« ist anschließend eine »0« gespeichert, ganz gleich welchen Inhalt die Speicherzelle vorher hatte.

Der Lectron Funktionsbaustein »JK-Master-Slave-Flipflop« hat noch einige Zusatzeigenschaften:

Mit dem Rücksetzsignal R = »1« kann er unabhängig vom Takt in die Grundstellung gebracht werden. Der Rücksetzeingang ist intern hochohmig mit Masse verbunden; wenn er nicht benötigt wird, kann er unbeschaltet bleiben.

Die Eingänge J und K sind dagegen intern hochohmig mit Versorgungsspannung verbunden. Bleiben sie unbeschaltet, so wirkt das wie J = K = »1« und entsprechend der letzten Zeile der Wahrheitstafel schaltet das Flipflop bei jedem Taktimpuls in den jeweils anderen Zustand.

Der Takteingang CLK muss immer extern beschaltet sein.

Die Leuchtdiode zeigt den Zustand des Q-Ausgangs an.

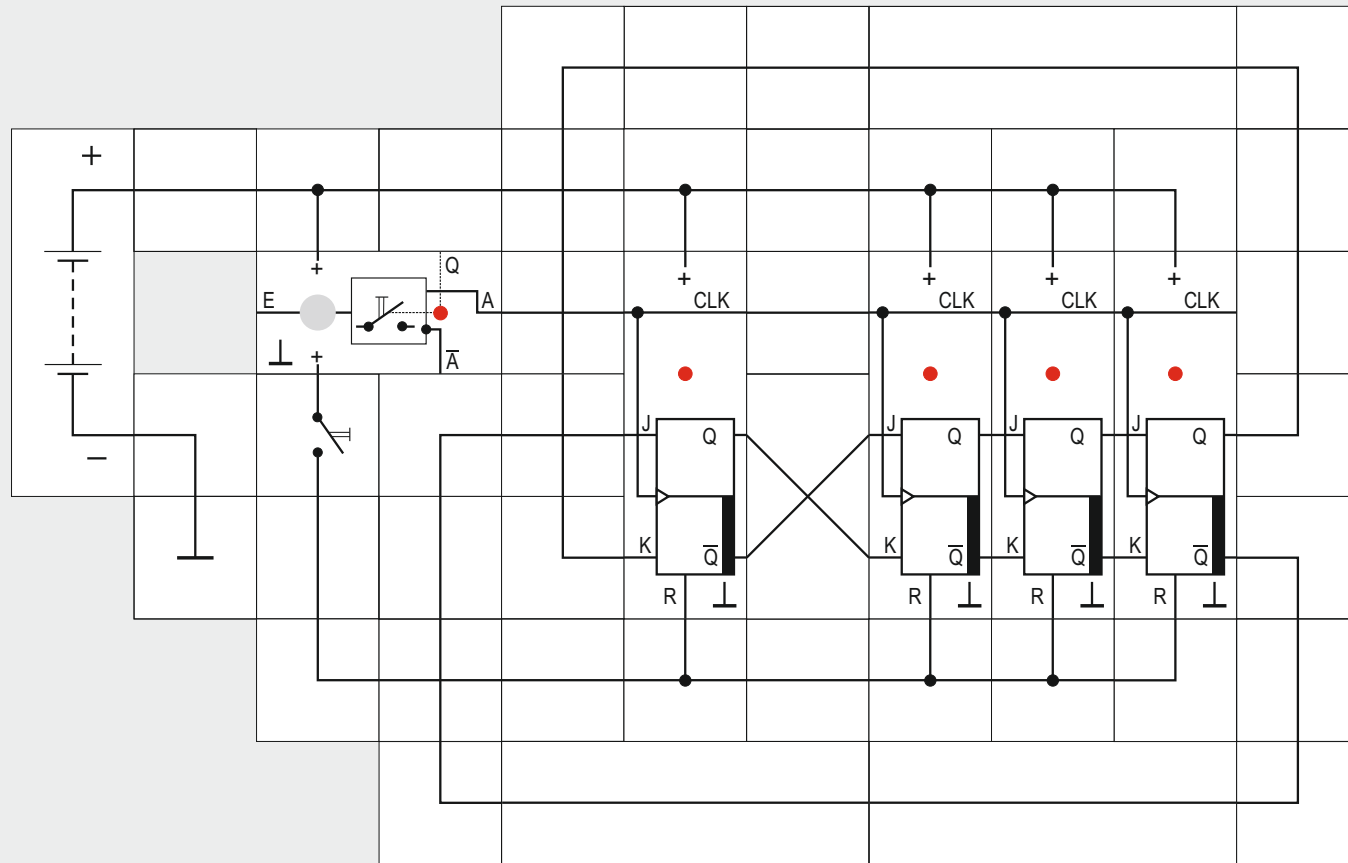
Mit dem Versuchsaufbau können wir uns noch einmal überzeugen, dass sich das Flipflop wie beschrieben verhält. Wichtig ist zur Takterzeugung die entprellte Taste zu nehmen, da pro Tastenbetätigung nur ein Taktimpuls erscheinen soll.

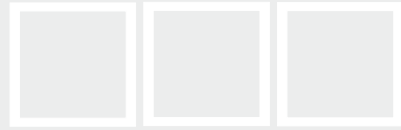
## Versuch 1

### Das JK-Flipflop

Der Lectron Baukasten »Zähler & Schrittmotor« ist als Ergänzungskasten zu »Digitaltechnik« gedacht und baut darauf auf. Die dort erarbeiteten Ergebnisse werden als bekannt vorausgesetzt, trotzdem soll zunächst noch einmal das JK-Flipflop mit seinen wesentlichen Eigenschaften angeführt werden, da es das Basiselement für die zu entwerfenden Zähler ist.

Die grundlegende Idee von Zählflipflops ist die Trennung von Eingang und Ausgang in dem Sinn, dass



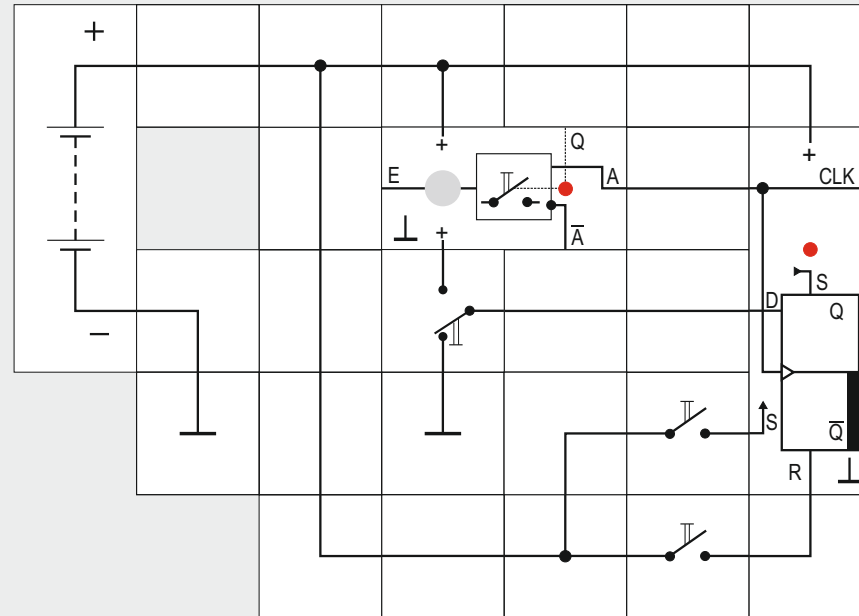
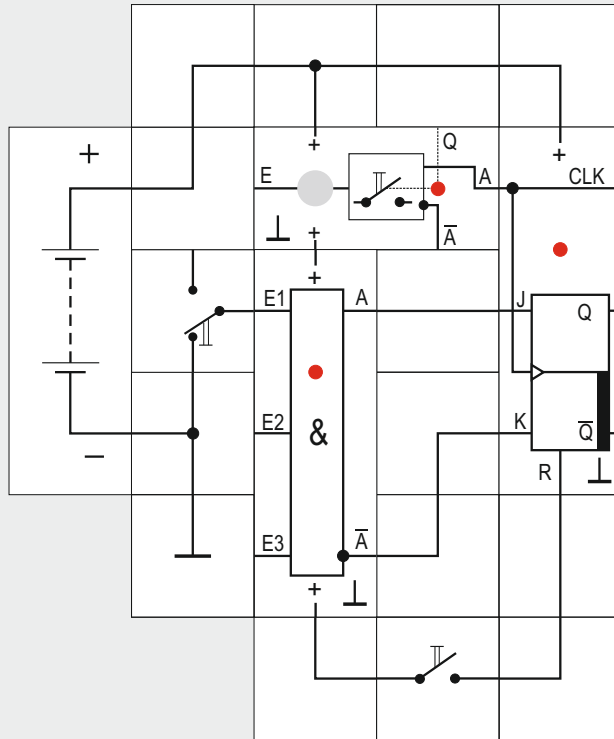


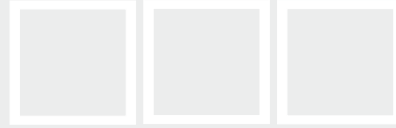
## Versuch 2

### Schieberegister aus JK-Flipflops

Als erste Anwendung wollen wir das bereits angesprochene Schieberegister mit vier JK-Flipflops aufbauen, und zwar soll es ein Ringschieberegister werden. Das bedeutet, die Ausgänge des letzten Flipflops in der Kette sind wieder auf die Eingänge des ersten geführt. In dem Ringschieberegister soll eine »1« kreisen, die bei jedem Taktimpuls ein Flipflop weiter wandert. Es wäre schön, wenn die »1« bereits beim Betätigen der Rücksetztaste in der ersten

Schieberegisterzelle wäre. Leider lassen die Lectron Funktionsbausteine das nicht ohne weiteres zu: Aus Mangel an Kontaktplättchen ist nur der R-Eingang des intern verwendeten integrierten JK-Flipflop-Bausteins herausgeführt, der für diesen Anwendungsfall hilfreiche S-Eingang ist nicht zugänglich. Das Problem ist trotzdem elegant lösbar: Wenn wir alle R-Eingänge an die Reset-Taste anschließen und diese betätigen, sind alle vier Registerzellen auf »0« gesetzt. Ein »Kreuzen« der Ausgänge Q und  $\bar{Q}$  des ersten Flipflops führt dazu, dass beim ersten Taktimpuls eine »1« ins zweite Flipflop geschoben wird. Damit nun nicht für die nächsten drei Schritte ständig weiter eine »1« ins zweite Flipflop gelangt, müssen wir dafür sorgen, dass nach dem ersten Taktimpuls im ersten Flipflop ebenfalls eine »1« gespeichert wird, die sich nach der Kreuzung zur »0« wandelt. Dies ist ganz einfach zu bewerkstelligen, indem wir die Ausgänge der letzten Zelle ebenfalls über Kreuz auf die Eingänge der ersten geben. Obwohl sich die JK-Flipflops nur rücksetzen lassen, schaffen wir es durch diesen Trick eine »1« bereits beim Grundstellen im Schieberegister zu erzeugen. Wir müssen allerdings darauf achten, dass die Leuchtdiodenanzeige der ersten Zelle gerade immer den invertierten Inhalt anzeigt und der eigentliche Zellenausgang der  $\bar{Q}$ -Ausgang ist.





LAY) in vielen Anwendungsfällen zu finden. Es entsteht mit  $J = \bar{K} = D$  und übernimmt taktgesteuert das an seinem D-Eingang liegende Signal. Wegen seiner Bedeutung gibt es im vorliegenden Baukasten vier Funktionsbausteine davon, die sich häufig an Stelle eines JK-Flipflops einsetzen lassen und den Schaltungsaufbau vereinfachen. Durch den Wegfall des K-Eingangs ist auch ein Kontaktplättchen frei, das mit dem asynchron wirkenden S-Eingang belegt wird. Im Funktionsbaustein befindet sich der integrierte Baustein CD4013, der zwei D-Flipflops enthält; sie sind parallel geschaltet. R- und S-Eingang sind intern hochohmig mit Masse verbunden, die Eingänge können unbeschaltet bleiben, wenn sie nicht genutzt werden. Der CLK-Eingang muss immer beschaltet werden, der D-Eingang ist intern hochohmig mit dem  $\bar{Q}$ -Ausgang verbunden. Das hat den Vorteil, dass wir ihn unbeschaltet lassen können, wenn wir das D-Flipflop als Binärteiler einsetzen. Die vollständige Beschaltung des Bausteins ist angegeben.

Mit den beiden Testschaltungen wollen wir das Verhalten des D-Flipflops nachprüfen und zeigen, dass sich beide Flipflops gleich verhalten. Das D-Flipflop können wir zusätzlich asynchron setzen, wobei auch wieder die Nebenbedingung  $S \wedge R = »0«$  eingehalten werden muss.

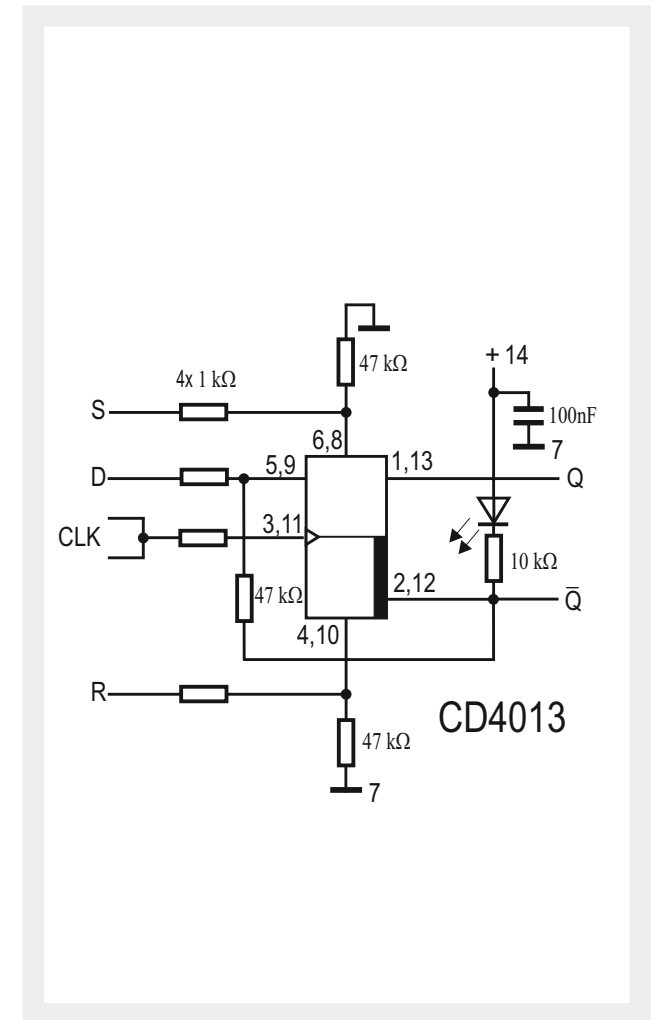
## Versuch 3

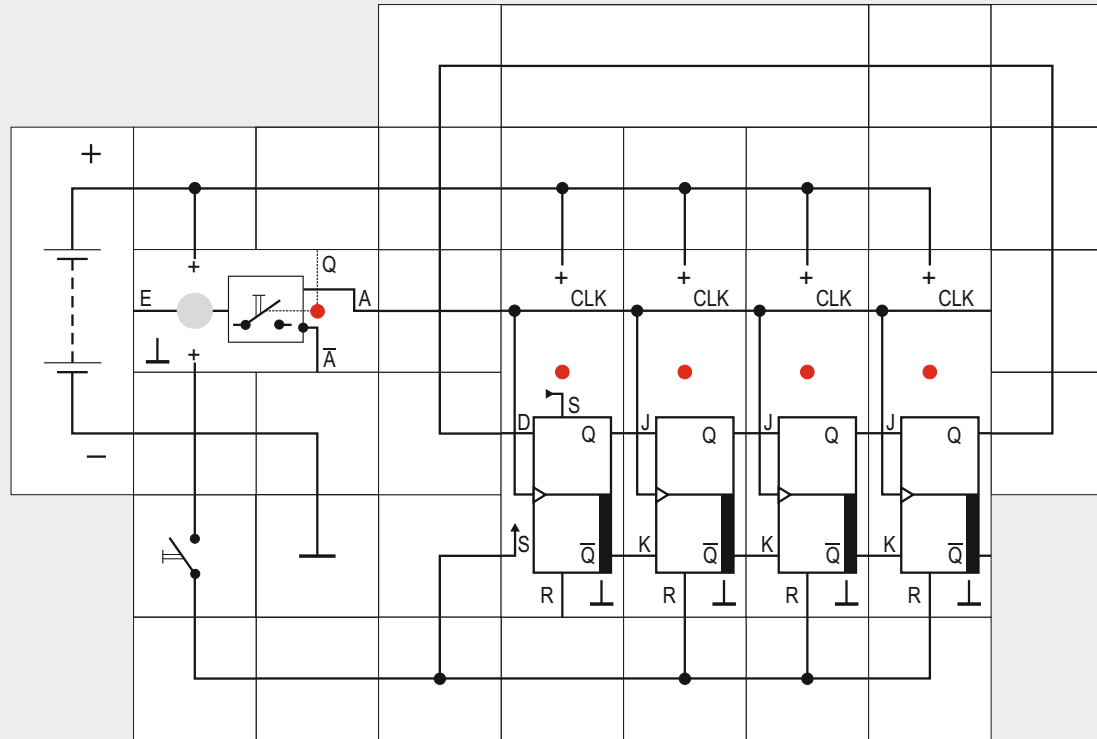
### Das D-Flipflop

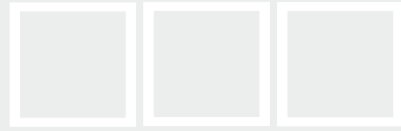
Aus einem JK-Flipflop lassen sich leicht durch passende Belegung des J- und des K-Eingangs andere Flipfloptypen erzeugen. So erhält man beispielsweise ein taktgesteuertes RS-Flipflop, wenn man  $J = S$  und  $K = R$  macht und die Nebenbedingung  $S \wedge R = »0«$  einhält. Dieser R-Eingang darf nicht mit dem asynchron wirkenden R-Eingang verwechselt werden.

Ein T-Flipflop (engl. TOGGLE) entsteht, wenn man  $J = K = T$  macht. Bei  $T = »1«$  schaltet es bei jedem Taktimpuls CLK in die jeweils andere Lage, bei  $T = »0«$  ändert sich nichts.

Neben dem JK-Flipflop ist das D-Flipflop (engl. DE-







## Versuch 4

### Ringschieberegister mit D-Flipflops

Wir können jetzt das in Versuch 2 aufgebaute Ringschieberegister so abändern, dass wir als erstes Flipflop in der Kette statt des JK- ein D-Flipflop verwenden; da der Funktionsbaustein einen Setzeingang hat, ist es ganz einfach, aus der Grundstellung heraus mit einer »1« im Ring zu starten. Die beiden Kreuzungen sind also überflüssig geworden und die Rückführung von der letzten auf die erste Zelle braucht nur noch mit einer Leitung - vom Q-Ausgang zum D-Eingang - ausgeführt zu werden. Ein Aufbau nur mit D-Flipflops ist ebenfalls möglich, kostet aber mehr Geradenbausteine, weil der S-Eingang der drei folgenden Zellen nicht mit dem  $\bar{Q}$ -Ausgang der jeweils vorangehenden Zelle verbunden werden darf und Platz gelassen werden muss.

# Lectron

D	C	B	A	X
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0
0	0	1	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	0
0	1	1	1	1
1	0	0	0	0
1	0	0	1	0
1	0	1	0	0
1	0	1	1	1
1	1	0	0	0
1	1	0	1	1
1	1	1	0	1
1	1	1	1	1

Abb. 18.2 Wahrheitstafel des Beispiels

CD \ AB	00	01	11	10
	00	01	11	10
00				
01				
11				
10				

Abb. 18.1 Leere Karnaughtafel

CD \ AB	00	01	11	10
	00	01	11	10
00	0	0	0	0
01	0	0	1	0
11	0	1	1	1
10	0	0	1	0

Abb. 18.3 Karnaugh-Tafel des Beispiels

CD \ AB	00	01	11	10
	00	01	11	10
00				1
01		1	1	
11	1			1
10				1

$A \wedge \bar{B} \wedge \bar{D}$   
 $\bar{B} \wedge C \wedge D$   
 $\bar{B} \wedge C \wedge D$

Abb. 18.4 Zusammenfassung von Zweierblöcken

CD \ AB	00	01	11	10
	00	01	11	10
00	1			1
01				
11				
10	1			1

$\bar{B} \wedge \bar{D}$

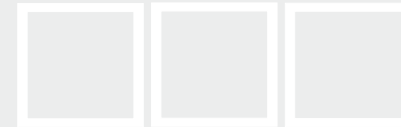
Abb. 18.6 Ein besonderer Viererblock

CD \ AB	00	01	11	10
	00	01	11	10
00	1	1		1
01	1	1		1
11		1	1	1
10		1	1	1

$\bar{B} \wedge \bar{C}$   
 $\bar{A} \wedge B$   
 $A \wedge C$

Abb. 18.5 Zusammenfassung von Viererblöcken





## Schaltungsoptimierung mit Karnaugh-Tafel

Bisher haben wir das logische Verhalten der Funktionsbausteine mit Wahrheitstafeln wiedergegeben, aus denen zu jeder der Eingangssignalkombination der logische Zustand des Ausgangssignals hervorging. Wir wollen nun eine spezielle Form der Wahrheitstafel kennen lernen, aus der man bei bis zu vier Eingangsvariablen bequem Schaltungen mit kleinem Aufwand herauslesen kann, nämlich die KARNAUGH-TAFEL. Bei mehr als vier Variablen ist auch sie nicht mehr übersichtlich. Abb. 18.1 zeigt eine Karnaugh-Tafel für vier Variable mit  $2^4 = 16$  Fel-

dern, sie entsprechen den 16 bei vier Variablen überhaupt möglichen Eingangssituationen. In die Felder werden die gewünschten Zustände des Ausgangs X auf die Eingangssituationen eingetragen, die am Tabellenrand angegeben sind. Als Beispiel wählen wir eine Schaltung, deren Ausgang X immer gleich »1« sein soll, wenn mindestens drei der vier Eingangssignale A bis D »1« sind. Anhand der bisher verwendeten Wahrheitstafel Abb. 18.2 füllen wir die Karnaugh-Tafel (Abb. 18.3) aus, die ja zunächst nur eine andere Form hat als die Wahrheitstafel. Soll eine Schaltung als UND-ODER-Schaltung in der sogenannten DISJUNKTIVEN NORMALFORM verwirklicht werden, so entspricht jede 1 der Karnaugh-Tafel (genauso wie jede Zeile der Wahrheitstafel, in der X = 1 ist) einem UND-Glied. Alle sich so ergebende UND-Glieder sind auf ein ODER-Glied zu führen. Bevor wir unser gewähltes Beispiel weiter verfolgen, soll an kleinen Beispielen gezeigt werden, wie man mit Hilfe der Karnaugh-Tafel vereinfachen kann (siehe weitere Abbildungen).

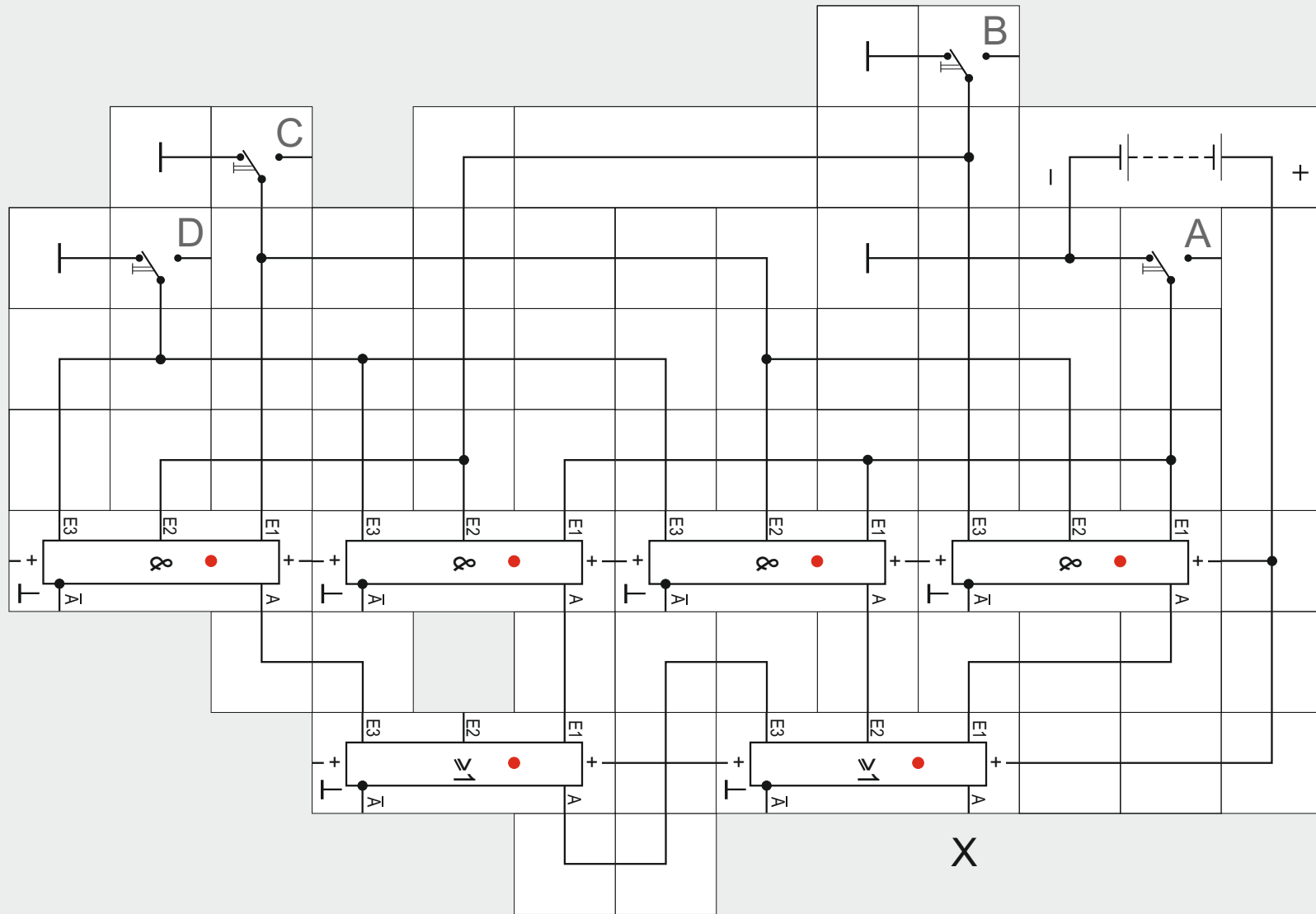
Bisher haben wir die Wahrheitstafel nur etwas anders aufgeschrieben, die Karnaugh-Tafel ist nun so angelegt, dass sich die auf ihren Rändern angegebenen Eingangssituationen beim Fortschreiten von Feld zu Feld jeweils nur um einen Schritt ändern. Aus zwei benachbart auftretenden 1-Werten lässt

sich deswegen leicht erkennen, dass Ausklammerungen im algebraischen Ausdruck und somit Schaltungsvereinfachungen möglich sind. Wir müssen weiter beachten, dass in der Karnaugh-Tafel der rechte Rand der Tafel mit dem linken benachbart ist und ebenso der obere Rand mit dem unteren. Aus den drei Beispielen des Bildes 18.4 ist ersichtlich, wie Zweierblöcke von 1en zusammen gefasst werden: Man lässt stets die Eingangsvariable weg, die sich ändert und schreibt die restlichen als UND-Verknüpfung hin, wobei diejenige Variable einen Negierungsstrich bekommt, die am Rand der betreffenden Zeile oder Spalte mit 0 angegeben ist.

Richtig gute Vereinfachungen entstehen, wenn 1en einen Viererblock bilden (siehe Abb. 18.5), dann können zwei Variable im algebraischen Ausdruck weggelassen werden, nämlich wieder die sich ändernden. Es gibt den kompakten und den langgestreckten Viererblock, der auch waagerecht liegen kann; in Abb. 18.5 ist gezeigt, wie es geht. Abb. 18.6 zeigt den »kompakten« Viererblock, den man vielleicht nicht gleich erkennt  $\bar{B} \wedge \bar{D}$ .

Bei einem Achterblock mit 1en bleibt nur noch eine Variable über.

Wir wollen uns jetzt unserer ursprünglichen Aufgabe wieder zuwenden und sehen, welche Vereinfachungen möglich sind.



		A B			
		0 0	0 1	1 1	1 0
C D	0 0	0	0	0	0
	0 1	0	0	1	0
1 1	1 1	0	1	1	1
	1 0	0	0	1	0

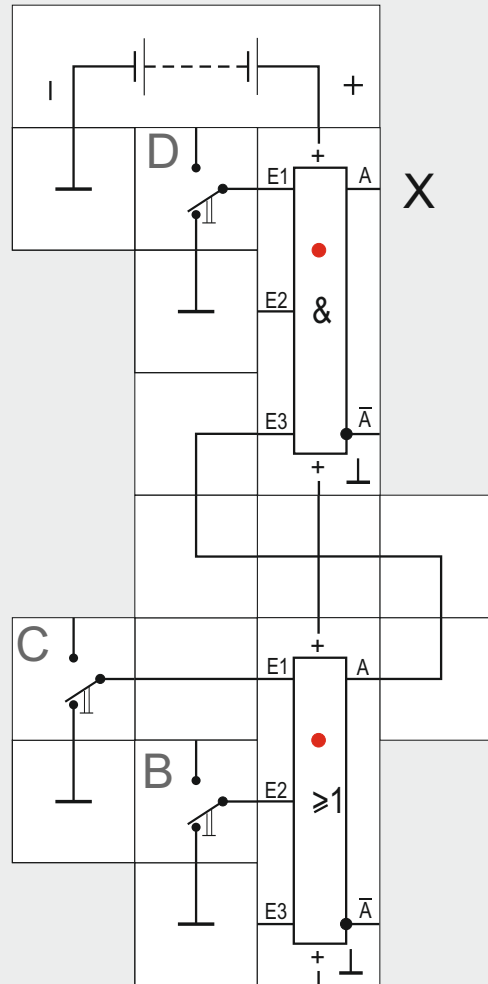
Abb. 20.1 Karnaugh-Tafel  
3-von-4-Funktion

$$X = (A \wedge B \wedge D) \vee (B \wedge C \wedge D) \vee (A \wedge B \wedge C) \vee (A \wedge C \wedge D)$$

## Versuch 5

### Die 3-von-4-Funktion

Wir gehen von der Karnaugh-Tafel unseres gewählten Beispiels aus und überlegen, wie wir die fünf 1en gut erfassen können. Wir müssen vier Zweierblöcke bilden, wobei die zentrale 1 vierfach erfasst wird, was aber zulässig ist. Die mathematischen Ausdrücke sind jeweils angegeben, alle vier müssen anschließend auf eine ODER-Verknüpfung gegeben werden. Da die Lectron Funktionsbausteine nur drei Eingänge haben, wird die ODER-Verknüpfung zweistufig ausgeführt.



D	C	B	A	X
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0
0	0	1	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	0
0	1	1	1	0
1	0	0	0	0
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	0	1	1	1
1	1	0	0	1
1	1	0	1	1
1	1	1	0	1
1	1	1	1	1

Abb. 22.1 Wahrheitstafel für Pseudotetraden

CD \ AB	00	01	11	10
	00	0 <sup>0</sup>	0 <sup>2</sup>	0 <sup>3</sup>
01	0 <sup>8</sup>	1 <sup>10</sup>	1 <sup>11</sup>	0 <sup>9</sup>
11	1 <sup>12</sup>	1 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	1 <sup>13</sup>
10	0 <sup>4</sup>	0 <sup>6</sup>	0 <sup>7</sup>	0 <sup>5</sup>

Abb. 22.2 Karnaugh-Tafel für Pseudotetraden

## Versuch 6

### Erkennen von Pseudotetraden

An einem weiteren Beispiel wollen wir das Arbeiten mit der Karnaugh-Tafel vertiefen: Wenn man einen Dezimalzähler aufbaut, benötigt man dazu wenigstens vier Flipflops. Mit vier Flipflops lassen sich jedoch  $2^4 = 16$  Zustände darstellen, so dass sechs überflüssig sind. Diese PSEUDOTETRADEN wollen wir mit Hilfe eines Schaltnetzes herausfinden. Dazu müssen wir den Variablen A bis D einen Stellenwert zuordnen und zwar zeigt A die  $2^0$ -Stelle, B die  $2^1$ -Stelle, C die  $2^2$ -Stelle und D die  $2^3$ -Stelle an. Mit A bis D sind im Folgenden immer die Ausgänge  $Q_A$  bis  $Q_D$  von Flipflops gemeint. Abb. 22.1 zeigt die Wertetabelle, Abb. 22.2 die Karnaugh-Tafel, wobei wir hier mit kleinen Zahlen in den Feldern den dezima-

len Wert zur Orientierung zusätzlich eingetragen haben. Der Ausgang X soll gleich 1 werden, wenn am Eingang des Schaltnetzes eine Pseudotetrade liegt, die Felder 10 bis 15 enthalten also eine 1. Wir können die sechs 1en mit zwei Viererblöcken, einem langen und einem kompakten abdecken. Der lange hat den Ausdruck  $C \wedge D$ , der kompakte ergibt  $B \wedge D$ , so dass  $X = B \wedge D \vee C \wedge D$  in der disjunktiven Normalform ist. Eine weitere Vereinfachung ergibt sich durch Ausklammern von D:

$X = (B \vee C) \wedge D$ . Die Schaltung lässt sich mit einem ODER und einem UND-Funktionsbaustein aufbauen, statt der Zählerausgänge sehen wir drei Um-

	A	0	0	1	1
	B	0	1	1	0
C	D				
0	0	0	3	2	1
0	1	15	12	13	14
1	1	8	11	10	9
1	0	7	4	5	6

Abb. 24.3 Karnaugh-Tafel für erweiterten Gray-Code

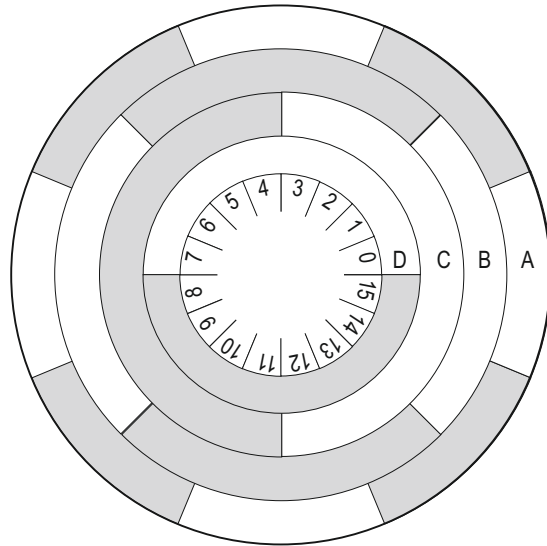
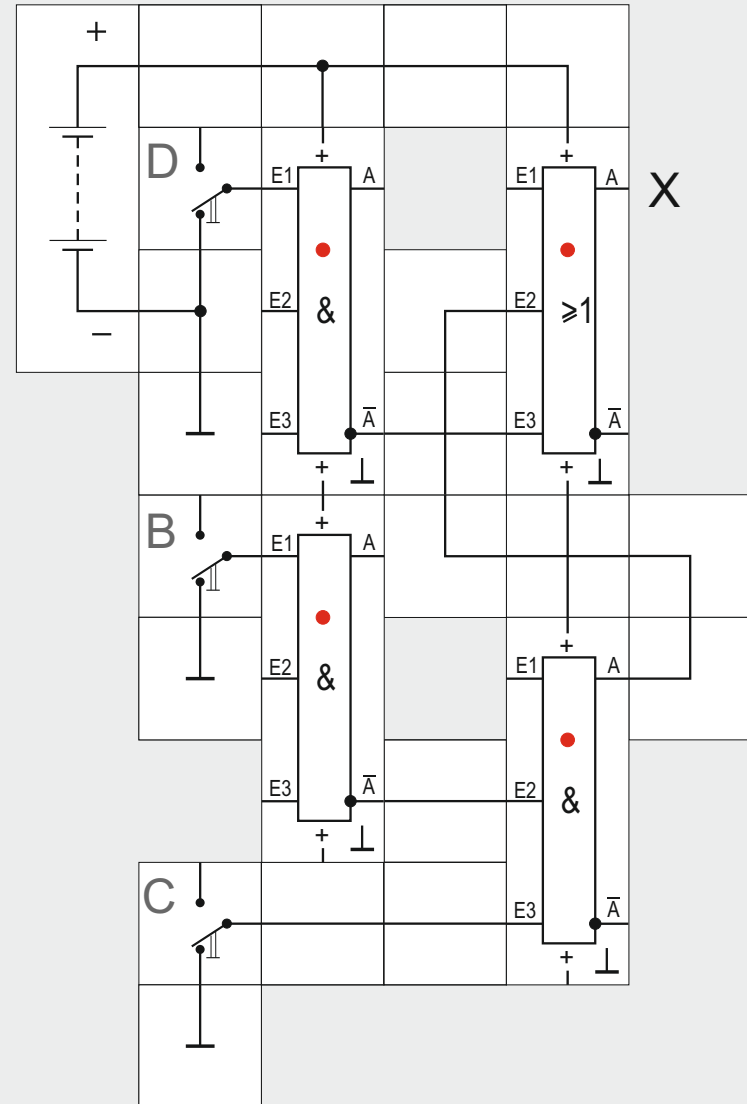


Abb. 24.4 Codescheibe für erweiterten Gray-Code



## Versuch 7

### Der Gray-Code

Das Ergebnis des vorherigen Versuchs hätten wir auch direkt bekommen, wenn wir statt der DISJUNTIVEN die KONJUNKTIVE NORMALFORM gewählt hätten. Sie verknüpft die Eingangssignale statt mit einer UND-ODER- mit einer ODER-UND-Anordnung. Dazu müssen in der Karnaugh-Tafel nicht die 1en, sondern die 0en abgedeckt werden; bei der Zusammenfassung fallen die sich ändernden Signale wieder weg und die übrigbleibenden werden negiert. Die Abbildung 24.1 zeigt, wie man vorgeht. Welche der beiden Formen günstiger ist, hängt von der Verteilung der 0en und 1en in der Karnaugh-Tafel und von den zur Verfügung stehenden Verknüpfungsbausteinen ab.

