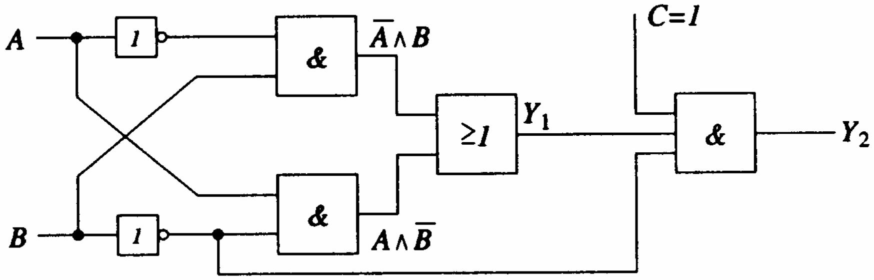
1.5 Laufzeiteffekte in Schaltnetzen

- Bisher wurden Schaltnetze mit idealen Verknüpfungsgliedern betrachtet
  - ⇨ die Verknüpfungsgliedern besaßen keine Signallaufzeit
- Bei realen Verknüpfungsgliedern dürfen Signallaufzeiten nicht vernachlässigt werden
  - ⇨ Schaltvariablen können Werte annehmen, die theoretisch oder bei idealen Verknüpfungsgliedern nie auftreten könnten
- Solche Störimpulse nennt man Hazards
  - ⇨ sie treten als Antwort auf die Änderung der Werte der Eingangsvariablen auf

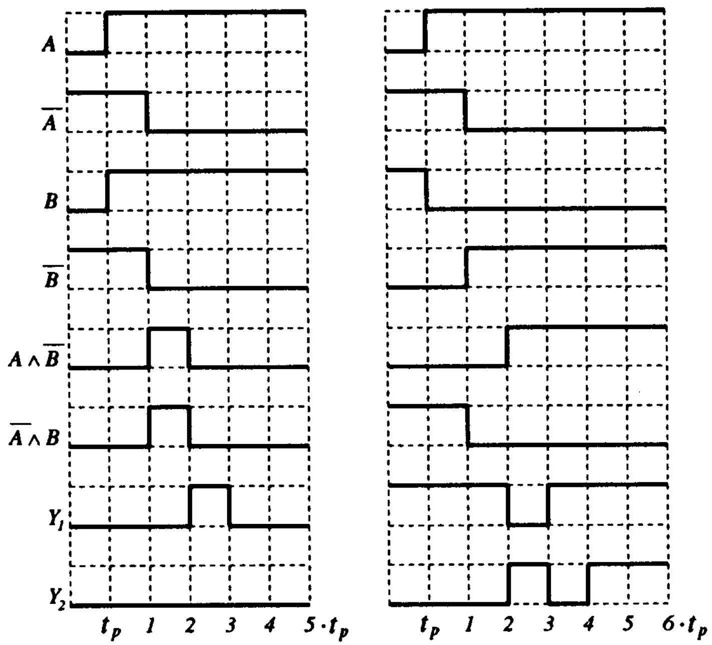
Entstehung von Hazards



a) Schaltnetz

B	A	Y_1	Y_2
0	0	0	0
1	1	0	0
1	0	1	0
0	1	1	1

b) Funktionstabelle



a) Impulsdiagramm

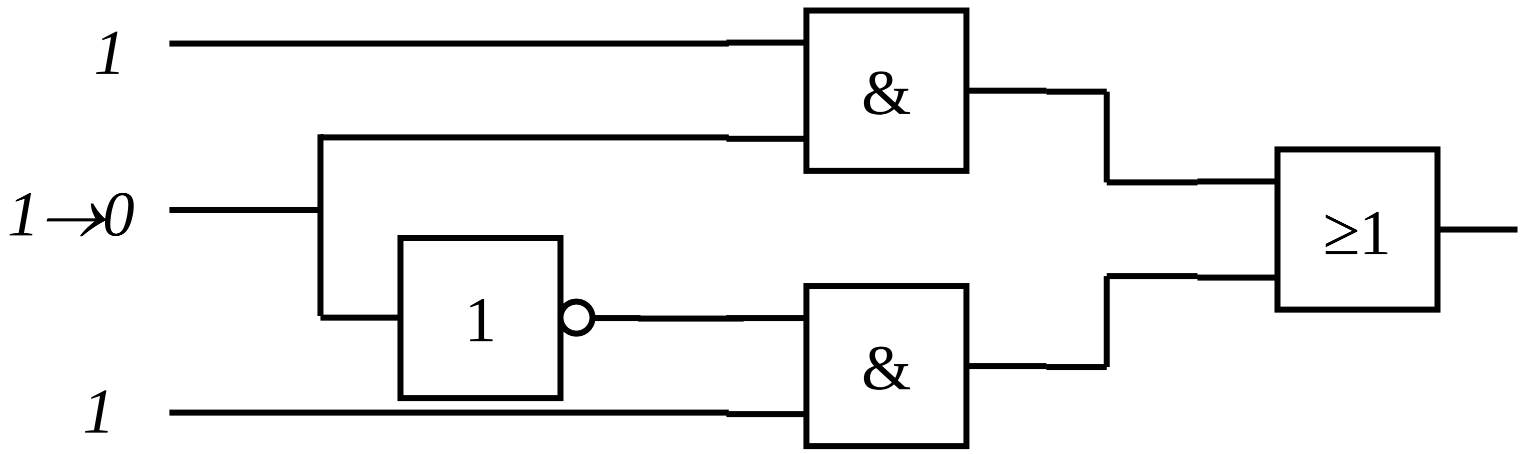
Statische Hazards

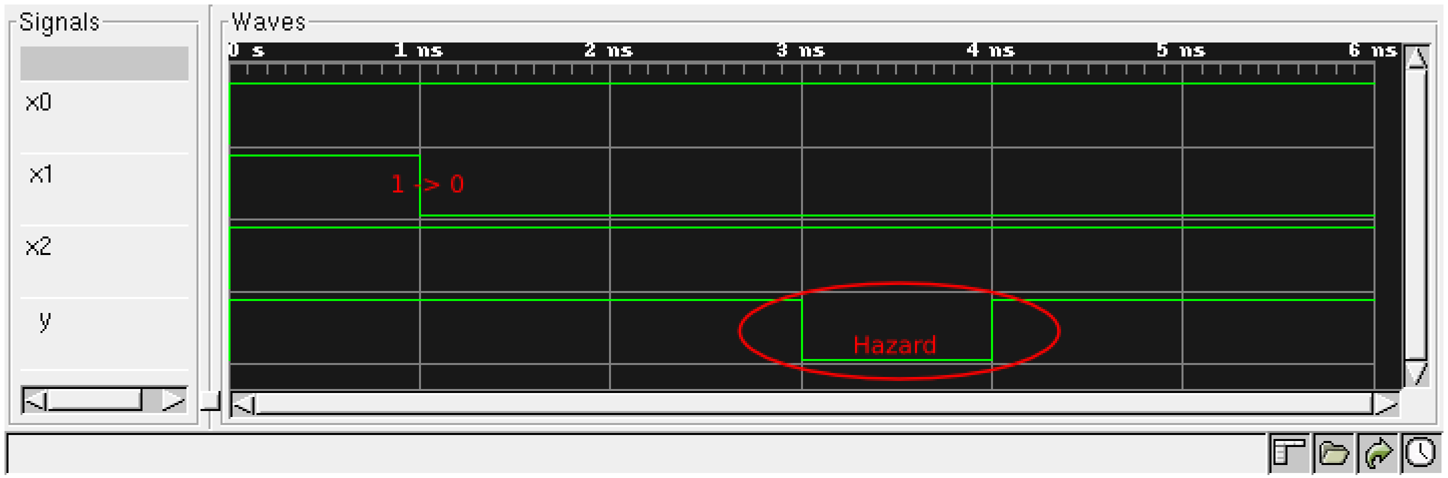
- **Statische Hazards sind Störimpulse aus einer Verknüpfung, die theoretisch konstant Null oder Eins liefern müsste**

$X_t \wedge \overline{X}_{t-k}$ **müsste Null liefern**
statischer 1-Hazard bei einem Übergang von X: 0→1

$X_t \vee \overline{X}_{t-k}$ **müsste Eins liefern**
statischer 0-Hazard bei einem Übergang von X: 1→0

