

# Endliche Automaten & Rotary Encoder

Thema

Rotary Encoder (RE)

RE Aufbau

Schritte & Takte

Decoding Tabelle

RE Funktion

RE Bouncing

Wege zur Lösung

“Endlicher Automat” von Peter Csurgay

Exkurs Automaten

Tresor

Tresor Symbole

Tresor Tabelle

Mealey Automat

Lampe

Lampe Symbole & Funktionen

Anwendung auf RE

RE mit Übergängen

RE FLACY

RE Symbole

RE Tabelle

Polling oder Interrupt

Arduino Script

Sketch Peter Csurgay

Sketch EBW

Links

Kontakt & Dokumente

---

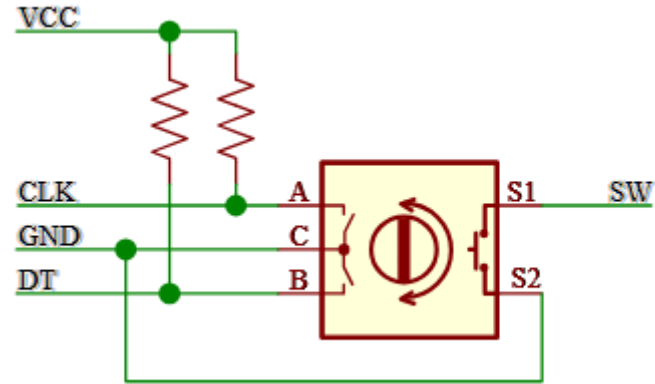
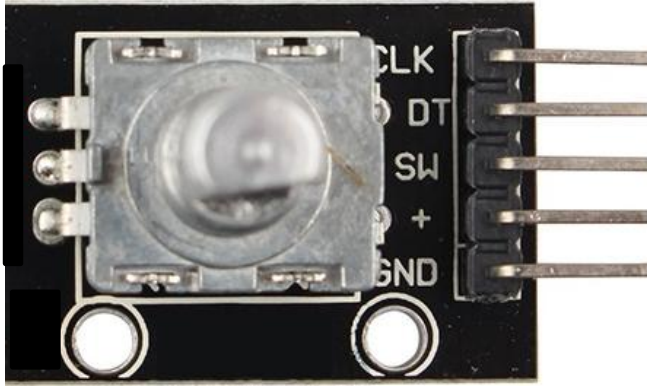
# Thema

Anlass	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bei einer RGB-LED sollte der Farbwert im HSV-Farbraum genau eingestellt werden. Die Werte liegen zwischen 0 und 360.</li><li>• Die Einstellung der Werte über ein Potentiometer erwies sich als zu ungenau.</li><li>• Ein Rotary Encoder (<b>RE</b>) mit z.B. 20 Schritten pro Umdrehung als Lösung.</li></ul>
Problem	<ul style="list-style-type: none"><li>• Das einfache Auslesen der beiden Datenleitungen zeigt einen Bouncing-Effekt, was zu Sprüngen beim Zählen führt.</li></ul>
Abhilfe	<ul style="list-style-type: none"><li>• Geeigneten Arduino-C++-Code, der die Sprünge eliminiert.</li></ul>
Themen	<ul style="list-style-type: none"><li>• Aufbau und Funktion des Rotary Encoders.</li><li>• Aus dem Internet Erfahrungen mit Software Lösungen erkunden.</li><li>• Theoretischer Ansatz „endlicher Automat“ verstehen und anwenden.</li><li>• Rotary Encoder als Mealey-Automat darstellen.</li><li>• Umsetzen des Encoder-Automaten in lesbaren, d.h. nachvollziehbaren, Arduino-C++-Code.</li><li>• Optimieren hinsichtlich der Geschwindigkeit und der Effizienz.</li></ul>

---

# Rotary Encoder (RE)

KY-040



Datenleitungen	CLK	(RE pin A)
	DT	(RE pin B)

Taster	SW
--------	----


Spannung 5 V	„+“	(VCC)
--------------	-----	-------

Masse	GND
-------	-----

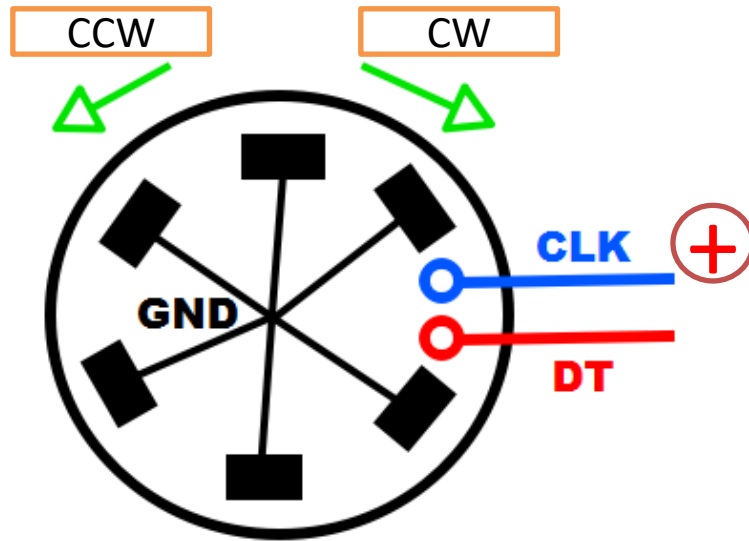
Quelle:	<a href="https://docs.wokwi.com/de-DE/parts/wokwi-ky-040">https://docs.wokwi.com/de-DE/parts/wokwi-ky-040</a>
---------	---

# RE Aufbau

Rotary-Encoder  
**KY-040**

Die Kontakte liegen auf positiver Spannung (**Pullup-Widerstände**).   
Die dunklen Kontakte sind mit Masse (**GND**) verbunden.