Als weiteres Beispiel wollen wir herausfinden, ob

eine Kombination von Eingangsvariablen ein gültiges Codewort des GRAY-CODES ist. Der Gray-Code ist ein EINSCHRITTIGER oder PROGRESSIVER CODE, bei dem sich beim Weiterzählen immer nur eine Stelle im Codewort ändert. Dies hat Vorteile z. B. beim Abtasten einer Codescheibe, die den Drehwinkel der Scheibenachse digital codiert liefern soll. Beim Drehen der Scheibe wechseln niemals zwei oder mehr Stellen gleichzeitig, so dass durch Zwischenstellungen und den damit verbundenen Abtastfehlern keine Fehlinformationen entstehen. Abb. 24.2 zeigt die bereits ausgefüllte Karnaugh-Tafel. Wir erkennen beim Hochzählen von 0 aus (kleine Ziffern in den Feldern), dass aufeinanderfolgende Ziffern auf benachbarten Feldern liegen, sich pro Zählschritt also tatsächlich nur eine Variable ändert. Außerdem sieht man, dass der Code nicht vollständig ist, beim Übergang von 9 auf 0 wird die Regel nicht eingehalten.

Wir wählen wieder die disjunktive Normalform und erhalten das angegebene Ergebnis für X. An unserem Versuchsaufbau mit Umschaltern können wir das Ergebnis nachprüfen.

Der Vollständigkeit halber ist auch noch die Karnaugh-Tafel des erweiterte Gray-Codes mit einer entsprechenden Codescheibe angegeben (Abb. 24.3 u. 24.4).

CD \ AB	00	01	11	10
00	0 <sup>0</sup>	0 <sup>2</sup>	0 <sup>3</sup>	0 <sup>1</sup>
01	0 <sup>8</sup>	1 <sup>10</sup>	1 <sup>11</sup>	0 <sup>9</sup>
11	1 <sup>12</sup>	1 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	1 <sup>13</sup>
10	0 <sup>4</sup>	0 <sup>6</sup>	0 <sup>7</sup>	0 <sup>5</sup>

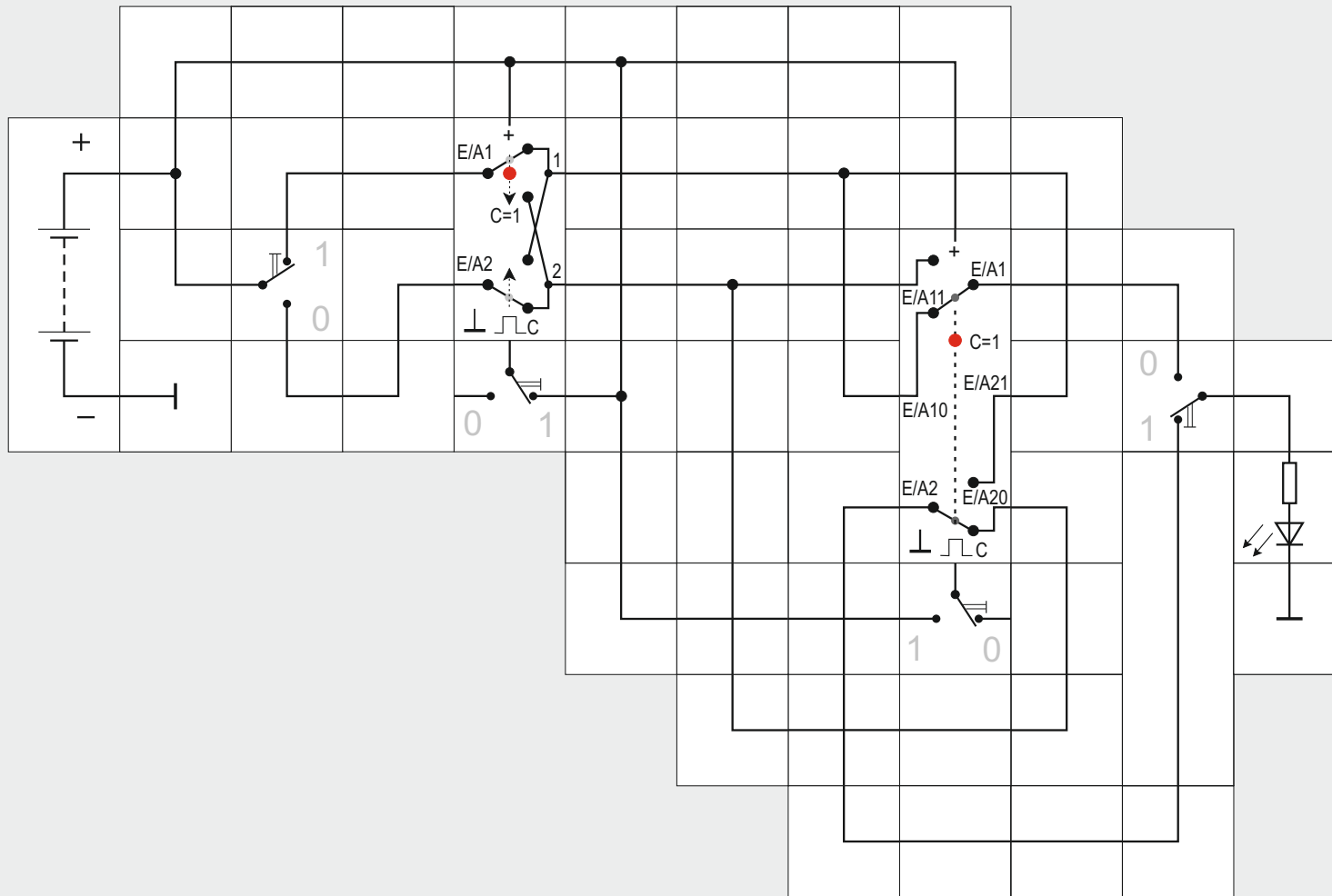
$X = (B \vee C) \wedge D$

Abb. 24.1 Karnaugh-Tafel für Pseudotetraden

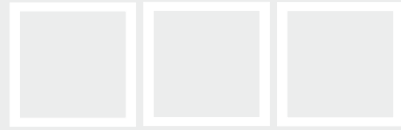
CD \ AB	00	01	11	10
00	1 <sup>0</sup>	1 <sup>3</sup>	1 <sup>2</sup>	1 <sup>1</sup>
01	0	0	0	0
11	1 <sup>8</sup>	0	0	1 <sup>9</sup>
10	1 <sup>7</sup>	1 <sup>4</sup>	1 <sup>5</sup>	1 <sup>6</sup>

$X = (\bar{B} \wedge C) \vee \bar{D}$

Abb. 24.2 Karnaugh-Tafel für Gray-Code







## Versuch 8

### Die Karnaugh-Tafel einer Wechselschaltung

Bevor wir uns an den Entwurf von Zählstufen heranwagen, soll noch eine Schaltung vorgestellt werden, deren Funktion so »sperrig« ist, dass sie sich mit Hilfe der Karnaugh-Tafel nicht vereinfachen lässt, nämlich die Wechselschaltung. Es ist eine EXOR – Verknüpfung von vier Variablen; zunächst werden jeweils zwei Variable EXOR-verknüpft und dann die beiden Ergebnisse noch einmal. Die Funktion  $X$  ist immer dann 1, wenn eine ungerade Anzahl von Variablen ebenfalls 1 ist, was in der Karnaugh-Tafel zu einer schachbrettartigen Verteilung von 0en und 1en führt. Im Alltag begegnet uns diese Schaltung als Wechselschaltung im Treppenhaus, aufgebaut mit zwei Umschaltern und zwei Kreuzschaltern.

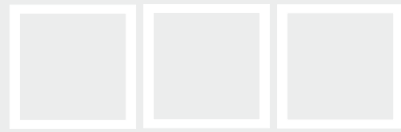
Wir haben in diesem Kasten einen elektronischen Kreuzschalter, den zweiten müssen wir uns aus dem Transmission-Gate des »Digitalkastens« zusammenbauen, wobei wir uns an der Beschaltung des ersteren orientieren können. Mit  $C = 0$  stehen die Schalter wie auf der Abdeckplatte angegeben, mit  $C = 1$  in der jeweils anderen Stellung. Da die C-Eingänge beider Funktionsbausteine intern hochohmig mit Masse verbunden sind, brauchen die Umschalter nur gegen Versorgungsspannung zu schalten. Es ergibt sich die angegebene Versuchsschal-

tung. Mit jedem Schalter lässt sich unabhängig von den anderen die LED an- und ausschalten.

Eine kleine Überlegung führt ebenfalls dazu, dass die Karnaugh-Tafel ein Schachbrettmuster sein muss: Angenommen, die LED leuchtet, was einem Feld mit einer 1 in der Tafel entspricht, dann kann man mit jedem der vier Schalter (jeder der vier Variablen) die LED ausschalten, d.h. mit einem Schritt in ein 0-Feld gelangen. Da sich nur eine Variable ändert, muss es immer ein benachbartes Feld sein, woraus folgt, alle vier benachbarten Felder sind 0-Felder. Die gleiche Überlegung lässt sich auch für ein 0-Feld als Ausgangsfeld mit dunkler LED anstellen; es muss von vier 1-Feldern umgeben sein, was letztendlich auf ein Schachbrettmuster hinausläuft.

		A		B	
		0	1	0	1
C	D	0	1	0	1
	0	0	0	1	0
0	1	1	0	1	0
1	1	0	1	0	1
1	0	1	0	1	0

Abb. 26.1 Karnaugh-Tafel für Wechselschaltung



## Versuch 9

### Der synchrone modulo-16-Zähler

Zum Zählerentwurf benötigen wir neben der Karnaugh-Tafel eine weitere Übersicht, in der wir das Schaltverhalten eines JK-Flip-Flops in Abhängigkeit seiner Eingangszustände festhalten wollen (Abb. 28.1).

Die Übersicht ist folgendermaßen zu lesen:

- ☞ Liegt zur Zeit  $t_n$  am Ausgang Q des Flipflops eine 0 und soll diese beim nächsten Takt zur Zeit  $t_{n+1}$  nicht geändert werden, so muss am Eingang J eine 0 anliegen; es ist gleichgültig, was am Eingang K anliegt ( $K = x$ ).
- ☞ Soll dagegen Ausgang Q eine 1 beibehalten, muss  $K = 0$  sein, der Eingang J ist nicht vorgeschrieben ( $J = x$ ).
- ☞ Soll ein Wechsel von 0 nach 1 stattfinden, muss eine 1 an J anliegen, K kann 0 oder 1 ( $K = x$ ) sein.
- ☞ Soll das Flipflop von 1 nach 0 schalten, so muss an K eine 1 liegen, der Eingang J ist nicht vorgeschrieben ( $J = x$ ).

Aus diesen vier Vorschriften lesen wir ab, dass es für K nur dann eine zwingende Vorschrift gibt, wenn

	Ausgang konstant		Ausgang wechselt	
	0	1	0	1
$Q_n$	0	1	0	1
$Q_{n+1}$	0	1	1	0
K	x	0	x	1
J	0	x	1	x

Abb. 28.1  
Vorschriften-  
Übersicht für  
Eingänge eines  
JK-Flipflops

eine 1 beibehalten werden soll oder ein Wechsel von 1 auf 0 bevorsteht. J ist entsprechend nur vorgeschrieben, wenn eine 0 beibehalten werden oder ein Wechsel auf 1 stattfinden soll. 0 bedeutet jeweils kein Wechsel, 1 ein Wechsel.

Wir wollen nun einen synchronen Zähler bis 16 (modulo-16-Zähler) entwerfen und geben dazu die Wahrheitstafel noch einmal an (Abb.28.2). A ist die  $2^0$ -Stufe, B die  $2^1$ -Stufe usw.; im Lageplan der Karnaugh-Tafel sind die dezimalen Werte mit kleinen Ziffern angegeben. Für jeden J- und jeden K-Eingang der vier Zählstufen muss mit Hilfe einer Karnaugh-Tafel die Ansteuerschaltung entworfen werden.

D	C	B	A	Dez
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	2
0	0	1	1	3
0	1	0	0	4
0	1	0	1	5
0	1	1	0	6
0	1	1	1	7
1	0	0	0	8
1	0	0	1	9
1	0	1	0	10
1	0	1	1	11
1	1	0	0	12
1	1	0	1	13
1	1	1	0	14
1	1	1	1	15

Abb. 28.2 Wahrheitstafel vom  
mod-16-Zähler

Wir fangen mit  $J_D$  an. In der Karnaugh-Tafel Abb.29.1 sind bereits die Dezimalzahlen in den dazu gehörigen Feldern vorhanden. Ein Blick auf die Wahrheitstafel Abb. 28.2 sagt uns, dass wir in die Karnaugh-Tafel auf den Plätzen 0 bis 6 eine 0 eintragen müssen, weil keine Umschaltung des Flipflops D folgt und die gespeicherte 0 beibehalten werden soll. In das Feld mit der Nummer 7 kommt eine 1, weil sich der Ausgang mit dem nächsten Takt auf 1 ändern soll. Auf den Plätzen 8 bis 14 ist nichts vorgeschrieben, weil die 1 unverändert bleiben soll. Auch für Platz 15 ist nichts vorgeschrieben, weil der Wechsel von 1 nach 0 folgt. Wir können über die Felder, für die nichts vorgeschrieben ist, frei verfügen. In unserem Fall belegen wir sie mit 0en, ausgenommen Feld 15; hier kommt eine 1 hinein, die wir mit der 1 auf Feld 7 zusammenfassen und D eliminieren können. Wir erhalten dann  $J_D = A \wedge B \wedge C$ .

Als nächstes nehmen wir uns die Funktion des K-Eingangs  $K_D$  von demselben Flipflop vor. Die Felder 0 bis 6 bleiben leer, weil der Ausgang konstant auf 0 liegt und dann für K nichts vorgeschrieben ist. Auch für Feld 7 ist nichts vorgeschrieben, der bevorstehende Wechsel von 0 nach 1 berührt K nicht. Die Felder 8 bis 14 bekommen eine 0, weil der Ausgang die 1 halten muss und das Feld 15 bekommt eine 1, weil beim nächsten Takt der Ausgang  $Q_D$  von 1 nach 0 wechselt. Auch hier füllen wir alle Felder mit 0en auf, bis auf Feld 7, das eine 1 bekommt. Die Zusammenfassung von Feld 15 mit Feld 7 ergibt dieselbe Funktion für  $K_D$  wie für  $J_D$ , nämlich  $A \wedge B \wedge C$ , was schaltungstechnisch Aufwand spart.

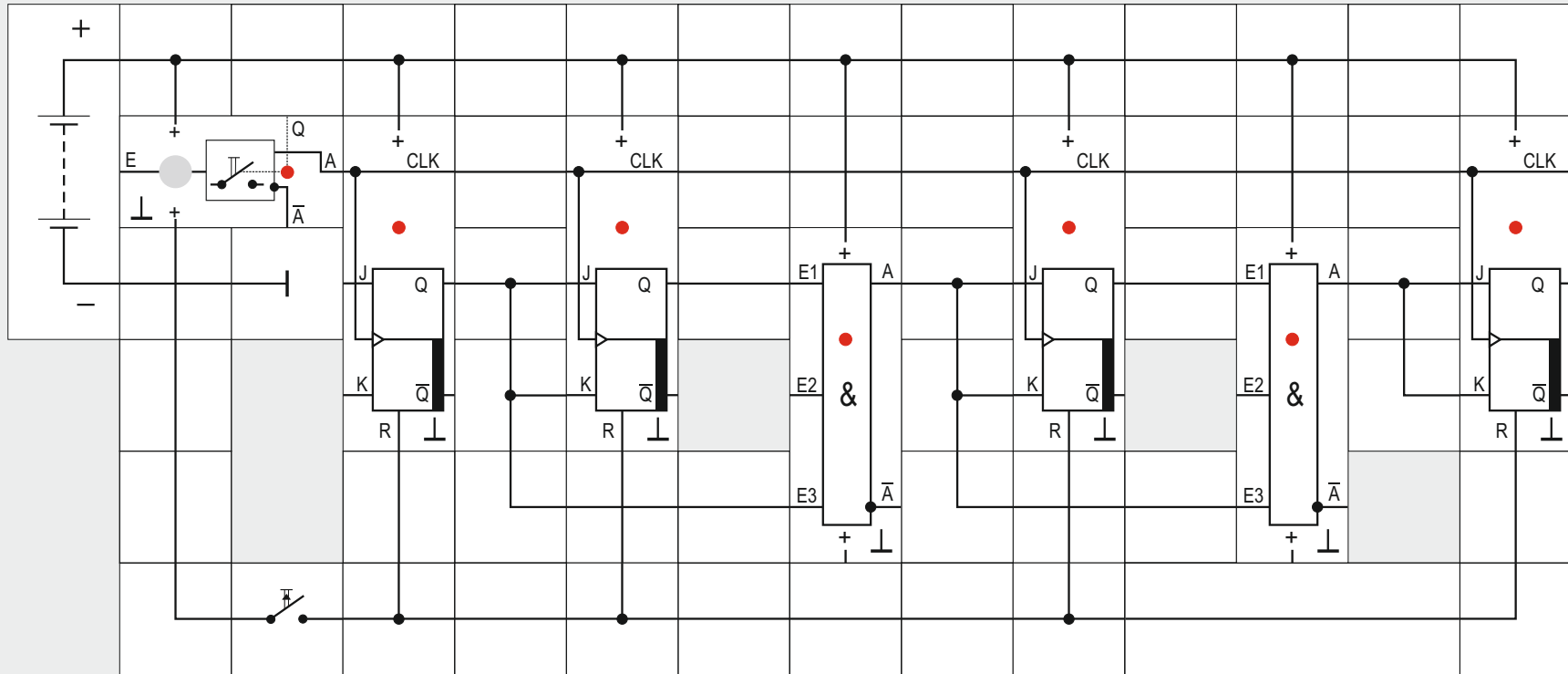
Als nächste Funktion kommt  $J_C$  an die Reihe: Die Felder 0 bis 2 bekommen ein 0, weil  $Q_C$  auf 0 bleiben muss, Feld 3 bekommt eine 1, denn im nächsten Schritt steht ein Wechsel auf 1 bevor. Die Felder 4 bis 6 und 7 sind beliebig, weil  $Q_C = 1$  bleibt, bzw. ein Wechsel auf 0 bevorsteht. In den Feldern 8 bis 10 steht eine 0, in Feld 11 eine 1, ( $Q_C = 0$ , bzw. Wechsel auf 1), die restlichen Felder sind wieder beliebig. Wir füllen geschickt auf, so dass ein langer Viererblock mit 1en entsteht.  $J_C$  ergibt sich zu  $A \wedge B$ . Auf der nächsten Seite sind alle notwendigen Tafeln für den Zählerentwurf abgebildet.

CD \ AB		00		01		11		10	
		0	1	0	1	0	1	0	1
0	0	0 <sup>0</sup>	0 <sup>2</sup>	0 <sup>3</sup>	0 <sup>1</sup>	0	0	0	0
0	1	0 <sup>8</sup>	0 <sup>10</sup>	0 <sup>11</sup>	0 <sup>9</sup>	0	0	0	0
1	1	0 <sup>12</sup>	0 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	0 <sup>13</sup>	0	1 <sup>7</sup>	0	0
1	0	0 <sup>4</sup>	0 <sup>6</sup>	0	0	0	0	0	0

Abb. 29.1 Karnaugh-Tafel für  $J_D = Q_A \wedge Q_B \wedge Q_C$

CD \ AB		00		01		11		10	
		0	1	0	1	0	1	0	1
0	0	0 <sup>0</sup>	0 <sup>2</sup>	0 <sup>3</sup>	0 <sup>1</sup>	0	0	0	0
0	1	0 <sup>8</sup>	0 <sup>10</sup>	0 <sup>11</sup>	0 <sup>9</sup>	0	0	0	0
1	1	0 <sup>12</sup>	0 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	0 <sup>13</sup>	0	1 <sup>7</sup>	0	0
1	0	0 <sup>4</sup>	0 <sup>6</sup>	0	0	0	0	0	0

Abb. 29.2 Karnaugh-Tafel für  $K_D$



CD \ AB	00	01	11	10
00	0 <sup>0</sup>	0 <sup>2</sup>	1 <sup>3</sup>	0 <sup>1</sup>
01	0 <sup>8</sup>	0 <sup>10</sup>	1 <sup>11</sup>	0 <sup>9</sup>
11	0 <sup>12</sup>	0 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	0 <sup>13</sup>
10	0 <sup>4</sup>	0 <sup>6</sup>	1 <sup>7</sup>	0 <sup>5</sup>

Abb. 29.3 Karnaugh-Tafel für  $J_c = Q_A \wedge Q_B$

CD \ AB	00	01	11	10
00	0 <sup>0</sup>	0 <sup>2</sup>	1 <sup>3</sup>	1 <sup>1</sup>
01	0 <sup>8</sup>	0 <sup>10</sup>	1 <sup>11</sup>	1 <sup>9</sup>
11	0 <sup>12</sup>	0 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	1 <sup>13</sup>
10	0 <sup>4</sup>	0 <sup>6</sup>	1 <sup>7</sup>	1 <sup>5</sup>

Abb. 29.5 Karnaugh-Tafel für  $J_b = Q_A$

CD \ AB	00	01	11	10
00	1 <sup>0</sup>	1 <sup>2</sup>	1 <sup>3</sup>	1 <sup>1</sup>
01	1 <sup>8</sup>	1 <sup>10</sup>	1 <sup>11</sup>	1 <sup>9</sup>
11	1 <sup>12</sup>	1 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	1 <sup>13</sup>
10	1 <sup>4</sup>	1 <sup>6</sup>	1 <sup>7</sup>	1 <sup>5</sup>

Abb. 29.7 Karnaugh-Tafel für  $J_A = 1$

CD \ AB	00	01	11	10
00	0 <sup>0</sup>	0 <sup>2</sup>	1 <sup>3</sup>	0 <sup>1</sup>
01	0 <sup>8</sup>	0 <sup>10</sup>	1 <sup>11</sup>	0 <sup>9</sup>
11	0 <sup>12</sup>	0 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	0 <sup>13</sup>
10	0 <sup>4</sup>	0 <sup>6</sup>	1 <sup>7</sup>	0 <sup>5</sup>

Abb. 29.4 Karnaugh-Tafel für  $K_c$

CD \ AB	00	01	11	10
00	0 <sup>0</sup>	0 <sup>2</sup>	1 <sup>3</sup>	1 <sup>1</sup>
01	0 <sup>8</sup>	0 <sup>10</sup>	1 <sup>11</sup>	1 <sup>9</sup>
11	0 <sup>12</sup>	0 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	1 <sup>13</sup>
10	0 <sup>4</sup>	0 <sup>6</sup>	1 <sup>7</sup>	1 <sup>5</sup>

Abb. 29.6 Karnaugh-Tafel für  $K_b$

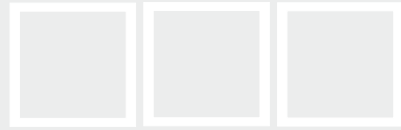
CD \ AB	00	01	11	10
00	1 <sup>0</sup>	1 <sup>2</sup>	1 <sup>3</sup>	1 <sup>1</sup>
01	1 <sup>8</sup>	1 <sup>10</sup>	1 <sup>11</sup>	1 <sup>9</sup>
11	1 <sup>12</sup>	1 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	1 <sup>13</sup>
10	1 <sup>4</sup>	1 <sup>6</sup>	1 <sup>7</sup>	1 <sup>5</sup>

Abb. 29.8 Karnaugh-Tafel für  $K_A$

Wir sehen, dass auch  $K_c = J_c$  ist, was wiederum den Schaltungsaufwand verringert, da die Verknüpfung nur einmal gebildet werden muss. Dies trifft auch für

die restlichen Verknüpfungen zu; darüber hinaus ist die Verknüpfung einer Zählstufe die »Vorverknüpfung« der nächsten, was sich günstig auf den Schaltungsaufwand auswirkt. Dass das nicht grundsätzlich so ist, werden wir beim nächsten Zähler, einem für die Praxis

wichtigen Dezimalzähler oder modulo-10-Zähler, sehen, der nach dem gleichen Verfahren gewonnen wird. Der Versuchsaufbau des modulo-16-Zählers ist natürlich identisch mit dem in »Digitaltechnik« mehr intuitiv entworfenen.



## Versuch 10

### Der synchrone modulo-10-Zähler

Dieser Zähler wird in der Praxis häufig benötigt, weil wir gemeinhin das Dezimalsystem benutzen. Ausgehend von der Wertetabelle Abb. 32.1 erzeugen wir uns mit Hilfe unserer Regeln die Karnaugh-Tafeln für alle J und K Verknüpfungen. Sie sind in den Abb. 32.2 bis 32.9 dargestellt. Verglichen mit dem modulo-16-Zähler sind die benötigten Verknüpfungen etwas komplizierter, da die Schaltfolgen der einzelnen Stufen nicht mehr ganz so regelmäßig sind, was sich in der Verteilung der 0en und 1en in den Tafeln widerspiegelt. Dies ist ganz allgemein zu beobachten: Je »krummer«  $n$  in einem modulo- $n$ -Zähler ist, desto komplizierter werden die Verknüpfungen. Wir werden dies bei dem folgenden Zähler wieder feststellen. Zu beachten ist noch die Umwandlung von  $J_b = A \wedge \bar{D}$  in die gleichwertige Verknüpfung  $\bar{A} \vee \bar{D}$  nach dem DE MORGANSCHEN GESETZ:

$$\overline{A \wedge B} = \bar{A} \vee \bar{B}$$

Die Schaltung lässt sich dann kompakter aufbauen; sie befindet sich auf Seite 34.

D	C	B	A	Dez
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	2
0	0	1	1	3
0	1	0	0	4
0	1	0	1	5
0	1	1	0	6
0	1	1	1	7
1	0	0	0	8
1	0	0	1	9
0	0	0	0	0

Abb. 32.1 Wahrheitstafel vom mod-10-Zähler

CD \ AB	00	01	11	10
	0 <sup>0</sup>	0 <sup>2</sup>	0 <sup>3</sup>	0 <sup>1</sup>
01	0 <sup>8</sup>	0 <sup>10</sup>	0 <sup>11</sup>	0 <sup>9</sup>
11	0 <sup>12</sup>	0 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	0 <sup>13</sup>
10	0 <sup>4</sup>	0 <sup>6</sup>	1 <sup>7</sup>	0 <sup>5</sup>

Abb. 32.2 Karnaugh-Tafel für  $J_D = Q_A \wedge Q_B \wedge Q_C$

CD \ AB	00	01	11	10
	0 <sup>0</sup>	0 <sup>2</sup>	1 <sup>3</sup>	1 <sup>1</sup>
01	0 <sup>8</sup>	0 <sup>10</sup>	1 <sup>11</sup>	1 <sup>9</sup>
11	0 <sup>12</sup>	0 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	1 <sup>13</sup>
10	0 <sup>4</sup>	0 <sup>6</sup>	1 <sup>7</sup>	1 <sup>5</sup>

Abb. 32.3 Karnaugh-Tafel für  $K_D = Q_A$

CD \ AB	00	01	11	10
	0	1	1	0
00	0 <sup>0</sup>	0 <sup>2</sup>	1 <sup>3</sup>	0 <sup>1</sup>
01	0 <sup>8</sup>	0 <sup>10</sup>	1 <sup>11</sup>	0 <sup>9</sup>
11	0 <sup>12</sup>	0 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	0 <sup>13</sup>
10	0 <sup>4</sup>	0 <sup>6</sup>	1 <sup>7</sup>	0 <sup>5</sup>

Abb. 32.4 Karnaugh-Tafel für  $J_c = Q_A \wedge Q_B$

CD \ AB	00	01	11	10
	0	1	1	0
00	0 <sup>0</sup>	0 <sup>2</sup>	1 <sup>3</sup>	1 <sup>1</sup>
01	0 <sup>8</sup>	0 <sup>10</sup>	0 <sup>11</sup>	0 <sup>9</sup>
11	0 <sup>12</sup>	0 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	0 <sup>13</sup>
10	0 <sup>4</sup>	0 <sup>6</sup>	1 <sup>7</sup>	1 <sup>5</sup>

Abb. 32.6 Karnaugh-Tafel für  $J_b = Q_A \wedge \bar{Q}_D$

CD \ AB	00	01	11	10
	0	1	1	0
00	1 <sup>0</sup>	1 <sup>2</sup>	1 <sup>3</sup>	1 <sup>1</sup>
01	1 <sup>8</sup>	1 <sup>10</sup>	1 <sup>11</sup>	1 <sup>9</sup>
11	1 <sup>12</sup>	1 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	1 <sup>13</sup>
10	1 <sup>4</sup>	1 <sup>6</sup>	1 <sup>7</sup>	1 <sup>5</sup>

Abb. 32.8 Karnaugh-Tafel für  $J_A = 1$

CD \ AB	00	01	11	10
	0	1	1	0
00	0 <sup>0</sup>	0 <sup>2</sup>	1 <sup>3</sup>	0 <sup>1</sup>
01	0 <sup>8</sup>	0 <sup>10</sup>	1 <sup>11</sup>	0 <sup>9</sup>
11	0 <sup>12</sup>	0 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	0 <sup>13</sup>
10	0 <sup>4</sup>	0 <sup>6</sup>	1 <sup>7</sup>	0 <sup>5</sup>

Abb. 32.5 Karnaugh-Tafel für  $K_c = Q_A \wedge Q_B$

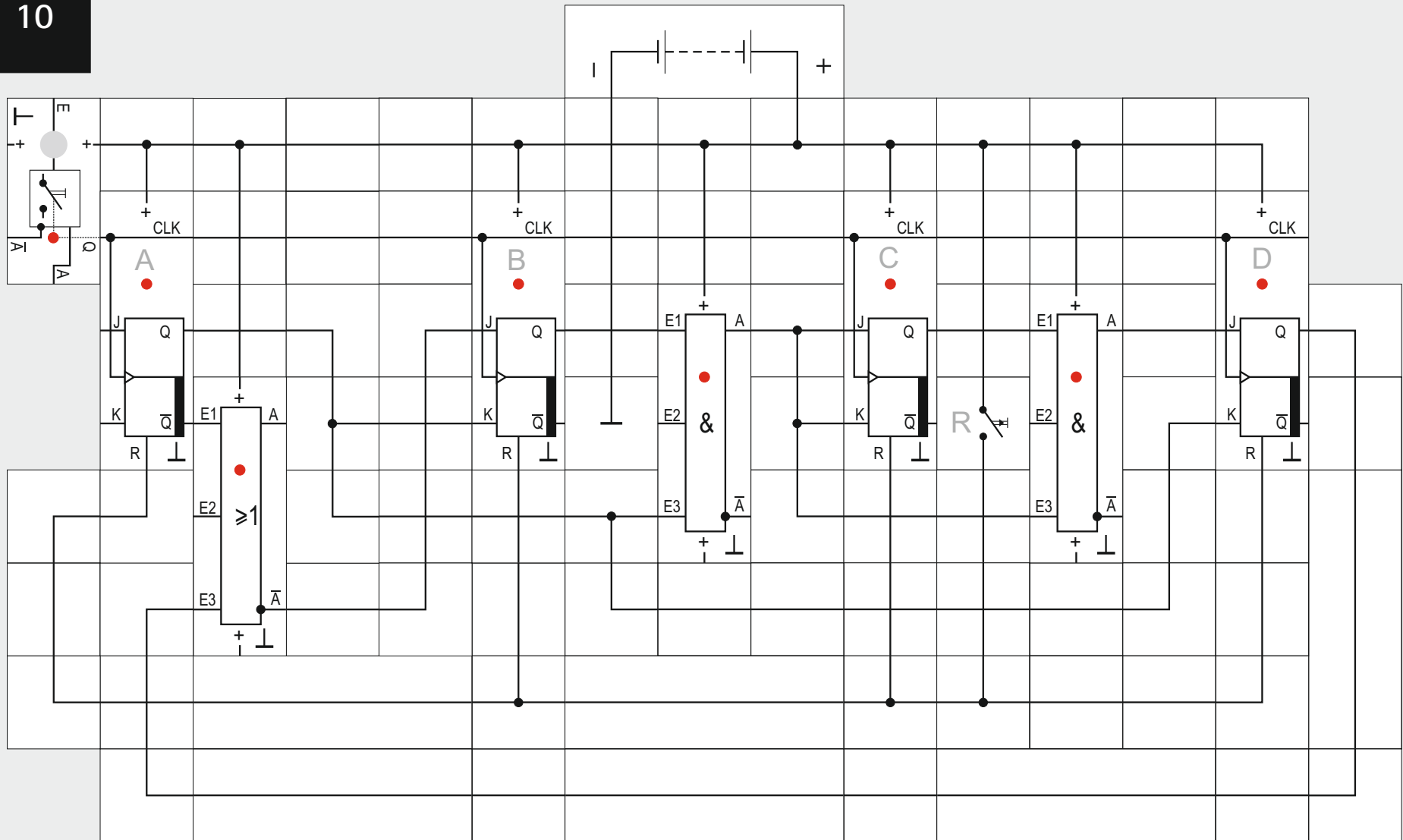
CD \ AB	00	01	11	10
	0	1	1	0
00	0 <sup>0</sup>	0 <sup>2</sup>	1 <sup>3</sup>	1 <sup>1</sup>
01	0 <sup>8</sup>	0 <sup>10</sup>	1 <sup>11</sup>	1 <sup>9</sup>
11	0 <sup>12</sup>	0 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	1 <sup>13</sup>
10	0 <sup>4</sup>	0 <sup>6</sup>	1 <sup>7</sup>	1 <sup>5</sup>