Statischer Hazard

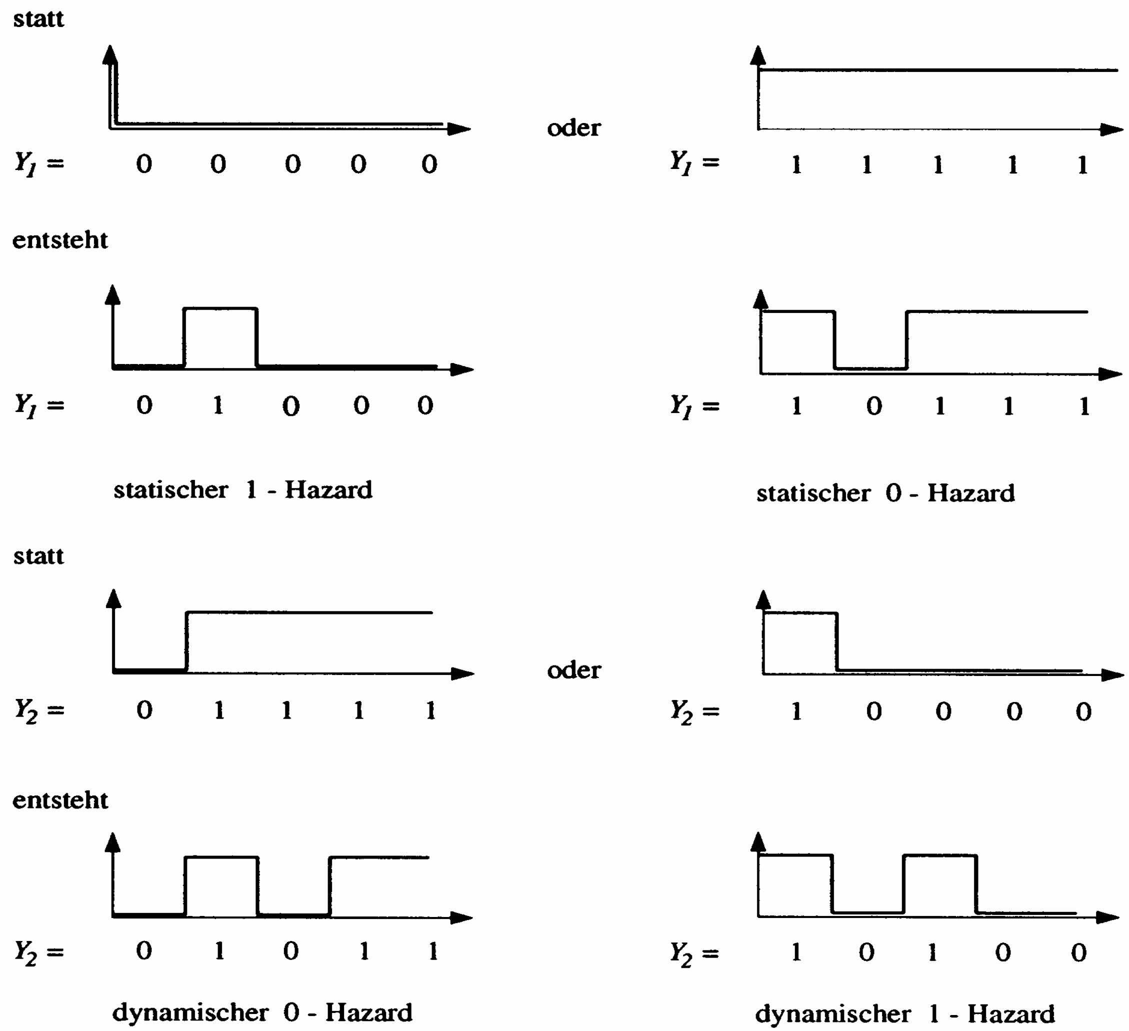




Dynamische Hazards

- **Dynamische Hazards entstehen als zusätzliche Übergänge beim Ausgang eines Schaltnetzes**
- $X_t \wedge \overline{X}_{t-k} \vee X_l$**, mit** $l > k$
  - ⇨ **bei einem Übergang von** $X{=}0 \rightarrow X{=}1$ **darf am Ausgang nur ein zu** $X_{t\text{-}l}$ **synchroner 0 →1 Übergang auftreten**
  - ⇨ **durch den vorgeschalteten statischen Hazard kommt es aber zu einer zusätzlichen 0 →1 Flanke**
- $X_t \wedge (\overline{X}_{t-k} \vee X_l)$**, mit** $l > k$
  - ⇨ **bei einem Übergang von** $X{=}1 \rightarrow X{=}0$ **darf am Ausgang nur ein zu** X_t **synchroner 1 →0 Übergang auftreten**
  - ⇨ **durch den vorgeschalteten statischen Hazard kommt es aber zu einer zusätzlichen 1 →0 Flanke**

Klassifikation von Hazards



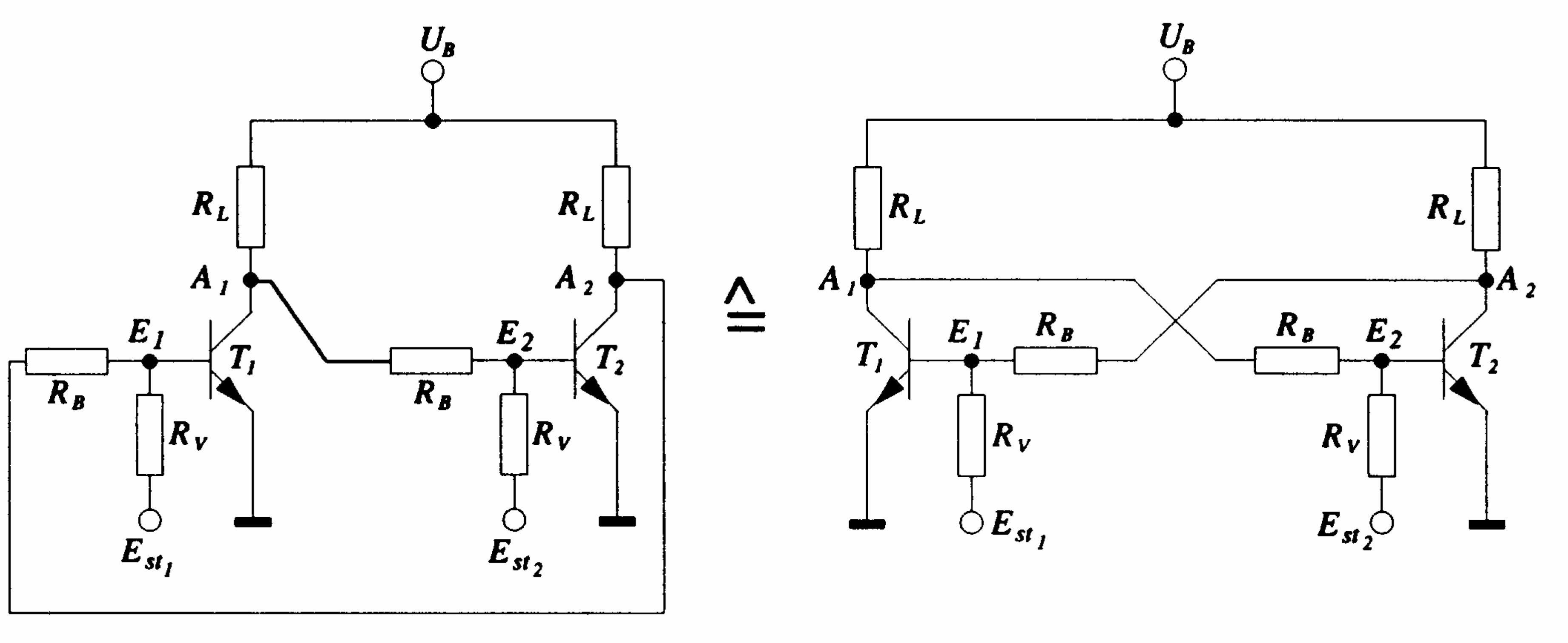
Behebung von Hazards

- Hazards können die Funktion von Schaltnetzen stören
  - ⇨ falsche Werte können an den Eingang eines Schaltnetzes zurückgekoppelt werden
- Um solche Fehler zu vermeiden werden taktflankengetriggerte Speicherglieder in die Rückkopplung eingefügt
- Die Signale werden erst übernommen, wenn die Hazards abgeklungen sind
  - ⇨ nur stabile, gültige Werte werden übernommen
  - ⇨ synchrone Schaltwerke: Schaltwerke, die durch einen zentralen Takt gesteuert werden
- Hazards haben einen Einfluss auf die maximale Schaltgeschwindigkeit
  - ⇨ maximaler Takt
  - ⇨ Entfernung von Hazards führt zu einer Erhöhung der Geschwindigkeit einer Schaltung

2 Speicherglieder

- **Speicherglieder dienen der Aufnahme, Speicherung und Abgabe von Schaltvariablen**
  - ⇨ **Ein Speicherglied ist ein bistabiles Kippglied**
  - ⇨ **Flipflop**
- **Zwei Zustände**
  - ⇨ **Zustand 1: Setzzustand**
  - ⇨ **Zustand 0: Rücksetzzustand**
- **Übernahme des Zustands kann erfolgen**
  - ⇨ **taktunabhängig (nicht taktgesteuert)**
  - ⇨ **taktabhängig (taktgesteuert)**
    - **taktzustandsgesteuert**
    - **taktflankengesteuert**
- **Die unterschiedlichen Arten der Ansteuerungen führen zu unterschiedlichen Flipflop-Typen**

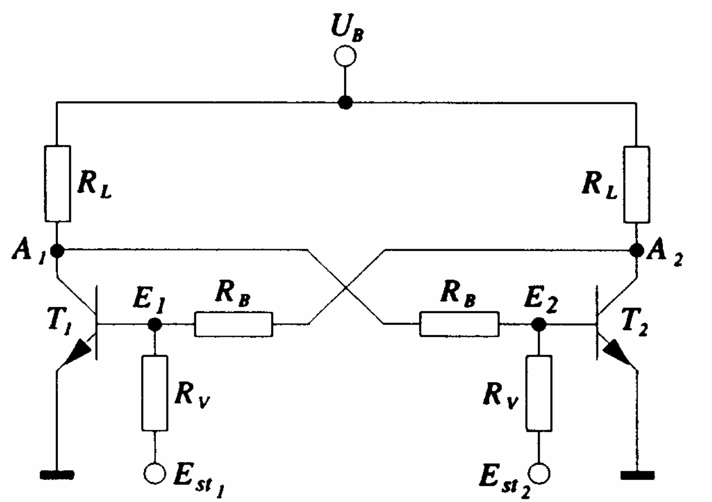
Funktionsprinzip



- **Rückkopplung**
  - ⇨ **Wirkprinzip aller bistabilen Kippschaltungen**
  - ⇨ **Ein Kippvorgang eines stabilen Zustands in den anderen wird durch E_{st1} und E_{st2} ausgelöst**

