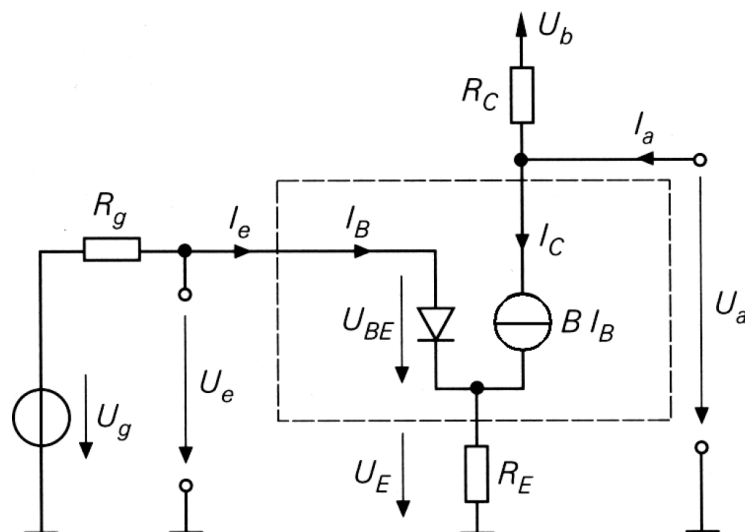


KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE

INSTITUT FÜR MIKRO- UND NANOELEKTRONISCHE
SYSTEME IMS

Tutorium Elektronische Schaltungen ES



Sommersemester 2018

Tutor: Robin Köhnlein

E-Mail: uinpj@student.kit.edu oder robkoh@gmx.de

Veranstaltung: Mittwoch 14:00 - 15:30, Geb.10.50 R702

ES Tutorium Nummer 15

Studiengänge ETIT, MIT

10. April 2018

Die Zusammenfassung soll die Inhalte des Tutoriums Elektronische Schaltungen zusammenfassen, visualisieren und bei der inhaltlichen Bearbeitung der Aufgaben unterstützen. Diese Zusammenfassung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und kann das ES-Skript nicht ersetzen. Ich hoffe dennoch, dass sie Euch bei Eurem Lernprozess in der Vorlesung ES unterstützt und wünsche Euch vorab ein erfolgreiches Semester!

Robin Köhnlein

”Der Preis des Erfolges ist Hingabe, harte Arbeit und unablässiger Einsatz für das, was man erreichen will” -Frank L. Wright

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| 1 Zusammenfassung Tutorium 1 | 3 |
| 2 Zusammenfassung Tutorium 2 | 6 |
| 3 Zusammenfassung Tutorium 3 | 9 |
| 4 Zusammenfassung Tutorium 4 | 12 |
| 5 Zusammenfassung Tutorium 5 | 13 |
| 6 Zusammenfassung Tutorium 6 | 15 |
| 7 Anhang 1: OP-Schaltungen | 16 |
| 8 Anhang 2: Flip-Flops | 19 |
| 9 Anhang 3: ES Formelsammlung | 25 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Lastgerade von ohmschen Widerständen | 3 |
| 2 | I-U-Kennlinie der Si-Diode | 4 |
| 3 | I-U-Kennlinie der Si- und Schottky Diode | 4 |
| 4 | I-U-Kennlinie der z-Diode | 5 |
| 5 | I-U-Kennlinie der z-Diode | 5 |
| 6 | Schaltsymbol bipolarer Transistoren | 6 |
| 7 | Grundschaltungen von Transistoren | 6 |
| 8 | Eingangs- und Ausgangskennlinie | 7 |
| 9 | bipolarer Transistor in Emitterschaltung | 8 |
| 10 | Großsignalersatzschaltbild, npn-Transistor | 8 |
| 11 | Kleinsignalersatzschaltbild, npn-Transistor | 8 |
| 12 | JFET Schaltsymbole | 9 |
| 13 | JFET-Großsignalersatzschaltbild | 9 |
| 14 | JFET-Kleinsignalersatzschaltbild | 9 |
| 15 | MOSFET Schaltsymbole | 10 |
| 16 | n-Kanal MOSFET, Anreicherungstyp, Sourceschaltung | 10 |
| 17 | Großsignalersatzschaltbild, n-Kanal MOSFET | 10 |
| 18 | Kleinsignalersatzschaltbild, n-Kanal MOSFET | 10 |
| 19 | Early-Effekt mit endlichem r_{DS} | 11 |
| 20 | Schaltsymbol OpAmp | 12 |
| 21 | Emitterschaltung als Inverter | 13 |
| 22 | TTL-Inverter, Übertragungskennlinie | 13 |
| 23 | Anstiegs- und Abfallzeit | 14 |
| 24 | Verzögerungszeiten | 14 |
| 25 | Flip-Flop-Gruppen | 15 |
| 26 | Taktzustandssteuerung | 15 |
| 27 | Taktflankensteuerung | 15 |

Hinweis:

Alle Grafiken und Formeln, deren Urheber nicht explizit angegeben werden, sind dem Vorlösungsskript der Vorlesung Elektronische Schaltungen entnommen.