Abb. 32.7 Karnaugh-Tafel für  $K_b = Q_A$

CD \ AB	00	01	11	10
	0	1	1	0
00	1 <sup>0</sup>	1 <sup>2</sup>	1 <sup>3</sup>	1 <sup>1</sup>
01	1 <sup>8</sup>	1 <sup>10</sup>	1 <sup>11</sup>	1 <sup>9</sup>
11	1 <sup>12</sup>	1 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	1 <sup>13</sup>
10	1 <sup>4</sup>	1 <sup>6</sup>	1 <sup>7</sup>	1 <sup>5</sup>

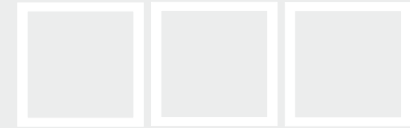
Abb. 32.9 Karnaugh-Tafel für  $K_A = 1$

10





# Formelsammlung



## Formelsammlung

Wir haben bereits einige Male Verknüpfungen aus Karnaugh-Tafeln umgeformt, weil dann die Schaltung günstiger mit den vorhandenen Bausteinen und dem Platz auf der Grundplatte aufgebaut werden konnte. Diese Umformungen unterliegen natürlich gewissen Gesetzen, die wir hier so zusammen gestellt haben, dass der duale Charakter der BOOLESCHEN ALGEBRA deutlich wird.

$$\begin{aligned}A \wedge 0 &= 0 \\A \wedge 1 &= A \\A \wedge A &= A \\A \wedge \bar{A} &= 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}A \wedge (B \wedge C) &= (A \wedge B) \wedge C \\&= A \wedge B \wedge C\end{aligned}$$

$$A \wedge B = B \wedge A$$

$$A \wedge (B \vee C) = (A \wedge B) \vee (A \wedge C)$$

$$\overline{A \wedge B} = \bar{A} \vee \bar{B}$$

$$\begin{aligned}A \wedge (A \vee B) &= A \\A \wedge (\bar{A} \vee B) &= A \wedge B \\(A \vee B) \wedge (\bar{A} \vee B) &= B\end{aligned}$$

## Grundregeln

$$\overline{\bar{A}} = A$$

$$\begin{aligned}A \vee 1 &= 1 \\A \vee 0 &= A \\A \vee A &= A \\A \vee \bar{A} &= 1\end{aligned}$$

## Assoziativgesetze

$$\begin{aligned}A \vee (B \vee C) &= (A \vee B) \vee C \\&= A \vee B \vee C\end{aligned}$$

## Kommutativgesetze

$$A \vee B = B \vee A$$

## Distributivgesetze

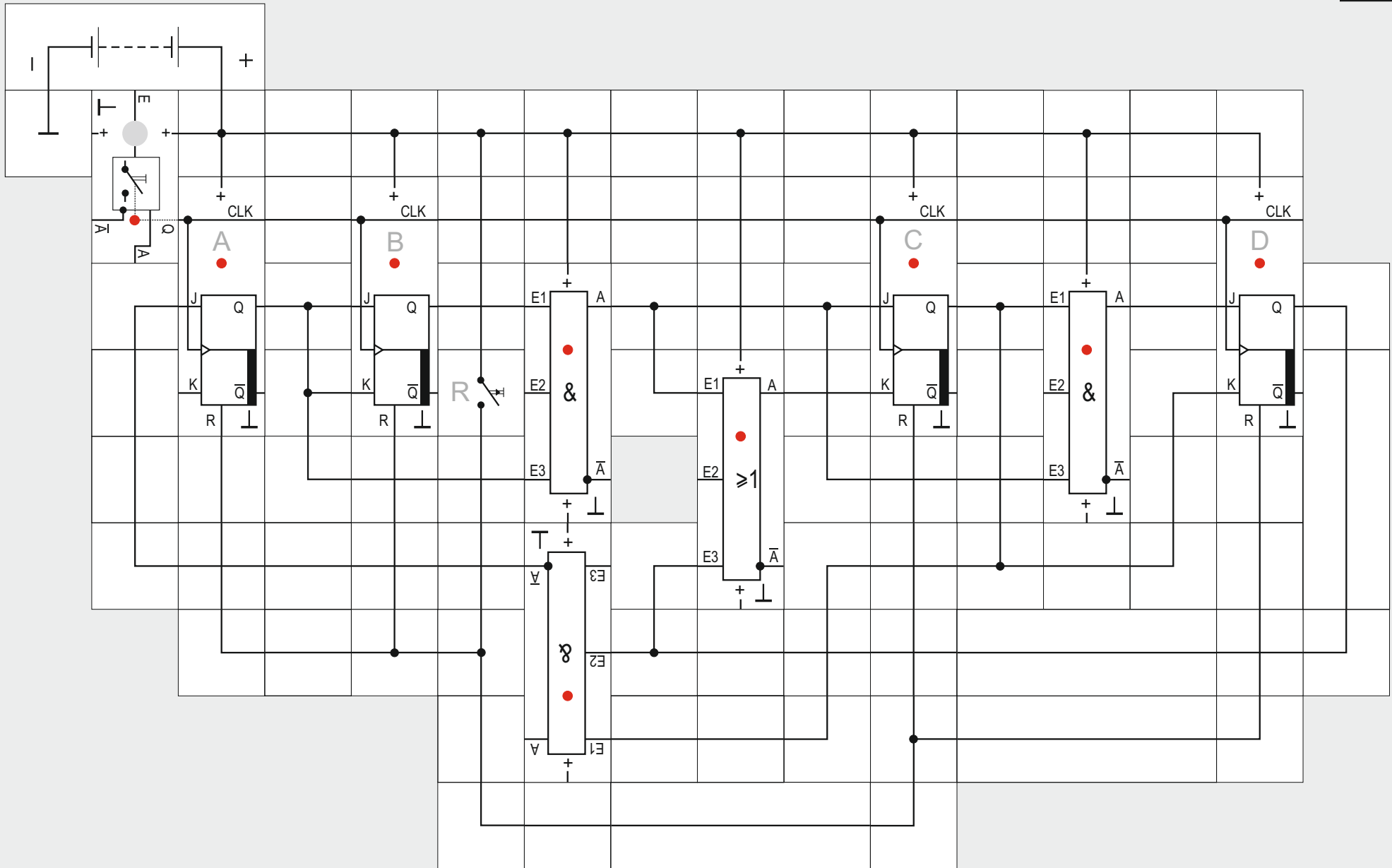
$$A \vee (B \wedge C) = (A \vee B) \wedge (A \vee C)$$

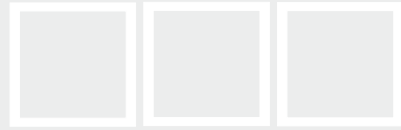
## de Morgansche Gesetze

$$\overline{A \vee B} = \bar{A} \wedge \bar{B}$$

## Vereinfachungen

$$\begin{aligned}A \vee (A \wedge B) &= A \\A \vee (\bar{A} \wedge B) &= A \vee B \\(A \wedge B) \vee (\bar{A} \wedge B) &= B\end{aligned}$$





## Versuch 11

### Der synchrone modulo-13-Zähler

Wie bereits angekündigt wollen wir noch einen Zähler aufbauen, der in einem sehr »krummen« System zählt, z.B. bis zwölf und dann wieder auf 0 springt. 13 ist keine Zweierpotenz, sondern eine Primzahl und wir können kompliziertere Verknüpfungen als bisher für die einzelnen J- und K-Eingänge erwarten.

Ohne dass wir im einzelnen jetzt die Karnaugh-Tafeln angeben, gehen wir beim Entwurf wie bisher vor und erhalten:

$$J_D = A \wedge B \wedge C$$

$$K_D = C$$

$$J_C = A \wedge B$$

$$K_C = (A \wedge B) \vee D$$

$$J_B = A$$

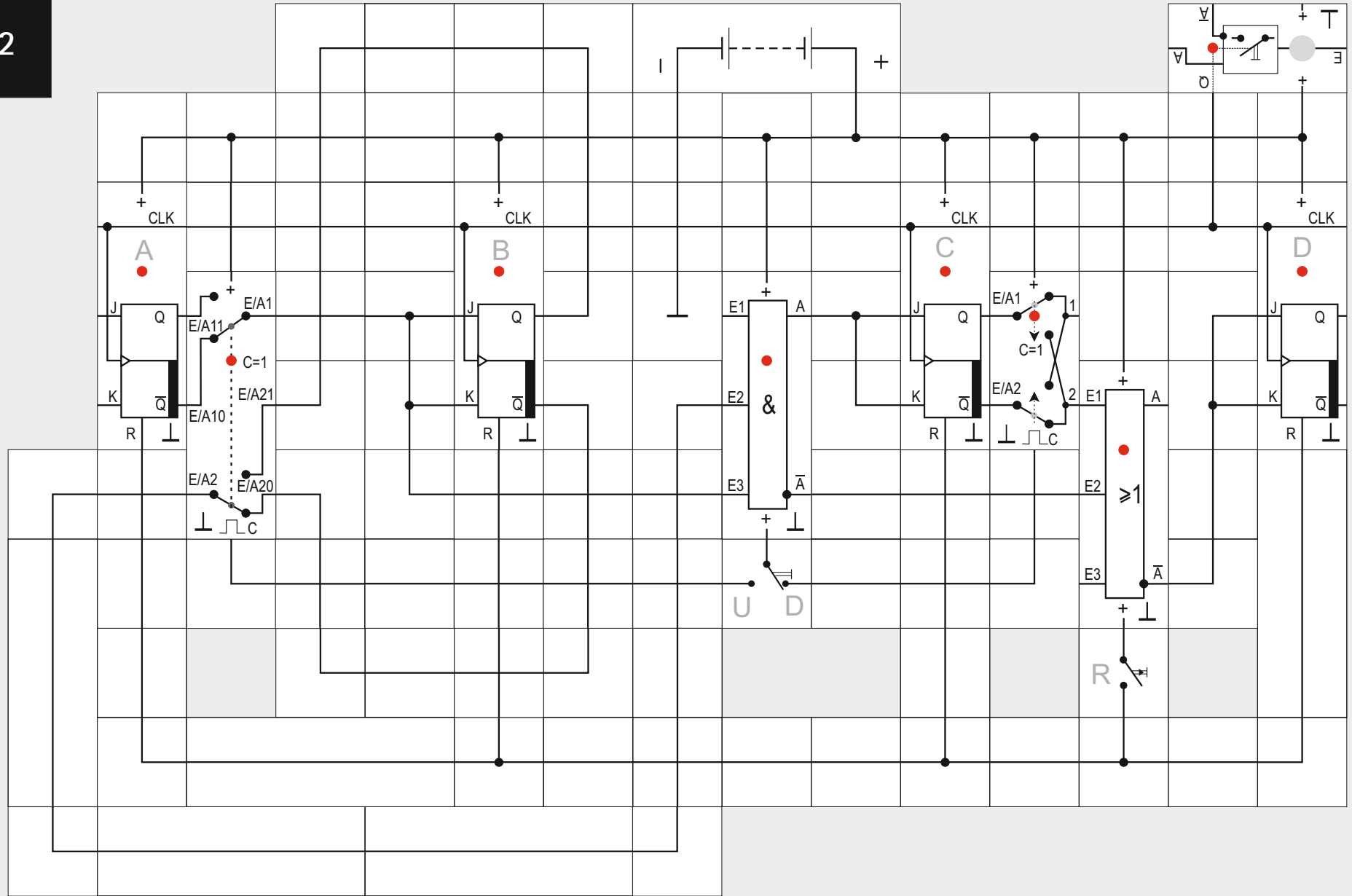
$$K_B = A$$

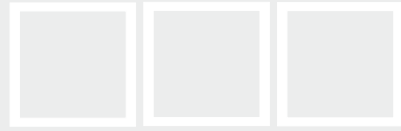
$$J_A = \overline{C} \vee \overline{D} = C \wedge D$$

$$K_A = 1$$

Der Ausdruck für  $J_A$  lässt sich mit dem de Morgan'schen Gesetz noch umformen, damit wir die Variable  $D$ , die schon für  $K_C$  benötigt wird, gleich noch einmal verwenden können und nicht auch noch  $\overline{D}$  »nach vorn« holen müssen.

12





## Versuch 12

### Ein synchroner modulo-16- Vorwärts/Rückwärts-Zähler

Wir wissen bereits, dass die J und K-Verknüpfungen bei modulo-n-Zählern sehr systematisch aufgebaut sind, wenn n eine Zweierpotenz ist. Bei einem modulo-16-Vorwärts-Zähler sind sie wie folgt:

$$J_A = K_A = 1$$

$$J_B = K_B = Q_A$$

$$J_C = K_C = Q_A \wedge Q_B$$

$$J_D = K_D = Q_A \wedge Q_B \wedge Q_C$$

Wenn wir für einen modulo-16-Rückwärts-Zähler mit Hilfe der Karnaugh-Tafeln die benötigten J- und K-Verknüpfungen bestimmen, so finden wir heraus, dass sie ähnlich strukturiert sind, nämlich:

$$J_A = K_A = 1$$

$$J_B = K_B = \overline{Q_A}$$

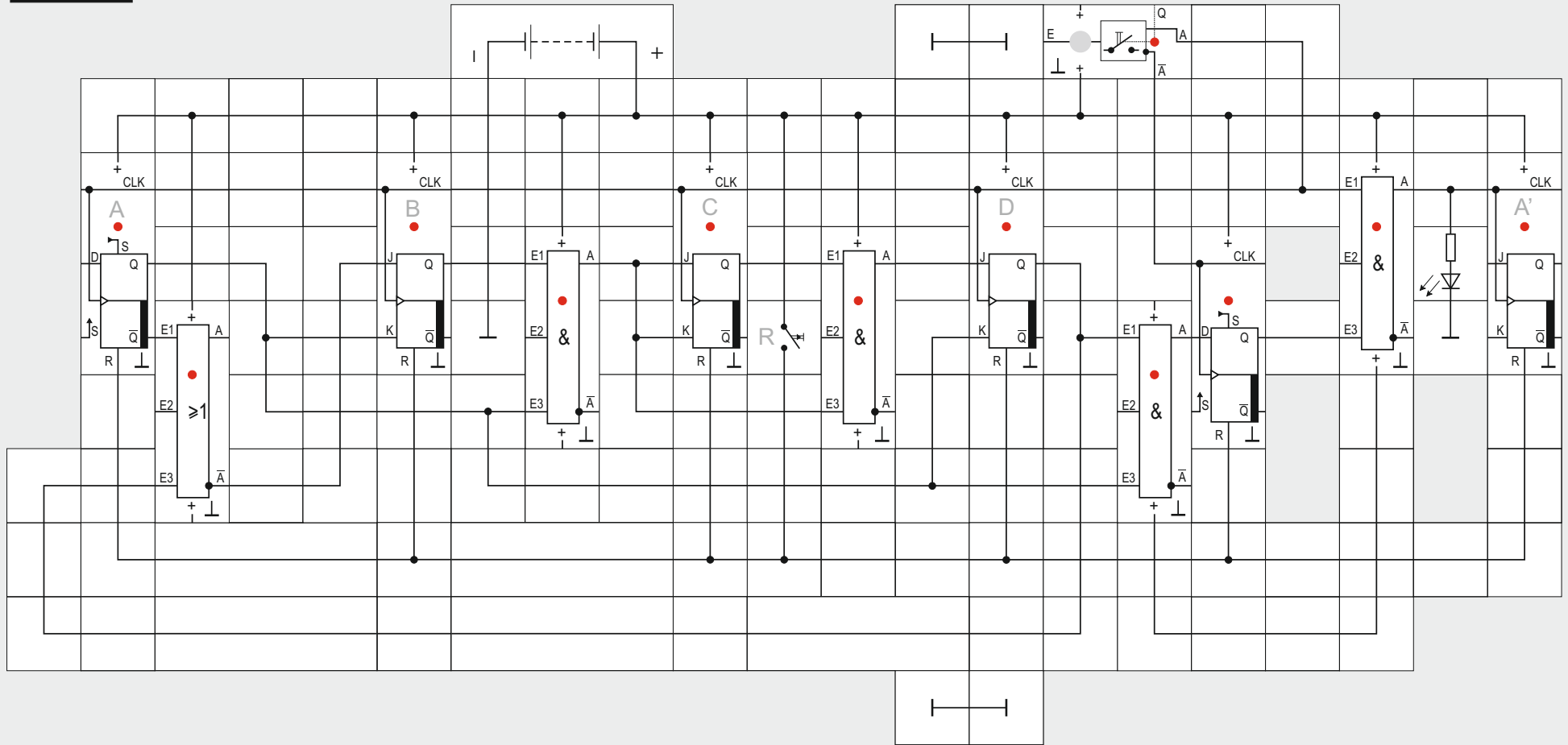
$$J_C = K_C = \overline{Q_A} \wedge \overline{Q_B}$$

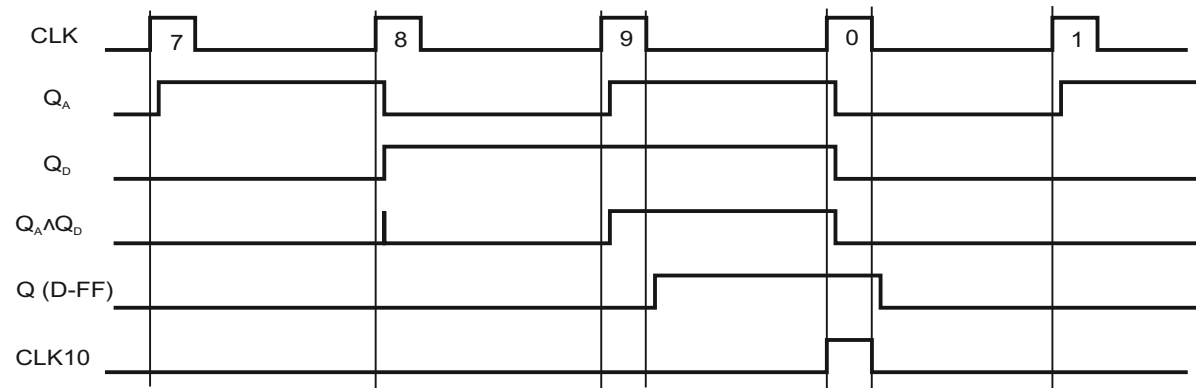
$$J_D = K_D = \overline{Q_A} \wedge \overline{Q_B} \wedge \overline{Q_C}$$

Damit eröffnet sich für uns die Möglichkeit, einen umschaltbaren Vorwärts/Rückwärts-Zähler aufzubauen. Wir brauchen immer nur das  $\overline{Q}$ -Signal statt des Q-Signals zu nehmen, wenn der Zähler rück-

wärts zählen soll, und das muss umschaltbar sein. Zum Umschalten verwenden wir das Transmission-Gate, das zwei elektronische Umschalter beinhaltet. Der eine Umschalter schaltet zwischen  $Q_A$  und  $\overline{Q_A}$  um, er lässt sich gut an das erste Flipflop A anschließen. Für die Umschaltung zwischen  $Q_B$  und  $\overline{Q_B}$  ist der »Verdrahtungsaufwand« erheblich größer. Die Umschaltung zwischen  $Q_C$  und  $\overline{Q_C}$  bewerkstelligen wir mit dem »Kreuzschalter«, der genauso aufgebaut ist wie das Transmission-Gate, nur dass die beiden vorhandenen Umschalter bereits vorverdrahtet und nicht mehr frei beschaltbar sind. Wir können deswegen auch nur noch einen Umschalter benutzen, was ausreichend ist. Unsere Schaltung hat noch zwei Besonderheiten: Wir können die Umschaltung der Zählrichtung mit einem Umschalter ausführen; die C-Eingänge der Umschalter sind bauteilintern hochohmig an Masse gelegt. Ein offener C-Eingang ist gleichbedeutend mit  $C = 0$ . In der Schalterstellung U (= up) zählt der Zähler vorwärts, in der Stellung D (= down) rückwärts. Außerdem ist die UND-Verknüpfung für  $J_D = K_D$  nach dem de Morganschen Gesetz in eine NOR-Verknüpfung mit invertierten Eingangssignalen umgewandelt. Die Schaltung lässt sich auf diese Weise platzsparend aufbauen.

13





## Versuch 13

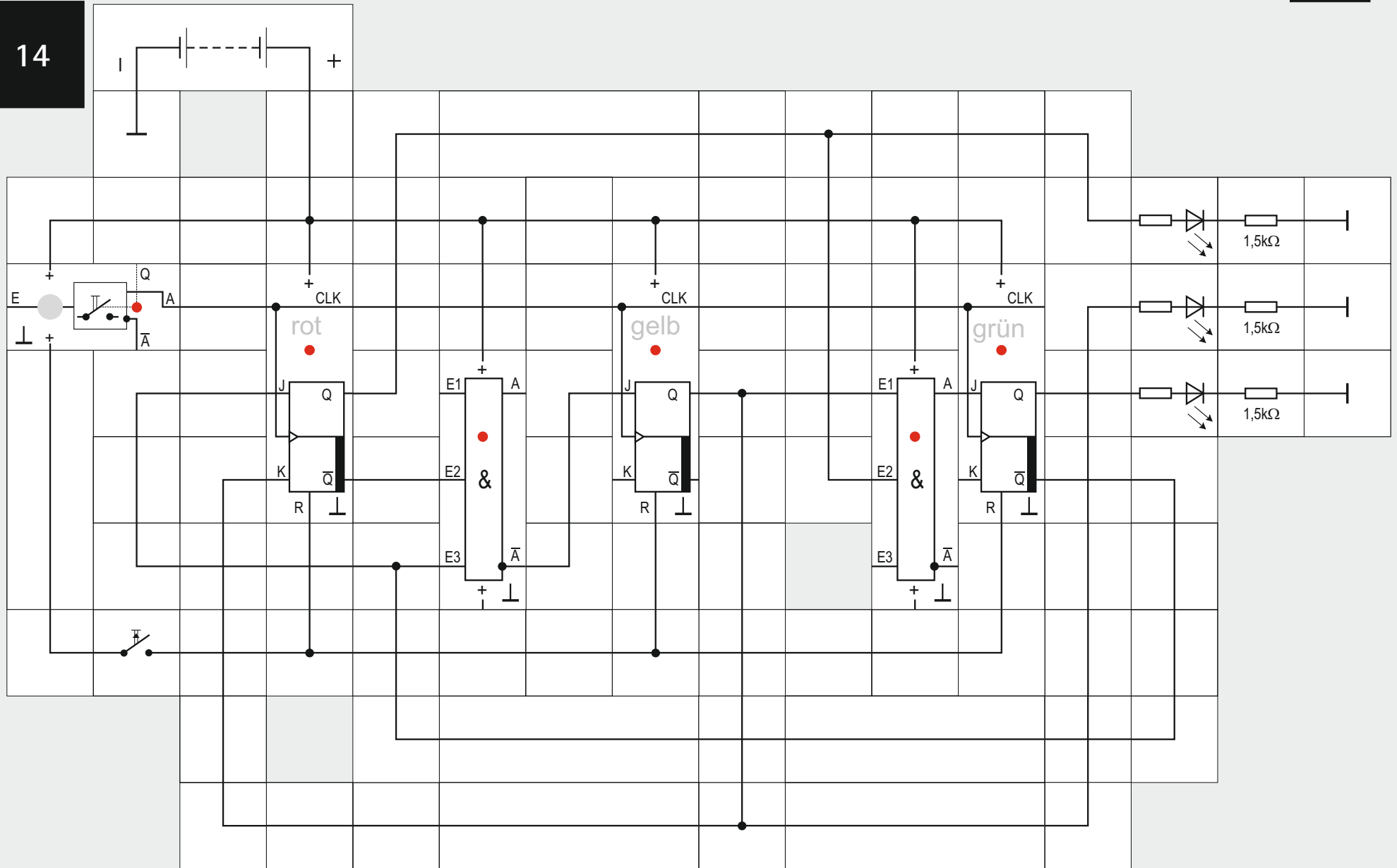
### Übertragsbildung

Bei dem in der Praxis häufig anzutreffenden synchronen Dezimalzähler gibt es noch ein Problem, das wir ansprechen müssen, bevor wir uns mit asynchronen Zählern beschäftigen, nämlich die Übertragsbildung. Modulo- $2^n$ -Zähler lassen sich mit dem bekannten Muster auf immer mehr Stellen erweitern, beim modulo-10-Zähler geht das nicht so ohne weiteres. Immer wenn die Einer-Stelle von »9« auf »0« wechselt, muss sich die Zehner-Stelle um eins erhöhen und zwar mit demselben Takt, sonst wäre es kein synchroner Zähler. Außerdem strebt man an, die Zehner- und alle folgenden Stellen strukturell genauso aufzubauen, wie die Einer-Stelle, also mit vier Flipflops und einigen Verknüpfungsgliedern. Bei diesen Randbedingungen kommt man zu dem Ergebnis, dass die Zehner-Stelle nur

jeden zehnten Taktimpuls erhalten darf, die Hunderter-Stelle nur jeden hundertsten, usw. Wir können das mit einer Torschaltung bewerkstelligen, die immer dann, wenn innerhalb einer Stelle eine »9« erreicht ist, für den nächsten Takt durchlässig wird und anschließend wieder sperrt. Um die »9« zu dekodieren geben wir  $Q_D$  und  $Q_A$  auf ein UND-Glied, dessen Ausgangssignal nur 1 wird, wenn eine »9« in der Stelle gespeichert ist. Mit diesem Signal können wir aber leider den Takt noch nicht sperren, ein Blick auf das Impulsdigramm zeigt uns das Problem: Unsere Flipflops schalten mit der ansteigenden (Vorder-) Flanke des Taktes, nach einer Durchlaufzeit von ca. 100 ns ändern sich die Ausgänge, was insbesondere schon beim 8. Takt infolge von Toleranzen zu einem Nadelimpuls beim Ausgang des UND-Gliedes führen kann. Außerdem ist dieses Signal be-

reits beim 9. Takt auf 1 und nach dem 10. sehr schnell wieder auf 0, so dass nur ein ganz schmaler Takt durch das Tor käme. Abhilfe schafft hier ein mit der fallenden Flanke getaktetes D-Flipflop, das uns das Sperrsignal gerade um die richtige Zeitspanne verzögert. Das verzögerte Flipflop-Ausgangssignal dient – auf ein weiteres UND-Glied gegeben – als Sperrsignal für den Takt. In der Schaltung können wir mit einer Leuchtdiode zeigen, dass wirklich nur jeder zehnte Takt durchkommt. Das Flipflop A' stellt das erste Flipflop in der Zehner-Stelle dar. Als erstes Flipflop A in der Einer-Stelle setzen wir ein D-Flipflop ein. Der Lectron-Baustein wirkt ja durch die interne hochohmige Beschaltung bei offenem D-Eingang wie ein Takteiler. Der Versuchsaufbau benötigt zwei Grundplatten, auf eine gute Masseverbindung der beiden Platten ist zu achten.

14





## Versuch 14

### Eine einfache Ampelsteuerung

Mit dem angewendeten Verfahren können wir auch etwas anderes als nur Zähler entwerfen. Wir wollen damit jetzt eine einfache Ampelsteuerung konstruieren, die auf Knopfdruck die Lampenfolge rot, rot/gelb, grün, gelb, rot usw. liefert. Wir haben also vier verschiedene Zustände, müssen aber bedenken, dass sich die JK-Flipflops nur rücksetzen lassen. Wenn wir definiert aus dem rückgesetzten Zustand starten wollen, gibt es also einen fünften (Start-) Zustand, weswegen wir drei Flipflops benötigen, jeweils eins für eine Lampe. Selbst bei nur vier Zuständen wäre es sinnvoll gewesen, pro Lampe einen Speicher zu spendieren. Wir gehen von der Wahrheitstafel Abb. 42.1 aus. Der Zustand 0 ist nur beim Start vorhanden, der Folgezustand von Nr. 4 ist im Betrieb immer Nr. 1. Der Schaltungsaufbau lässt sich vereinfachen, wenn der Ausdruck für  $J_{\text{gelb}}$  umgeformt wird, damit wir ein NAND verwenden können.

rot	gelb	grün	Zustand
0	0	0	0
1	0	0	1
1	1	0	2
0	0	1	3
0	1	0	4
1	0	0	1

Abb. 42.1 Wahrheitstafel für Ampelsteuerung

rot gelb	0	0	1	1
grün	0	1	1	0
0	1 <sup>0</sup>	1 <sup>4</sup>	1 <sup>2</sup>	1 <sup>1</sup>
1	0 <sup>3</sup>	0	0	0

Abb. 42.2 Karnaugh-Tafel für  $J_{\text{rot}} = \overline{Q_{\text{grün}}}$

rot gelb	0	0	1	1
grün	0	1	1	0
0	0 <sup>0</sup>	1 <sup>4</sup>	1 <sup>2</sup>	0 <sup>1</sup>
1	0 <sup>3</sup>	0	0	0

Abb. 42.3 Karnaugh-Tafel für  $K_{\text{rot}} = Q_{\text{gelb}}$

rot gelb	0	0	1	1
grün	0	1	1	0
0	0 <sup>0</sup>	0 <sup>4</sup>	1 <sup>2</sup>	1
1	1 <sup>3</sup>	1	1	1

Abb. 42.4 Karnaugh-Tafel für  $J_{\text{gelb}} = Q_{\text{rot}} \vee Q_{\text{grün}}$

rot gelb	0	0	1	1
grün	0	1	1	0
0	1 <sup>0</sup>	1 <sup>4</sup>	1 <sup>2</sup>	1 <sup>1</sup>
1	1 <sup>3</sup>	1	1	1

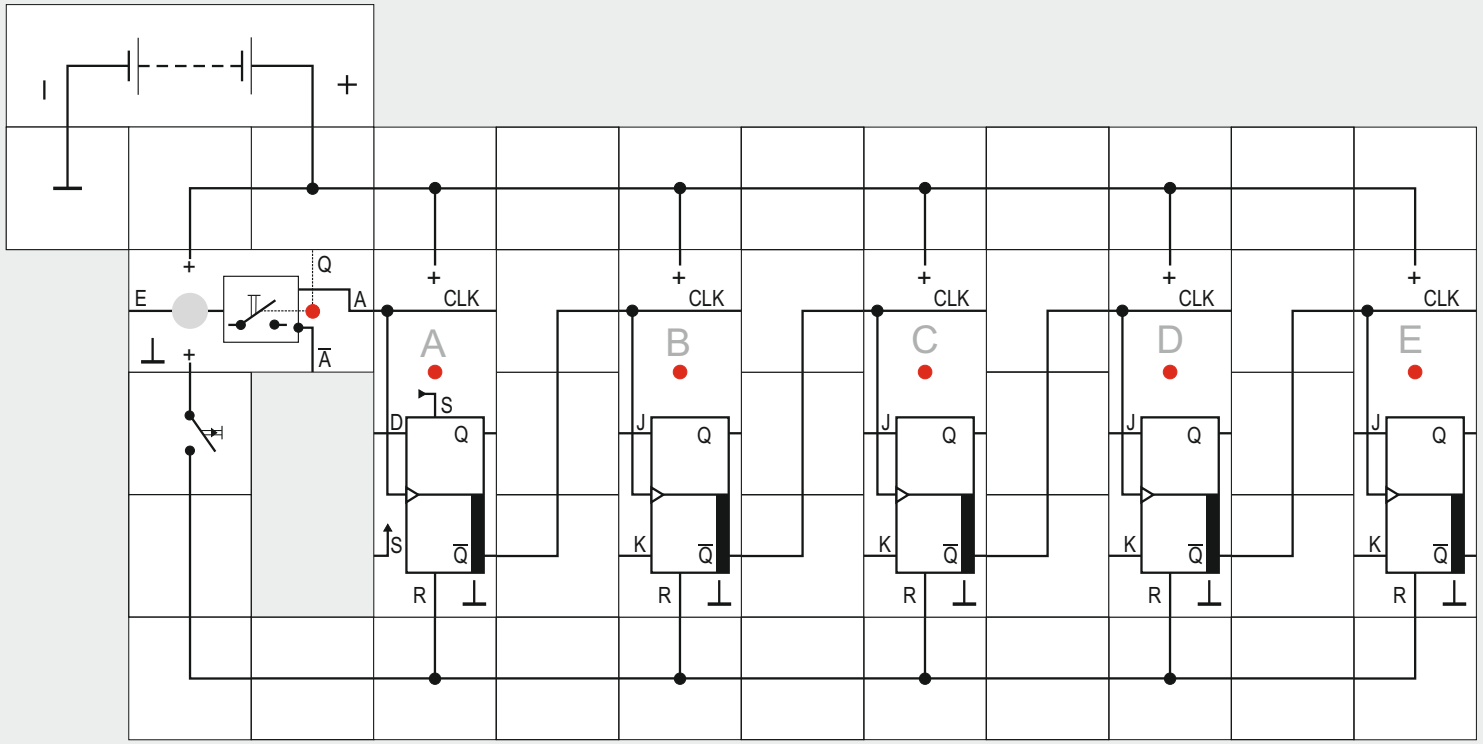
Abb. 42.5 Karnaugh-Tafel für  $K_{\text{gelb}} = 1$

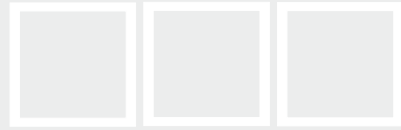
rot gelb	0	0	1	1
grün	0	1	1	0
0	0 <sup>0</sup>	0 <sup>4</sup>	1 <sup>2</sup>	0 <sup>1</sup>
1	0 <sup>3</sup>	0	0	0

Abb. 42.6 Karnaugh-Tafel für  $J_{\text{grün}} = Q_{\text{rot}} \wedge Q_{\text{gelb}}$

rot gelb	0	0	1	1
grün	0	1	1	0
0	1 <sup>0</sup>	1 <sup>4</sup>	1 <sup>2</sup>	1 <sup>1</sup>
1	1 <sup>3</sup>	1	1	1

Abb. 42.7 Karnaugh-Tafel für  $K_{\text{grün}} = 1$





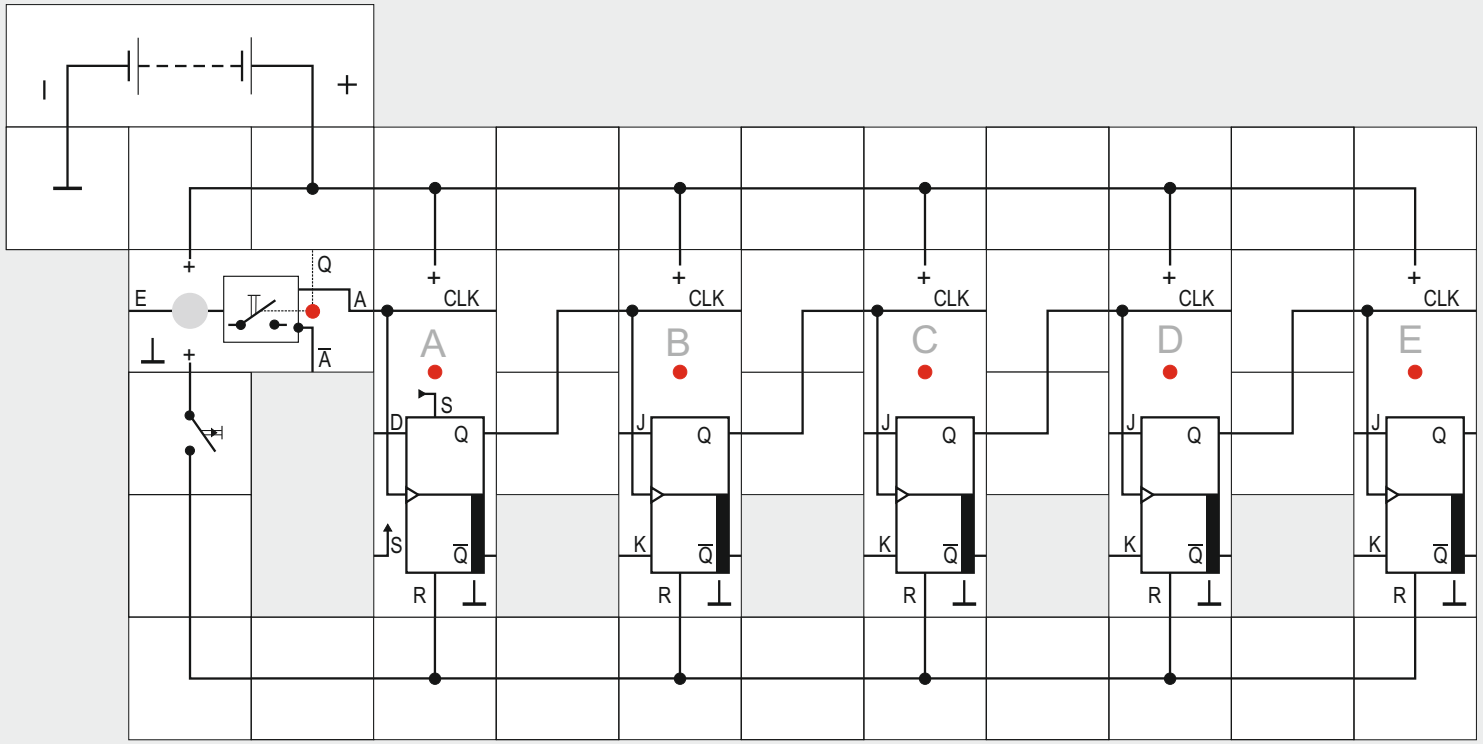
## Versuch 15

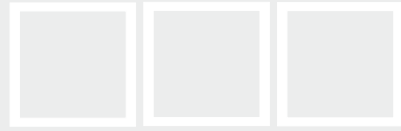
### Der asynchrone Dualzähler

Asynchrone Zähler unterscheiden sich von synchronen dadurch, dass nicht alle Flipflops von einem zentralen Takt gesteuert werden. Ihr großer Vorteil ist der einfache Aufbau, ihr Nachteil, dass sie im Betrieb störempfindlicher sind, weil die Taktimpulse in der Flipflopkette immer breiter werden. Bei synchronen Flipflops arbeitet man mit schmalen Takt-

impulsen und hält die zentrale Taktleitung die längste Zeit niederohmig auf Masse, so dass externe Störungen kaum einkoppeln können. Das ist beim asynchronen Aufbau nicht möglich. Bei langen Zählketten und hohen Taktfrequenzen kann auch das Ablesen des Zählerstandes Probleme bereiten, weil ständig noch irgendein Flipflop in der Kette schaltet; das Schalten durchläuft die Flipflopkette ja wie eine Welle, im Englischen heißen diese Zähler deswegen auch RIPPLE COUNTER.