Funktionsprinzip

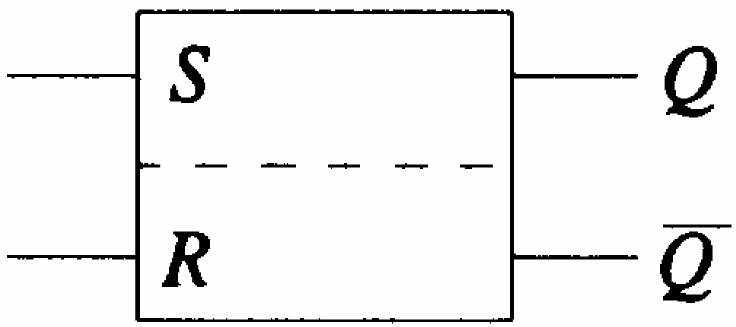
- Nach dem Anlegen von U_B sei T_2 leitend, T_1 sperrt
  - ⇨ A_1 besitzt H-Pegel und A_2 besitzt L-Pegel
  - ⇨ dieser Zustand ist stabil
- Wird E_{st1} auf H-Pegel gesetzt, so
  - ⇨ wird T_1 leitend, A_1 geht auf L-Pegel
  - ⇨ T_2 sperrt und A_2 geht auf H-Pegel
  - ⇨ dieser Zustand ist ebenfalls stabil
- Wird E_{st2} auf H-Pegel gesetzt, so
  - ⇨ wird T_2 leitend, A_2 geht auf L-Pegel
  - ⇨ T_1 sperrt und A_1 geht auf H-Pegel
  - ⇨ dieser Zustand ist wiederum stabil
- Werden E_{st1} und E_{st2} auf H-Pegel gesetzt, so
  - ⇨ leiten beide Transistoren, die Rückkopplung wird unwirksam
  - ⇨ dieser Zustand ist nicht stabil
  - ⇨ unzulässige Eingangsbelegung



RS-Flipflop

- Bistabile Kippschaltungen können aus rückgekoppelten
  - ⇨ Transistoren
  - ⇨ NOR-Gattern
  - ⇨ NAND-Gattern

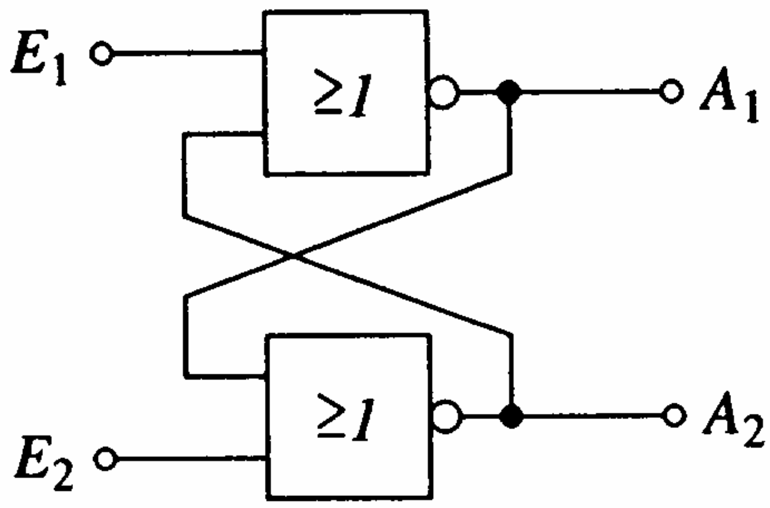
  gebaut werden
- RS-Flipflop
  - ⇨ wenn die Eingänge den Wert 0 haben, bleibt der vorherige Zustand stabil
  - ⇨ wird S =1, wird Q=1 und $\overline{Q}$=0
  - ⇨ wird R=1, wird Q=0 und $\overline{Q}$=1
  - ⇨ S=1 und gleichzeitig R=1 sind nicht zulässig



Schaltzeichen für ein RS-Flipflop nach DIN

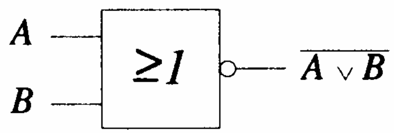
RS-Flipflop aus NOR-Gattern

- **Liegt an einem Eingang eines NOR-Gatters eine 1 an, so geht der entsprechende Ausgang auf 0**
- **Liegen an beiden Eingängen eine 0 an, so bleiben die Ausgänge erhalten**



Funktionstabelle der Ausgänge A_1 und A_2

E_1	E_2	A_1	A_2
0	0	(wie vorher) speichern	
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	(0	0) unzulässig



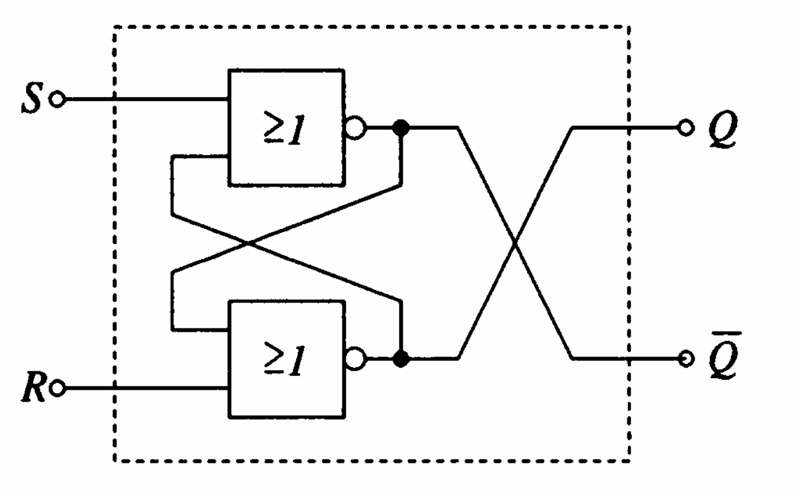
B	A	$\overline{A \vee B}$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

RS-Flipflop aus NOR-Gattern

- **Ein RS-Flipflop entsteht durch Vertauschen der Ausgänge**

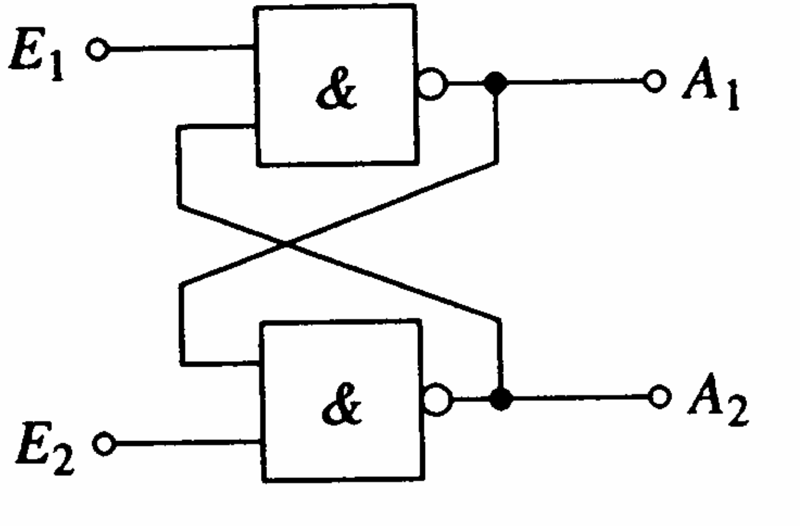
Funktionstabelle

S	R	Q	$\overline{Q}$
0	0	(wie vorher) speichern	
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	(0	0) unzulässig



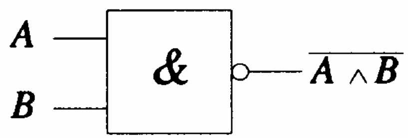
RS-Flipflop aus NAND-Gattern

- **Liegt an beiden Eingängen eines NAND-Gatters eine 1 an, so geht der entsprechende Ausgang auf 0**
- **Liegen an beiden Eingängen der Schaltung eine 1 an, so bleiben die Ausgänge erhalten**



Funktionstabelle der Ausgänge A_1 und A_2

E_1	E_2	A_1	A_2
0	**0**	**(1**	**1) (unzulässig)**
0	**1**	**1**	**0**
1	**0**	**0**	**1**
1	**1**	**(wie vorher) speichern**	



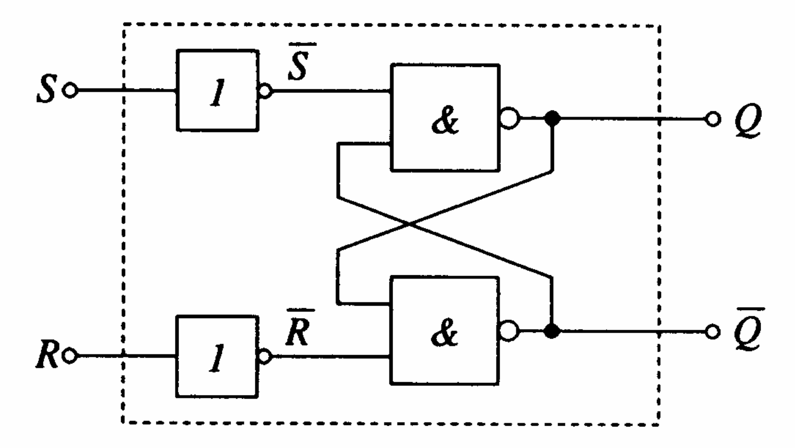
B	A	$\overline{A \wedge B}$
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

RS-Flipflop aus NAND-Gattern

- **Ein RS-Flipflop entsteht durch Negation der Eingänge**

Funktionstabelle

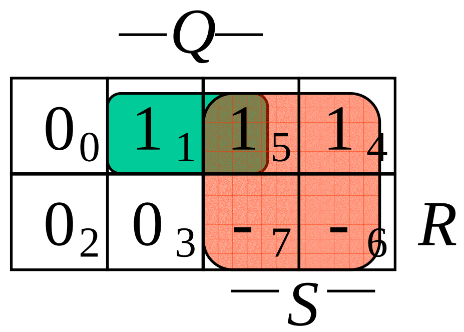
S	R	$\overline{S}$	$\overline{R}$	Q	$\overline{Q}$
0	0	1	1	(wie vorher) speichern	
0	1	1	0	0	1
1	0	0	1	1	0
1	1	0	0	(1	1) unzulässig



Zustandsfolgetabelle

- **Das Ausgangssignal ändert sich zeitversetzt nach der Signaländerung am Eingang**
- **Zeitverhalten wird in einer Zustandsfolge dargestellt**
  - Q_n **ist der Wert vor der Signaländerung**
  - Q_{n+1} **ist der Wert nach der Signaländerung**