(Symbolische Darstellung)



CW	
CLK	DT
1	1
0	1
0	0
1	0

CCW	
CLK	DT
1	1
1	0
0	0
0	1

Quelle:

<https://www.instructables.com/A-Complete-Arduino-Rotary-Solution/>

## Schritte & Takte

Der KY-40 erzeugt 4 Takte für einen Schritt.  
Fügt man CLK und DT binär zusammen, liegt ein gray-code vor.

Uhrzeigersinn CW	CLK	DT	Gegen Uhrzeigersinn CCW	CLK	DT
Start	1	1	Start	1	1
Takt 1	0	1	Takt 1	1	0
Takt 2	0	0	Takt 2	0	0
Takt 3	1	0	Takt 3	0	1
Takt 4	1	1	Takt 4	1	1

1 Umdrehung: Besteht aus 20 Schritten

jeder Schritt: Aus 4 Takten

Es sollen hier nur die Schritte gezählt werden.

# Decoding Tabelle

Hier: Clockwise (CW)

CLK	1	0	0	1	1
		CLKfall		CLKrise	
DT	1	1	0	0	1
	DTKrise		DTfall		
status	(4)	1	2	3	4

	Takt nacher	1	2	3	4
Takt vorher		01	00	10	11
(4)	11 → CLKfall				
1	01		Dtfall		
2	00			CLKrise	
3	10				DTrise

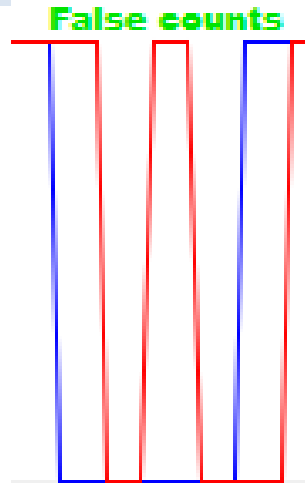
CLK DT

## RE Funktion

Ziel	Zählen der Schritte. Unterscheiden zwischen Uhrzeigersinn (CW) und gegen den Uhrzeigersinn (CCW).
Ausgangszustand?	CLK auf HIGH und DT auf HIGH.
Drehrichtung?	Bei CW folgt: auf CLK=HIGH und DT=HIGH: CLK=LOW und DT=HIGH Bei CCW folgt: auf CLK=HIGH und DT=HIGH: CLK=HIGH und DT=LOW
Algorithmus	Durch Vergleich des letzten mit dem aktuellen Zustand kann die Drehrichtung entschieden werden!
Prinzip	Ein vorheriger <b>Zustand</b> , gefolgt von einem <b>Übergang</b> , führt zu einem bestimmten nachfolgenden <b>Zustand</b> .
Endlicher Automat (Typ Mealey)	Damit sind die Voraussetzungen für einen „endlichen Automaten“ erfüllt.

# RE Bouncing

Problem Leider kommt es zum Bouncing-Effekt.



Ursache Beim Übergang von einem Takt zum Folgetakt treten nicht erwünschte Sprünge im Potential der Datenleitungen CLK und DT auf.