Die erste Stufe unseres asynchronen Dualzählers unterscheidet sich nicht von der eines synchronen Zählers. Sie teilt die Taktfrequenz durch zwei. Wir können hier wieder unseren Lectron D-Flipflop Baustein einsetzen, dessen D-Eingang intern hochohmig mit dem  $\bar{Q}$ -Ausgang verbunden ist, so dass er bei offenem D-Eingang wie ein Taktteiler arbeitet. Die zweite Stufe muss immer dann schalten, wenn der Q-Ausgang der ersten eine fallende Flanke hat, also beim 1-0-Übergang. Da unsere Flipflops auf der ansteigenden Flanke schalten, müssen wir den  $\bar{Q}$ -Ausgang zum Takten verwenden. Dieses Muster setzt sich auf alle weiteren Stufen fort und wir erhalten den abgebildeten Versuchsaufbau. Schon ein oberflächlicher Blick zeigt eine kompakte, übersichtliche Schaltung und das obwohl wir schon eine Zählstufe mehr als vorher aufgebaut haben.



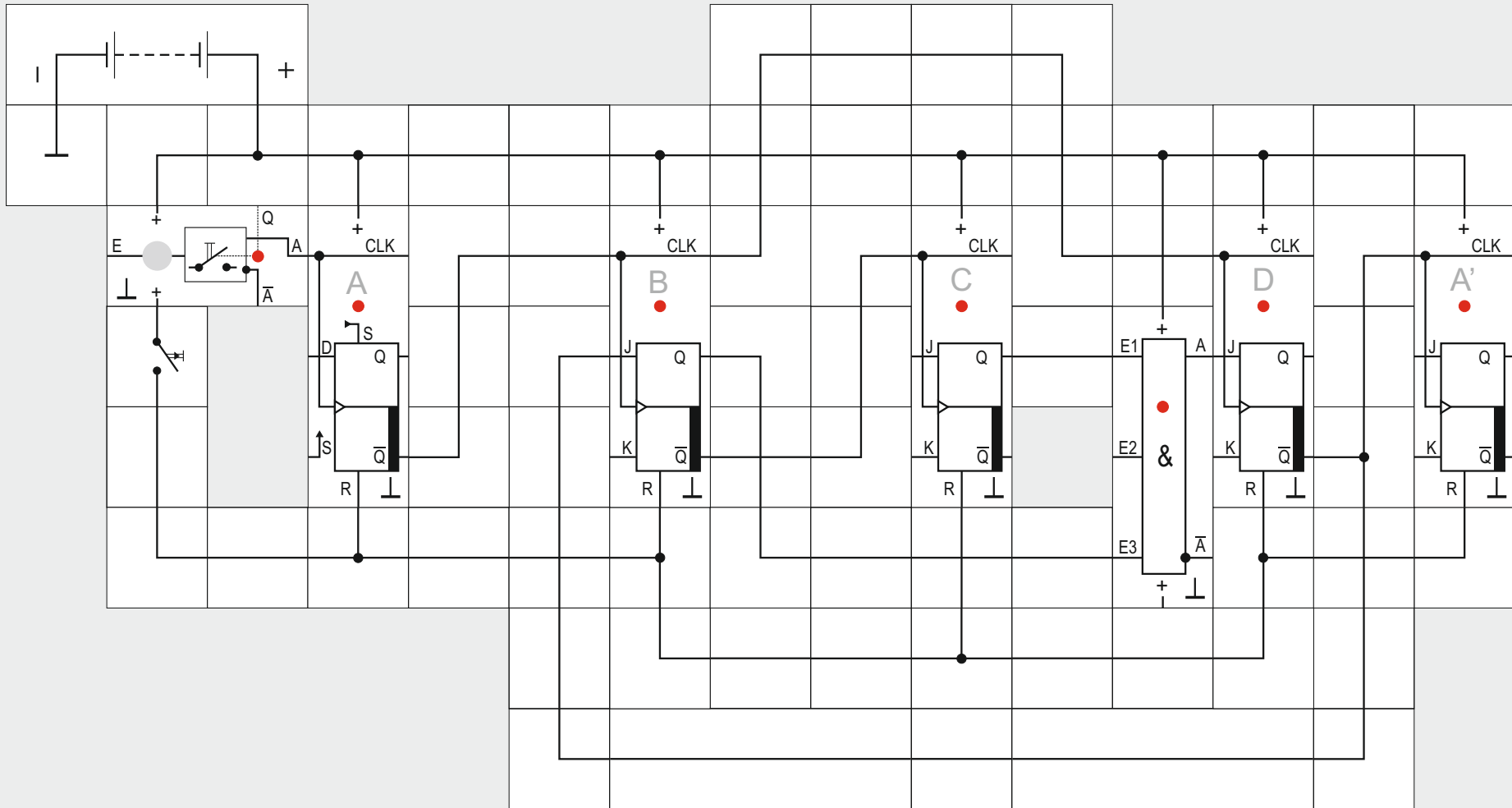


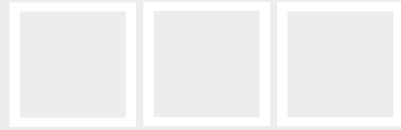
## Versuch 16

### Der asynchrone Rückwärts-Dualzähler

Die Code-Tabelle dieses Zählers sagt aus, dass sich eine Stelle immer dann ändert, wenn die vorangehende einen 0-1-Wechsel aufweist. Wir müssen deswegen den Q-Ausgang eines Zählflipflops immer mit dem Takteingang des nächsten verbinden und erhalten dann den abgebildeten Versuchsaufbau. Natürlich kann man das auch umschaltbar ausführen, wenn ein Vorwärts/Rückwärts-Zähler aufgebaut werden soll. Wir verzichten darauf und wenden uns im nächsten Versuch dem asynchronen Dezimalzähler zu.

17





## Versuch 17

### Der asynchrone Dezimalzähler

Rein asynchrone Zähler können nur für den Dualcode aufgebaut werden. Es ist nicht möglich, das auch für den Dezimalzähler hinzubekommen: Die Codetabelle legt einerseits fest, wie die Ausgänge der Flipflops schalten müssen, andererseits liefert aber ein vorangehendes Flipflop nicht immer die für den Takt benötigte passende aktive Flanke. Ein Dezimalzähler hat daher eine gemischte synchron-asynchrone Struktur. Wir werden ihn auf ähnliche Weise mit Karnaugh - Tafeln entwerfen wie den Synchronzähler.

Die Codetabelle sagt uns, dass das A-Flipflop von Dezimalziffer zu Dezimalziffer seinen Wert wechselt. Dafür ist keine Ansteuerschaltung nötig, es reicht  $J_A = K_A = 1$  zu machen. Nun kommt das B-Flipflop an die Reihe. Nur wenn  $Q_A$  (oder  $\overline{Q}_A$ ) mindestens an allen Stellen, an denen B schalten soll, eine passende Flanke hat, kann es als Taktsignal ge-

nommen werden, andernfalls muss auf den Eingangstakt zurückgegriffen werden. Das A-Flipflop ( $\overline{Q}_A$ ) hat beim Übergang von der »9« zur »0« eine aktive Flanke, die B nicht benötigt. Wir müssen deswegen für  $J_B$  und  $K_B$  jeweils eine Verknüpfungsschaltung entwerfen, wie wir das vom synchronen Zähler her bereits kennen. In der Karnaugh - Tafel brauchen wir allerdings nur die Plätze zu betrachten, bei denen eine aktive Flanke des als Takt vorgesehenen Ausgangs bevorsteht, hier also die Felder 1,3,5,7 und 9, denn nur diese Flanken schalten das Flipflop. Abb.48.1 und 48.2 zeigen die Ergebnisse.

Bei Flipflop C ist die Sache wieder einfach. Flipflop B ( $\overline{Q}_B$ ) hat genau an den Stellen, an denen C schalten muss, aktive Flanken, Ausgang  $\overline{Q}_B$  kann direkt verwendet werden.

Das letzte Flipflop D kann weder vom Flipflop B noch von C getaktet werden, beide besitzen beim Übergang von »9« nach »0« keine passende Flanke; allerdings geht A, wenn durch Verknüpfungen für  $J_D$  und  $K_D$  dafür gesorgt wird, dass nicht alle Flanken D schalten. Abb. 48.3 und 48.4 zeigen die Karnaugh - Tafeln.

Für den Übertrag können wir  $\overline{Q}_D$  direkt nehmen, seine einzige 0-1-Flanke kommt an der richtigen Stelle.

C D	A B			
	0 0	0 1	1 1	1 0
0 0	1 <sup>0</sup>	1 <sup>2</sup>	1 <sup>3</sup>	1 <sup>4</sup>
0 1	0 <sup>8</sup>	0 <sup>10</sup>	0 <sup>11</sup>	0 <sup>9</sup>
1 1	0 <sup>12</sup>	1 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	0 <sup>13</sup>
1 0	1 <sup>4</sup>	1 <sup>6</sup>	1 <sup>7</sup>	1 <sup>5</sup>

Abb. 48.1 Karnaugh-Tafel für  $J_B = \overline{Q}_D$

C D	A B			
	0 0	0 1	1 1	1 0
0 0	0 <sup>0</sup>	0 <sup>2</sup>	0 <sup>3</sup>	0 <sup>1</sup>
0 1	0 <sup>8</sup>	0 <sup>10</sup>	0 <sup>11</sup>	0 <sup>9</sup>
1 1	0 <sup>12</sup>	1 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	0 <sup>13</sup>
1 0	0 <sup>4</sup>	1 <sup>6</sup>	1 <sup>7</sup>	0 <sup>5</sup>

Abb. 48.3 Karnaugh-Tafel f.  $J_D = Q_B \wedge Q_C$

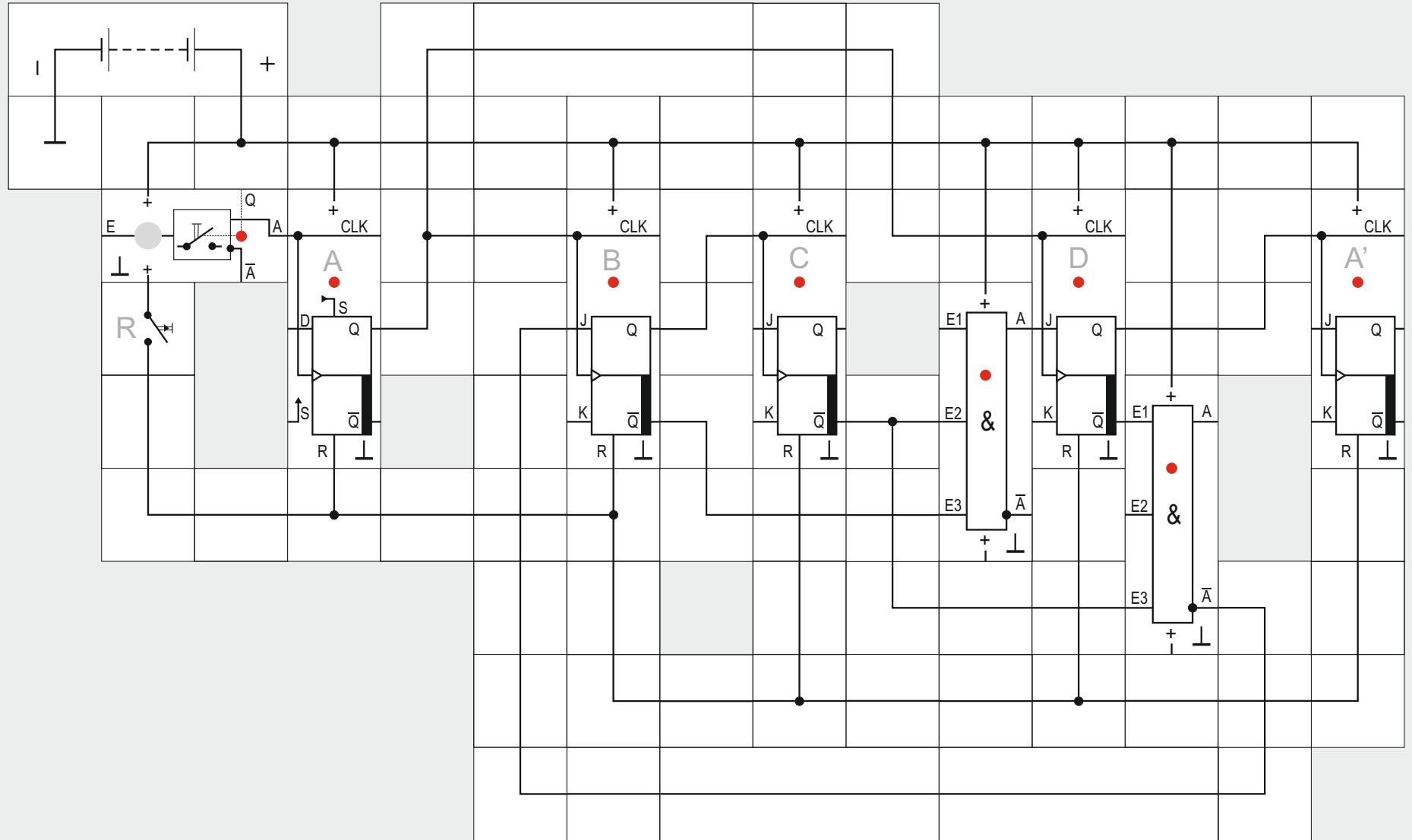
C D	A B			
	0 0	0 1	1 1	1 0
0 0	1 <sup>0</sup>	1 <sup>2</sup>	1 <sup>3</sup>	1 <sup>1</sup>
0 1	1 <sup>8</sup>	1 <sup>10</sup>	1 <sup>11</sup>	1 <sup>9</sup>
1 1	1 <sup>12</sup>	1 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	1 <sup>13</sup>
1 0	1 <sup>4</sup>	1 <sup>6</sup>	1 <sup>7</sup>	1 <sup>5</sup>

Abb. 48.2 Karnaugh-Tafel für  $K_B = 1$

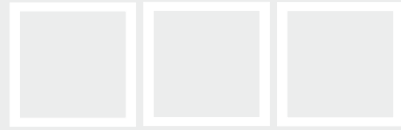
C D	A B			
	0 0	0 1	1 1	1 0
0 0	1 <sup>0</sup>	1 <sup>2</sup>	1 <sup>3</sup>	1 <sup>1</sup>
0 1	1 <sup>8</sup>	1 <sup>10</sup>	1 <sup>11</sup>	1 <sup>9</sup>
1 1	1 <sup>12</sup>	1 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	1 <sup>13</sup>
1 0	1 <sup>4</sup>	1 <sup>6</sup>	1 <sup>7</sup>	1 <sup>5</sup>

Abb. 48.4 Karnaugh-Tafel für  $K_D = 1$

18







## Versuch 18

Der asynchrone Rückwärts-Dezimalzähler  
 Natürlich gibt es auch einen rückwärts zählenden Dezimalzähler. Die erste Zählstufe A ist identisch mit der des vorwärtszählenden Zählers. Zum Takten von Zählstufe B ist  $\overline{Q}_A$  unbrauchbar, wir müssen  $Q_A$  nehmen. Die überzählige Taktflanke beim Übergang von »0« auf »9« machen wir durch eine Verknüpfung  $J_B = C \vee D$  unwirksam. Der Aufbau der Schaltung vereinfacht sich, wenn wir dies nach dem de Morgan'schen Gesetz in  $\overline{C} \wedge \overline{D}$  umformen und den NAND-Baustein einsetzen. Flipflop C kann mit  $Q_B$  getaktet werden. Zum Takten von Flipflop D muss wieder auf den Ausgang  $Q_A$  zurück gegriffen werden. Mit  $J_D = \overline{B} \wedge \overline{C}$  werden nicht benötigte Flanken unwirksam gemacht. Als Übertrag auf die nächste Zählstufe eignet sich  $Q_D$ .

Durch Umschalten der Taktansteuerungen und Verknüpfungen erhält man einen Vorwärts/Rückwärts-Zähler, der Vorteil des einfachen Aufbaus ist dann allerdings nicht mehr gegeben.

CD \ AB	00	01	11	10
00	0 <sup>0</sup>	0 <sup>2</sup>	0 <sup>3</sup>	0 <sup>1</sup>
01	1 <sup>8</sup>	1 <sup>10</sup>	1 <sup>11</sup>	1 <sup>9</sup>
11	1 <sup>12</sup>	1 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	1 <sup>13</sup>
10	1 <sup>4</sup>	1 <sup>6</sup>	1 <sup>7</sup>	1 <sup>5</sup>

Abb. 50.1 Karnaugh-Tafel für  $J_B = Q_B \vee Q_D$

CD \ AB	00	01	11	10
00	1 <sup>0</sup>	0 <sup>2</sup>	0 <sup>3</sup>	1 <sup>1</sup>
01	1 <sup>8</sup>	0 <sup>10</sup>	0 <sup>11</sup>	1 <sup>9</sup>
11	0 <sup>12</sup>	0 <sup>14</sup>	0 <sup>15</sup>	0 <sup>13</sup>
10	0 <sup>4</sup>	0 <sup>6</sup>	0 <sup>7</sup>	0 <sup>5</sup>

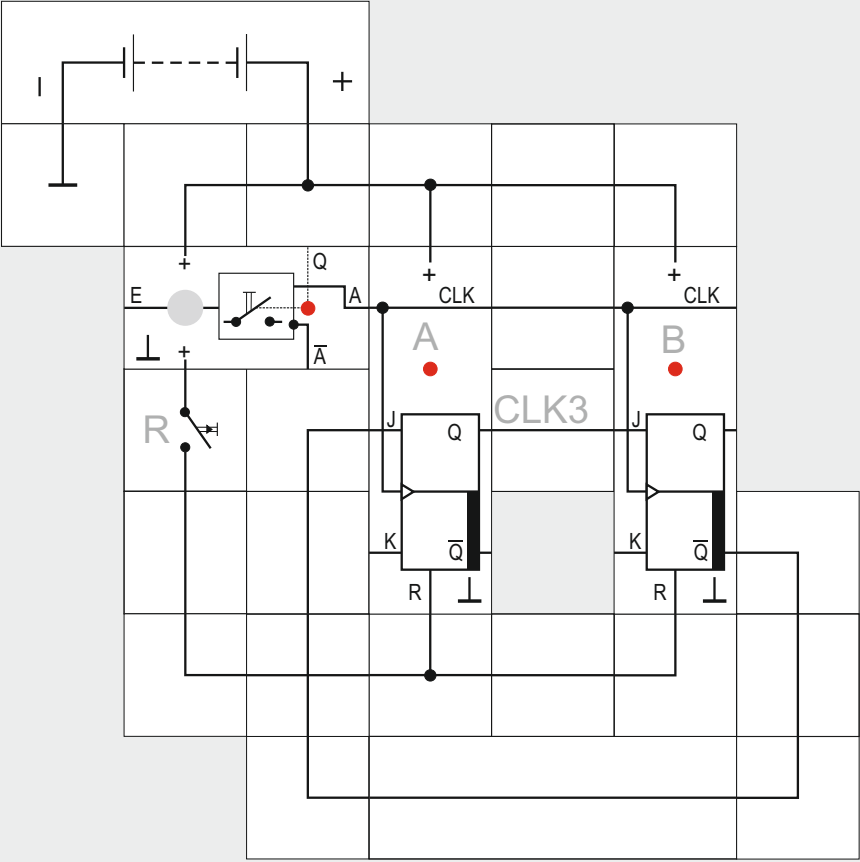
Abb. 50.3 Karnaugh-Tafel f.  $J_D = \overline{Q_B} \wedge \overline{Q_C}$

CD \ AB	00	01	11	10
00	1 <sup>0</sup>	1 <sup>2</sup>	1 <sup>3</sup>	1 <sup>1</sup>
01	1 <sup>8</sup>	1 <sup>10</sup>	1 <sup>11</sup>	1 <sup>9</sup>
11	1 <sup>12</sup>	1 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	1 <sup>13</sup>
10	1 <sup>4</sup>	1 <sup>6</sup>	1 <sup>7</sup>	1 <sup>5</sup>

Abb. 50.2 Karnaugh-Tafel für  $K_B = 1$

CD \ AB	00	01	11	10
00	1 <sup>0</sup>	1 <sup>2</sup>	1 <sup>3</sup>	1 <sup>1</sup>
01	1 <sup>8</sup>	1 <sup>10</sup>	1 <sup>11</sup>	1 <sup>9</sup>
11	1 <sup>12</sup>	1 <sup>14</sup>	1 <sup>15</sup>	1 <sup>13</sup>
10	1 <sup>4</sup>	1 <sup>6</sup>	1 <sup>7</sup>	1 <sup>5</sup>

Abb. 50.4 Karnaugh-Tafel für  $K_D = 1$





## Versuch 19

### Der Frequenzteiler 1:3

Nachdem wir ein systematisches Verfahren zum Entwurf synchroner und asynchroner Zähler kennen gelernt und angewendet haben, wollen wir uns nun Schaltungen zuwenden, die große Ähnlichkeit mit Zählern haben, den Frequenzteilern. Natürlich können wir auch Zähler zum Teilen der Taktfrequenz einsetzen, der Übertragsimpuls ist ja nichts anderes als ein geteilter Takt. Während es beim Zähler aber auf alle Zwischenstände und ihre Codierung, also auf den Zählcode ankommt, ist man beim Frequenzteilen nur an der geteilten Frequenz interessiert, die an einem Ausgang zur Verfügung steht. Wir können also erwarten, dass Frequenzteiler einfacher aufgebaut sind als Zähler, andernfalls hätte man gleich den passenden Zähler genommen.

Der einfachste Teiler 1:2 ist uns schon häufig als erste Stufe eines Zählers begegnet, es ist ein JK-

Flipflop mit  $J=K=1$ ; einfacher lässt er sich nicht aufbauen.

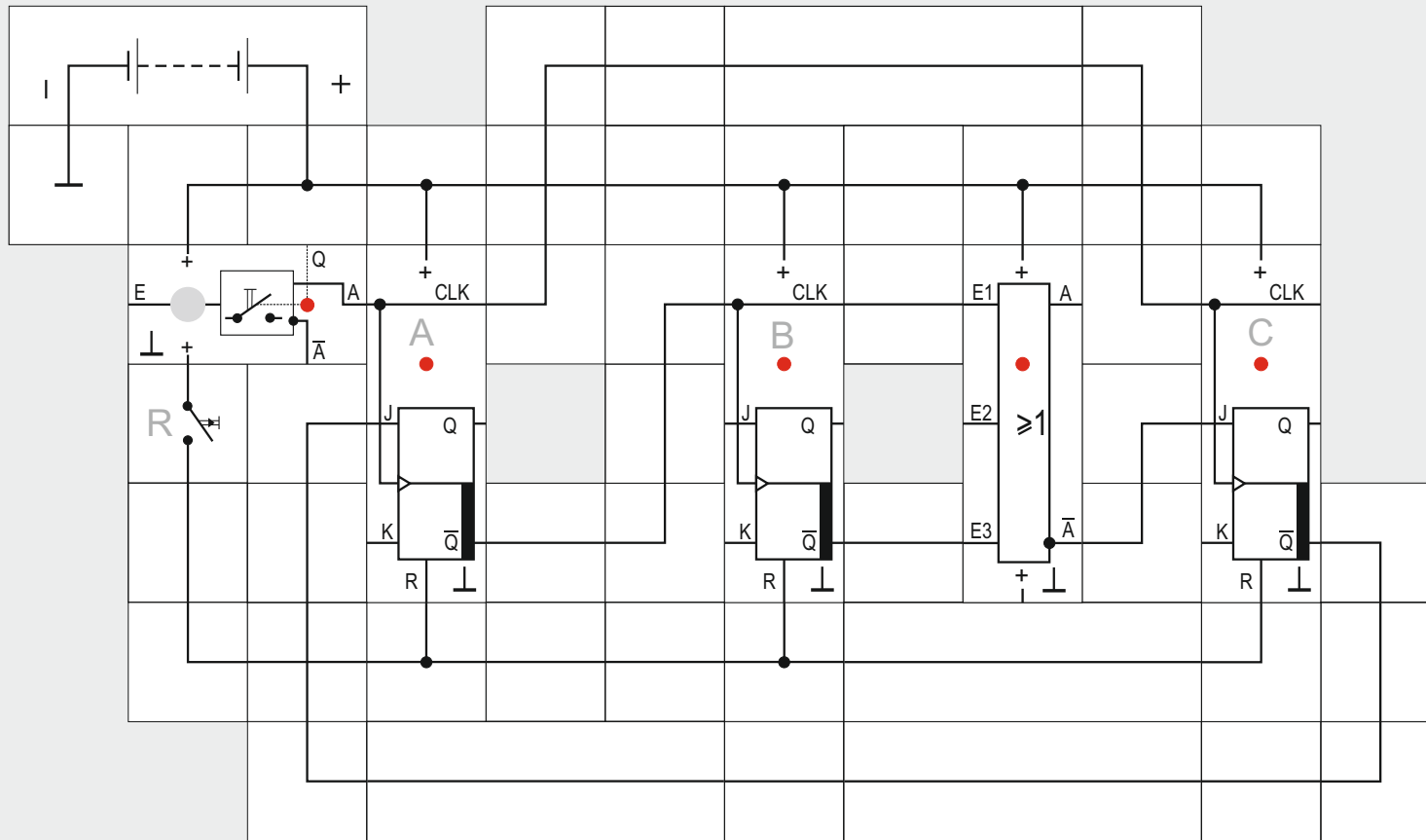
Der nächste Teiler 1:3 erfordert bereits ein Flipflop mehr, wir können den synchronen modulo-3-Zähler verwenden, bei dem

$J_A = \overline{Q_B}$ ,  $J_B = Q_A$  und  $K_A = K_B = 1$  ist.

Das geteilte Taktsignal CLK3 kann an den Ausgängen des ersten oder zweiten Flipflops abgenommen werden, es liegt jeweils für einen Taktschritt auf 1 und für zwei Schritte auf 0 oder umgekehrt. Hierbei zeigt sich schon, dass es beim Einsatz unserer Flipflopbausteine kein Ausgangssignal geben kann, das symmetrisch ist; es müsste nämlich für  $1\frac{1}{2}$  Schritte jeweils auf 0 und 1 liegen, zum Zeitpunkt des erforderlichen Potentialwechsels gibt es aber keine Flanke, die ein Flipflop schalten könnte. Allgemein strebt man als Ausgangssignal eines Frequenzteilers ein symmetrisches Signal an, bei ihm ist der Oberwellenanteil am kleinsten oder anders ausgedrückt, der Anteil der Grundfrequenz am Frequenzspektrum der Rechteckschwingung am größten. Ein symmetrisches Ausgangssignal ist nur bei geraden Teilverhältnissen erreichbar.

Für den Teiler 1:4 können wir den synchronen oder den asynchronen Zähler verwenden, beide sind gleich aufwandsarm, das geteilte symmetrische Signal gibt die zweite Zählstufe B ab.

20





## Versuch 20

### Der Frequenzteiler 1:5

Der Teiler 1:5 erfordert ein Flipflop mehr als der Teiler 1:3, da man mit 2 Flipflops nur  $2^2 (=4)$  verschiedene Zustände darstellen kann. Wenn wir probeweise den synchronen Zähler bis 5 als Teiler verwenden wollen, erhalten wir aus den Kar-

naugh-Tafeln die folgenden Beziehungen:

$$J_A = \overline{Q_C} \quad K_A = 1$$

$$J_B = Q_A \quad K_B = Q_A$$

$$J_C = Q_A \wedge Q_B \quad K_C = 1$$

Der Zähler lässt sich mit drei Flipflops und einem Verknüpfungsglied aufbauen. Wir wollen sehen, ob die asynchrone Variante aufwandsärmer ist und ohne die zusätzliche Verknüpfung auskommt. Das Entwurfsverfahren für asynchrone Zähler liefert uns:

$$CLK_A = CLK$$

$$J_A = \overline{Q_C} \quad K_A = 1$$

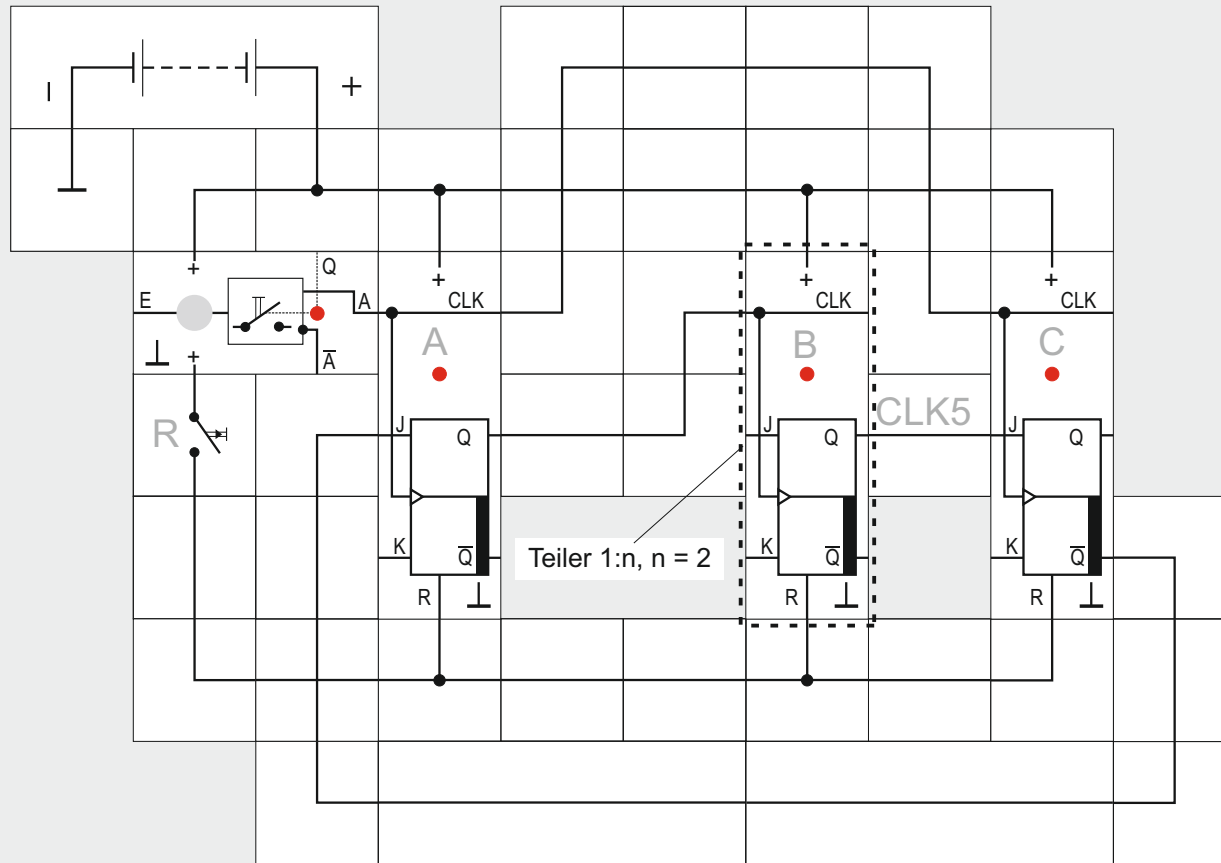
$$CLK_B = \overline{Q_A}$$

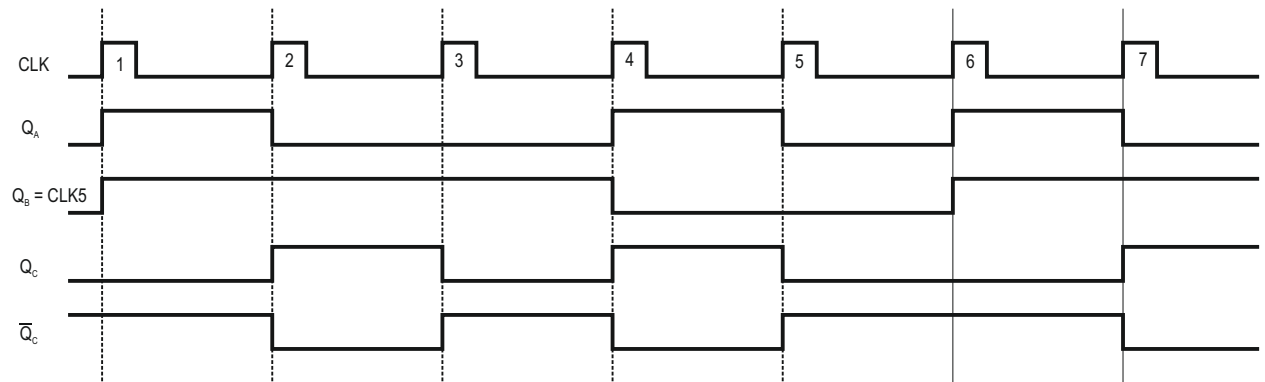
$$J_B = 1 \quad K_B = 1$$

$$CLK_C = CLK$$

$$J_C = Q_A \wedge Q_B \quad K_C = 1$$

Der asynchrone Zähler ist dem synchronen recht ähnlich, lediglich die zweite Zählstufe B wird unterschiedlich angesteuert und leider benötigt auch er die zusätzliche Verknüpfung, die wir in unserem Versuchsaufbau in eine NOR-Verknüpfung  $Q_A \wedge Q_B = \overline{Q_A} \vee \overline{Q_B}$  umgewandelt haben, da diese »Verdrahtungsvorteile« bringt. Im nächsten Versuch werden wir uns mit einer Schaltung beschäftigen, die durch fünf teilt, aber die zusätzliche Verknüpfung nicht benötigt.