S	R	Q_n	Q_{n+1}	
0	**0**	**0**	**0**	**speichern**
0	**0**	**1**	**1**	**speichern**
0	**1**	**0**	**0**	**rücksetzen**
0	**1**	**1**	**0**	**rücksetzen**
1	**0**	**0**	**1**	**setzen**
1	**0**	**1**	**1**	**setzen**
1	**1**	**0**	**-**	**unzulässig**
1	**1**	**1**	**-**	**unzulässig**

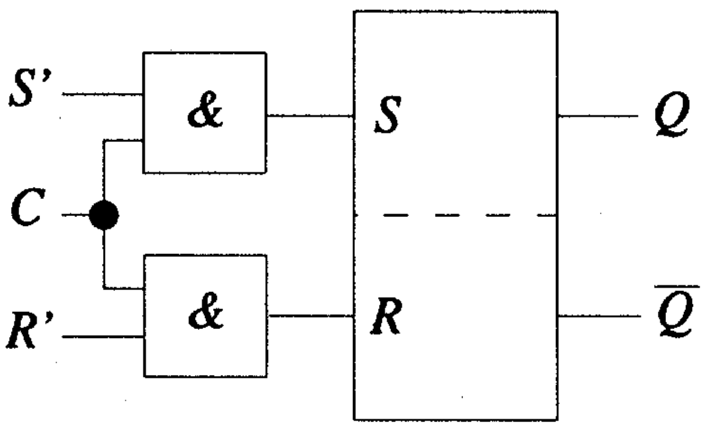


$$Q_{n+1} = S \vee (\overline{R} \wedge Q_n)$$

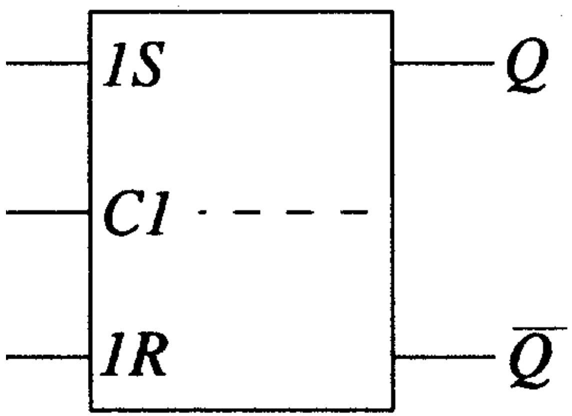
- **Diese Gleichung heißt auch Funktionsgleichung oder Übergangsfunktion eines RS-Flipflops**
  - **das Verhalten eines Flipflops kann durch eine Schaltfunktion beschrieben werden**

RS-Flipflop mit Zustandssteuerung

- **Beim RS-Flipflop wird der Ausgang sofort nach Anlegen der Eingangssignale gesetzt**
  - ⇨ **zur Vermeidung von Hazards wird häufig gefordert, dass ein Flipflop seinen Wert nur zu bestimmten Zeitpunkten ändert**
  - ⇨ **Synchrone Schaltwerke**
  - ⇨ **Einführung eines Taktsignals**



Schaltung



Schaltzeichen

RS-Flipflop mit Zustandssteuerung

Funktionstabelle

C	*S*	*R*	Q_n	Q_{n+1}	
0	0	0	0	0	
0	0	0	1	1	keine Änderung
0	0	1	0	0	des
0	0	1	1	1	Ausgangs-
0	1	0	0	0	zustands
0	1	0	1	1	d.h.
0	1	1	0	0	Speichern
0	1	1	1	1	
1	0	0	0	0	speichern
1	0	0	1	1	speichern
1	0	1	0	0	rücksetzen
1	0	1	1	0	rücksetzen
1	1	0	0	1	setzen
1	1	0	1	1	setzen
1	1	1	0	-	unzulässig
1	1	1	1	-	unzulässig

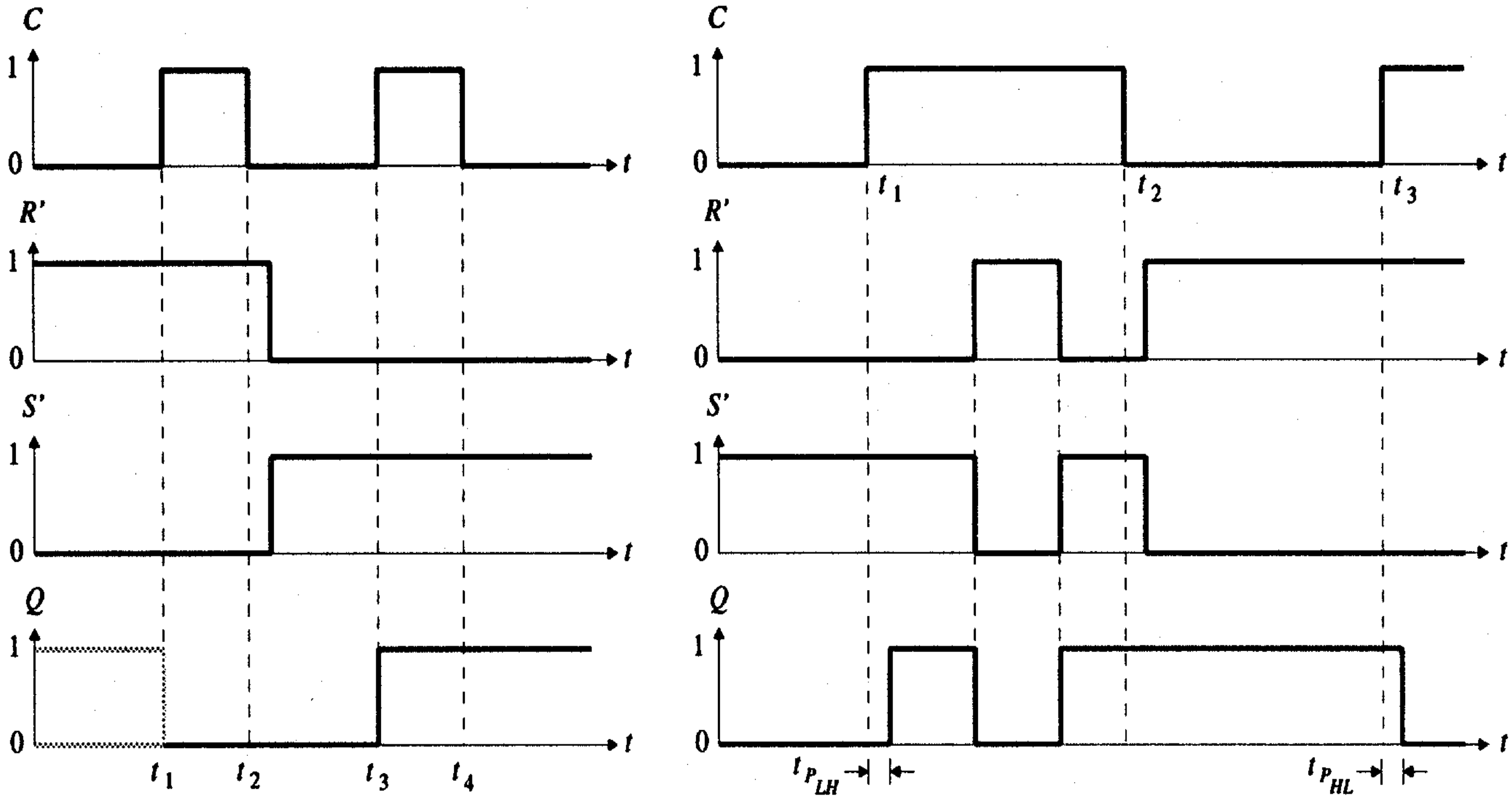
- **Aus der Übergangsfunktion des RS-Flipflos**

$$Q_{n+1} = S \vee (\overline{R} \wedge Q_n)$$

mit $S = (C \wedge S')$ **und** $R = (C \wedge R')$

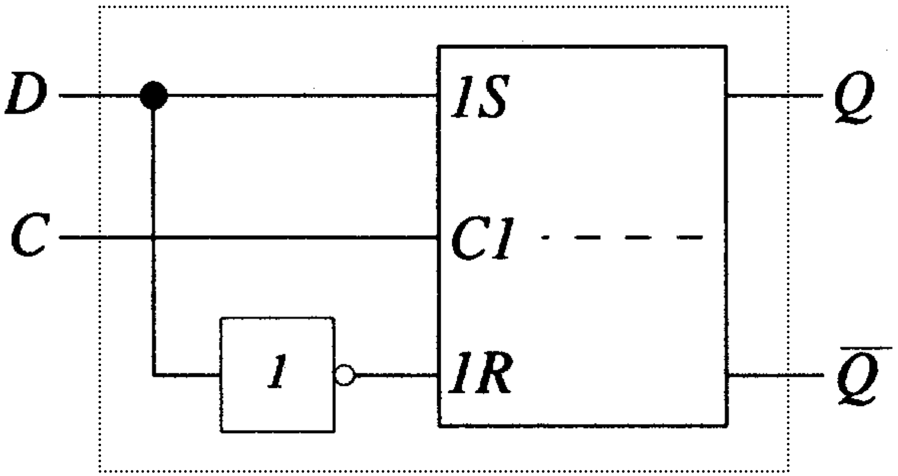
$$Q_{n+1} = (C \wedge S') \vee (\overline{(C \wedge R')} \wedge Q_n)$$

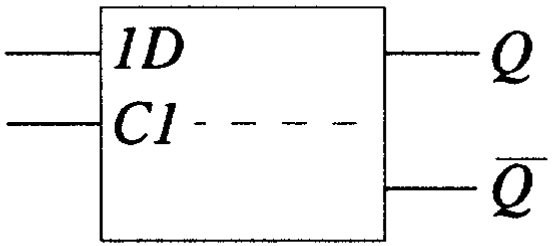
Impulsdiagramm für Taktzustandssteuerung



D-Flipflop mit Zustandssteuerung

- **Das D-Flipflop entsteht aus einem RS-Flipflop mit Zustandssteuerung, durch die Negation des Setzsignals S**