Bildquelle:

Prof. Dr. rer. nat. M. Siegel. Skript zur Vorlesung Lineare Elektronische Schaltungen. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Mikro- und Nanoelektronische Systeme, Hertzstraße 16, D-76187 Karlsruhe, April 2018.

1 Zusammenfassung Tutorium 1

Lastgerade:

Ohmsche Widerstände besitzen im Strom-Spannungs-Diagramm eine Ursprungsgerade als Kennlinie. Diese lineare Kennlinie wird als Lastgerade bezeichnet. Sie besitzt die Steigung m :

$$m = \frac{\Delta I}{\Delta U} = \frac{1}{R}, \quad [S] = \left[\frac{1}{\Omega} \right] \quad (1)$$

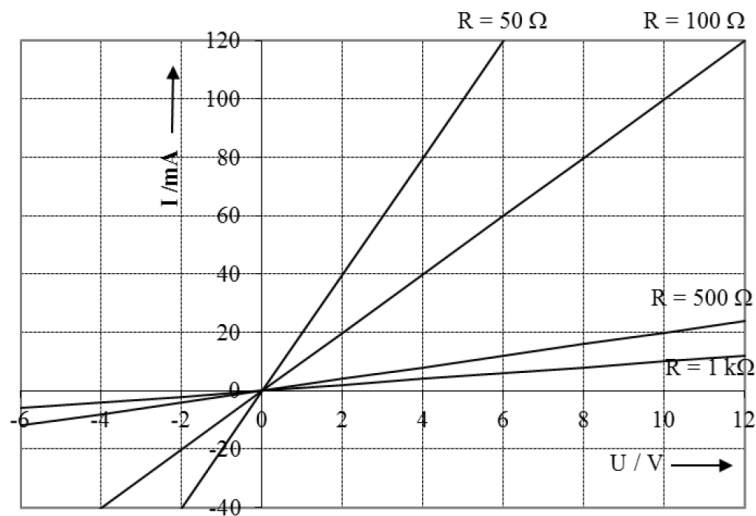


Abbildung 1: Lastgerade von ohmschen Widerständen

Dioden:

Dioden sind nichtlineare Bauteile, deren Kennlinie von der Wahl des Arbeitspunktes und von der Temperatur abhängt.

Temperaturspannung einer Diode mit $T_{Raum} = 300K$:

$$U_T = \frac{k_B \cdot T}{e} \quad (2)$$

Diodenstrom im Durchlassbereich mit $U_T = 26mV$:

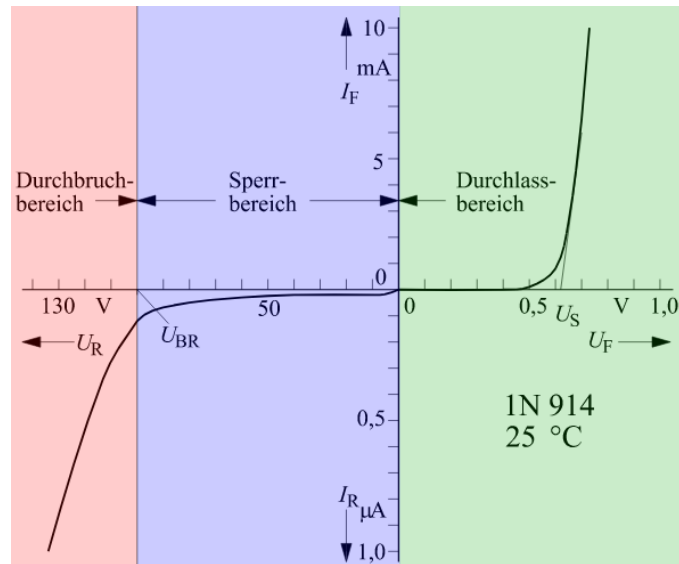
$$I_D = I_S \cdot \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) \quad (3)$$

Für den differentiellen Widerstand r_D im Arbeitspunkt gilt

$$r_D = \frac{dU}{dI_D} = \left(\frac{dI_D}{dU} \right)^{-1} \neq R_{Ohm} = \frac{U_A}{I_A} \quad (4)$$

Si-Diode:

Die Diodenkennlinie der Silizium-Diode wird in einen Durchlass-, einen Sperr- sowie einen Durchbruchbereich eingeteilt. Die Durchlassspannung einer Si-Diode beträgt $U_S = 0,7V$.