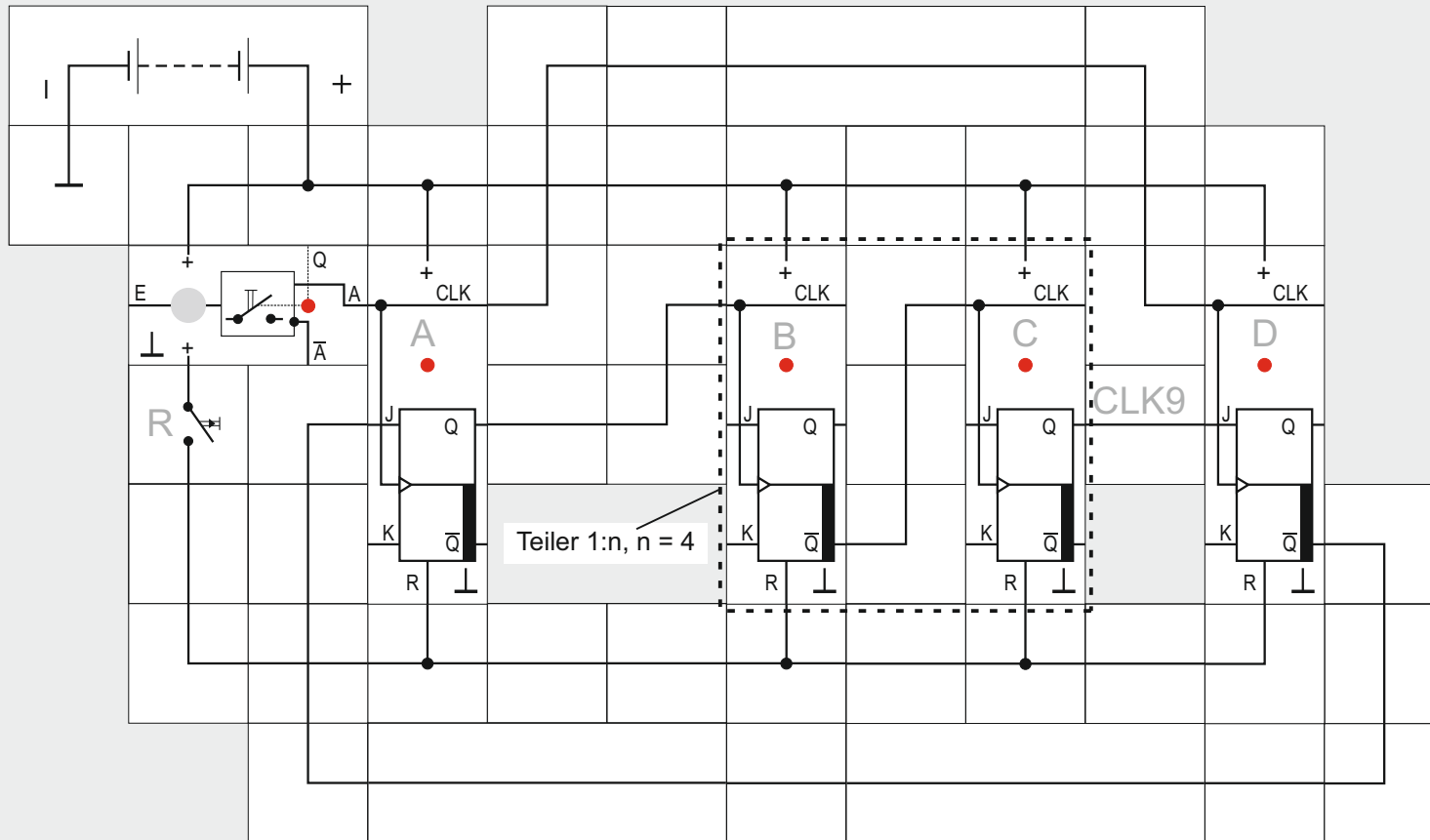


## Versuch 21

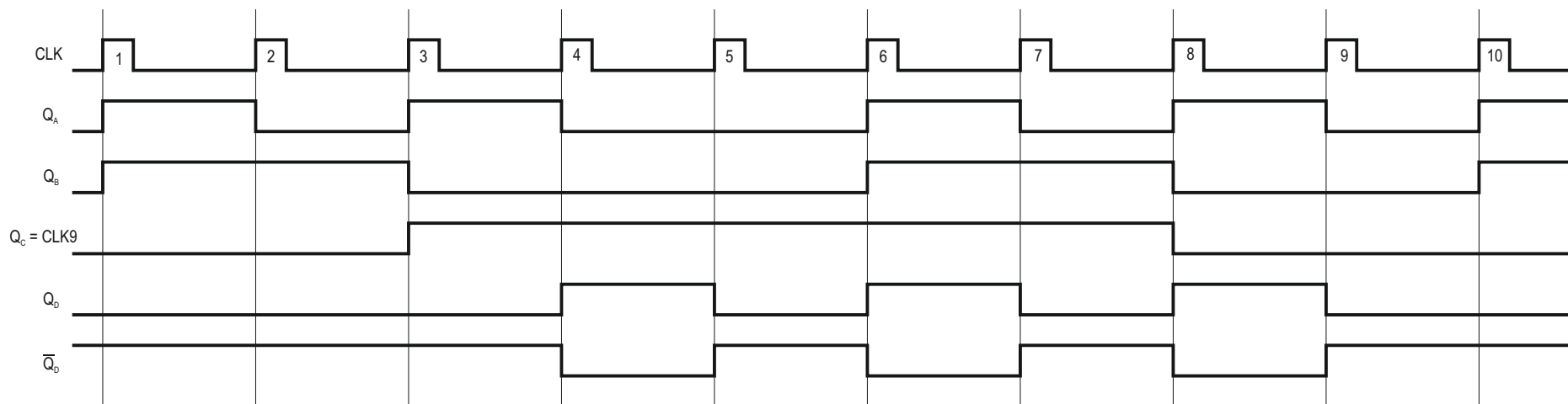
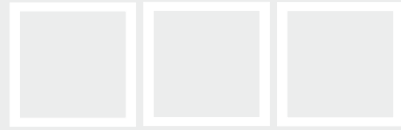
### Ein 1:5 Teiler ohne zusätzliche Verknüpfungsglieder

Wir bauen zunächst die Schaltung auf und wollen anhand des Impulsdiagramms ihr Verhalten untersuchen. Wenn wir von Hand Impulse auf die Schaltung geben, würden ohne die rückführende Verbindung  $\overline{Q}_c$  nach  $J_A$  die beiden ersten Flipflops die Taktfrequenz im Verhältnis 1:2n, d.h. hier im Verhältnis 1:4 teilen. Am Ausgang  $Q_B$  wird das unterteilte Signal abgenommen. Die Flipflops A und B arbeiteten als rückwärts zählender Asynchrone Zähler bis vier; nach vier Takten wäre die Grundstellung  $Q_A = Q_B = 0$  wieder erreicht. Während einer Periode gibt es am Ausgang  $Q_B$  nur eine ansteigende und eine abfallende Flanke. Die Rückführung kann nun durch geeignetes Potential aber nur verhindern, dass das A-Flipflop schaltet, sie kann keine zusätzlichen Flanken am  $Q_B$ -Signal erzeugen; mit anderen Worten: Die Anzahl der auf eine Periode des  $Q_B$ -Ausgangs treffenden Eingangstaktimpulse kann nur größer als vier werden und nicht kleiner. Sehen wir uns das Impulsdiagramm im Detail an. Nach dem Rücksetzen liegen alle Q-Ausgänge auf 0. Der erste Impuls schaltet Flipflop A, da  $J_A(\overline{Q}_c) = K_A = 1$  ist. Flipflop B wird durch die steigende Flanke an  $Q_A$  ebenfalls auf 1 geschaltet. Flipflop C hat wegen  $J_C = Q_B = 0$  nicht geschaltet. Der zweite Impuls bringt  $Q_A$  wieder auf 0, da sich an den Eingangsbedingungen von Flipflop A immer noch nichts geändert hat. Weiter schaltet er  $Q_C$  auf 1, da ja inzwischen  $J_C = 1$  geworden ist;  $J_A = \overline{Q}_c$  ist nun 0, Flipflop B erhält keine ansteigende Flanke und schaltet nicht.

Der dritte Impuls kippt nur Flipflop C wieder auf 0 zurück. Flipflop A schaltet jetzt nicht, wegen  $J_A = 0$ . Der vierte Taktimpuls findet ein Flipflop A vor, bei dem inzwischen wieder  $J_A = 1$  geworden ist und schaltet es auf  $Q_A = 1$ , womit auch Flipflop B auf  $Q_B = 0$  schaltet.  $Q_C$  wird 1. Der fünfte Taktimpuls bringt  $Q_A$  und  $Q_C$  wieder auf 0, womit die Ausgangsstellung der Flipflopkette wieder erreicht ist. Letzendlich hat der Taktimpuls 3 keine Wirkung auf unseren aus Flipflop A und B gebildeten Teiler 1:2n (1:4) gehabt, wir haben deswegen am Ausgang  $Q_B$  einen Zyklus von  $1:(2n+1)$ , d.h. in unserem speziellen Fall von  $1:(4+1)$  oder 1:5 und das ohne zusätzliches Verknüpfungsglied. Diese Schaltung ist nun die Basis für alle weiteren Teiler durch eine ungerade Zahl.







## Versuch 22 Der Teiler 1:9

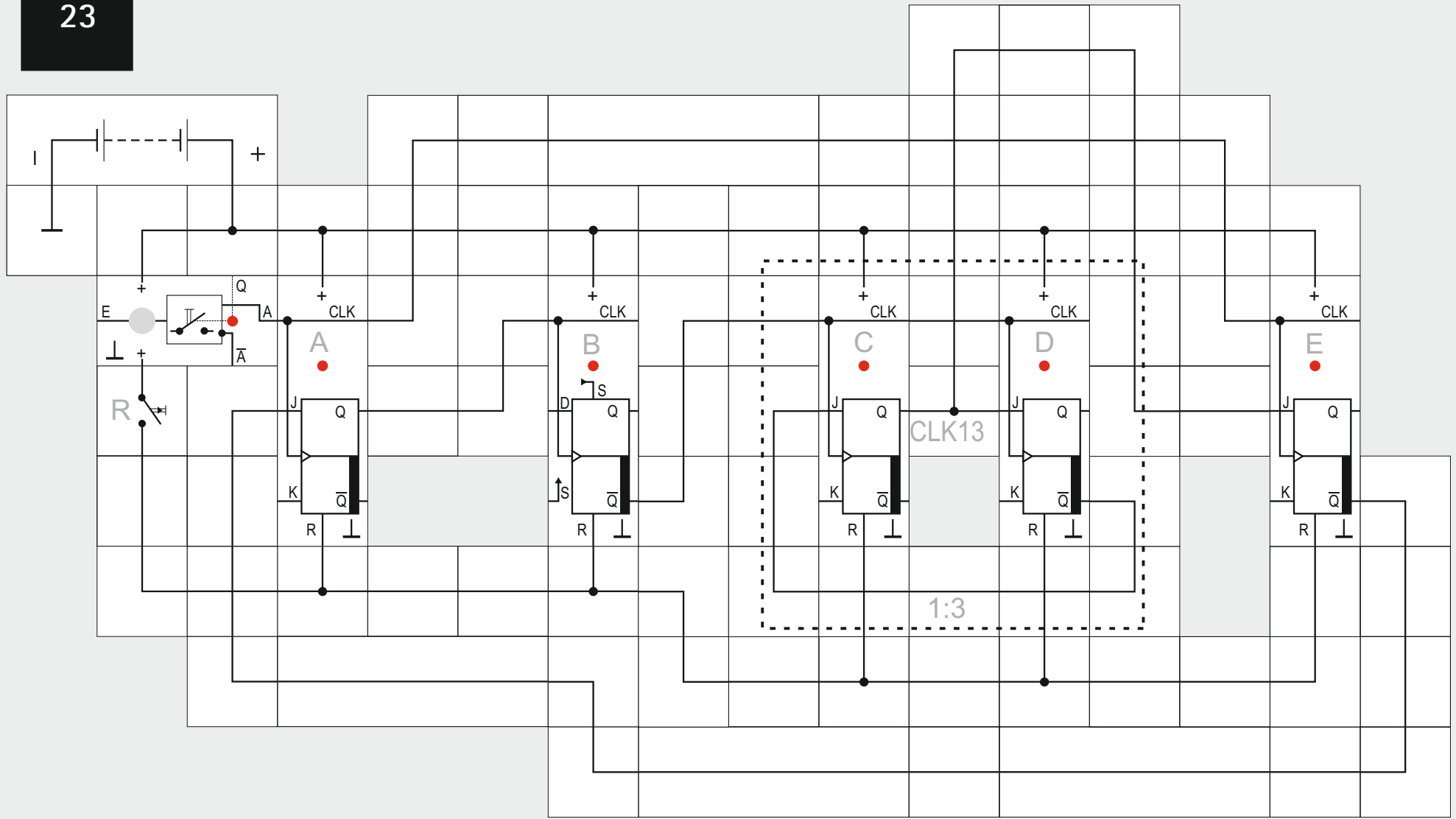
Wenn wir im letzten Versuch den Teil des Aufbaus, der für die 1:2 Teilung verantwortlich ist, nämlich das Flipflop B, ersetzen durch zwei Flipflops, die insgesamt eine Teilung 1:4 bewirken, so teilt die Gesamtkonfiguration durch 9 gemäß der Formel  $1:(2n+1)$  mit  $n = 4$ . Das Impulsdiagramm zeigt, wie genau wieder ein Impuls (Nr. 5) unterdrückt wird, indem er am Flipflop A nichts bewirkt. Dieses Schaltungsprinzip kann nun auf beliebige Teilverhältnisse

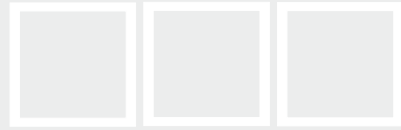
nisse verallgemeinert werden; der Entwurf eines Teilers basiert dann auf einer Zerlegung des gewünschten Teilverhältnisses. Diese Zerlegung ist immer möglich. Ist das Teilverhältnis eine gerade Zahl, so kann durch 2 dividiert werden und zwar mit einem JK-Flipflop, dessen beide Eingänge  $J = K = 1$  sind. Ist dagegen das Teilverhältnis eine ungerade Zahl, so kann es in eine Summe aus einer geraden Zahl und 1 aufgespalten werden und es kommt die eben besprochene Schaltung zum Einsatz. Der gerade Anteil ist wiederum durch 2 teilbar. Die Division

ergibt eine neue Zahl, die entweder wieder gerade ist und erneut durch 2 geteilt wird oder eine ungerade, von der 1 abgespalten und dann erst dividiert wird. Im nächsten Versuch werden wir eine solche Zerlegung durchführen.

Ein Hinweis muss noch gegeben werden: Die Schaltung mit dem Teilverhältnis  $1:(2n+1)$  funktioniert nur, wenn ihr Ausgang mindestens für drei Taktperioden auf 1 liegt, d.h. man kann sie erst ab der Teilung durch 5 anwenden. Die Teilung durch 3 führt die im Versuch 19 vorgestellte Schaltung aus.

23





## Versuch 23

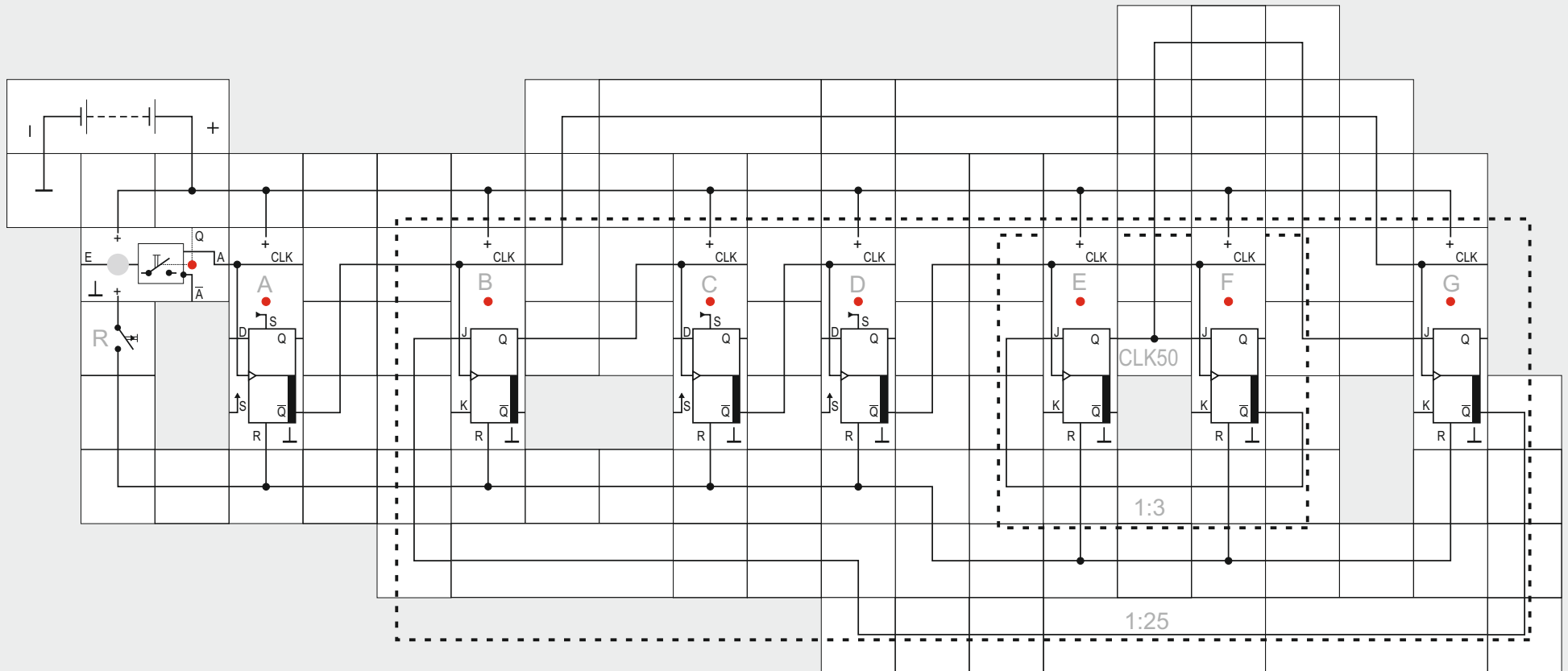
### Der Teiler 1:13

Anhand eines Beispiels wollen wir nun eine Zerlegung durchführen und die Schaltung aufbauen. Wir nehmen dazu den Teiler 1:13 und können dann den Aufwand mit dem des modulo-13-Zählers aus Versuch 11 vergleichen.

$$\begin{aligned} 13 &= 2 \cdot 6 + 1 \\ &= 2 \cdot 2 \cdot 3 + 1 \\ &= 2 \cdot 2 \cdot (2 + 1) + 1 \end{aligned}$$

Aus der Zerlegung können wir bereits sehen, dass fünf Flipflops benötigt werden, und zwar für jede Ziffer eins. Der Teiler 1:3 ist markiert, das Ausgangssignal CLK13 wird an Flipflop C abgegriffen; es liegt fünf Taktperioden auf 1 und acht Perioden auf 0.

Für den einfachen Binärteiler (Flipflop B) können wir den Lectron D-Flipflop Baustein einsetzen. Im Versuchsaufbau ist die obige Zerlegung gut zu erkennen.





## Versuch 24

### Der Teiler 1:50

Große praktische Bedeutung hat der 1:50 Teiler; wenn wir auf seinen Eingang Wechselspannung mit 50 Hz geben, teilt er die Frequenz so herunter, dass wir am Ausgang sehr genaue Sekundenimpulse be-

kommen. Wir zerlegen als erstes die Zahl 50:

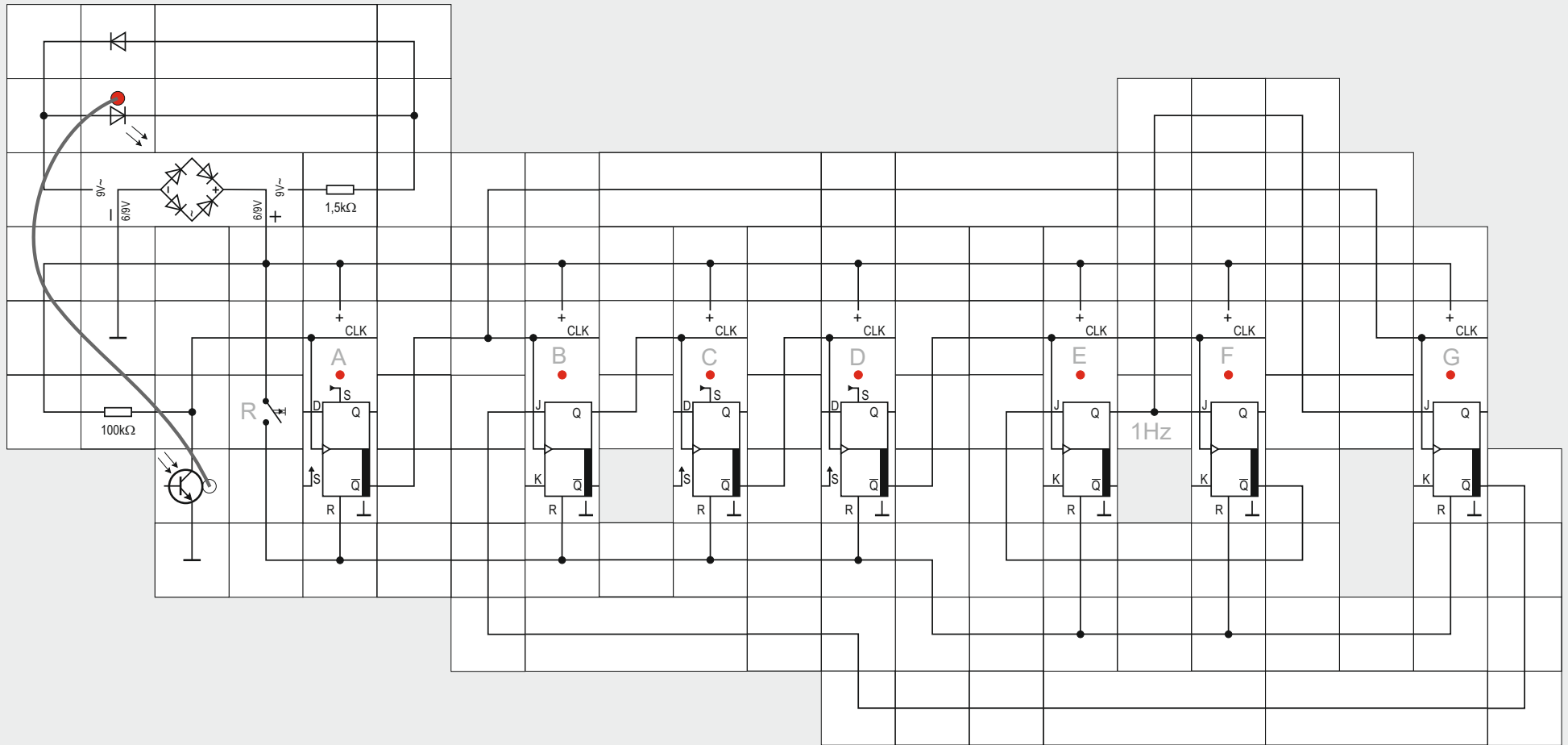
$$\begin{aligned} 50 &= 2 \cdot 25 \\ &= 2 \cdot (24 + 1) \\ &= 2 \cdot (2 \cdot 12 + 1) \\ &= 2 \cdot (2 \cdot 2 \cdot 6 + 1) \\ &= 2 \cdot (2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 + 1) \\ &= 2 \cdot [2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot (2 + 1) + 1] \end{aligned}$$

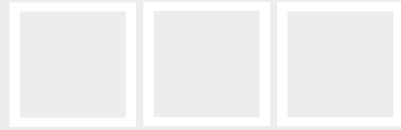
Die Zerlegung sagt uns, dass wir sieben Flipflops benötigen werden (pro Ziffer eins). Zunächst einen Binärteiler, dann drei Binärteiler, die mit einem 1:3 Teiler über die bekannte Schaltung mit Rückführung zur Unterdrückung eines Taktes verschachtelt sind. Für die drei reinen Binärteiler verwenden wir D-Flipflop Bausteine. Das Ausgangssignal wird am Ausgang  $Q_E$  abgegriffen. Es ist 18 Taktperioden auf 1 und 32 Perioden auf 0. Möchte man ein symmetrisches Signal haben, muss das erste Flipflop A, das durch 2 teilt, an den Schaltungsausgang verlegt werden.

Nach Betätigen der Rücksetztaste liegen alle Flipflops auf 0. Dieser Zustand wird auch wieder erreicht, wenn man per Hand 50 Taktimpulse erzeugt hat, die Schaltung teilt also tatsächlich durch 50.

Die Schaltung muss wegen ihrer Größe auf zwei Grundplatten aufgebaut werden, auf eine gute Masseverbindung der beiden Platten mit »Verbindung Masse«-Bausteinen ist zu achten.

25





## Versuch 25\*

### Ein Sekundenimpuls Generator

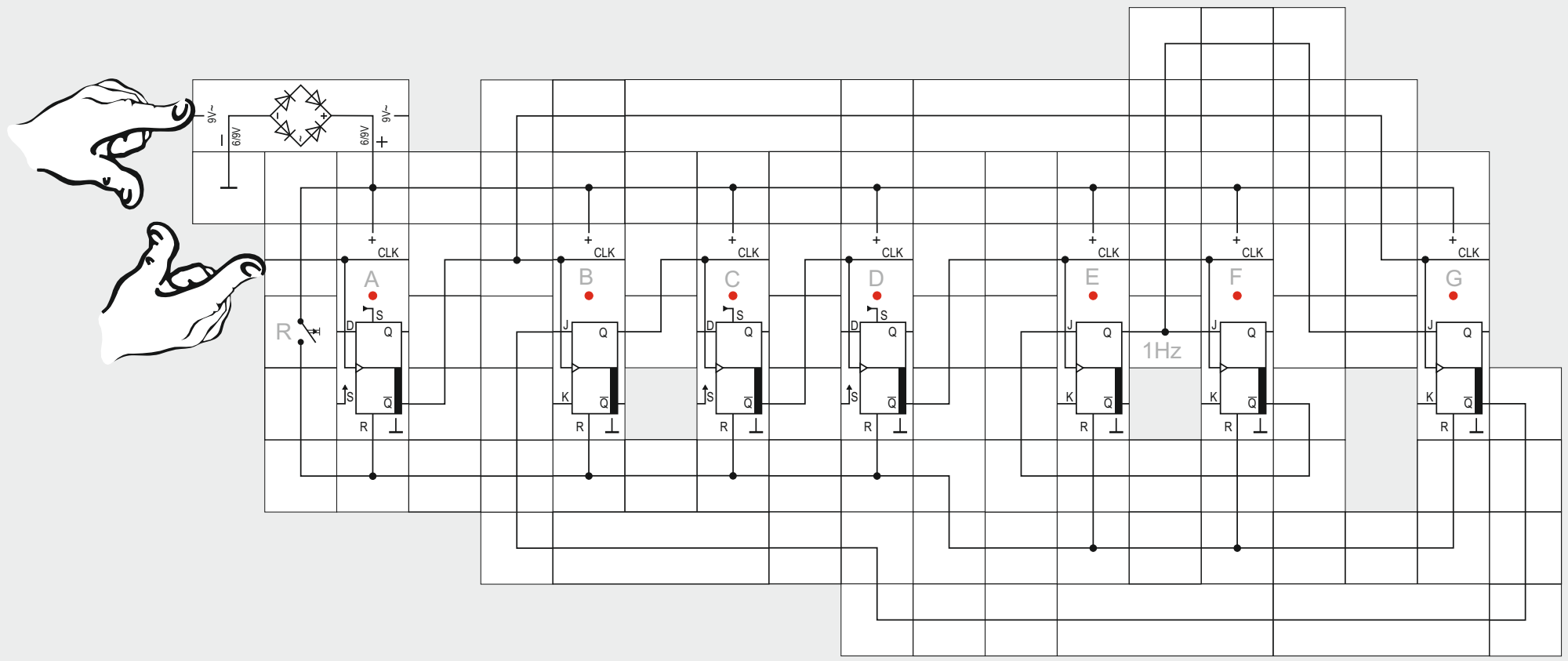
Den aufgebauten Teiler 1:50 verwenden wir jetzt dazu, Sekundenimpulse zu erzeugen. Wir tauschen den Batteriebaustein gegen das Netzgerät aus und

---

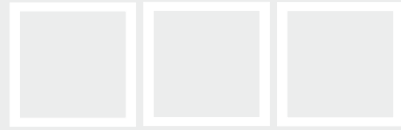
\*) Für den Versuch sind Bauteile aus »Optoelektronik und Solartechnik«, sowie ein Netzteil, das nicht im Kasten enthalten ist, erforderlich.

speisen weiterhin von seinen Gleichspannungsausgängen den Teiler. An die Wechselspannungsausgänge schließen wir über einen Vorwiderstand von  $1,5 \text{ k}\Omega$  zwei antiparallel geschaltete Dioden, eine normale und eine Leuchtdiode mit Loch zur Aufnahme eines Lichtwellenleiters, an: Damit wir keine Probleme mit den Bezugspotentialen zwischen der Wechsel- und der Gleichspannung bekommen, wollen wir die 50 Hz Wechselspannungsimpulse über einen »Optokoppler« auf den Teiler geben. Die eine Halbwelle des Wechselstroms fließt über die Leuchtdiode und bringt sie zum Leuchten, die andere Halbwelle fließt normal über die andere Diode. Wir erhalten also 50 Lichtblitze pro Sekunde, die über den Lichtwellenleiter auf den Phototransistor gegeben, diesen 50 mal pro Sekunde niederohmig schalten. Ist der Transistor während der »Dunkelzeiten« gesperrt, sorgt der  $100 \text{ k}\Omega$  Widerstand für hohes Potential am Schaltungseingang. Am Ausgang  $Q_e$  erhalten wir dann die mit der Konstanz der Netzfrequenz genauen Sekundenimpulse, die auch von der LED des Flipflops E angezeigt werden. Leuchtdiode, Lichtwellenleiter und Phototransistor sind Teile des Lectron Baukastens »Optoelektronik und Solartechnik«; besitzt man diesen Kasten nicht, kann man sich trotzdem weiter helfen. Wie, das wird im nächsten Versuch gezeigt.

26







# Lectron

gar nicht erst aufgebaut haben, können wir den 1:50 Teiler als empfindlichen Empfänger benutzen. Der offene Schaltungseingang  $CLK_A$  führt direkt auf die Gates eines CMOS - Inverters, welche sehr hochohmig gegen den Rest der Schaltung und damit auch sehr empfindlich sind. **Wir dürfen den Eingang deswegen erst dann berühren, wenn wir uns vorher entladen haben.** Dazu legen wir die linke Hand zunächst auf die Grundplatte und berühren dann erst mit der rechten Hand den Kontakt  $CLK_A$ . Da wir selbst auf Nullpotential liegen, passiert zunächst nichts, der Schaltungseingang liegt auf demselben Potential. Berühren wir nun mit der linken Hand einen Wechselspannungskontakt des Netzgerätes, so werden augenblicklich die Leuchtdioden des Teilers zu blinken anfangen. Es wird wahrscheinlich schon ausreichen, nur in die Nähe des Kontaktes zu kommen, um das Blinken auszulösen. Die Leuchtdiode des Flipflops E wird wieder die Sekundenimpulse der geteilten 50 Hz Wechselspannung anzeigen. Es kann allerdings auch sein, dass sie doppelt so schnell blinkt, weil durch unsaubere Potentialverhältnisse gleichgerichtete 100 Hz Halbwellen an den Schaltungseingang gelangen und anschließend durch 50 geteilt werden. Der Versuch zeigt, wie allgegenwärtig die 50 Hz Netzspannung und ihre Vielfachen in unserer Umgebung sind.