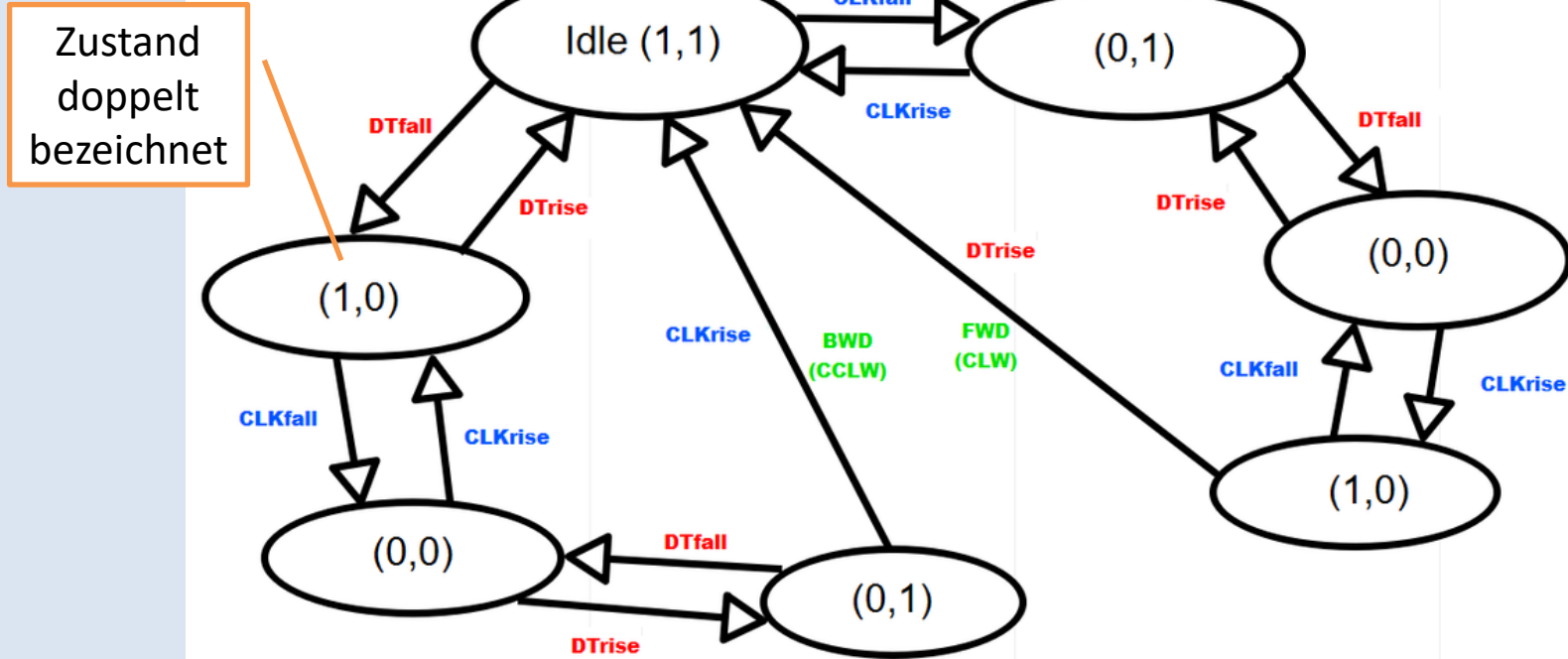
Folgen für Algorithmus Ein Programm (Arduino-Sketch) sollte diesen Effekt erkennen, ansonsten treten beim Zählen der Schritte unerwünschte Sprünge auf.



## Wege zur Lösung

Ziel	Arduino-C++-Code entwickeln
Aufgaben	<ul style="list-style-type: none"><li>• Zählen der Schritte im Uhrzeigersinn (CW) und gegen den Uhrzeigersinn (CCW).</li><li>• Bouncing erkennen und sauberes Zählen erreichen.</li></ul>
Google ChatGPT	Zahlreiche sehr unterschiedliche Ansätze.
Bester Vorschlag	„A Complete Arduino Rotary Solution“ (FSM) von Peter Scurgay. Siehe: <a href="#">A Complete Arduino Rotary Solution : 5 Steps – Instructables</a>
	Die Lösungsidee besteht darin, die Funktion des Rotary Encoders in einer „ <b>Finite State Machine</b> “ (FSM) abzubilden.
Englisch:	„Finite State Machine“ (FSM)
Deutsch:	„endlicher Automat“
Idee	<b>Nur bei einem fehlerfreien Durchlauf der 4 Takte, soll ein Schritt gezählt werden.</b>

## “Endlicher Automat” von Peter Csurgay



Quelle: <https://www.instructables.com/A-Complete-Arduino-Rotary-Solution/>

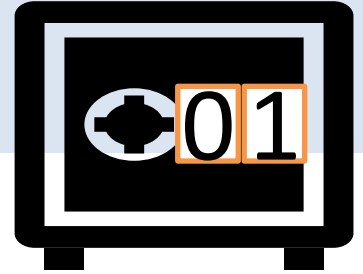
## Exkurs Automaten

Automaten	Ein Thema der theoretischen Informatik.
Definition	<ul style="list-style-type: none"><li>• Automaten kann man sich als eine Art "Maschine" vorstellen, die einem festgelegtem Schema folgt.</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ein „<b>endlicher Automat</b>“ ist ein Modell eines Systems mit endlichen vielen Zuständen.</li></ul>
Kaffeemaschine <b>Zustände</b>	Eine Kaffeemaschine kann sich in den verschiedenen Zuständen befinden: <ul style="list-style-type: none"><li>• <b>warten</b>,</li><li>• Kaffee <b>brühen</b>,</li><li>• Kaffee <b>warm halten</b>.</li></ul>
<b>Übergänge</b>	Wenn der Brühvorgang <b>ausgelöst</b> wird, soll der Kaffee gebrüht werden. Wenn dieser <b>beendet</b> ist, soll der Kaffee warm gehalten werden.
Erfahrung	Der Automat setzt sich aus <b>Zuständen</b> und <b>Übergängen</b> zusammen.
Definition	Zu jedem Zeitpunkt befindet sich ein Automat in genau einem Zustand. <b>Übergänge</b> werden anhand einer <b>Übergangsfunktion</b> beschrieben.

# Tresor

## Aufbau

Ein Schlüsseltresor mit 2 Tasten.  
Eine Taste für die Ziffer „0“.  
Eine Taste für die Ziffer „1“.