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/db/Kennlinie_Diode_1N914.svg

Abbildung 2: I-U-Kennlinie der Si-Diode

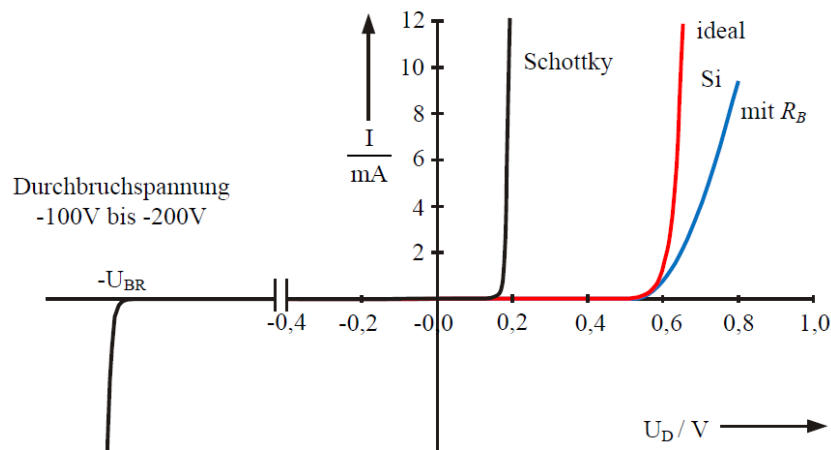
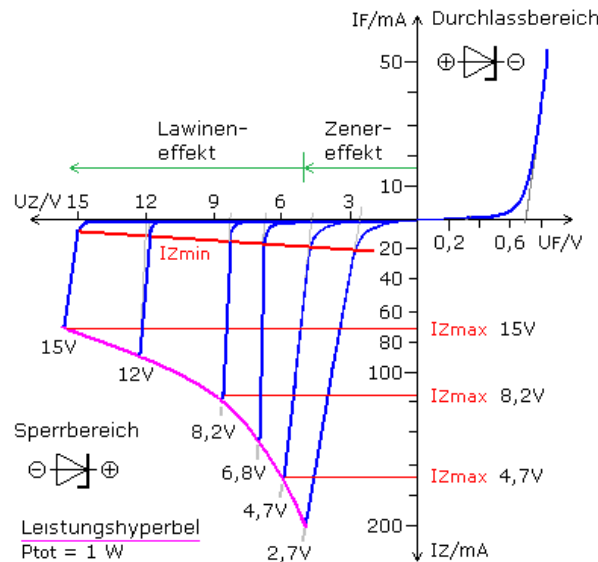


Abbildung 3: I-U-Kennlinie der Si- und Schottky Diode

Zener-Diode:

Die Zener-Diode besitzt eine Durchlassspannung von $U_S = 0,7V$. Im Gegensatz zu einer Si-Diode weist die Kennlinie einer Zener-Diode eine geringe Durchbruchspannung von ca. $U_{Durchbruch} = -2,7V$ bis $U_{Durchbruch} = -8,2V$ auf. Die exakte Durchbruchspannung hängt von der Wahl des Diodentyps ab.



URL : <https://elektroniktutor.de/bauteilkunde/zdiode.html>

Abbildung 4: I-U-Kennlinie der z-Diode

Zener-Dioden werden häufig in Gegenrichtung zur Spannungsstabilisierung betrieben.

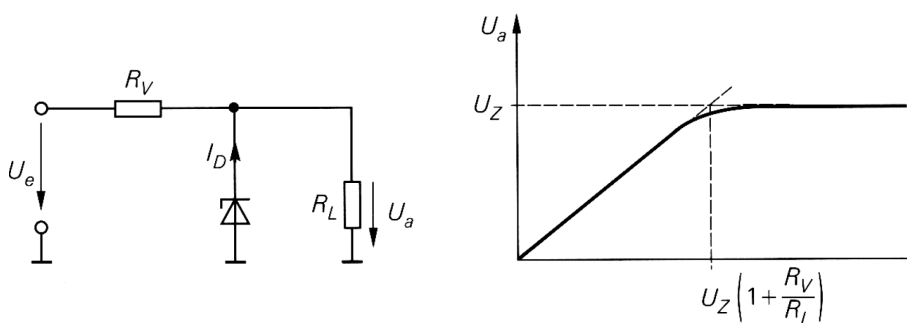


Abbildung 5: I-U-Kennlinie der z-Diode

Für den Glättungsfaktor gilt:

$$G = \frac{\Delta U_e}{\Delta U_a} \cong \frac{dU_e}{dU_a} \tag{5}$$

2 Zusammenfassung Tutorium 2

Bipolare Transistoren:

Bipolare Transistoren sind Halbleiter mit drei Anschlüssen, der Basis, dem Kollektor und dem Emittter. Die Basis-Kollektor-Diode ist bei einem npn-Transistor in Sperrichtung, die Basis-Emittter-Diode in Durchlassrichtung geschaltet.