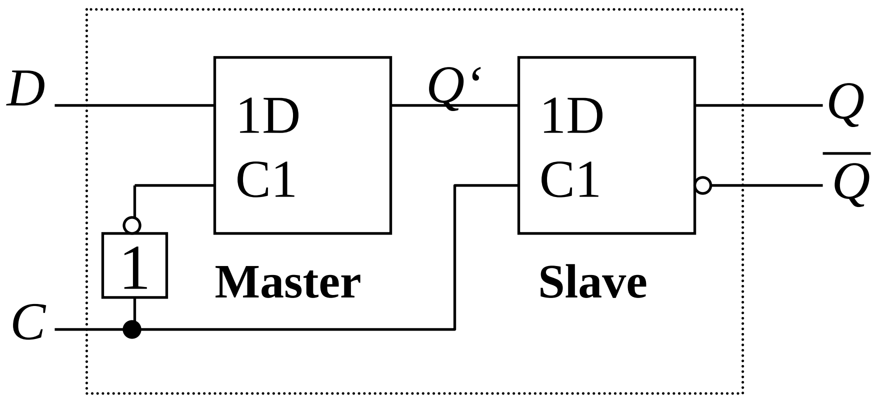




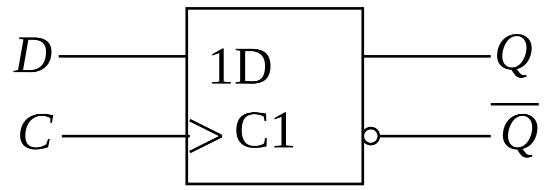
C	D	Q_n	Q_{n+1}	
0	-	0	0	speichern
0	-	1	1	speichern
1	0	-	0	rücksetzen
1	1	-	1	setzen

Master-Slave D- Flipflop

- Probleme beim Verketten von Flipflops
  - ⇨ bei C=1 rutschen die Eingänge bis zum Ausgang durch
  - ⇨ Anwendung: Schieberegister, Zähler
- Lösung: (positiv) flankengesteuertes Flipflop
  - ⇨ zwei D-Flipflops werden hintereinander geschaltet
  - ⇨ das erste Flipflop erhält den negierten Takt
  - ⇨ Master-Slave-Prinzip