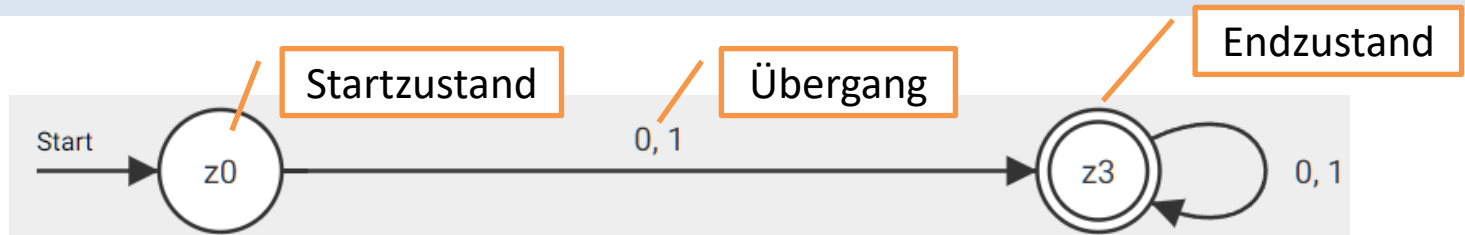


## Bedingungen

1. Es sollen mindestens 3 Ziffern eingegeben werden.
2. Eine Pin mit 3 Nullen ist nicht erlaubt.

## Versuch 1:

Zustände:  
z0, z1



## Bedingungen?

Es können beliebige Pin-Varianten eingegeben werden.  
Nicht erfüllt.

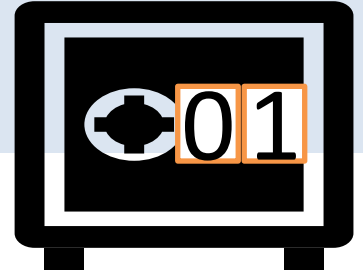
## Hinweis:

Der Endzustand ist entweder wahr oder falsch!

# Tresor

## Aufbau

Ein Schlüsseltresor mit 2 Tasten.  
Eine Taste für die Ziffer „0“.  
Eine Taste für die Ziffer „1“.



## Bedingungen

1. Es sollen mindestens 3 Ziffern eingegeben werden.
2. Eine Pin mit 3 Nullen ist nicht erlaubt.

## Versuch 2:

Zustände:  
z0 bis z3



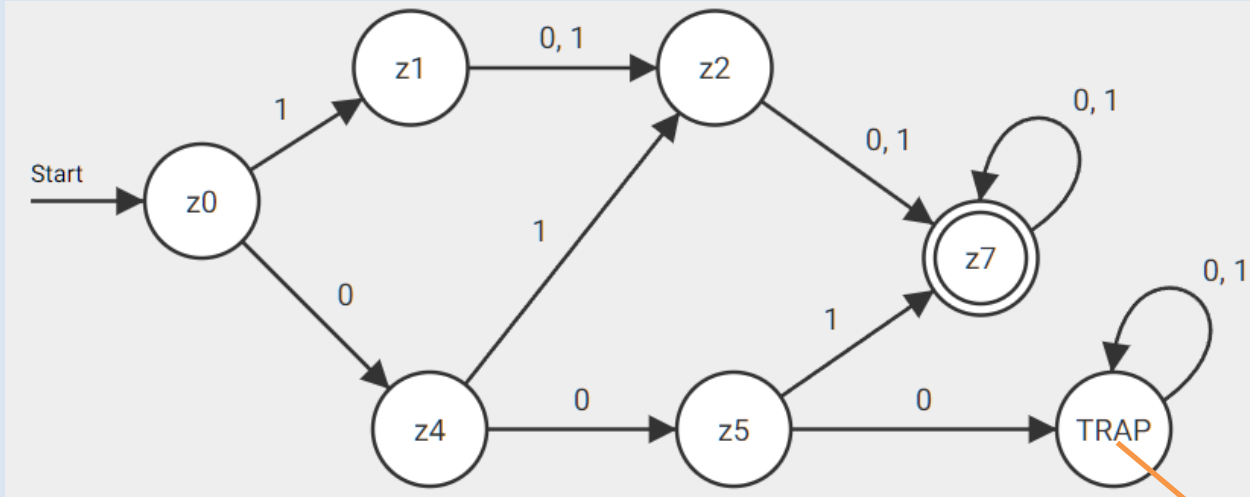
## Bedingungen?

- Bedingung 1 erfüllt: Es müssen 3 Ziffern in beliebigen Pin-Varianten eingegeben werden.
- Bedingung 2 nicht erfüllt.

Z.B. führt das Wort „11“ zur Blockade.

# Tresor

## Versuch 3:



Erstellt mit  
FLACI

Fehler  
Zustand

Bedingungen: mindestens 3 Ziffern und keine Nuller-Pin erfüllt.