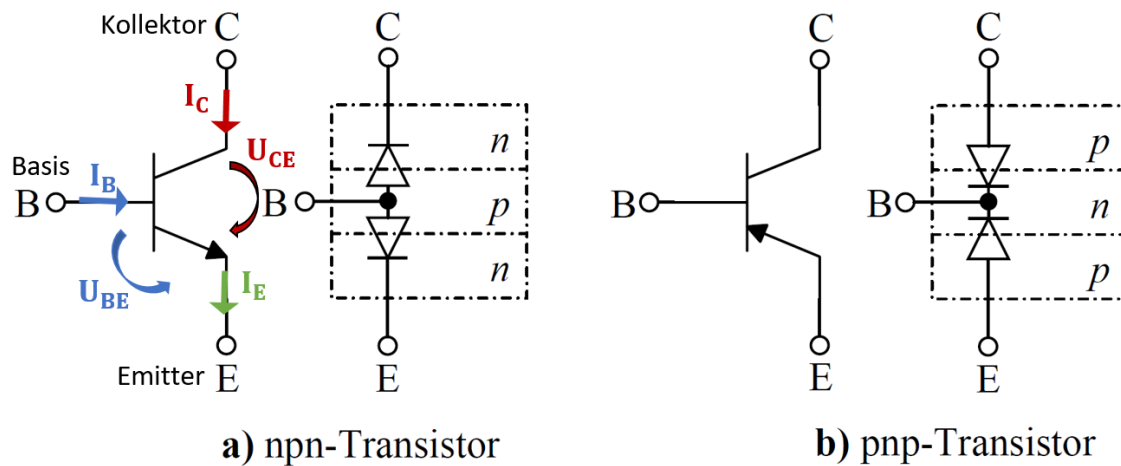


Abbildung 6: Schaltsymbol bipolarer Transistoren

Die drei Grundschaltungen, Basis-, Emittter-, und Kollektorschaltung sind in Abbildung 7 dargestellt. Der Schaltungstyp definiert sich durch einen gemeinsamen Referenzpunkt der Ein- und Ausgangsspannung.

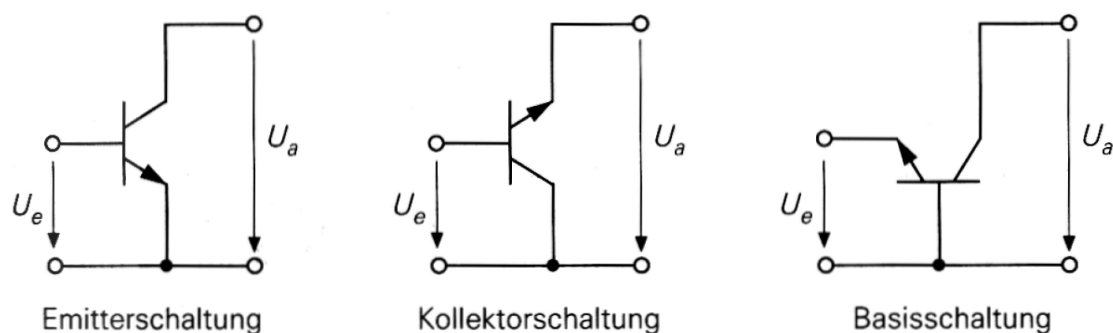


Abbildung 7: Grundschaltungen von Transistoren

bipolare Transistorkennlinien:

Der Eingang eines bipolaren Transistor weist einen nichtlinearen Kennlinienverlauf auf, welche mit der Kennlinie einer Si-Diode vergleichbar ist. Die Eingangskennlinie bzw. der Basisstrom I_B ist lediglich proportional von der Basis-Emitter-Spannung U_{BE} abhängig.

Die Ausgangskennlinie eines Transistors ist im dritten Bild der Abbildung 8 visualisiert. Der Kollektorstrom I_C ist proportional von der Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} und der Basis-Emitter-Spannung U_{BE} abhängig.