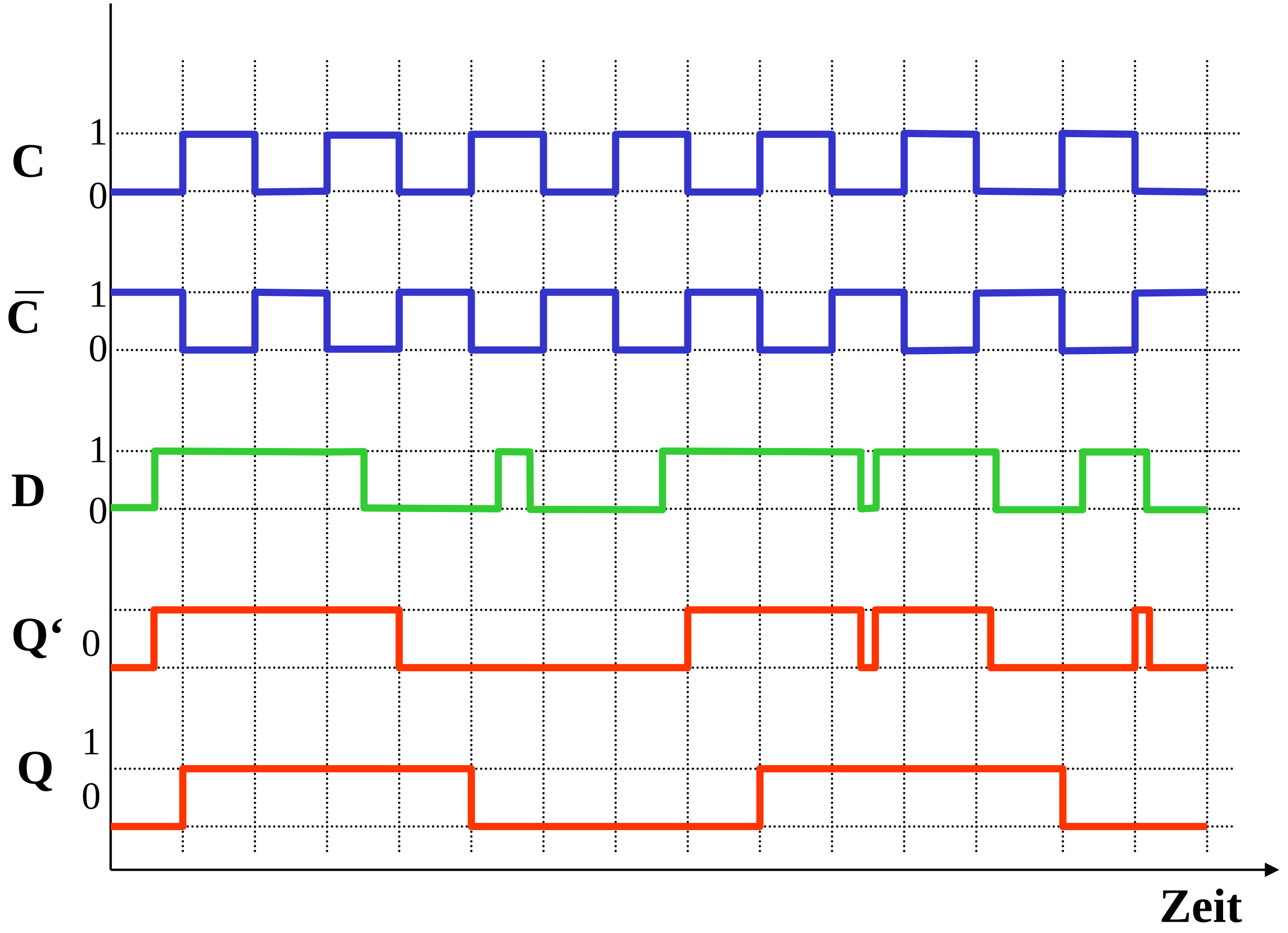


Schaltung

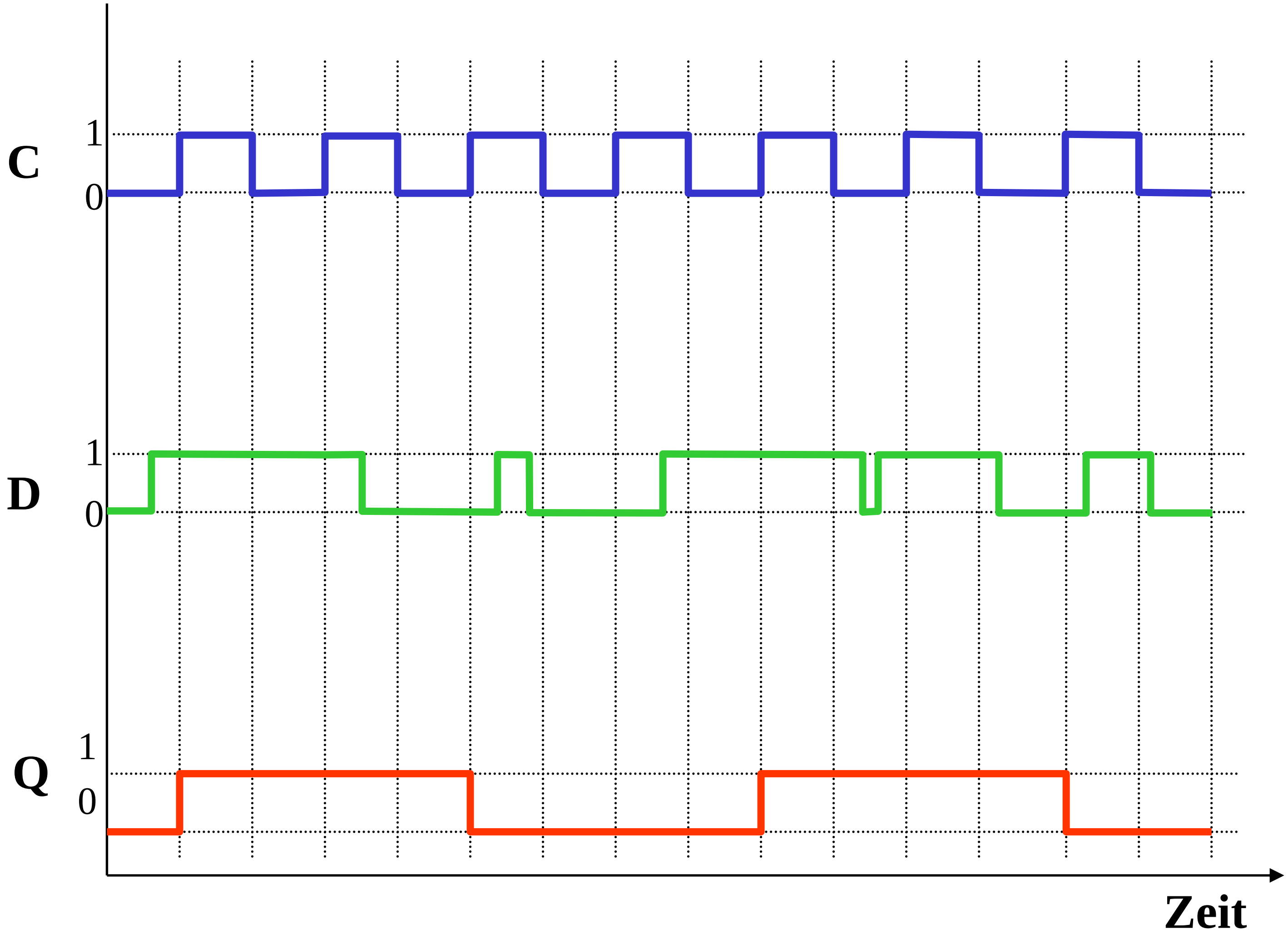


Schaltzeichen

Impulsdiagramm des Master-Slave D-Flipflops

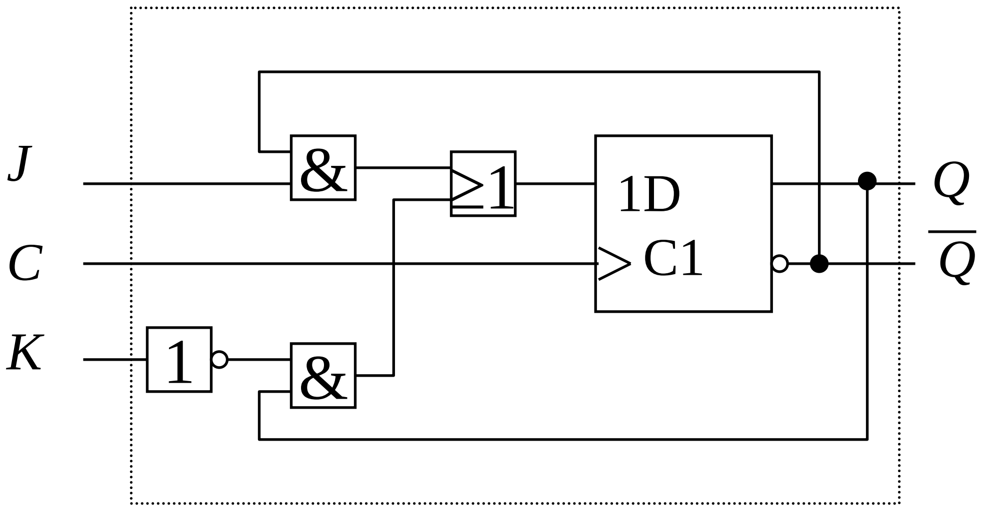


Impulsdiagramm des Master-Slave D-Flipflops

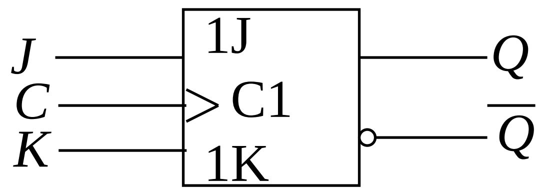


JK-Flipflop

- Neben den Funktionen <u>speichern</u>, <u>setzen</u> und <u>rücksetzen</u>, macht es Sinn für die undefinierte Belegung R=S=1 die weitere Funktion <u>wechseln</u> zu definieren
  - ⇨ Man erreicht dies durch Rückführung der Ausgänge an den Eingang



Schaltung



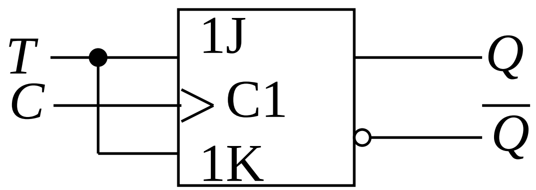
Schaltzeichen

J	K	Q_{n+1}	
0	0	Q_n	speichern
0	1	0	rücksetzen
1	0	1	setzen
1	1	$\overline{Q_n}$	wechseln

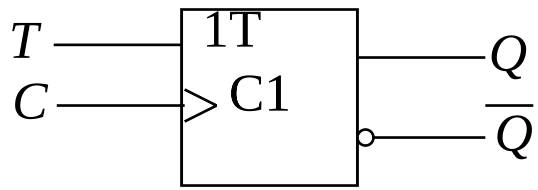
Funktionstabelle

Master-Slave T-Flipflop

- **Ein T-Flipflop besitzt wie das D-Flipflop nur einen Eingang**
  - ⇨ **ist dieser gleich 1, wechselt das Flipflop seinen Wert**
  - ⇨ **T steht für toggle**



Schaltung



Schaltzeichen

T	Q_{n+1}	
0	Q_n	speichern
1	$\overline{Q}_n$	wechseln

Funktionstabelle

3 Schaltwerke

3.1 Formale Grundlagen

- **Schaltnetze**
  - ⇨ **die Ausgabe einer Schaltung hängt nur von den Werten der Eingabe zum gleichen Zeitpunkt ab**
  - ⇨ **man nennt sie auch kombinatorische Schaltungen**
- **Schaltwerke**
  - ⇨ **die Ausgabe einer Schaltung kann von den Werten der Eingabe zu vergangenen Zeitpunkten abhängen**
  - ⇨ **alle Abhängigkeiten von Werten der Vergangenheit werden in einem Zustand zusammengefaßt**
  - ⇨ **sie sind Implementierungen von deterministischen endlichen Automaten**

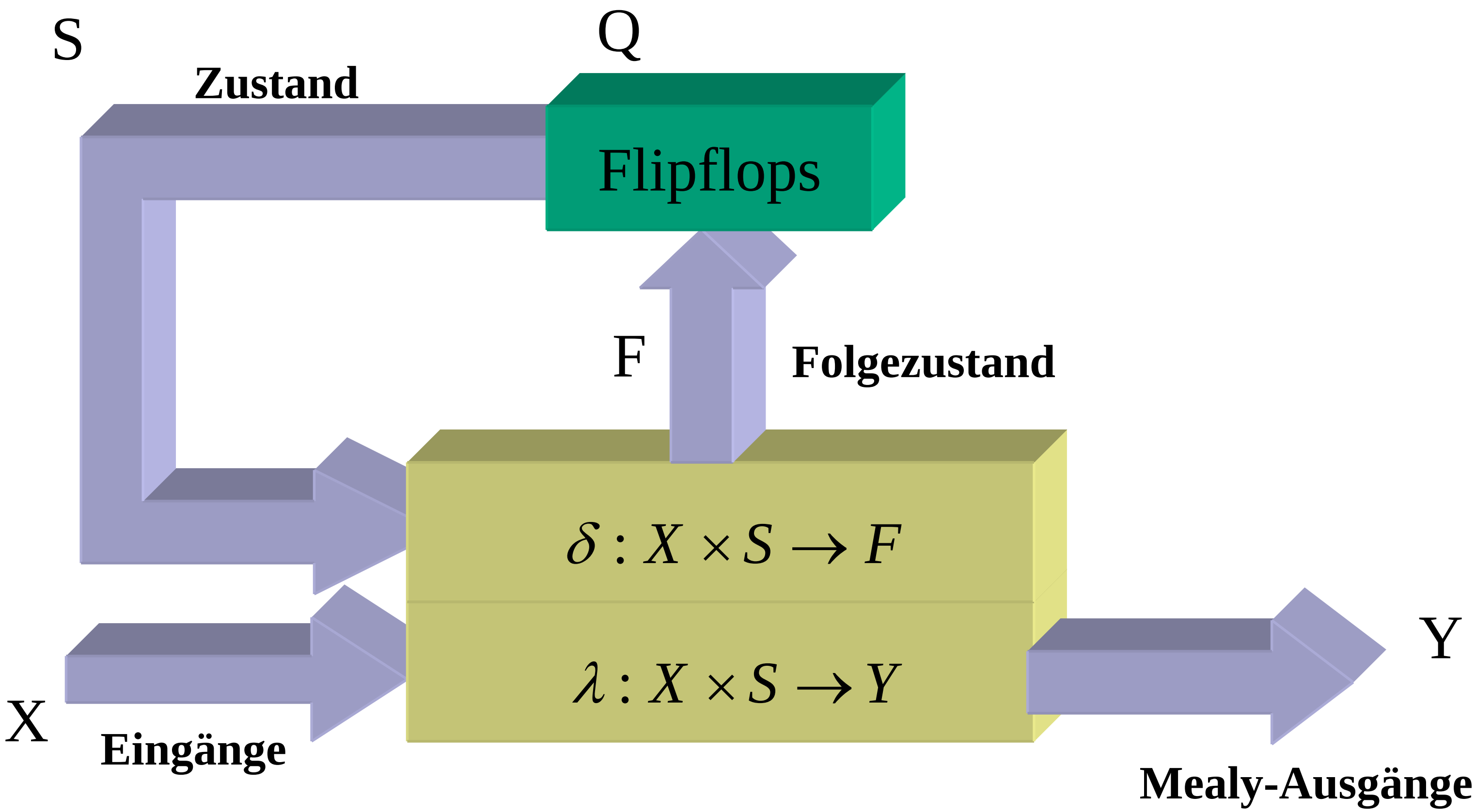
Beschreibung von endlichen Automaten

- **Andere Namen für endliche Automaten sind:**
  - ⇨ **finite state machine, FSM**
  - ⇨ **sequentielle Schaltungen**
  - ⇨ **Schaltungen mit Speicherverhalten**
- **Aus der Automatentheorie:**
  Ein endlicher Automat ist ein Quintupel $A=(X, Y, S, \delta, \lambda, s_0)$
  - ⇨ **eine endliche Menge von Eingangsbelegungen,** X
  - ⇨ **eine endliche Menge von Ausgangsbelegungen,** Y
  - ⇨ **eine endliche Menge von Zuständen,** S
  - ⇨ **eine Zustandsübergangsfunktion** $\delta : X \times S \to S$
  - ⇨ **eine Ausgabefunktion**
    $\lambda : X \times S \to Y$ **(Mealy Verhalten)**
    $\lambda : S \to Y$ **(Moore Verhalten)**
  - ⇨ **und er besitzt einen Startzustand** s_0