# Tresor Symbole

## Symbole & Bedeutungen

Typ:	Norm	Hier:
Akzeptor	$Q$	$z =$ endliche Menge von Zuständen
	$\Sigma$ Sigma	$E =$ Eingabealphabet
	$\delta$ Delta	$u =$ Übergangsfunktion (Zustand)
	$Q_0$	$z_0 =$ Startzustand
	$F$	$z_E =$ Endzustand
	$\Sigma^*$	$E^* =$ Menge aller Wörter

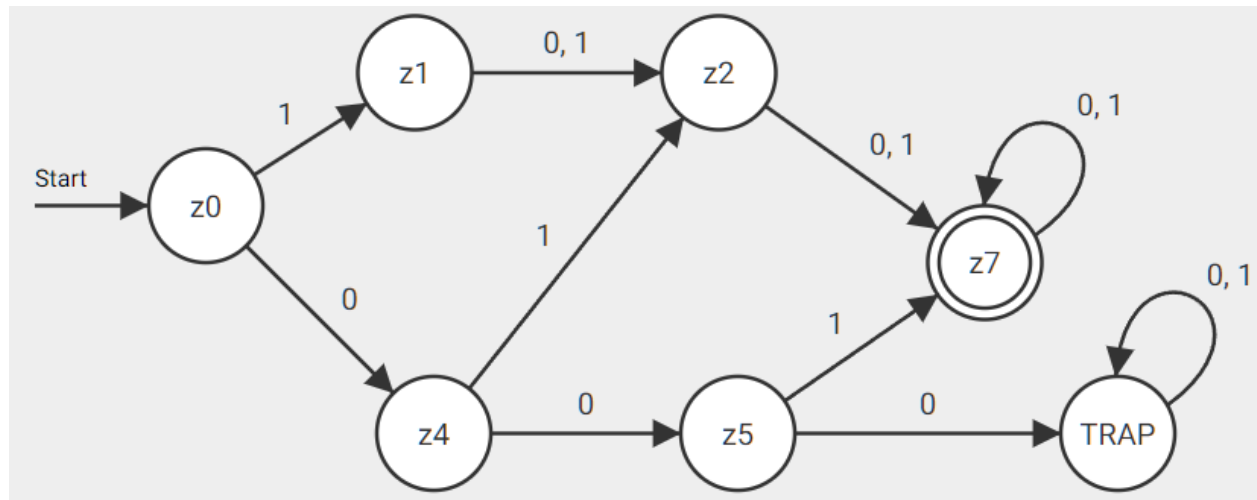
Zustände	$z = \{ z_0, z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6, z_7, \text{Trap} \}$
Eingabealphabet	$E = \{ 0, 1 \}$
Startzustand	$z_0 = z_0$
Endzustand	$z_E = z_7$
Wörter	$E^* = \{ 100, 110, 001, \dots \}$
Zustand-Funktion	$u : z \times E \rightarrow z$

Mengenlehre

Quelle: FLACI

# Tresor Tabelle

## Übergangstabelle Tresor



$\delta$	0	1
TRAP	TRAP	TRAP
z0	z4	z1
z1	z2	z2
z2	z7	z7
z4	z5	z2
z5	TRAP	z7
z7	z7	z7

Quelle FLACI



# Mealey Automat

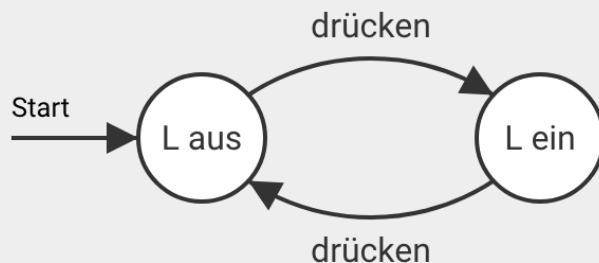
Bisher **Akzeptor**: Endergebnis **wahr oder falsch**.  
Jetzt **Transduktor**: Ein Automat mit mehreren **Eingaben- und Ausgaben**.

Der Mealey-Automat hat keine Endzustände.

Beispiel  
**Lampe**



Zustandsgraph  
(nicht formal)



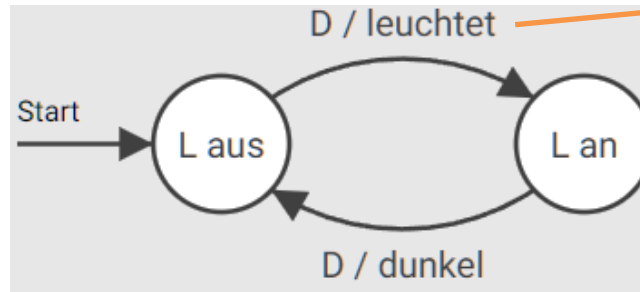
Interpretation:

Zu Beginn ist das Licht aus. Wenn ich den Schalter drücke, geht das Licht an. Wenn ich den Schalter nochmals drücke, geht es wieder aus.

Quelle: [Endliche Automaten | EF Informatik 2023](#)

# Lampe

Zustandsgraph  
Lampe



Eingabe / Ausgabe

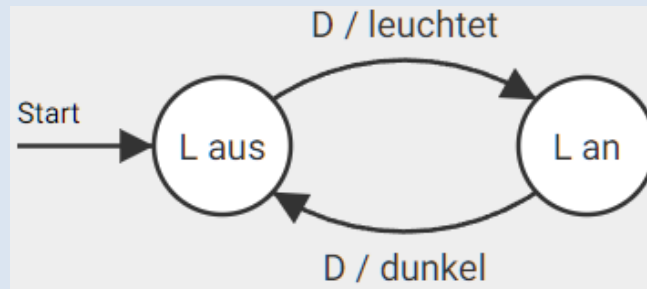
Achtung:  
Der Übergangspfeil ist mit Angaben zur  
Ein- und Ausgabe bezeichnet.