## Versuch 26\*

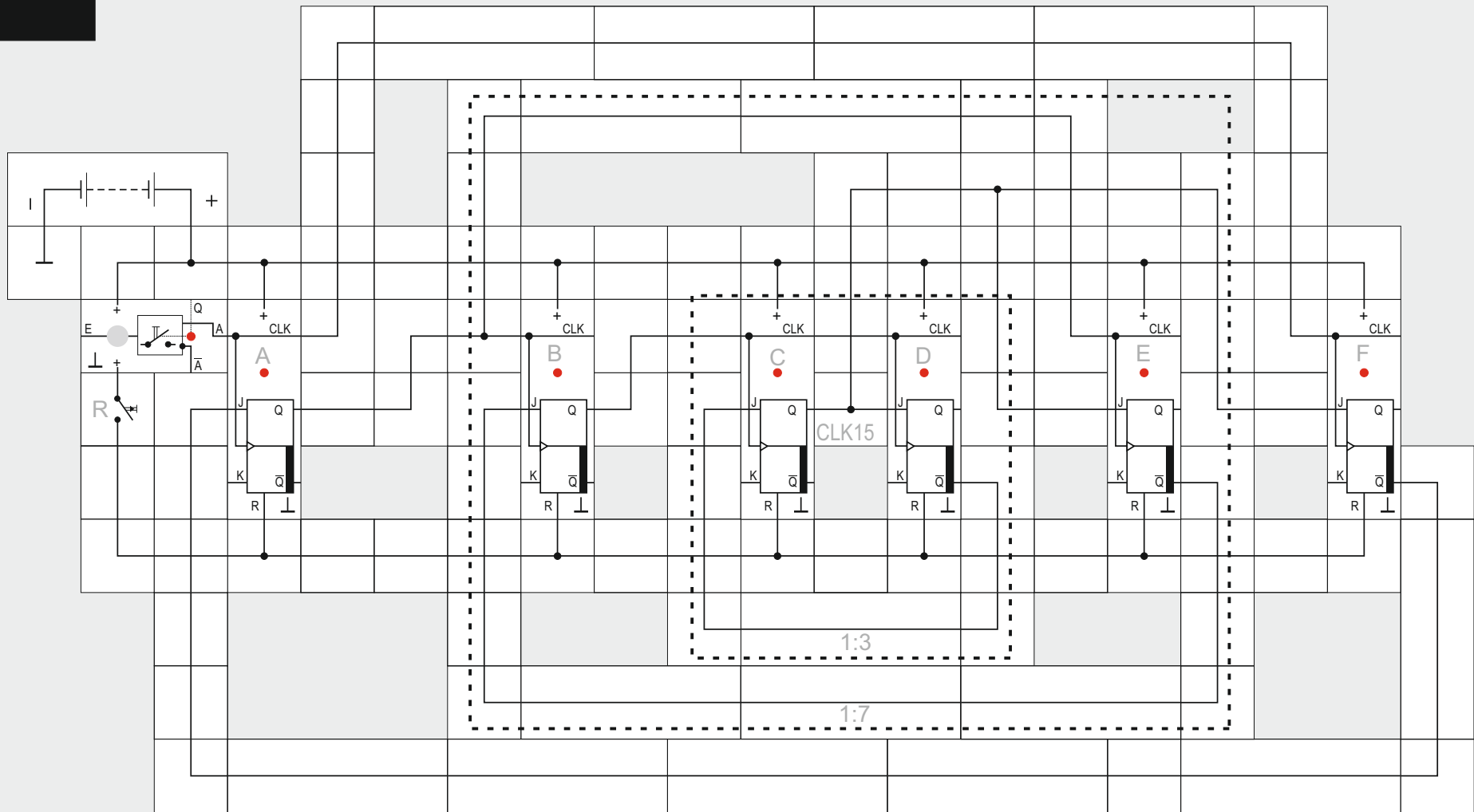
### Ein sehr empfindlicher Empfänger

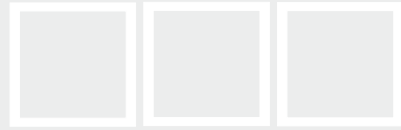
Wenn wir die Optokoppler - Strecke entfernen oder

---

\*) Für den Versuch ist ein Netzteil, das nicht im Kasten enthalten ist, erforderlich.

27





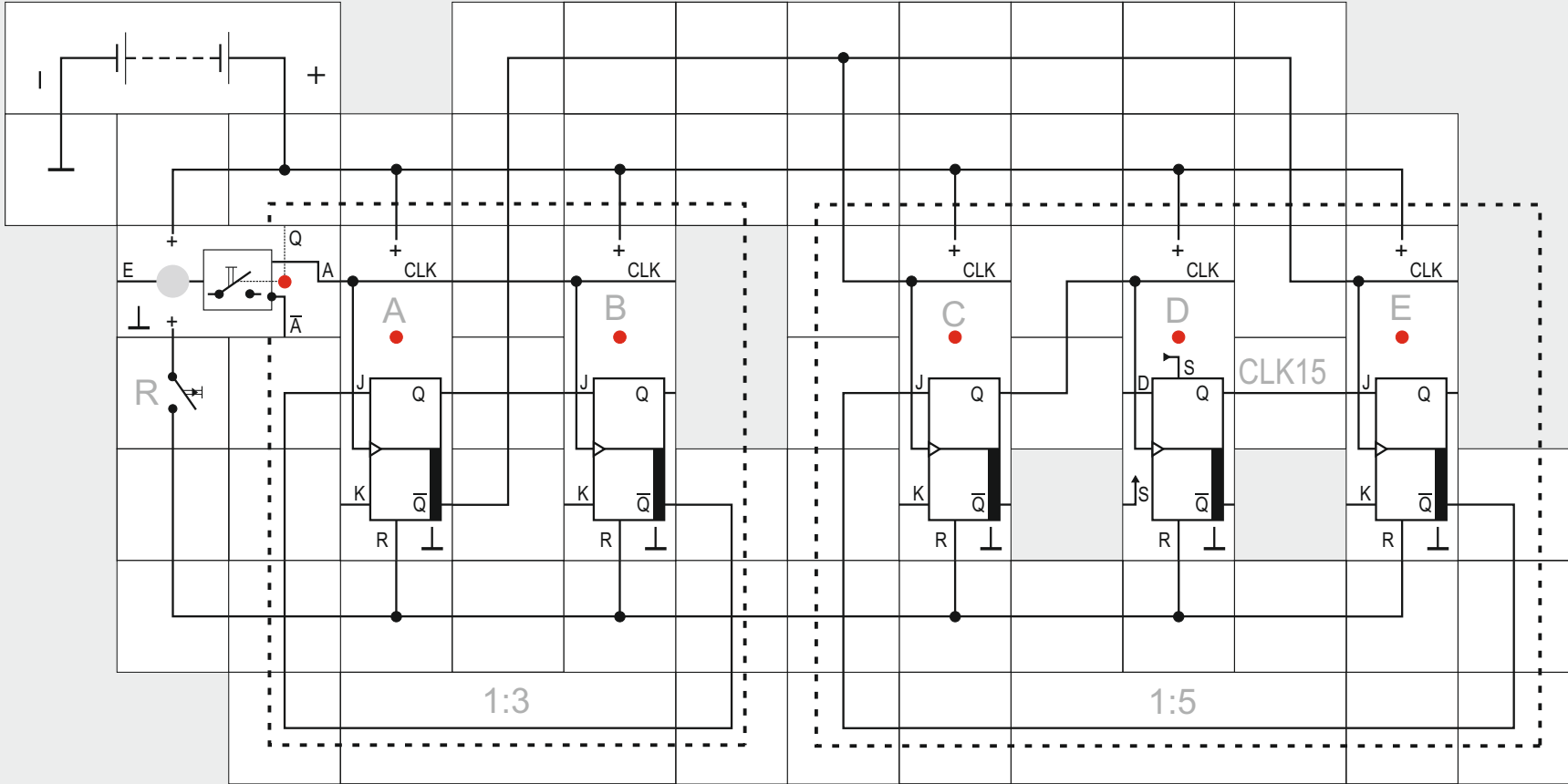
## Versuch 27

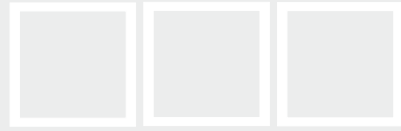
### Der 1:15 Teiler

Die verwendete Methode der Teileraufspaltung funktioniert immer, liefert aber nur gute Resultate, wenn der Teiler eine Zweierpotenz ist oder knapp darüber liegt; liegt er dagegen knapp darunter, ist diese Methode ungünstig, weil in der Entwicklung nur ungerade Zahlen auftreten, was in der Realisierung unnötig viele Flipflops erfordert. Wir wollen das an dem Teiler 1:15 zeigen. 15 liegt gerade um eins unter der Zweierpotenz  $16 = 2^4$ . Die Zerlegung nach unserer Methode ergibt:

$$\begin{aligned} 15 &= 2 \cdot 7 + 1 \\ &= 2 \cdot (2 \cdot 3 + 1) + 1 \\ &= 2 \cdot [2 \cdot (2 + 1) + 1] + 1 \end{aligned}$$

Wir werden für den Teiler 6 Flipflops benötigen, da die Zerlegung 6 Ziffern ergibt. Die abgebildete Schaltung kann man nur aufbauen, wenn man sich noch 2 zusätzliche JK-Flipflops besorgt, im Baukasten sind nur 4 enthalten; wir können keins der 6 durch ein D-Flipflop ersetzen, da kein reiner Binärteiler vorkommt. Im nächsten Versuch wird gezeigt, wie wir trotzdem mit dem vorhandenen Material den Teiler aufbauen können.

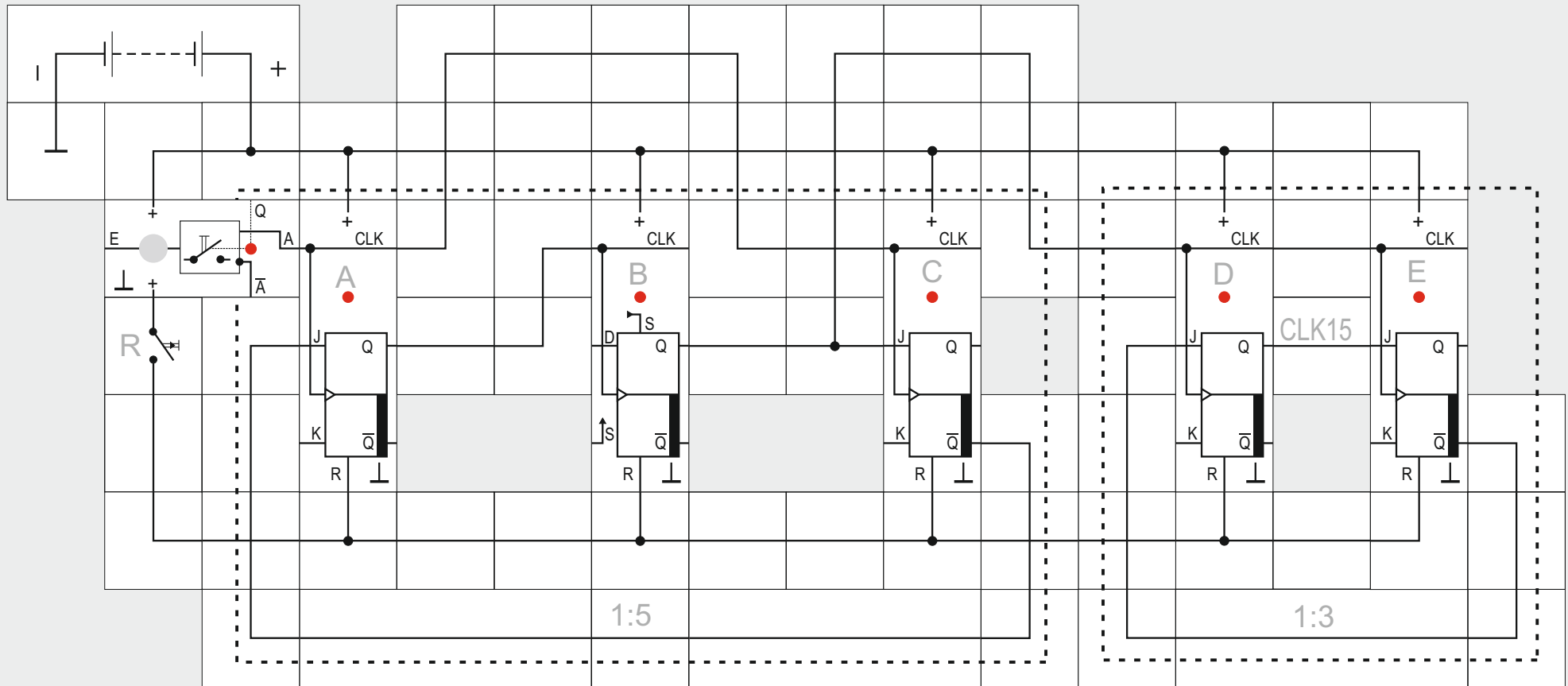


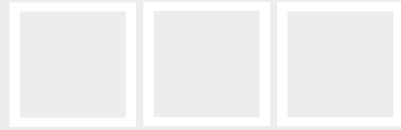


## Versuch 28

### Die Faktorenerlegung

Die Zahl 15 muss nicht unbedingt nach der bisherigen Methode zerlegt werden. Wir wissen, dass 15 gleich  $3 \cdot 5$  ist und weiter, wie ein 1:3 und ein 1:5 Teiler aussehen, da wir sie bereits aufgebaut haben. Schalten wir die beiden Teiler hintereinander, erhalten wir ebenfalls einen 1:15 Teiler. Dieser Teiler benötigt ein Flipflop weniger, also nur 5 und wir können ein JK-Flipflop durch ein D-Flipflop ersetzen, weil ein reiner Binärteiler im 1:5 Schaltungsteil vorkommt. Wir erkennen auf den ersten Blick, dass auch die Verdrahtung dieser Schaltung erheblich einfacher ist als die der sehr ineinander geschachtelten Anordnung des vorherigen Versuchs. Das Tastverhältnis des Ausgangssignals CLK15 ist allerdings ein anderes; es ist  $t_1/t_1+t_0 = 9/15$  und hängt immer vom letzten Teilerblock ab; wir wollen das im nächsten Versuch nachprüfen. Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass bei geraden Teilverhältnissen ein symmetrisches Ausgangssignal  $t_1/t_1+t_0 = 1/2$  entsteht, wenn man den Binärteiler an das Ende der Teilerkette setzt.



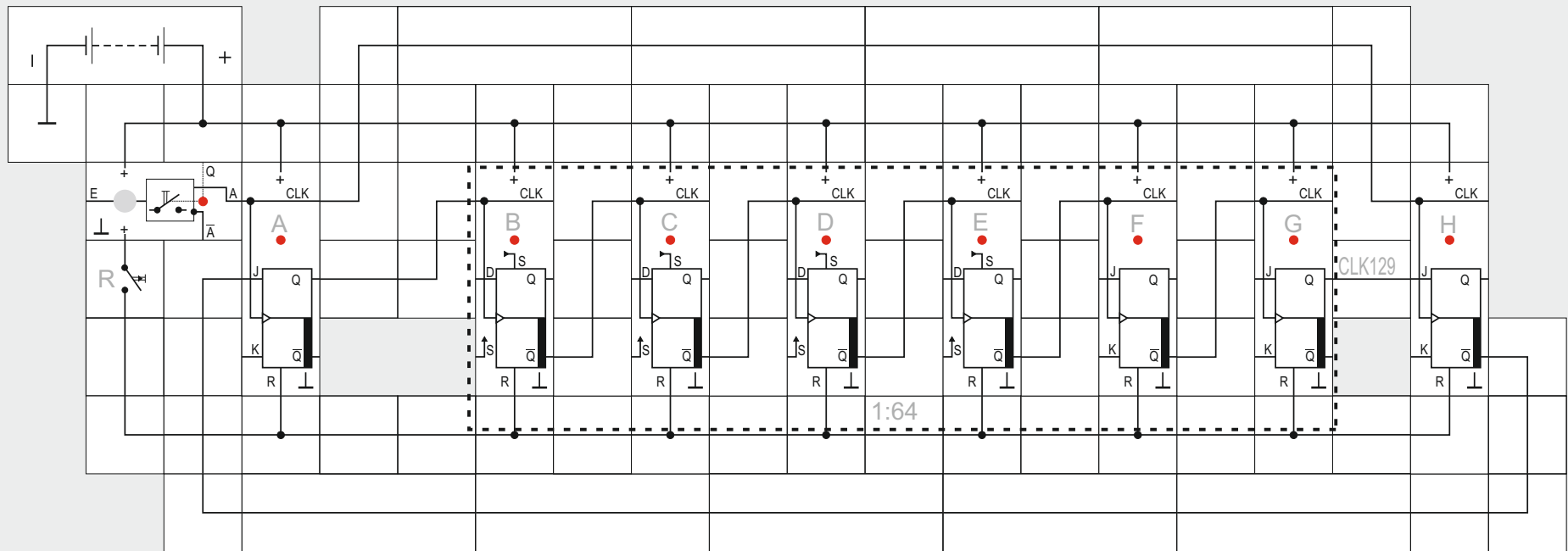


## Versuch 29

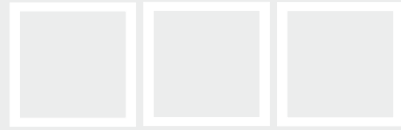
### Ein anderer 1:15 Teiler

15 ist nicht nur 3·5, sondern auch 5·3. Wir können also auch die Reihenfolge der Teiler in der Schaltung ändern und erhalten wiederum einen 1:15 Teiler. Sein Ausgangssignal  $Q_D$  ist allerdings nur für fünf Schritte auf 1,  $t_1/t_1+t_0$  beträgt 5/15, ist also verschieden von dem des vorherigen Versuchs. Statt der Impulsdiagramme sind in der Tabelle für beide Teilervarianten die einzelnen Schritte durch den Status der Leuchtdioden angegeben und wir können sehen, wie das Ergebnis zustande kommt.

	3·5					5·3				
CLK	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1	●	○	○	○	○	●	●	○	●	○
2	○	●	●	●	○	○	●	●	●	○
3	○	○	●	●	○	○	●	○	●	○
4	●	○	●	●	○	●	○	●	●	○
5	○	●	○	●	●	○	○	○	●	○
6	○	○	○	●	●	●	●	○	○	●
7	●	○	○	●	●	○	●	●	○	●
8	○	●	○	●	○	○	●	○	○	●
9	○	○	○	●	○	●	○	●	○	●
10	●	○	○	●	○	○	○	○	○	●
11	○	●	●	○	●	●	●	○	○	○
12	○	○	●	○	●	○	●	●	○	○
13	●	○	●	○	●	○	●	○	○	○
14	○	●	○	○	○	●	○	●	○	○
15	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
16	●	○	○	○	○	●	●	○	●	○







## Versuch 30

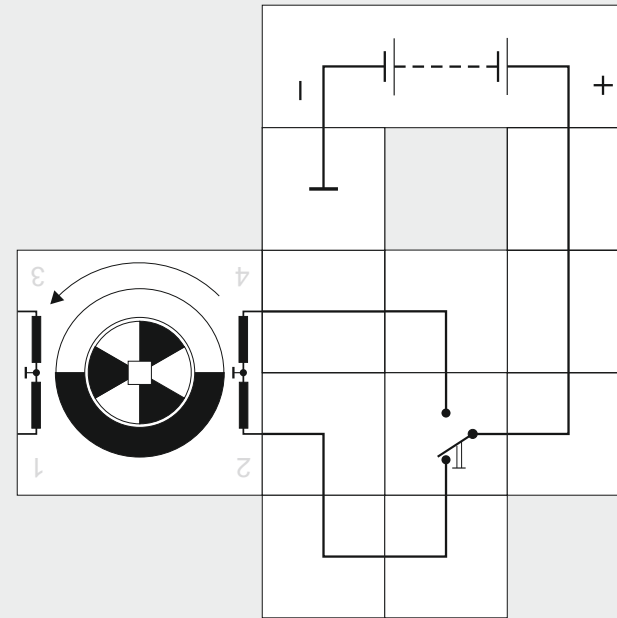
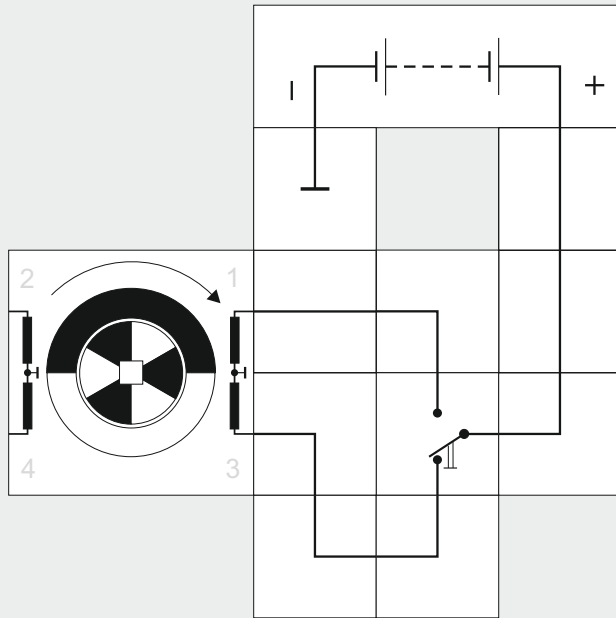
### Der 1:129 Teiler

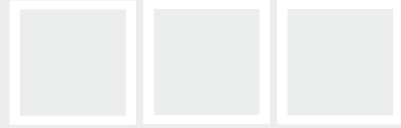
Zum Abschluss der Teilerkonstruktionen wollen wir einen Teiler aufbauen, bei dem alle unsere Flipflops benötigt werden und dessen Teilverhältnis knapp über einer Zweierpotenz liegt; diese Teiler lassen sich ja besonders günstig aufbauen. Wir wählen 129 als Teiler. Die Zerlegung läuft folgendermaßen:

$$\begin{aligned}129 &= 2 \cdot 64 + 1 \\ &= 2 \cdot 2 \cdot 32 + 1 \\ &= 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 16 + 1 \\ &= 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 8 + 1 \\ &= 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 4 + 1 \\ &= 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 + 1\end{aligned}$$

Wir erhalten 8 Ziffern und benötigen deswegen auch alle 8 Flipflops unseres Kastens. Da 6 von ihnen reine Binärteiler sind, lassen sich die 4 D-Flipflops gut einsetzen. An der aufgebauten Schaltung stellen wir fest, dass der  $Q_6$ -Ausgang nach dem 63. Taktimpuls auf 1 und nach dem 128. wieder auf 0 geht. Das Ausgangssignal des Teilers ist demnach mit  $t_1/t_0 + t_0 = 65/129$  nahezu symmetrisch.

31



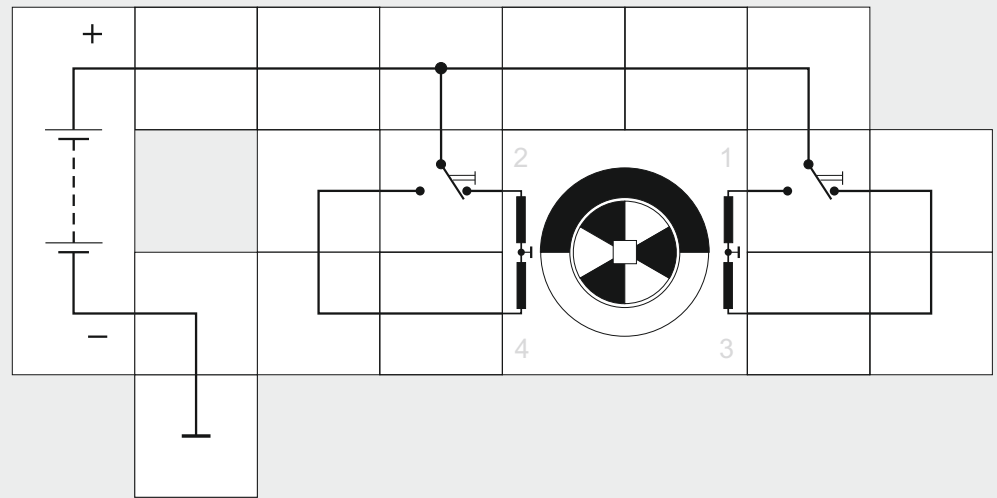


### Versuch 31 Der Schrittmotor

Wenn man eine Wicklung des Lectron Schrittmotors an Gleichspannung legt und erwartet, dass der Motor losläuft, wird man enttäuscht sein, wie wenig sich tut. Die Welle macht höchstens einen kleinen Ruck und bewegt sich nicht weiter. Schrittmotoren sind nicht dafür gedacht, sich wie «normale» Motoren zu drehen, sie sind vielmehr so konstruiert, dass sich ihre Welle schrittweise um einen genau definierten Winkel bewegt. Die Motoren werden deswegen für Positionierungsaufgaben in der Elektronik und der Feinmechanik eingesetzt. Viele Geräte aus unserem Alltag, wie Scanner, Kopierer,

Tintendrucker, CD-Spieler enthalten solche Motoren. Die Welle dreht sich bei ihnen schrittweise durch ein wanderndes Magnetfeld, das in paarweise angeordneten, sich kreuzenden Stator - Wicklungen erzeugt wird. Sie tut das sehr exakt in der einen oder der anderen Richtung um einen bestimmten Winkel (Schritt), der konstruktiv vorgegeben ist. Etwaige Abweichungen summieren sich nicht auf. Außerdem wird die Welle in der erreichten Position festgehalten, so dass auch äußere Einflüsse sie nur schwer verdrehen können.

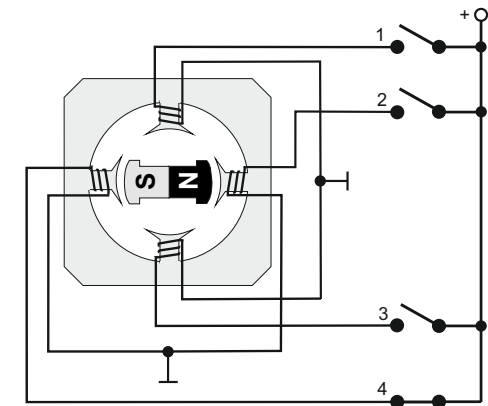
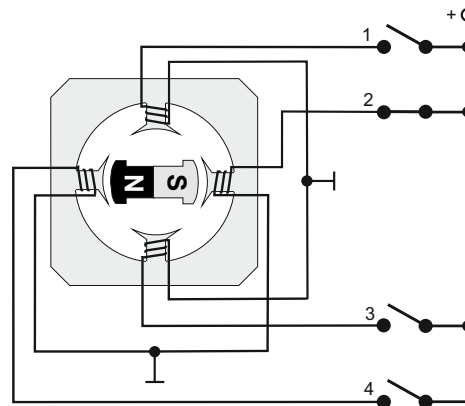
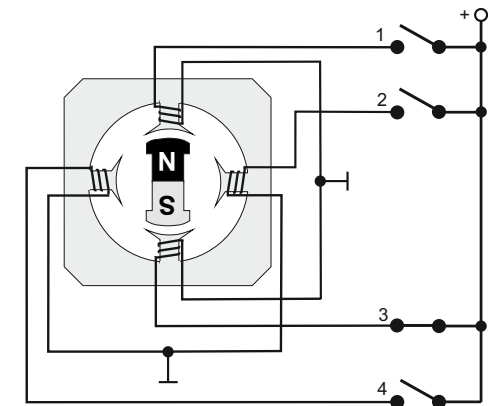
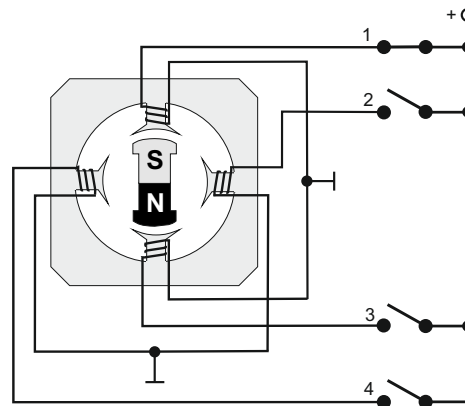
Damit die Welle sich schrittweise bewegen kann, müssen wir also ein wanderndes Magnetfeld im Motor erzeugen. Die Schaltungen zeigen, wie man es macht, wenn man zunächst nur ein Spulenpaar benutzt. Der Umschalter legt abwechselnd Spannung an die Spulen 1 und 3, die gegen Masse geschaltet sind, und bei jedem Umschalten springt die Welle ein Stück weiter im Uhrzeigersinn. Zählt man mit, so wird man herausfinden, dass zwölf Schritte für eine Umdrehung erforderlich sind; ein Schritt entspricht also einem Winkel von  $30^\circ$ . Zur Orientierung sind die Spulen mit 1-4 nummeriert. Dreht man den Motor im Versuchsaufbau um  $180^\circ$ , so wird statt des Spulenpaars 1-3 das Paar 2-4 benutzt und der Motor springt bei Schalterbetätigung in Gegenrichtung.

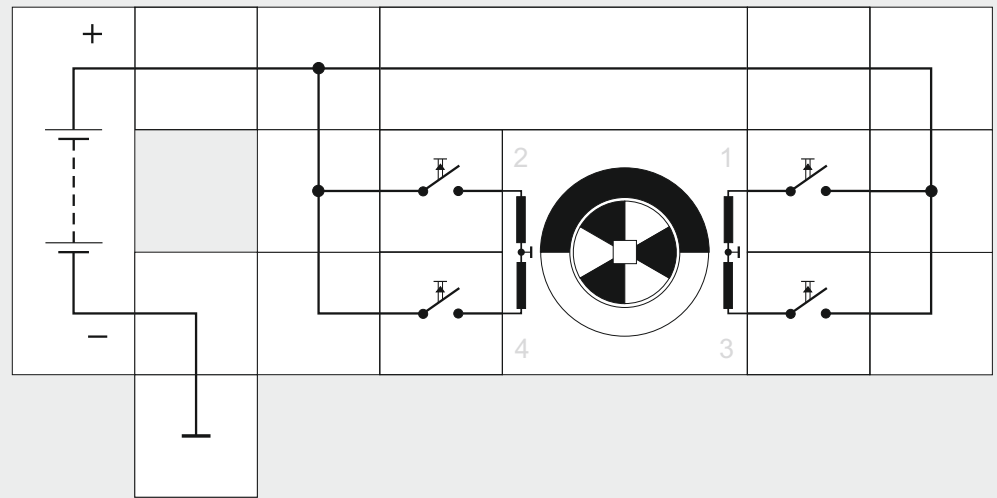


## Versuch 32

### Der Aufbau des Schrittmotors

Wir sagten bereits, dass beim Schrittmotor ein wanderndes Magnetfeld, welches in paarweise angeordneten, sich kreuzenden Statorwicklungen erzeugt wird, die schrittartige Bewegung hervorruft. Das Magnetfeld wirkt im Inneren des Motors auf den Rotor, der eine ganze Reihe permanentmagnetischer Pole (Dauermagnete) besitzt. Der Rotor unseres Motors hat 12 Polpaare und vier Statorpole, woraus sich 48 Schritte für eine Umdrehung ( $360^\circ$ ) im VOLLSCHRITT-BETRIEB ergeben. Ein Schritt passiert immer dann, wenn sich der magnetische Fluss in einem Stator durch eine geänderte Ansteuerung verändert. Die Abbildungen zeigen das Prinzip, wenn wir alle Spulenpaare nutzen. Der Einfachheit halber hat der Rotor nur ein Polpaar statt zwölf, er benötigt deswegen nur vier Schritte statt 48 für eine Umdrehung. (Die 24 Schritte im vorigen Versuch kamen dadurch zustande, dass wir nur ein Spulenpaar benutzten und der Motor deswegen Doppelschritte machte).



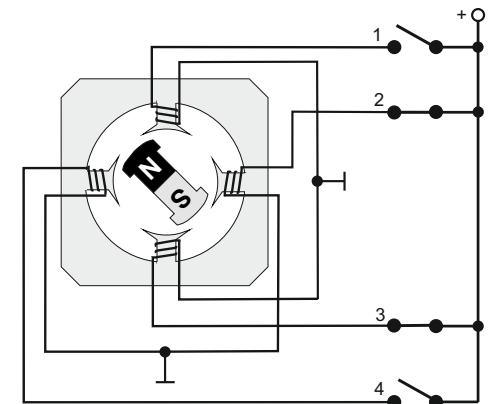
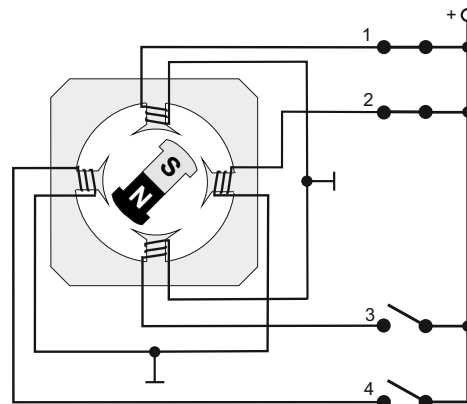
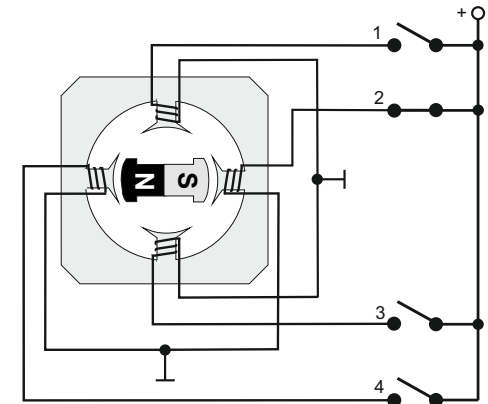
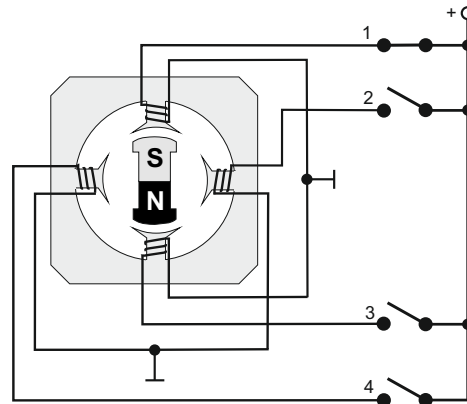


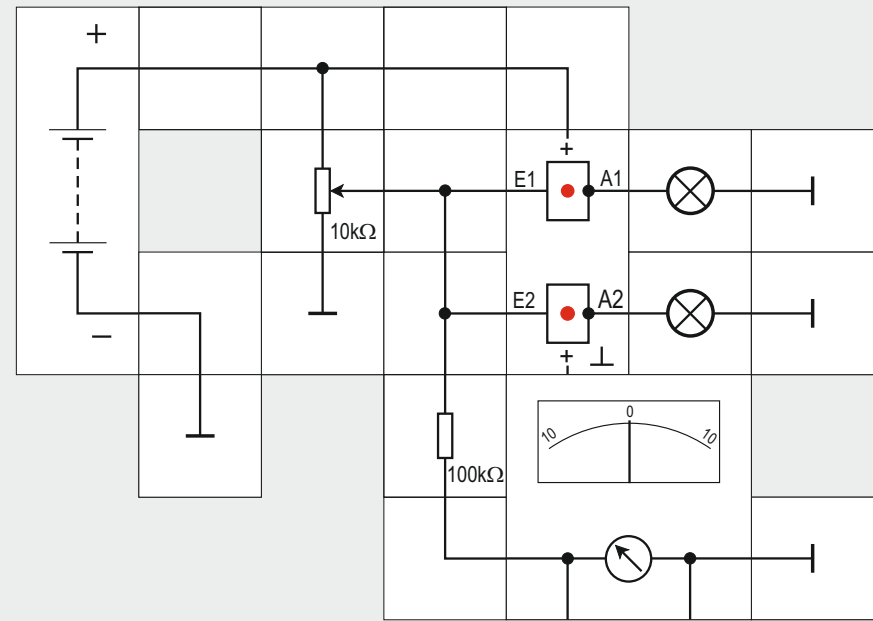
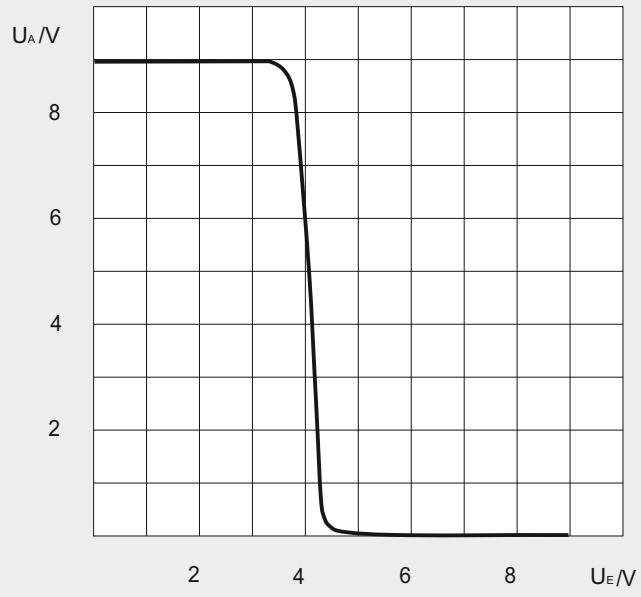
## Versuch 33

### Der Halbschrittbetrieb mit Taster

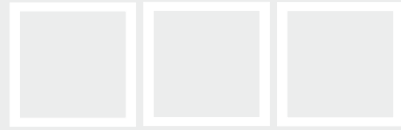
Bei der Ansteuerung des Motors muss man nicht nur immer einen Schalter schließen, man kann auch zwei gleichzeitig betätigen, also beispielsweise Schalter 1 und 2; dann stellt sich der Rotor mit seinem Südpol genau zwischen zwei Statorpole. Auf diese Weise wird die Schrittweite halbiert und der Motor arbeitet im HALBSCHRITTBETRIEB. Er benötigt für eine Umdrehung dann 96 Halbschritte.