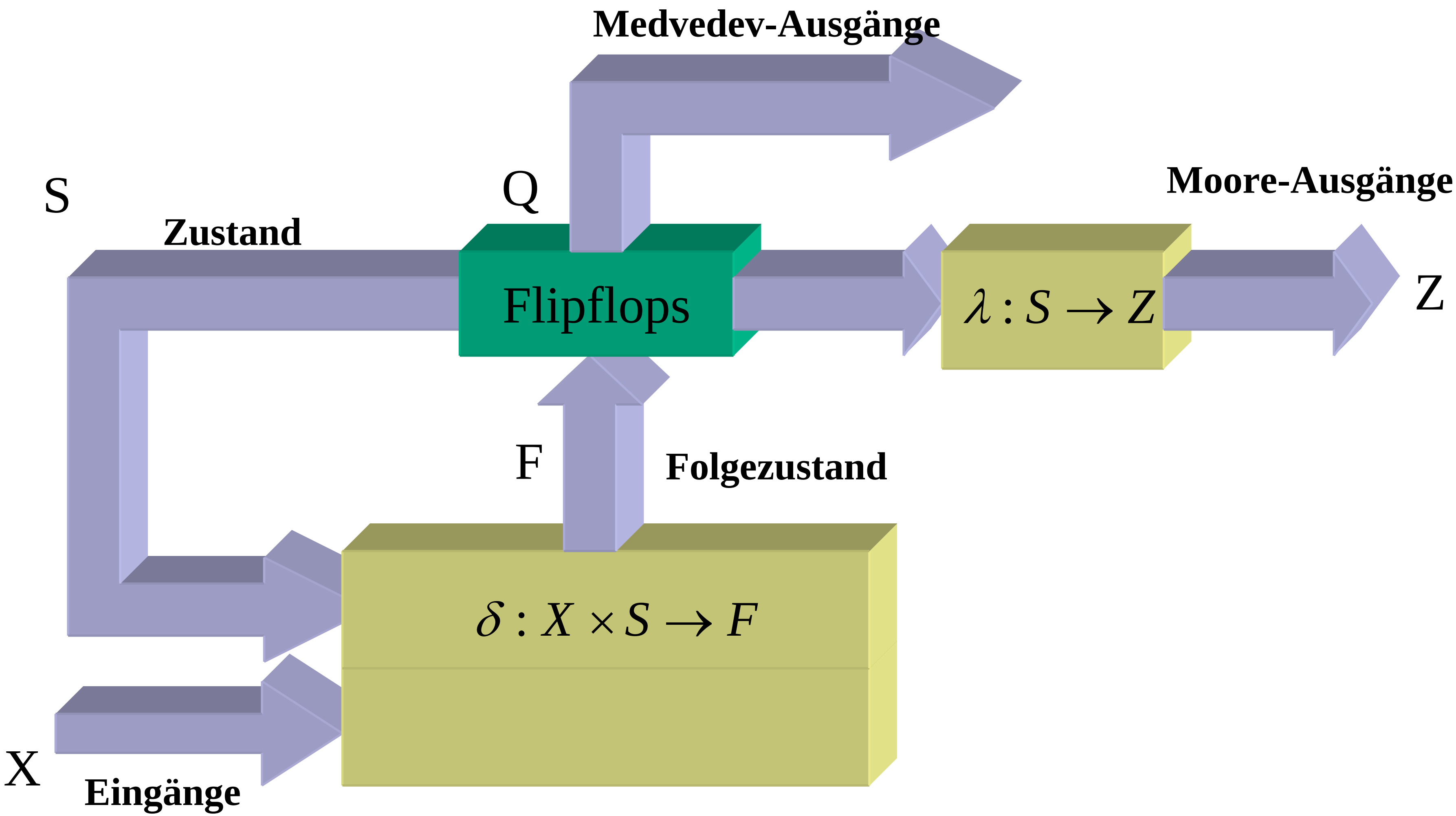
Mealy- und Moore-Automaten

- **Die Zustände eines endlichen Automaten werden in Flipflops gespeichert**
  - ⇨ **möglich sind D-, T-, JK-, RS-Flipflops**
- **Der aktuelle Zustand wird an die Eingänge der Schaltung rückgekoppelt**
- **Man unterscheidet Mealy- und Moore- und Medvedev-Automaten:**
- **Mealy:**
  - ⇨ **Ausgangsleitungen können sich ändern, auch wenn keine Taktflanke aufgetreten ist**
- **Moore:**
  - ⇨ **Änderung von Ausgangsleitungen nur mit Änderung eines Taktimpulses**
- **Medvedev:**
  - ⇨ **Spezialfall des Moore-Automaten**
  - ⇨ **die Ausgänge sind die Zustandsbits der Flipflops**

Struktur eines Mealy-Automaten



Struktur eines Moore-Automaten



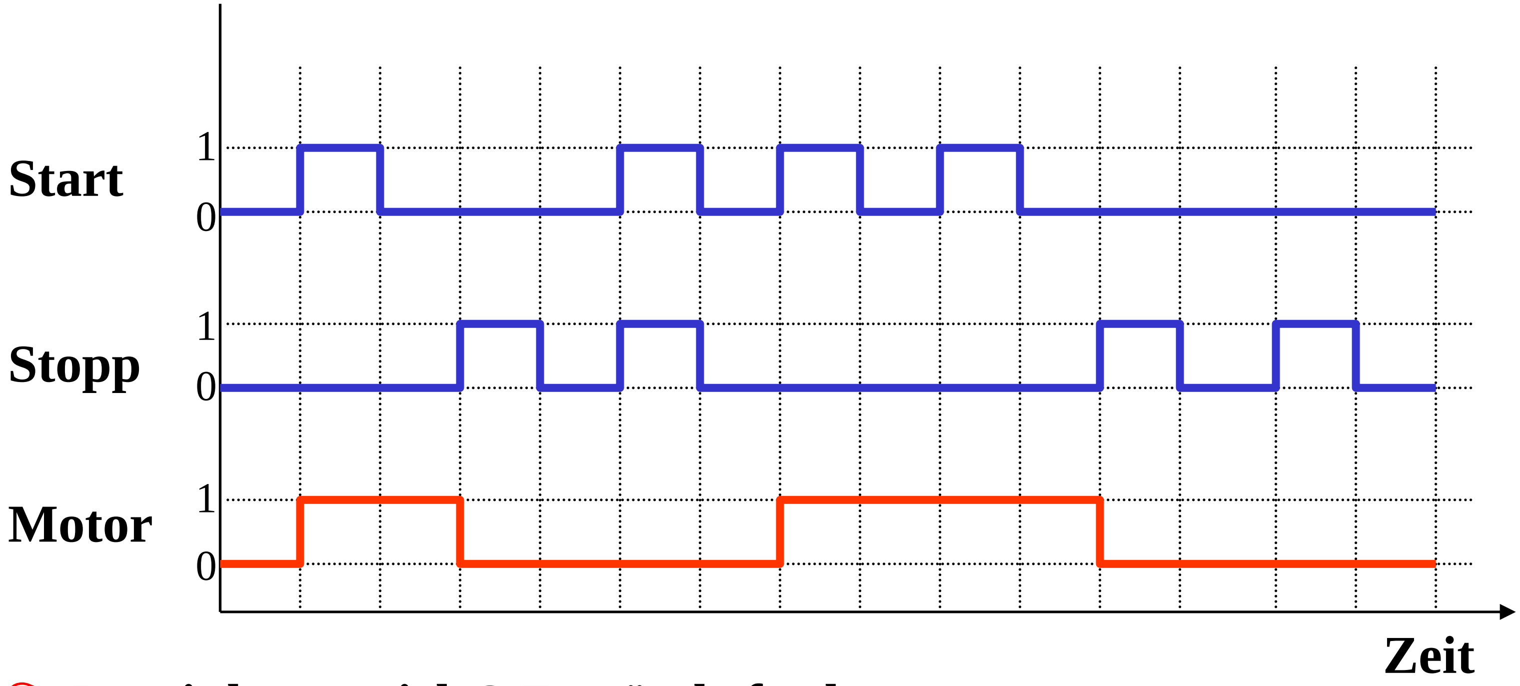
3.2 Darstellung endlicher Automaten

- **Die Aufgabenstellung liegt meist in einer nicht formalisierten Form vor**
- **Um beim Entwurf von Schaltwerken systematische und möglichst auch rechnergestützte Entwurfsverfahren einsetzen zu können, muss eine formalisierte Beschreibung verwendet werden**
- **Häufig verwendete Darstellungsformen sind:**
  - ⇨ **Zeitdiagramm**
  - ⇨ **Automatengraph**
  - ⇨ **Ablauftabelle**
  - ⇨ **Schaltfunktionen**
  - ⇨ **Automatentabelle**