Zustandstabelle

	Eingabe von → alter Zustand ↓	D
	L aus	L ein
	L ein	L aus

# Lampe Symbole & Funktionen

Zustände  $z = \{ \text{L aus}, \text{L ein} \}$   
Eingabealphabet  $E = \{ D \}$   
Ausgangsalphabet  $A = \{ \text{leuchtet}, \text{dunkel} \}$   
Startzustand  $z_0 = \text{„L aus“}$   
Menge aller Wörter  $E^* = \{ D \}$   
Funktionen  
**Zustand:**  $u : z \times E \rightarrow z$   
**Ausgabe:**  $a : z \times E \rightarrow z$



## Übergangs- & Ausgabefunktion

Alter Zustand		Eingabe		Neuer Zustand		Ausgabe
$z$		$E$		$u : z \times E \rightarrow z$		$a : z \times E \rightarrow z$
L aus	x	D	→	L ein		leuchtet
L ein	x	D	→	L aus		Dunkel

## Anwendung auf RE

- Die Potentiale der Datenleitungen CLK und DT wechseln in einem festgelegten Rhythmus. Das ergibt einen stetigen Wechsel von **Zuständen**.
- Die Potentialänderung selbst kann als **Übergang** zwischen den Zuständen aufgefasst werden.


Im Uhrzeigersinn hat der RE die <b>Zustände</b> :	11	01	00	10
In C++ bezeichnet als:	IDLE_11	CW_01	CW_00	CW_10
In FLACI bezeichnet als:	ID11	CW01	CW00	CW10

Gegen den Uhrzeigersinn die <b>Zustände</b> :	11	10	00	01
In C++ bezeichnet als:	IDLE_11	CCW_10	CCW_00	CCW_01
In FLACI bezeichnet als:	ID11	CCW10	CCW00	CCW01

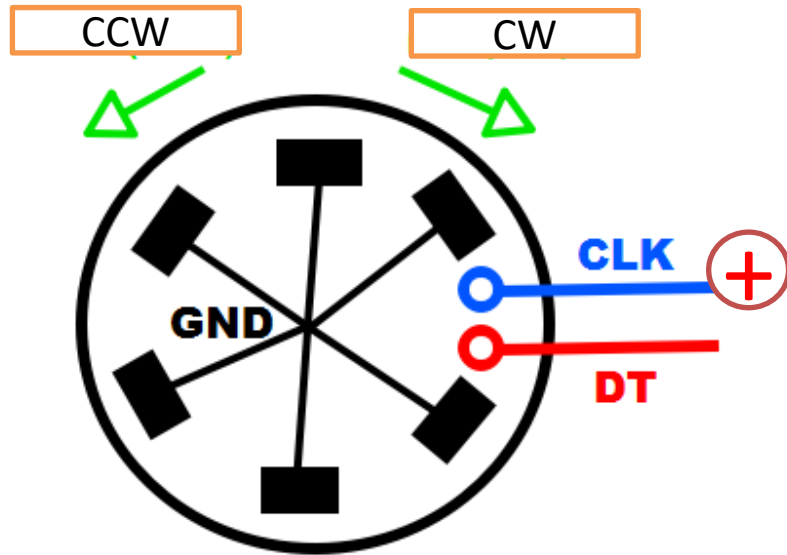
Hiermit sollte sich der Zustandsgraph eines RE erstellen lassen.

# RE mit Übergängen

Rotary-Encoder  
**KY-040**

Die Kontakte liegen auf positiver Spannung **Pullup-Widerstände**.   
Die dunklen Kontakte sind mit Erde (**GND**) verbunden.

(Symbolische Darstellung)