In unserem Versuchsaufbau ersetzen wir die Umschalter durch Taster und betätigen sie in der Reihenfolge 1, 1&2, 2, 2&3, 3, 3&4, 4, 4&1 usw. »Betätigen« heißt Taster 1 drücken und im gedrückten Zustand festhalten, Taster 2 drücken und festhalten, Taster 1 loslassen, Taster 3 drücken, usw. Hat der Rotor nur ein Polpaar wie in der Übersicht, kommen wir auf 8 Halbschritte pro Umdrehung; bei den 12 Polpaaren des Lectron Motors sind es entsprechend 96 Schritte. Die Abbildungen zeigen in der Reihenfolge links oben, links unten, rechts oben, rechts unten die ersten vier der acht Halbschritte.







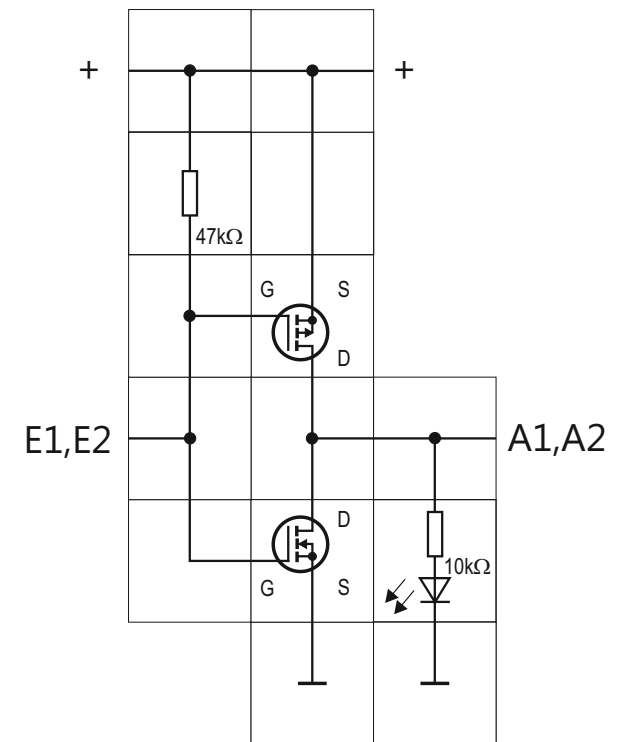


## Versuch 34 Der CMOS Inverter

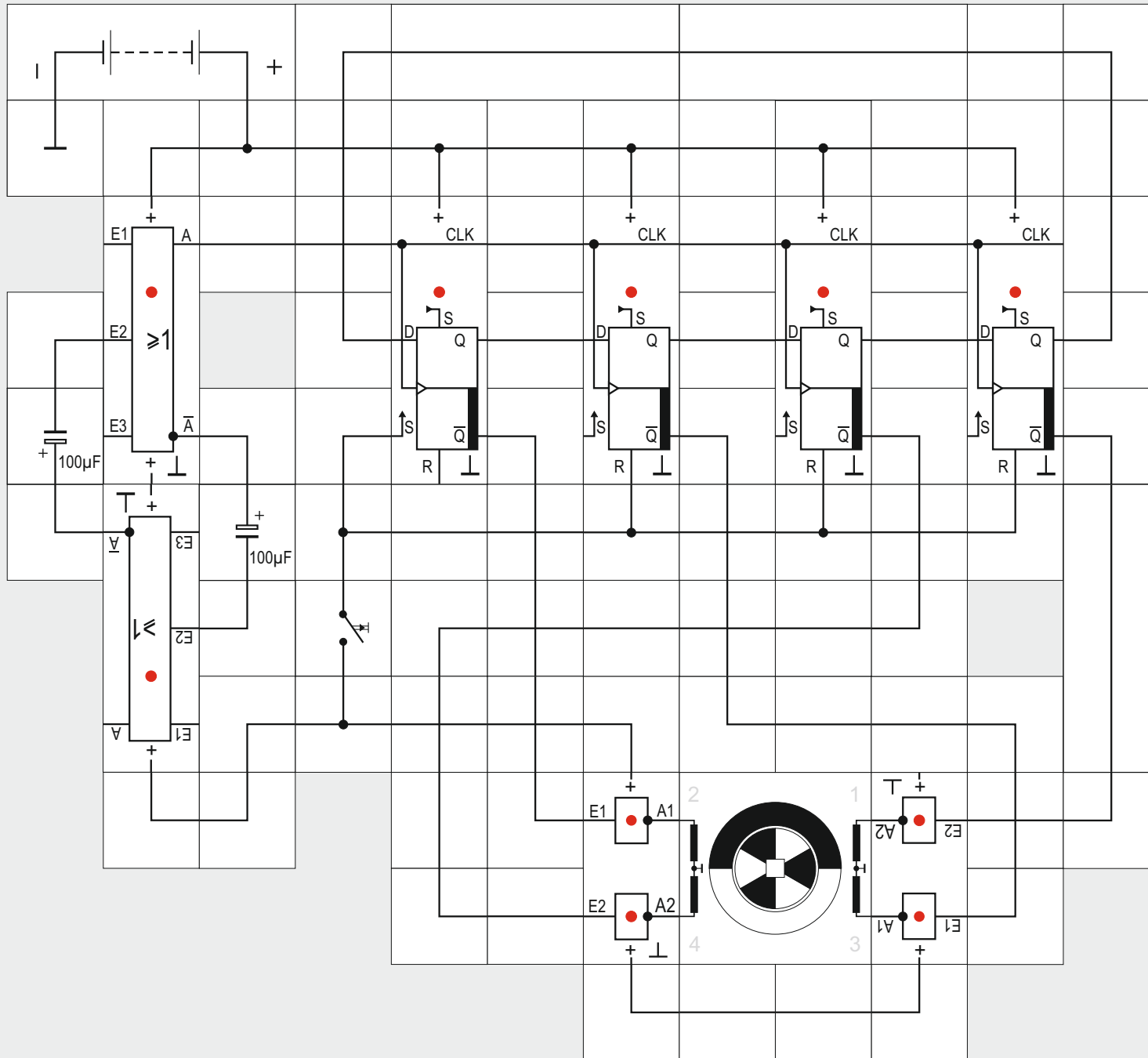
Es ist nicht gerade eine elegante Lösung, den Schrittmotor mittels Schalterbetätigung anzusteuern. Besser ist eine »elektronische« Ansteuerung, die ohne mechanische Schalter auskommt, nämlich eine, die den Motor von Zählern oder Schieberegistern aus ansteuert. Diese Schaltungen sind in CMOS-Technik ausgeführt und können im allgemeinen an ihren Ausgängen nur Ströme im Bereich von 5 mA abgeben oder aufnehmen, was zur Motoransteuerung nicht ausreichend ist; wir müssen deswegen noch einen Verstärker dazwischen set-

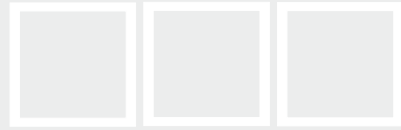
zen. Vom Lectron »Digitalbaukasten« ist uns bereits der CMOS Inverter bekannt, der aus einem n- und einem p-Kanal MOSFET besteht. Diese Transistoren gibt es auch als POWER MOSFETS, bei denen unzählige n- bzw p-Kanal Systeme in einem Transistor parallel geschaltet sind. Als Resultat erhält man Transistoren, deren Eingangskapazität nicht nur 5 pF beträgt, sondern entsprechend hoch ist und sich schnellen Umladungen widersetzt. Das soll uns bei unseren relativ langsamen Schaltvorgängen nicht weiter stören, wir wollen eine andere Eigenschaft der Transistoren ausnutzen: Ihr Ein-Widerstand liegt im Bereich von 50 m $\Omega$ , sie schalten also sehr niederohmig durch. Baut man aus ihnen einen Inverter zusammen, so kann man diesen problemlos von einem Schieberegister ansteuern und er selbst kann wiederum den Schrittmotor steuern. Wir müssen lediglich beachten, dass er invertiert.

Die Übertragungskennlinie nehmen wir mit der angegebenen Schaltung auf, wobei das Lectron Messinstrument ausreicht. Als Last wählen wir zwei Glühlampen und sehen an ihrem Leuchten, dass der Inverter knapp über 4 V Eingangsspannung in einem schmalen Einstellbereich des Potentiometers umschaltet. Die Ausgangssignale der beiden in dem Baustein untergebrachten Inverter werden zusätzlich mit Leuchtdioden angezeigt.



Diese Schaltung ist zweimal in dem Inverter Baustein enthalten





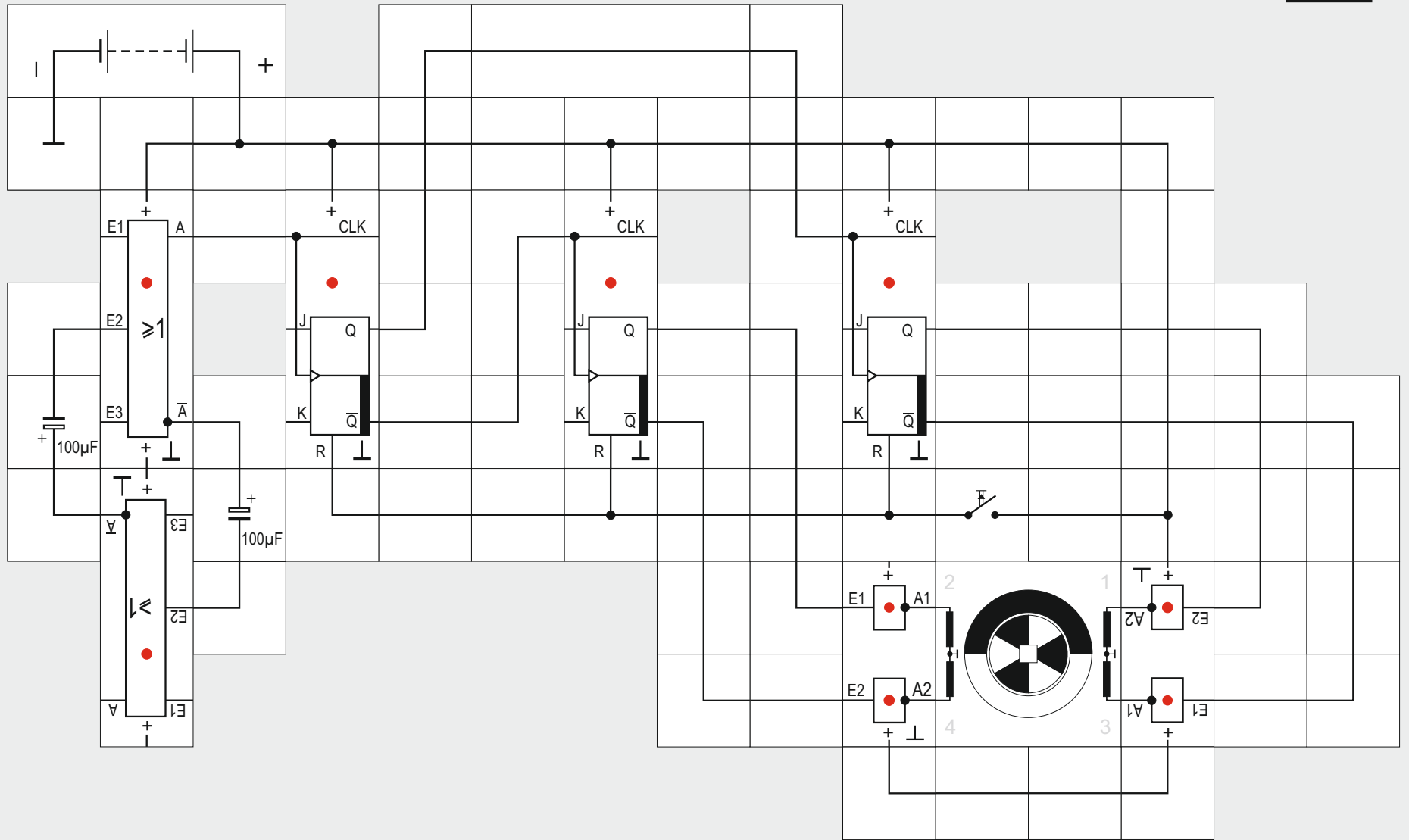
## Versuch 35

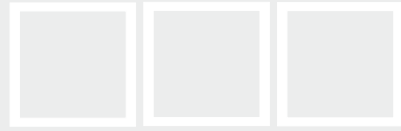
### Der Schrittmotor im Vollschrittbetrieb

Nachdem wir den invertierenden CMOS Leistungsverstärker eingeführt haben, können wir den Schrittmotor elektronisch ansteuern und die Taster weglassen. Wir wollen dies zunächst mit einem aus vier D-Flipflops bestehenden Ringschieberegister tun. Vier Zellen bieten sich an, da der Motor vier Spulen hat; jede Zelle steuert eine Spule an.

Beim Betätigen der Rücksetztaste wird die erste Zelle gesetzt und die anderen drei werden rückgesetzt. Der aus zwei NOR-Bausteinen aufgebaute astabile Multivibrator taktet das Ringschieberegister. Nimmt man für die zeitbestimmenden Glieder  $10\mu\text{F}$  Kondensatoren, ist die Taktfrequenz höher und die Motorachse bewegt sich schneller als wenn man  $100\mu\text{F}$  Kondensatoren verwendet; bei diesen hat man den Vorteil, die Schaltvorgänge im einzelnen verfolgen zu können. Jeweils eine Spule des Motors liegt an Spannung, so dass der Rotor gerade immer einem Statorpol gegenüber steht, er arbeitet im Vollschrittbetrieb. Man muss nicht unbedingt Spule 1 an die erste Flipflopzelle anschließen, es reicht, eine Zelle an Spule 1 anzuschließen und die nächste Zelle des Ringschieberegisters an Spule 2 usw., wenn die Motorwelle sich im Uhrzeigersinn drehen soll.

36



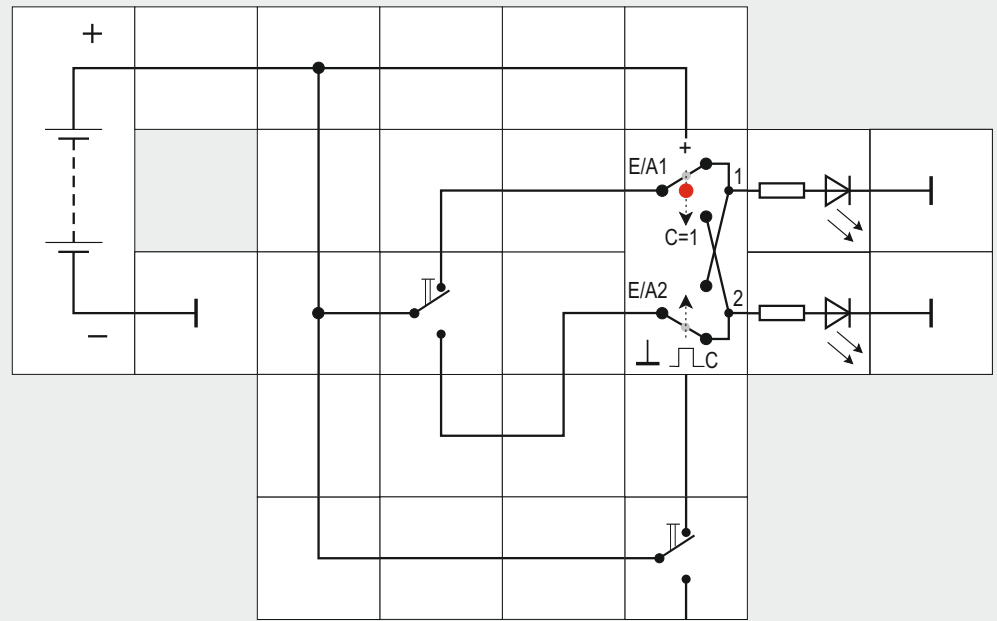


## Versuch 36

### Ansteuerung des Schrittmotors vom Binärteiler

Häufig findet man die abgebildete Schaltungsanordnung zur Ansteuerung des Schrittmotors. Hier arbeitet der astabile Multivibrator zunächst auf einen Binärteiler und die Ausgänge dieses Teilers steuern asynchron zwei weitere Binärteiler an. Die insgesamt vier vorhandenen Ausgänge stellen die Ansteuersignale für die vier Spulen des Schrittmotors bereit. Bis auf den ersten Takt nach Betätigen der Rückstelltaste liegen immer zwei Spulen gleichzeitig an Spannung 1&2, 2&3, 3&4, 4&1 usw., der Motor arbeitet also auch im Vollschrittbetrieb mit 48 Schritten pro Umdrehung wie im letzten Versuch, nur dass der Rotor immer genau zwischen zwei Statorpolen zum Stehen kommt.

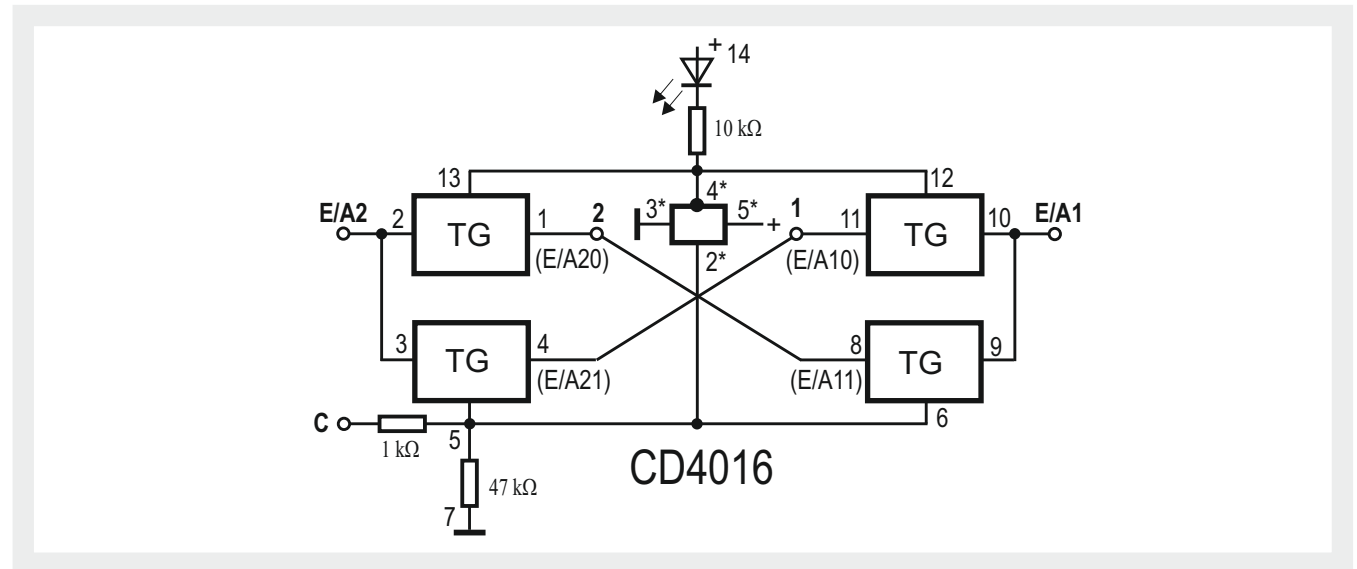
37



## Versuch 37

### Der Polwender

Möchte man den Schrittmotor sich in Gegenrichtung drehen lassen, muss man die Ansteuerung der Spulen in ihrer Reihenfolge umkehren. Bei der Ansteuerung vom Ringschieberegister aus bedeutet dies z.B., die 1 muss in entgegengesetzter Richtung geschoben werden. Gestaltet man dies umschaltbar, ist ein größerer Schaltungsaufwand erforderlich. Der Richtungswechsel lässt sich allerdings auch einfacher realisieren: Wir betrachten zunächst die Ansteuerung für eine Drehung im Uhrzeigersinn: Es werden die Spulen in der Reihenfolge 1, 2, 3, 4, 1, 2, 3, 4, usw. angesteuert. Vertauschen wir in dieser Folge lediglich die 2 mit der 4, so erhalten wir die neue Folge 1, 4, 3, 2, 1, 4, 3, 2, usw.; dies ist nichts anderes als die ursprüngliche Folge rückwärts gezählt. Für die Schaltung zur Richtungsumkehrung bedeutet dies aber lediglich die Vertauschung eines Spulenpaars. Hier haben wir das Paar

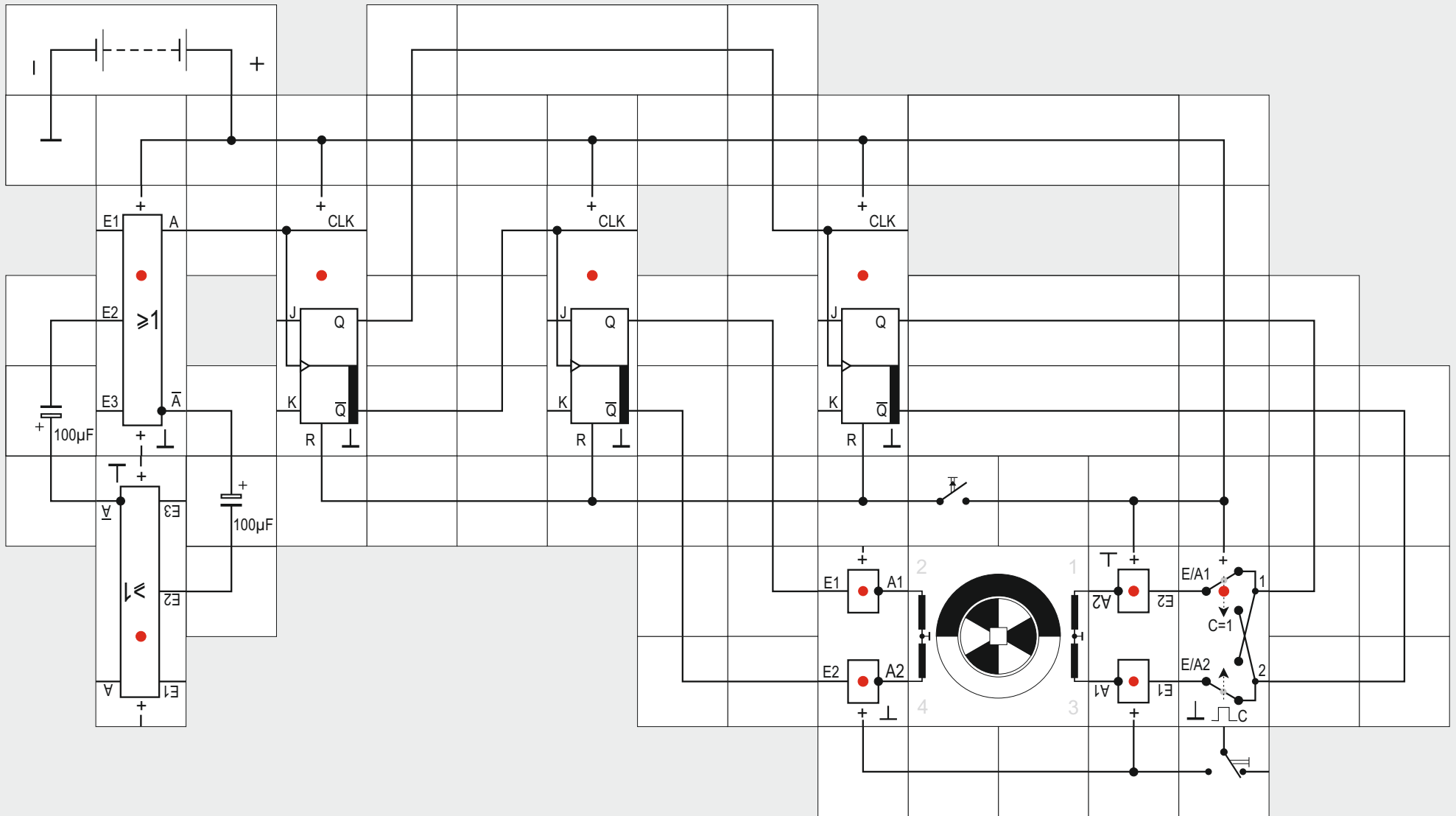


2-4 genommen, genauso gut geht auch das 1-3 Paar.

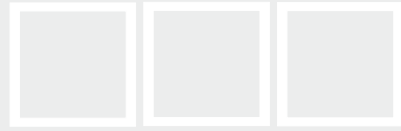
Die Umschaltung der Spulen ließe sich mit dem Relaisbaustein bewerkstelligen; er lieferte uns die beiden dafür benötigten Umschalter. Auch das Transmission Gate wäre dafür geeignet. Beide Bausteine erfordern allerdings relativ viel äußere Verdrahtung, so dass es besser ist, einen weiteren Baustein einzuführen. Es ist der bereits bei der Wechselschaltung verwendete KREUZSCHALTER oder POLWENDER. Dieser Baustein enthält das Transmission Gate mit zusätzlicher interner Verdrahtung, und zwar

sind bei ihm E/A10 mit E/A21 und E/A11 mit E/A20 verbunden. Wir haben dann nur noch die beiden Signalleitungen E/A1 und E/A2, die bei C=0 die beiden sich gegenüber liegenden Kontaktplättchen verbinden (E/A1 mit 1 und E/A2 mit 2) und bei C=1 die Verbindung »über Kreuz« schalten (E/A1 mit 2 und E/A2 mit 1) und damit zwei Spulenanschlüsse vertauschen können. In dem Versuchsaufbau wird die Wirkung deutlich: Mit dem Umschalter schalten wir eine LED ein und die andere aus und können dies mit dem zweiten Umschalter, der den Polwender ansteuert, wieder rückgängig machen.

38





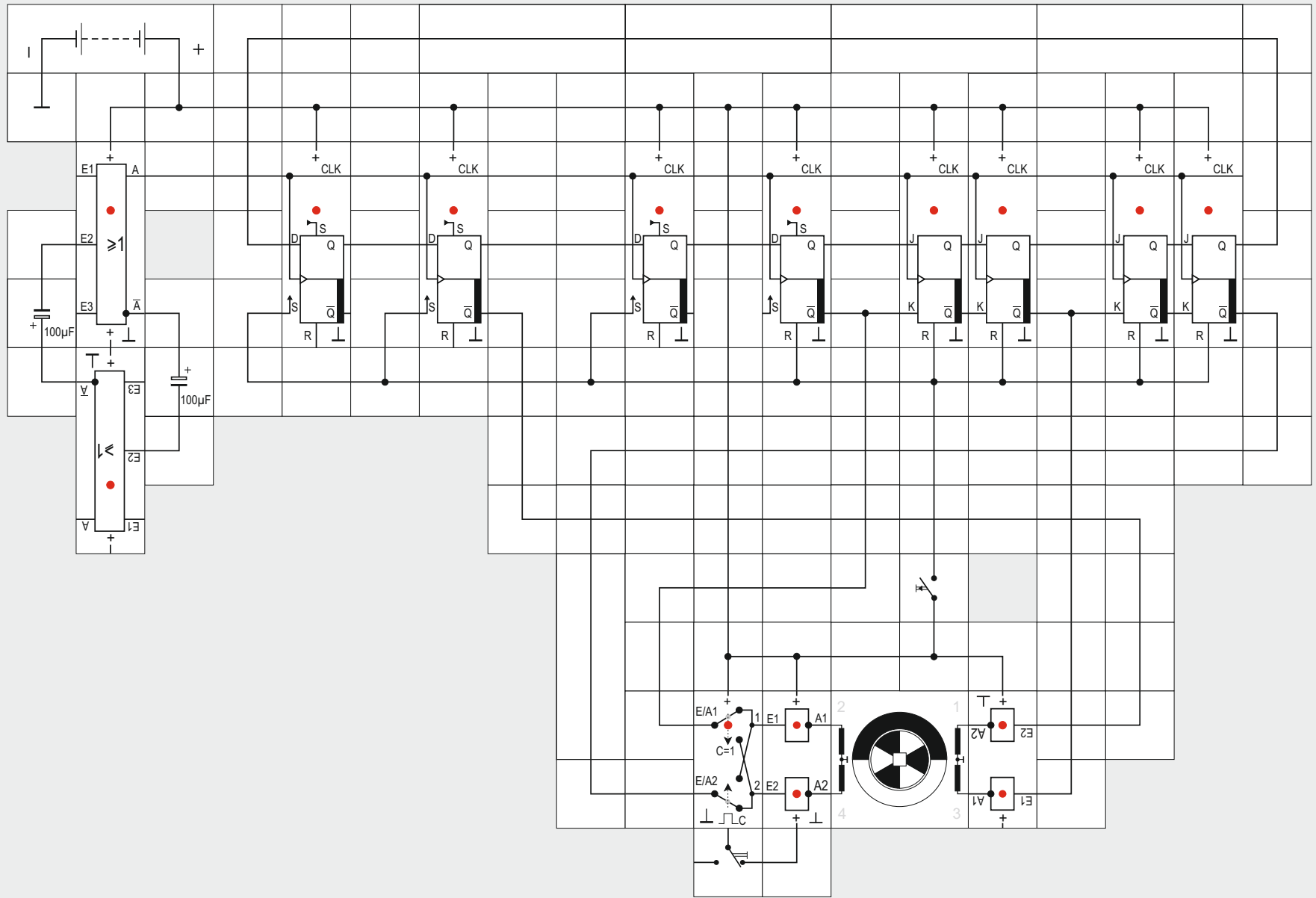


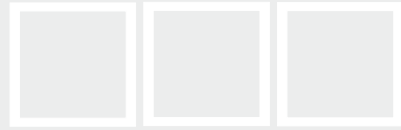
## Versuch 38

### Richtungsumschaltung

Wir ergänzen die vorhandene Schaltung mit dem Polwender und einem Umschalter und können nun den Schrittmotor sich in die eine oder die andere Richtung drehen lassen. Der Umschalter braucht nur 1-Potential an den Steuereingang C zu legen, das 0-Potential wird bausteinintern durch den Widerstand nach Masse erzeugt.

39





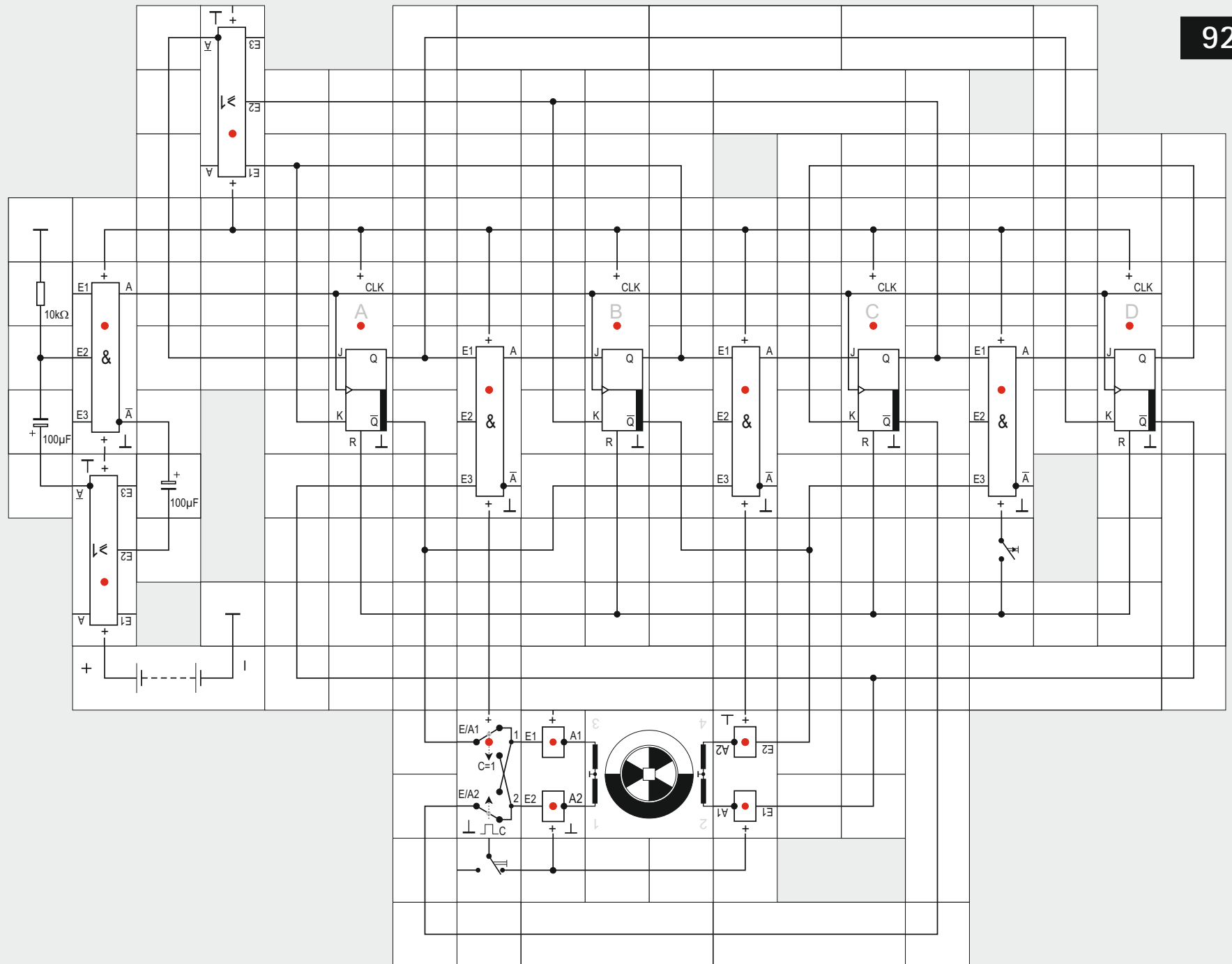
# Lectron

## Versuch 39 Ansteuerschaltung für Halbschrittbetrieb

Bisher haben wir den Schrittmotor im Vollschrittbetrieb mit zwei verschiedenen Ansteuerungen betrieben; einmal so, dass der Rotor genau einem Startopol gegenüberstand (immer nur eine Spule an Spannung) und zum anderen so, dass er genau immer zwischen zwei Polen stand (zwei Spulen angesteuert). Wenn wir beides miteinander kombinieren, arbeitet der Motor im Halbschrittbetrieb und benötigt 96 Schritte für eine Umdrehung.