Beispiel: Selbsthalteschaltung

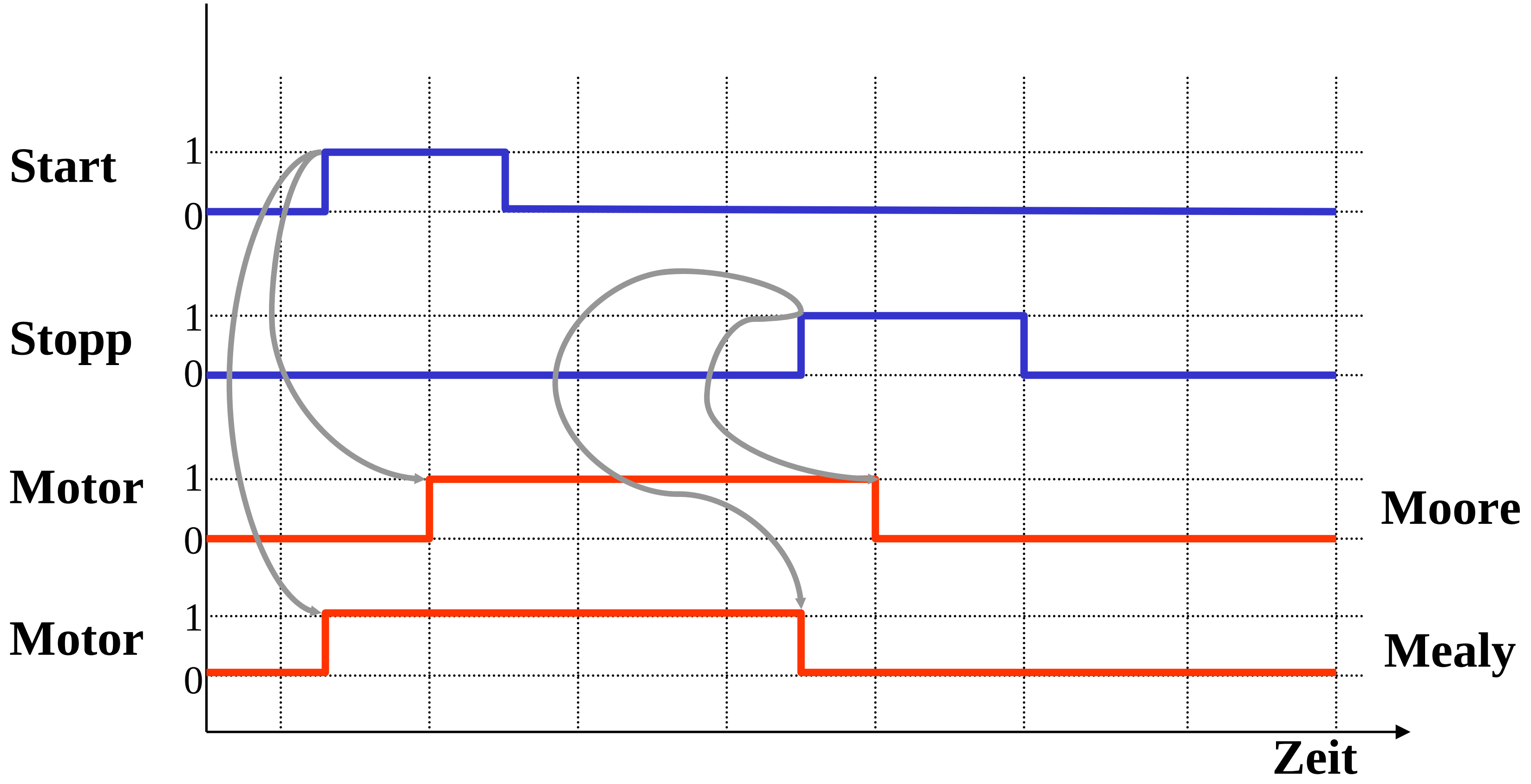
- Beschreibung der Funktion:
  - ⇨ an den Eingängen befinden sich zwei Tasten : (Start und Stopp)
  - ⇨ die Schaltung liefert ein Ausgangssignal, mit dem ein Gerät ein- oder ausgeschaltet werden kann
  - ⇨ wird die Starttaste gedrückt, soll das Gerät eingeschaltet werden
  - ⇨ es soll eingeschaltet bleiben, auch wenn die Starttaste wieder losgelassen wird
  - ⇨ das Gerät soll ausgeschaltet werden, sobald die Stopptaste betätigt wird
- zu klären ist:
  - ⇨ was passiert, wenn beide Tasten gleichzeitig betätigt werden?
  - ⇨ was passiert, wenn die Starttaste gedrückt wird, obwohl das Gerät eingeschaltet ist?
  - ⇨ was passiert, wenn das Gerät ausgeschaltet ist und die Stopptaste gedrückt wird?

Zeitdiagramm



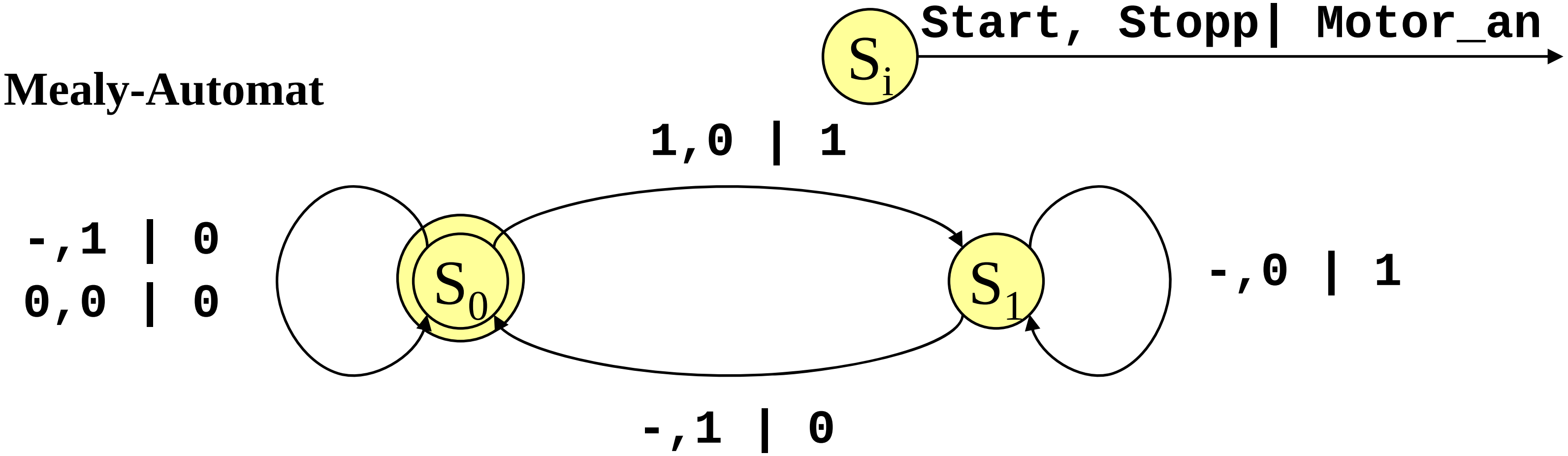
- **Damit lassen sich 2 Zustände festlegen:**
  - ⇨ **Zustand s_0: Ausgabe von** Motor=0 **und warten auf** Start=1 **und** Stopp=0
  - ⇨ **Zustand s_1: Ausgabe von** Motor=1 **und warten auf** Stopp=1

Mealy und Moore Verhalten

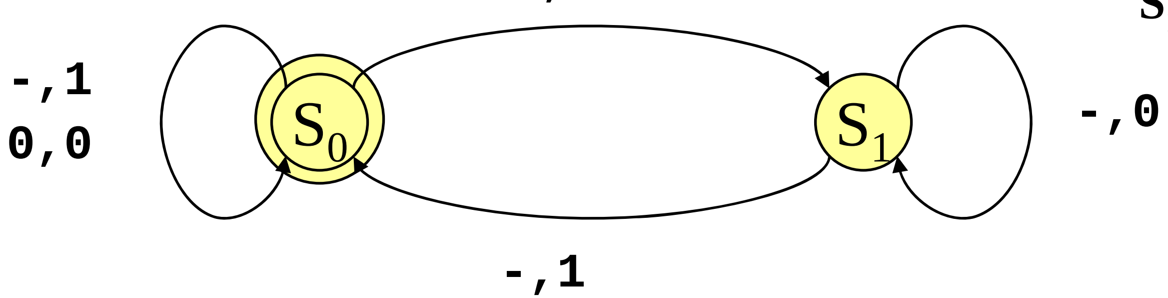


Automatengraph

Mealy-Automat



Moore-Automat



S_0 = Motor aus

S_1 = Motor an

Ablauftabelle

Mealy-Ablauftabelle

Eingang	Zustand	Folgezustand	Ausgang
-, 1	S0	S0	0
0, 0	S0	S0	0
1, 0	S0	S1	1
-, 0	S1	S1	1
-, 1	S1	S0	0

Moore-Ablauftabelle

Eingang	Zustand / Ausgang	Folgezustand
-, 1	S0/ 0	S0
0, 0	S0/ 0	S0
1, 0	S0/ 0	S1
-, 0	S1/ 1	S1
-, 1	S1/ 1	S0

Interpretation der Ablauftabelle

Wenn	**wir im Zustand 0 sind**
und	**zusätzlich Start = 1 und Stop = 0 gilt,**
dann	**wird Motor_an zu 1**
und	**wir gehen mit dem nächsten Takt in den Zustand 1**

Schaltfunktionen

- **Aus der Ablauftabelle lassen sich die die Ausgabe- und die Zustandsübergangsfunktion ablesen:**

x_1, x_2	Zustand S	Folgezustand S^+	Ausgang y
-, 1	S0	S0	0
0, 0	S0	S0	0
1, 0	S0	S1	1
-, 0	S1	S1	1
-, 1	S1	S0	0

- **Übergangsfunktion:** $s_0^+ = (x_2 \wedge s_0) \vee (\bar{x}_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge s_0) \vee (x_2 \wedge s_1)$

  $s_1^+ = (x_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge s_0) \vee (\bar{x}_2 \wedge s_1)$

- **Ausgabefunktion:** $y = (x_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge s_0) \vee (\bar{x}_2 \wedge s_1)$ **Mealy-Automat**

  $y = s_1$ **Moore-Automat**

Automatentabelle

Zustand	Folgezustand Start/Stopp 0/0	0/1	1/0	1/1	Ausgang
s_0	s_0	s_0	s_1	s_0	0
s_1	s_1	s_0	s_1	s_0	1

Moore-Automat

Zustand	Folgezustand/ Ausgang Start/Stopp 0/0	0/1	1/0	1/1
s_0	$s_0/0$	$s_0/0$	$s_1/1$	$s_0/0$
s_1	$s_1/1$	$s_0/0$	$s_1/1$	$s_0/0$

Mealy-Automat

- **In der Automatentabelle werden die Zustände senkrecht und alle möglichen Eingangsbelegungen waagrecht dargestellt**
  - ⇨ **an den Schnittpunkten werden die Folgezustände eingetragen**
  - ⇨ **Moore-Automat: Die Ausgabe wird dem Zustand zugeordnet**
  - ⇨ **Mealy-Automat: Die Ausgabe wird dem Folgezustand zugeordnet**

Medvedev- und Moore-Automaten

- Auch Moore-Automaten können während des Übergangs Fehlimpulse (Glitches, Hazards) auslösen
  - ⇨ unterschiedliche Laufzeiten in der Schaltung
  - ⇨ 01 nach 10 Übergänge der Zustandsübergangsfunktion ohne Änderung des Ausgangswerts
- Medvedev-Automaten besitzen am Ausgang ein Flipflop
  - ⇨ keine Fehlimpulse
  - ⇨ Ausgangswert muss einen Takt früher berechnet werden

Eingang	Zustand / Ausgang	Folgezustand	Eingang	Zustand / Ausgang	Folgezustand
-, 1	S0/ 0	S0	-, 1	S0/ 0	S0
0, 0	S0/ 0	S0	0, 0	S0/ 0	S0
1, 0	S0/ 0	S1	1, 0	S0/ 1	S1
-, 0	S1/ 1	S1	-, 0	S1/ 1	S1
-, 1	S1/ 1	S0	-, 1	S1/ 0	S0

Moore-Automat **Medvedev-Automat**