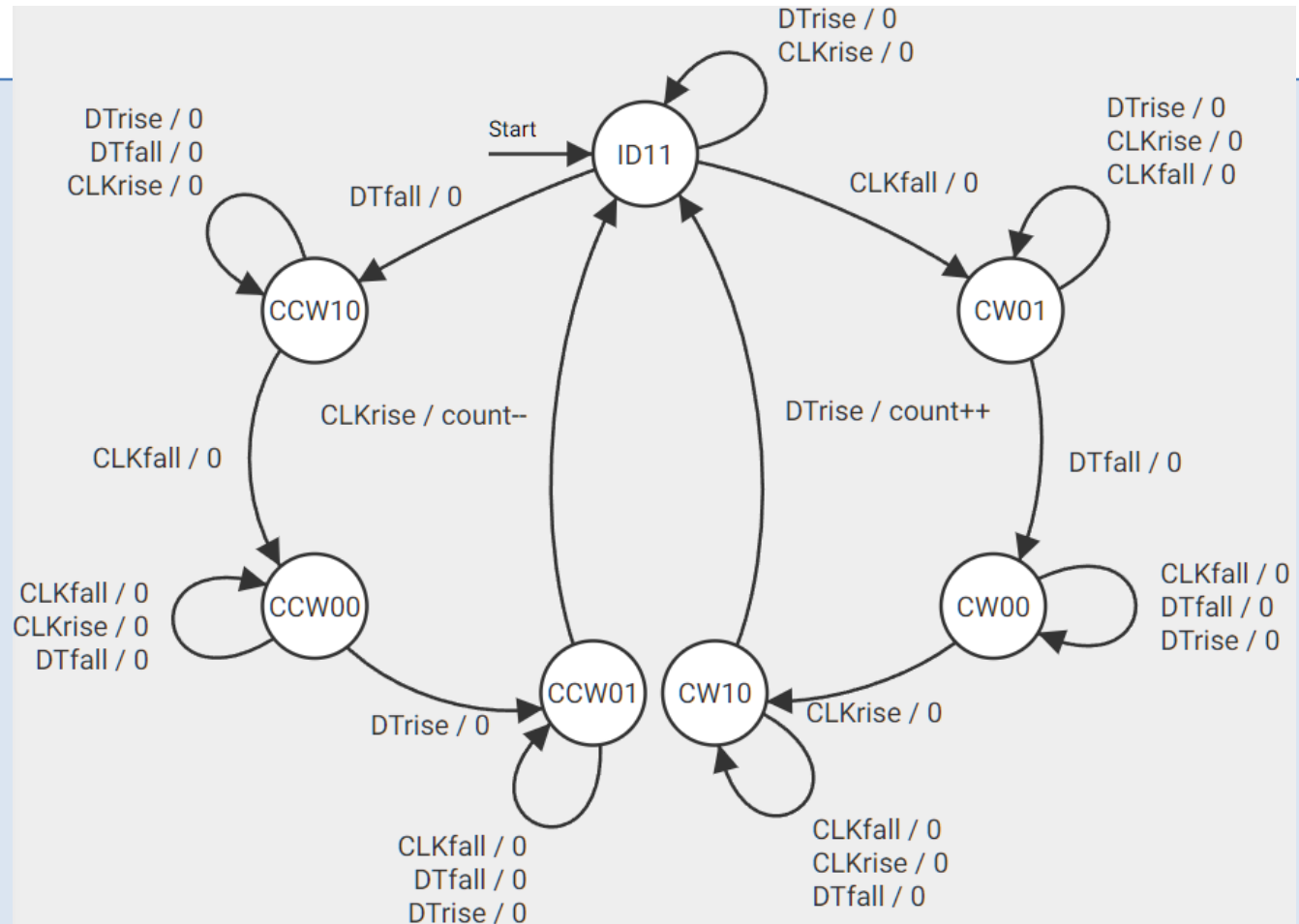
CW		CCW	
CLK	DT	CLK	DT
1	1	1	1
CLKfall			DTfall
0	1	1	0
	DTfall	CLKfall	
0	0	0	0
CLKrise			DTrise
1	0	1	0
	DTrise	CLKrise	

Quelle:

<https://www.instructables.com/A-Complete-Arduino-Rotary-Solution/>

# RE FLACY

## Zustandsgraph Typ: Mealey



Quelle: FLACY

# RE Symbole

Typ: Mealey	z = endliche Menge von Zuständen E = Eingabealphabet A = Ausgabealphabet u = Übergangsfunktion a = Ausgabefunktion z <sub>0</sub> = Startzustand E* = Menge aller Wörter							
Zustände	z = {	IDLE_11,	CW_01,	CW_00,	CW_10,	CCW_10	CCW_00	CCW_01 }
Eingabealphabet	E = {	CLKfall,	CLKrise,	DTfall,	DTrise }			
Ausgabealphabet	A = {	count++,	count++	, 0}				
Wörter	E* = {	„CLKfall DTfall CLKrise DTrise“, „CLKfall CLKfall DTfall CLKrise Dtrise“, ...}						
Startzustand	z <sub>0</sub> = IDLE_00							
Funktionen	Zustand: u: z x E → z Ausgabe: a: z x E → z							

## RE Tabelle

Übergangstabelle ( C++ Bezeichner )					
Alter Zustand $z$		Eingabe $E$		Neuer Zustand $u : z \times E \rightarrow z$	Ausgabe $a : z \times E \rightarrow z$
IDLE_11	x	CLKfall	→	CW_01	0
CW_01	x	DTfall	→	CW_00	0
CW_00	x	CLKrise	→	CW_10	0
CW_10	x	DTrise	→	IDLE_11	count++
IDLE_11	x	DTfall	→	CCW_10	0
CCW_10	x	CLKfall	→	CCW_00	0
CCW_00	x	DTrise	→	CCW_01	0
CCW_10	x	CLKrise	→	IDLE_11	count--

0: bedeutet keine Ausgabe



# Polling oder Interrupt

## Polling

```
void setup() {  
    // put your setup code here, to run once:  
  
}  
  
void loop() {  
    // code which shall be executed over and over  
    // in this case polling pins 3/CLK and 2/DT  
    CLK = digitalRead(CLKpin); // read Pin 3/CLK  
    DT  = digitalRead(DTpin);  // read Pin 2/DT  
    // ...  
}
```

## Interrupt

```
void setup() {  
    // put your setup code here, to run once:  
    // ...  
    // Both CLK and DT will trigger interrupts  
    // for all level changes  
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(CLKpin), ISRchange,  
                                                             CHANGE);  
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(DTpin), ISRchange,  
                                                             CHANGE);  
}  
  
void loop() {  
  
}  
  
void ISRchange() {  
    oldState = state;  
    int CLK = digitalRead(CLKpin);  
    int DT  = digitalRead(DTpin);  
    //...  
}
```