Wir brauchen dazu eine geeignete Ansteuerschaltung. Eine Überlegung ergibt, dass es acht verschiedene Ansteuerzustände geben muss: Spule 1, Spulen 1&2, 2, 2&3, 3, 3&4, 4, 4&1 angesteuert. Es ist deswegen bestimmt keine schlechte Idee, ein achtstufiges (Ring-) Schieberegister aufzubauen. Allerdings reicht es nicht aus, eine 1 im Ring kreisen zu lassen, es müssen ja alle zwei Schritte auch einmal zwei Spulen gleichzeitig angesteuert werden. Mit einem »Dreierblock« aus 1en und einer Ansteuerung von jeder zweiten Zelle aus lösen wir das Problem. Da wir nach dem Rücksetzen gleich drei 1en im Ring benötigen, ordnen wir drei D-Flipflops, die sich ja über ihren S-Eingang setzen lassen, vorne an, lassen das vierte und dann erst die JK-Flipflops kommen. An den Leuchtdioden können wir gut erkennen, wie die Schaltung arbeitet.

40



## Versuch 40

### Zähleransteuerung für Halbschrittbetrieb

Es ist auch möglich, statt des Schieberegisters einen Zähler zum Ansteuern zu verwenden. Wir entwerfen die J- und K-Verknüpfungen nach der bekannten Methode und beachten dabei, dass der Zähler aus Zustand 0 anlaufen muss. Diesen Zustand erreicht er im Betrieb nicht mehr, er springt dann von Zustand 8 gleich nach 1.

A	B	C	D	Zust
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
1	1	0	0	2
0	1	0	0	3
0	1	1	0	4
0	0	1	0	5
0	0	1	1	6
0	0	0	1	7
1	0	0	1	8

#### Anmerkungen:

Die Verdrahtung wird einfacher, wenn man den Ausdruck für  $J_A$  umwandelt. Der »gemischt« aufgebaute astabile Multivibrator benötigt einen 10 k $\Omega$  Widerstand nach Masse, sonst schwingt er nicht.

Abb. 94.1 Wahrheitstafel für Zähler Halbschrittansteuerung

CD	AB			
	00	01	11	10
00	1 <sup>0</sup>	0 <sup>3</sup>	0 <sup>2</sup>	1 <sup>1</sup>
01	1 <sup>7</sup>	0	0	1 <sup>8</sup>
11	0 <sup>6</sup>	0	0	0
10	0 <sup>5</sup>	0 <sup>4</sup>	0	0

Abb. 94.2 Karnaugh-Tafel für  $J_A = \overline{Q_B} \wedge \overline{Q_C} = Q_B \vee Q_C$

CD	AB			
	00	01	11	10
00	0 <sup>0</sup>	1 <sup>3</sup>	1 <sup>2</sup>	0 <sup>1</sup>
01	0 <sup>7</sup>	1	1	0 <sup>8</sup>
11	0 <sup>6</sup>	1	0	0
10	0 <sup>5</sup>	1 <sup>4</sup>	1	0

Abb. 94.3 Karnaugh-Tafel für  $K_A = Q_B \wedge Q_C$

CD	AB			
	00	01	11	10
00	0 <sup>0</sup>	0 <sup>3</sup>	0 <sup>2</sup>	0 <sup>1</sup>
01	0 <sup>7</sup>	0	0	0 <sup>8</sup>
11	1 <sup>6</sup>	0	1	1
10	1 <sup>5</sup>	0 <sup>4</sup>	0	1

Abb. 94.8 Karnaugh-Tafel für  $J_D = \overline{Q_B} \wedge Q_C$

CD	AB			
	00	01	11	10
00	0 <sup>0</sup>	0 <sup>3</sup>	1 <sup>2</sup>	1 <sup>1</sup>
01	0 <sup>7</sup>	0	0	0 <sup>8</sup>
11	0 <sup>6</sup>	0	0	0
10	0 <sup>5</sup>	0 <sup>4</sup>	1	1

Abb. 94.4 Karnaugh-Tafel für  $J_B = Q_A \wedge \overline{Q_D}$

CD	AB			
	00	01	11	10
00	0 <sup>0</sup>	0 <sup>3</sup>	0 <sup>2</sup>	0 <sup>1</sup>
01	0 <sup>7</sup>	0	0	0 <sup>8</sup>
11	1 <sup>6</sup>	1	1	1
10	1 <sup>5</sup>	1 <sup>4</sup>	1	1

Abb. 94.5 Karnaugh-Tafel für  $K_B = Q_C$

CD	AB			
	00	01	11	10
00	0 <sup>0</sup>	0 <sup>3</sup>	1 <sup>2</sup>	1 <sup>1</sup>
01	0 <sup>7</sup>	0	1	1 <sup>8</sup>
11	0 <sup>6</sup>	0	1	1
10	0 <sup>5</sup>	0 <sup>4</sup>	1	1

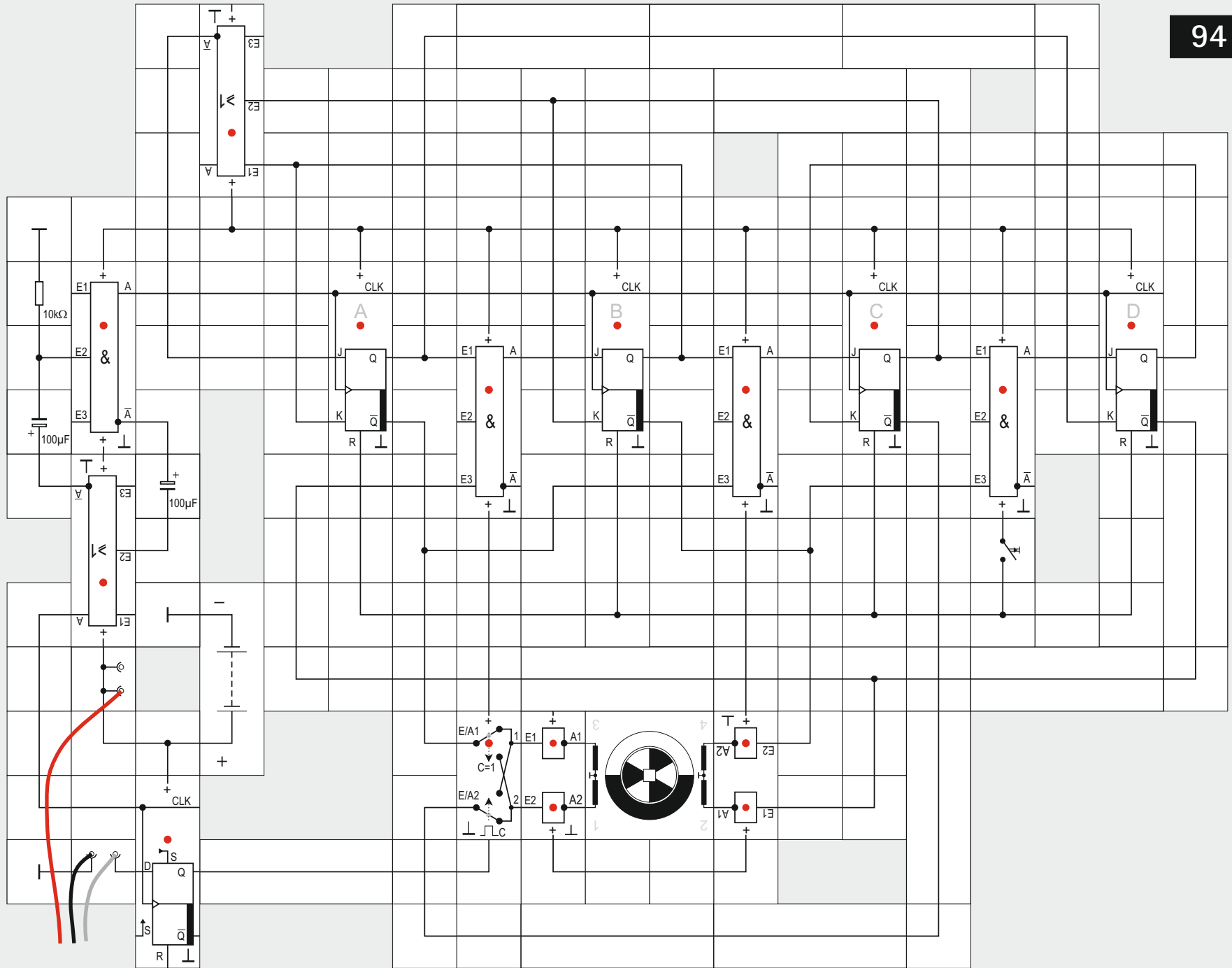
Abb. 94.9 Karnaugh-Tafel für  $K_D = Q_A$

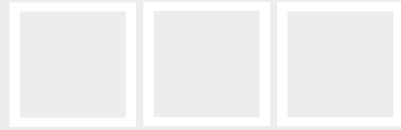
CD	AB			
	00	01	11	10
00	0 <sup>0</sup>	1 <sup>3</sup>	0 <sup>2</sup>	0 <sup>1</sup>
01	0 <sup>7</sup>	1	0	0 <sup>8</sup>
11	0 <sup>6</sup>	1	0	0
10	0 <sup>5</sup>	1 <sup>4</sup>	0	0 <sup>5</sup>

Abb. 94.6 Karnaugh-Tafel für  $J_C = \overline{Q_A} \wedge Q_B$

CD	AB			
	00	01	11	10
00	0 <sup>0</sup>	0 <sup>3</sup>	0 <sup>2</sup>	0 <sup>1</sup>
01	1 <sup>7</sup>	1	1	1 <sup>8</sup>
11	1 <sup>6</sup>	1	1	1
10	0 <sup>5</sup>	0 <sup>4</sup>	0	0

Abb. 94.7 Karnaugh-Tafel für  $K_C = Q_D$

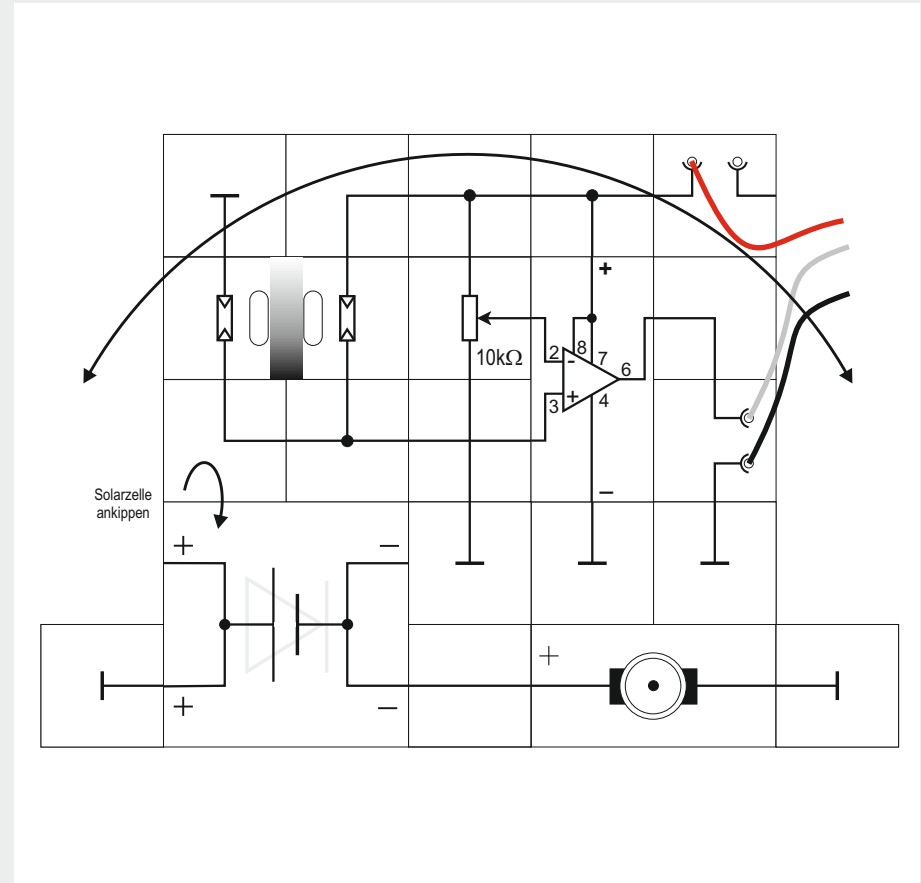
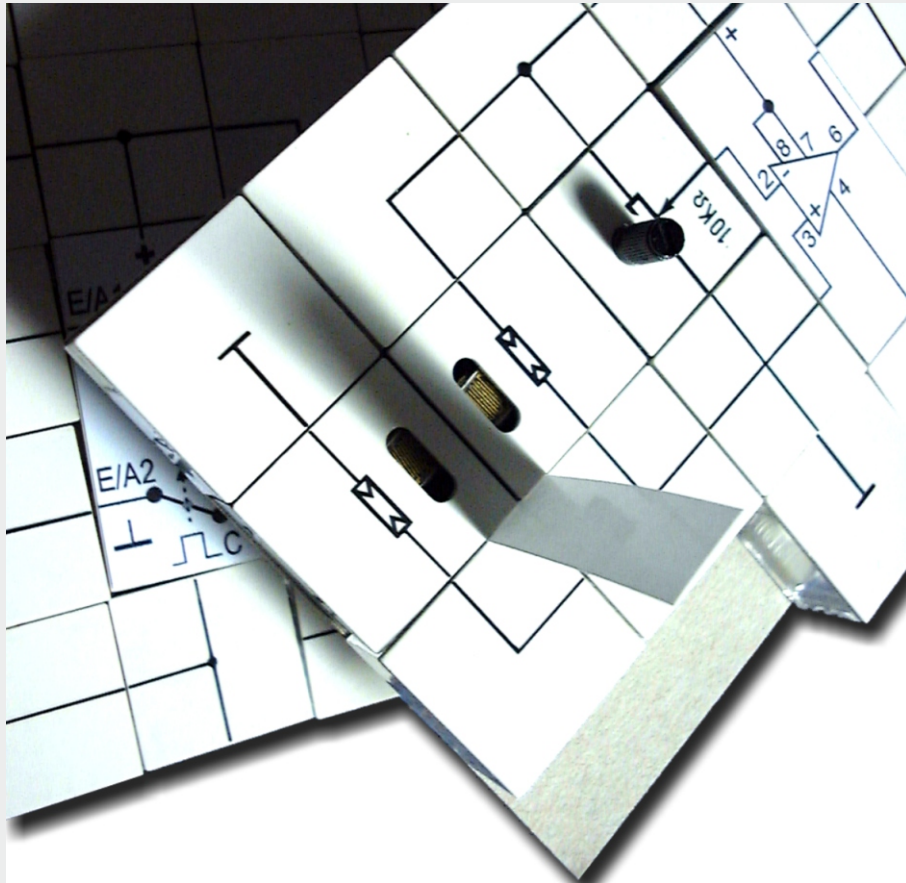




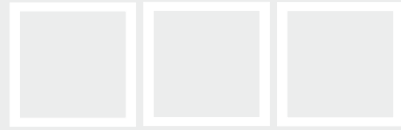
## Versuch 41

### Eine Nachführsteuerung

Die aufgebaute Zählerschaltung für den Halbschrittbetrieb soll jetzt Teil einer Nachführsteuerung werden. Dazu muss der mechanische Schalter für die Richtungssteuerung ersetzt werden; das Richtungssignal kommt vom Ausgang eines D-Flipflops, das Flipflop selbst wird mit der »fallenden« Flanke des Taktgebers getaktet. Wenn wir mit einem Kabel Masse- oder Versorgungspotential an den D-Eingang legen, können wir die Drehrichtung des Schrittmotors verändern. Wir werden das Signal vom Ausgang eines Differenzverstärkers holen, der Teil einer kleinen Ansteuerschaltung ist, die im nächsten Versuch beschrieben wird.







## Versuch 42\*

### Der Differenzverstärker

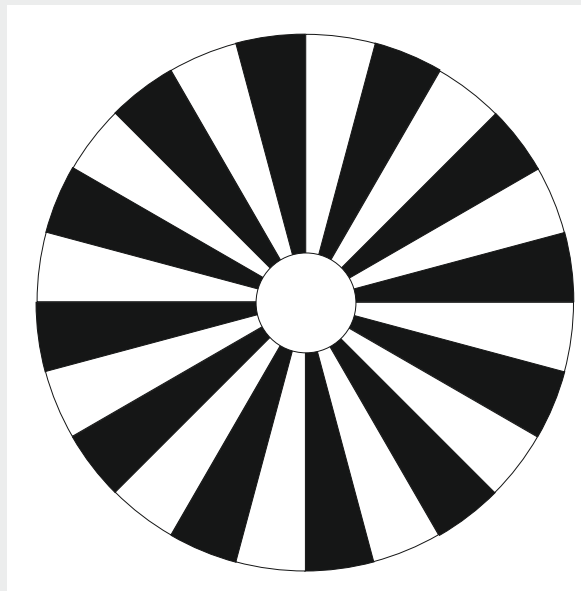
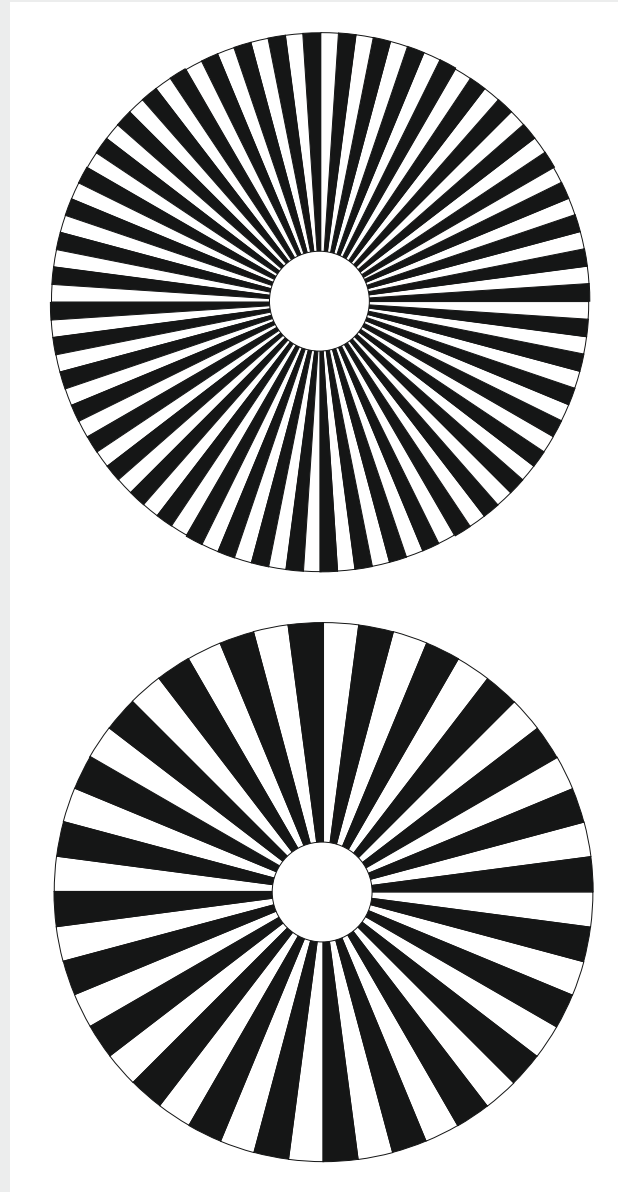
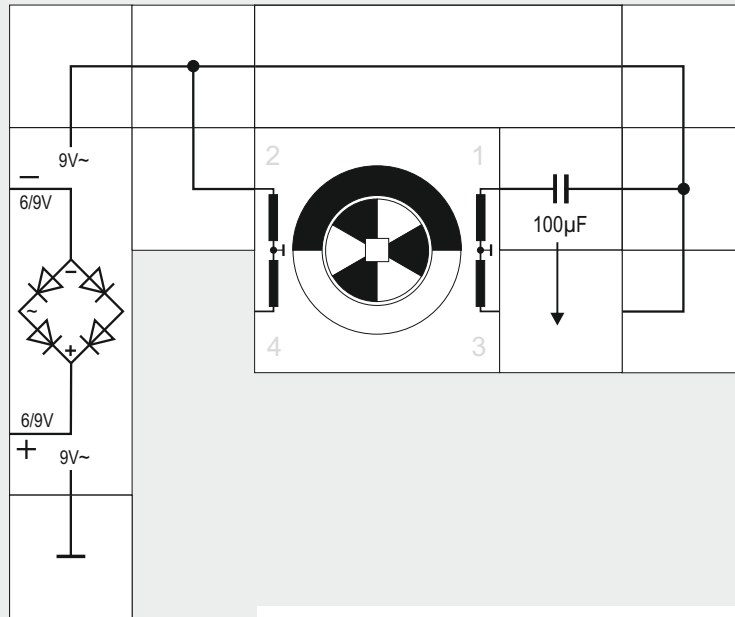
Wenn man aus den beiden Fotowiderständen des Lectron Baukastens »Optoelektronik und Solartechnik« einen Spannungsteiler aufbaut, an die Versorgungsspannung von 9 V anschließt und beide Wi-

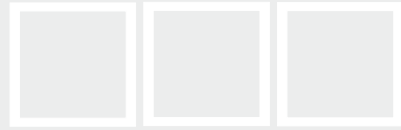
\*) Für den Versuch sind Bauteile aus »Optoelektronik und Solartechnik«, sowie ein Differenzverstärker aus dem Baukasten »Operationsverstärker« erforderlich.

derstände gleichmäßig stark beleuchtet, so werden sich zwar die Absolutwerte der beiden Widerstände vom Dunkelwiderstand  $15\text{ k}\Omega$  erniedrigen, der Spannungsteilerabgriff wird aber weiterhin das Potential der halben Versorgungsspannung beibehalten. Das Potential wird sich allerdings ändern, wenn die Fotowiderstände verschieden stark beleuchtet werden. Diese Eigenschaft wollen wir ausnutzen, um eine Ansteuerschaltung für die Nachführsteuerung aufzubauen; damit soll eine Solarzelle so ausgerichtet werden, dass trotz wandernder Sonne die Einstrahlung immer senkrecht auf die Zelle erfolgt. Vor beide Fotowiderstände bauen wir einen schmalen Pappstreifen, dessen Schatten ungefähr so breit ist wie der Abstand der beiden Öffnungen in den Kästchen (siehe Foto). So lange die Sonne genau von vorn auf den Streifen fällt, beschattet er beide Fotowiderstände nur ganz wenig und gleich stark. Mit wandernder Sonne wandert auch der Schatten und ein Widerstand wird stärker beleuchtet als der andere, wodurch sich das Potential des Teilerpunktes verschiebt. Vergleichen wir nun dieses Potential mit dem am Potentiometer eingestellten Potential der halben Versorgungsspannung, so können wir herausfinden, in welche Richtung die Sonne gewandert ist und die ganze Anordnung durch Drehen wieder so ausrichten, dass beide Fotowiderstände

gleichmäßig beschienen werden. Die Auswertung der Potentialänderung geschieht mit einem DIFFERENZVERSTÄRKER. Dieser Verstärker hat zwei Eingänge: Am Minuseingang 2 liegt das Vergleichspotential, am Pluseingang 3 das Teilerpotential. Der Verstärker verstärkt die Differenz zwischen diesen beiden Potentialen nun so stark, dass ca. 50-100mV Differenz ausreichen, um am Ausgang 6 eine positive Spannung  $>4,5\text{ V}$  zu erhalten, wenn Eingang 3 positiver ist als Eingang 2. Sie bleibt dagegen unterhalb 4,5V, wenn Eingang 3 negativer ist als Eingang 2. Das Ausgangssignal benutzen wir, um die Drehrichtung des Schrittmotors vorzugeben. Dazu bauen wir die komplette Schaltung auf eine kleine Blechplatte und befestigen sie gut ausbalanciert mit doppelseitig klebendem Band auf dem Schrittmotor. Über die Messbuchsen führen wir die Versorgungsspannung zu und nehmen das Steuersignal für die Drehrichtung ab. Es wird der bereits aufgebauten Steuerschaltung auf der Grundplatte zugeleitet. Bei gleichmäßiger Beleuchtung der Fotowiderstände stellen wir das Potentiometer so ein, dass der Verstärker gerade schaltet. Wenn alles verdrahtet und eingestellt ist, fügen wir noch eine geeignete Solarzelle mit dem Glockenankermotor hinzu; die Nachführsteuerung dreht sie in waagerechter Richtung immer so, dass sie senkrecht beschie-

43





## Versuch 43\*

### Der »rund« laufende Schrittmotor

Auch wenn der Schrittmotor eigentlich nicht dafür konstruiert ist, können wir ihn kontinuierlich rund laufen lassen. Wir müssen dafür sorgen, dass in seinem Inneren ein kontinuierliches Drehfeld entsteht. Mit Gleichspannung ist das allerdings nicht zu schaffen, wir brauchen dazu Wechselspannung aus dem Netzgerät. Es reicht bereits, an eine Spule Wechselspannung anzuschließen, denn das erzeugte magnetische Wechselfeld kann man sich aus zwei gegenläufigen Drehfeldern zusammengesetzt vorstellen. Der Motor setzt sich beim Anlegen der Wechselspannung sofort in eine der beiden Richtungen in Bewegung, kann aber sehr leicht seine Drehrichtung durch Antippen der Welle in Gegenrichtung umkehren. Wir können auch versuchsweise an eine Spule des anderen Paares über den bipolaren 100µF Kondensator zusätzlich Wechselspannung legen. Der Kondensator bewirkt, dass die Spannung dem Strom nacheilt und so im Motor ein zweites magnetisches Wechselfeld entsteht, das zusammen mit dem ersten auf jeden Fall ein Drehfeld

\*) Für den Versuch ist ein Netzteil, das nicht im Kasten enthalten ist, erforderlich.

als Resultat ergibt. Klebt man eine der Segmentscheiben auf die Motorwelle und beleuchtet sie mit Licht aus einer Leuchtstofflampe, so scheinen die Segmente trotz sich drehender Welle still zu stehen. Dieser STROBOSKOP-EFFEKT kommt dadurch zustande, dass die Lampe im Takt der Netzfrequenz 100 Mal pro Sekunde an- und ausgeht und der Motor sich synchron zur Netzfrequenz dreht. Ein weißes Segment hat sich z.B. zwischen zwei »Lichtmaxima« gerade um einen Winkel, der ein Vielfaches von  $7,5^\circ$  ist, weiter gedreht und erscheint dadurch unserem Auge an einer Stelle, an der wir vorher auch schon ein weißes Segment sahen.

Wenn der Schrittmotor nur ein Polpaar hätte, würde er sich bei der zur Netzfrequenz synchronen Drehzahl 50-mal pro Sekunde drehen (50U/s); bei zwölf Polpaaren dreht er sich nur  $\frac{1}{12}$  so schnell, also mit 4,1667U/s; das entspricht einem Winkel von  $4,1667 \cdot 360^\circ/\text{s} = 1500^\circ/\text{s}$ . Während dieser Zeit »blitzt« die Leuchtstoffröhre 100-mal auf, d.h. unser Auge sieht die Segmentscheibe alle  $15^\circ$  weitergedreht. Hat diese Scheibe nun ein Muster, das sich alle  $15^\circ$  wiederholt (oder ganzzahlige Teile davon, z.B.  $7,5^\circ$  oder  $3,75^\circ$ ), so scheint die Scheibe still zu stehen. Legt man eine Segmentscheibe mit größerer Teilung auf, ist dieser Effekt nicht mehr zu beobachten.

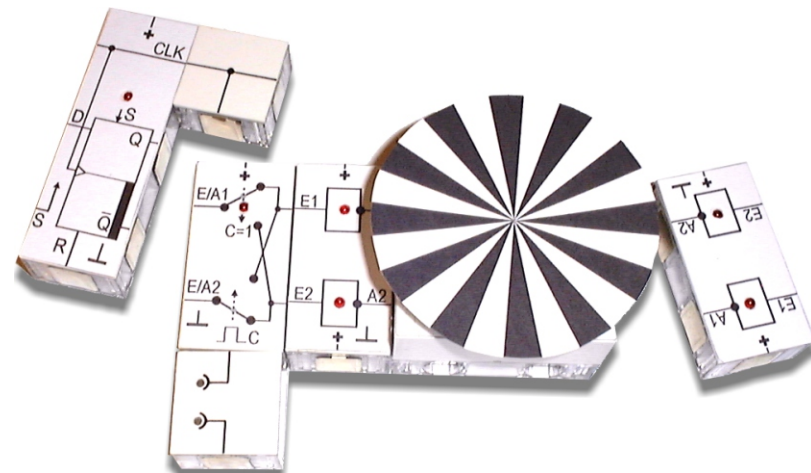
# Bauteile



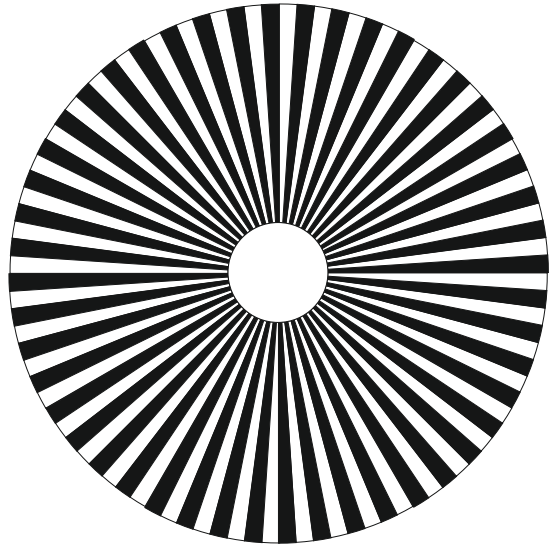
# Lectron

Der vorliegende Baukasten »Zähler und Schrittmotor« ist als Ergänzungskasten zu »Digitaltechnik« konzipiert, zum Aufbau der Versuche benötigt man also auch die Bauteile der ersten Kastens. Für die Versuche Nr. 25 und 42 sind darüber hinaus Bauteile aus »Optoelektronik und Solartechnik«, sowie ein Differenzverstärker-Baustein erforderlich. Einige Versuche benötigen Wechselspannung, hierfür wird das Lectron Netzgerät empfohlen.

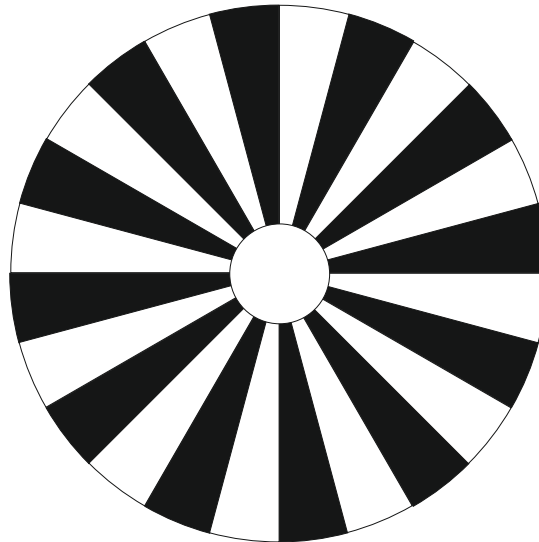
Verbindung Gerade	12 Stück
Verbindung T-Stück	7 Stück
Verbindung Winkel	22 Stück
Verbindung Kreuzung isoliert	35 Stück
Verbindung Gerade 3-fach	8 Stück
Taster Arbeitskontakt	2 Stück
Schalter SKS	1 Stück
Glühlampenbaustein mit Birnchen	1 Stück
Leuchtdiode grün	1 Stück
Polwender	1 Stück
Leistungs-Inverter	2 Stück
D-Flipflop	4 Stück
Schrittmotor	1 Stück
Anleitung »Zähler & Schrittmotor«	1 Stück
Zubehör	



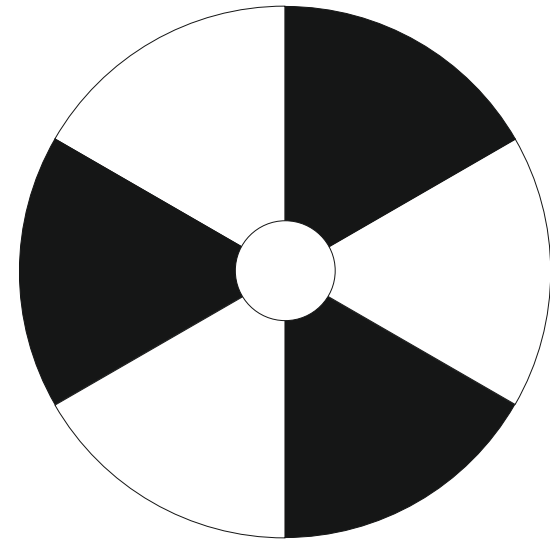
# Kopiervorlagen



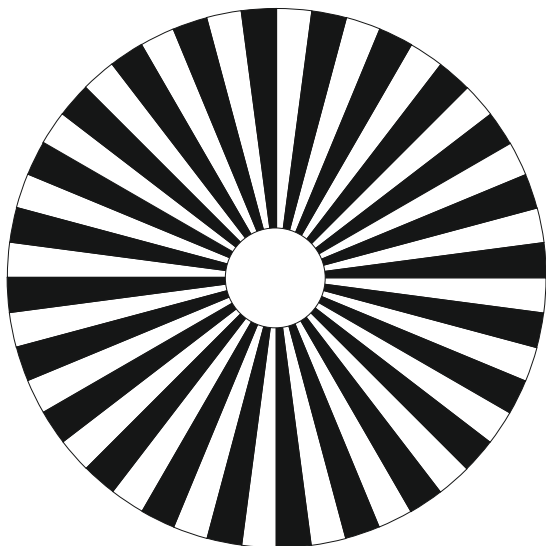
3,75° Segmente



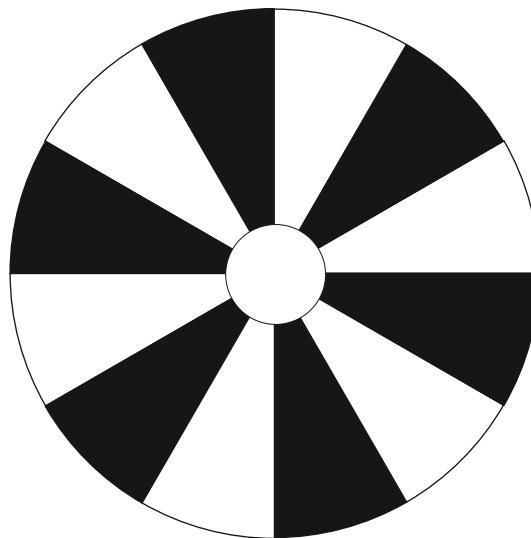
15° Segmente



60° Segmente



7,5° Segmente



30° Segmente



Spirale

# Notizen