# Arduino Script

Aufgabe	Aus dem Zustandsgraph oder der Übergangstabelle einen lesbaren Arduino-C++-Code erstellen.
„else if“	<pre>if (condition1) {     // block of code to be executed if condition1 is true } else if (condition2) {     // block of code to be executed if the condition1 is false and condition2 is true }</pre>
Comparison operators	<code>==</code> (Equal to) - the comparison of two values leads to true (1) or false (0)
Logical operators	<code>&amp;&amp;</code> (AND) - all conditions must be true <code>  </code> (OR) - at least one condition must be true <code>!</code> (NOT) - reverses a condition (true → false, false → true)

# Arduino Script

„enum“	Ein <b>enum</b> ist ein spezieller Typ der eine Gruppe von Konstanten (nicht änderbar) definiert.
Syntax	<pre>enum Level { Apfel, Birne, Orange }; // Index      0      1      2</pre>
	<ul style="list-style-type: none"><li>• In Zuweisungen verwendet man die <b>Bezeichner</b>, die in Wirklichkeit den <b>Index</b> als Werthaben.</li><li>• In Bedingungen werden Indexe verglichen.</li></ul>
Beispiel	<pre>//          Index 0      Index 1 enum State {IDLE_11 , CW_01, ...}; int state;  // from previous function-call //          Index 0 // e.g. state = IDLE_11  //      0      ==      0          Index 1 If ( state == IDLE_11 ) state = CW_01;</pre>

## Sketch Peter Csurgay

```
// State Machine transitions for CLK level changes
void rotaryCLK() {
    if (digitalRead(CLK) == LOW) {
        if (state == IDLE_11) state = CW_01;
        else if (state == CCW_10) state = CCW_00;
    }
    else {
        if (state == CW_00) state = CW_10;
        else if (state == CCW_01) { state = IDLE_11; curVal--; }
    }
}

// State Machine transitions for DT level changes
void rotaryDT() {
    if (digitalRead(DT) == LOW) {
        if (state == IDLE_11) state = CCW_10;
        else if (state == CW_01) state = CW_00;
    }
    else {
        if (state == CCW_00) state = CCW_01;
        else if (state == CW_10) { state = IDLE_11; curVal++; }
    }
}
```

Hinweis: Am besten über den Zustandsgraph zu verstehen.

## Sketch EBW

```
// transition table
// from IDLE_11 with CLKfall (LOW) to CW_01
// from CW_01 with DTfall (LOW) to CW_00
// from CW_00 with CLKrise (HIGH) to CW_10
// from CW_10 with DTrise (HIGH) to IDLE_11

// from IDLE_11 with DTfall (LOW) to CCW_10
// from CCW_10 with CLKfall (LOW) to CCW_00
// from CCW_00 with DTrise (HIGH) to CCW_01
// from CCW_01 with CLKrise (HIGH) to IDLE_11

void ISRchange() {
    // ...
    int CLK = digitalRead(CLKpin);
    int DT = digitalRead(DTpin);
    // CW
    if ( state==IDLE_11 && CLK==LOW ) state=CW_01;
    if ( state==CW_01 && DT ==LOW ) state=CW_00;
    if ( state==CW_00 && CLK==HIGH ) state=CW_10;
    if ( state==CW_10 && DT ==HIGH ) {state=IDLE_11; count++;}
    // CCW
    if ( state==IDLE_11 && DT ==LOW ) state=CCW_10;
    if ( state==CCW_10 && CLK==LOW ) state=CCW_00;
    if ( state==CCW_00 && DT ==HIGH ) state=CCW_01;
    if ( state==CCW_01 && CLK==HIGH ) {state=IDLE_11; count--;}
    // ...
}
```

---

# Links

[https://de.wikipedia.org/wiki/Endlicher\\_Automat](https://de.wikipedia.org/wiki/Endlicher_Automat)

[https://de.wikibooks.org/wiki/Theoretische\\_Informatik/\\_Das\\_Prinzip\\_des\\_Automaten](https://de.wikibooks.org/wiki/Theoretische_Informatik/_Das_Prinzip_des_Automaten)

<https://informatik.mygymer.ch/ef2023/02-automaten/01-automaten.html>

[https://lehrerfortbildung-bw.de/u\\_matnatech/informatik/gym/bp2016/fb2/05\\_automaten/1\\_hintergrund/1\\_infos/](https://lehrerfortbildung-bw.de/u_matnatech/informatik/gym/bp2016/fb2/05_automaten/1_hintergrund/1_infos/)

[https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/faecher/naturwissenschaften/informatik/theoretische\\_informatik/automaten/automaten\\_und\\_sprachen.pdf](https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/faecher/naturwissenschaften/informatik/theoretische_informatik/automaten/automaten_und_sprachen.pdf)

<https://www.instructables.com/A-Complete-Arduino-Rotary-Solution/>

[https://www.pjrc.com/teensy/td\\_libs\\_Encoder.html?#](https://www.pjrc.com/teensy/td_libs_Encoder.html?#)

---

## Kontakt & Dokumente

E-Mail: [H39@email.de](mailto:H39@email.de)

GitHub: <https://github.com/EKlatt/Experiences>  
Verzeichnis “Automaten”

---