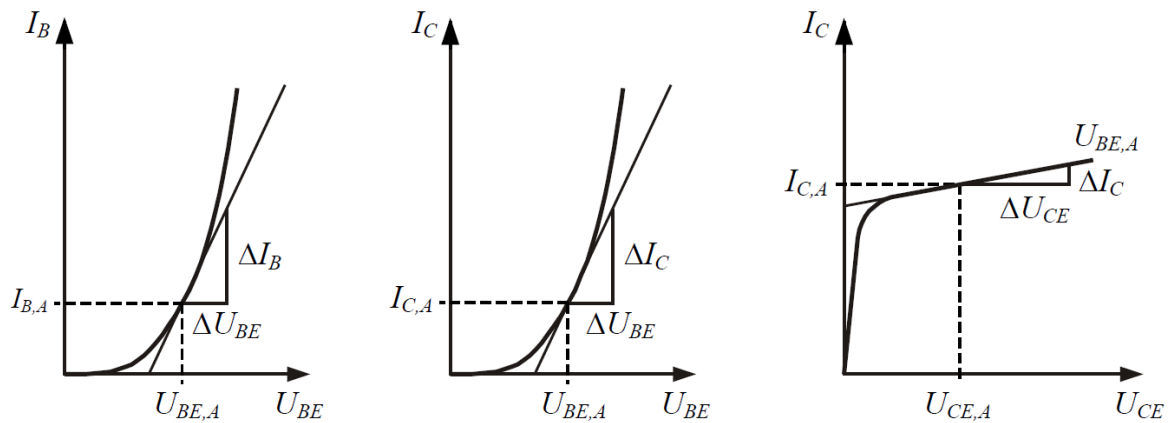


Abbildung 8: Eingangs- und Ausgangskennlinie

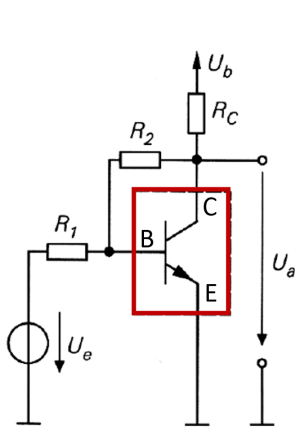
Ersatzschaltbilder:

Abbildung 9: bipolarer Transistor in Emitterschaltung

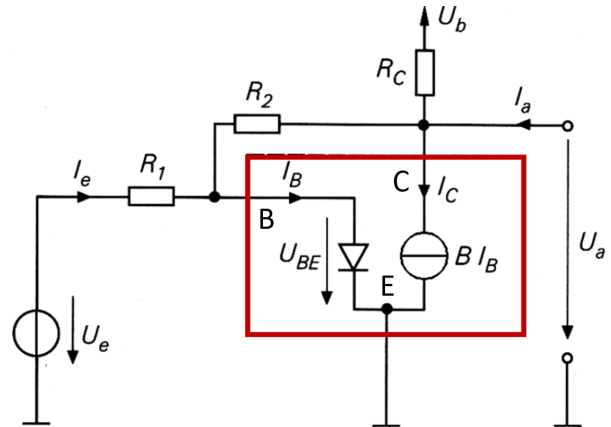


Abbildung 10: Großsignalersatzschaltbild, npn-Transistor

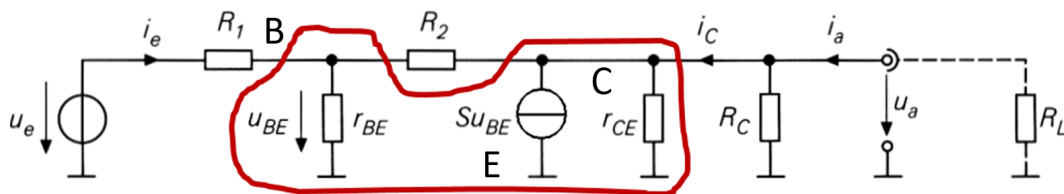


Abbildung 11: Kleinsignalersatzschaltbild, npn-Transistor

Großsignal:

Mit dem Großsignalersatzschaltbild wird der DC-Arbeitspunkt des Transistors eingestellt. Bei dieser Betrachtung wird eine Gleichspannung und Gleichstrom angenommen, wodurch Koppelkondensatoren als **Leerlauf** mit unendlich hoher Impedanz approximiert werden.

$$I_C = B \cdot I_B \quad (6)$$

Kleinsignal:

Mit dem Kleinsignalersatzschaltbild wird das Verhalten des Transistors untersucht, wenn dieser in der unmittelbaren Umgebung seines Arbeitspunktes betrieben wird. Bei dieser Betrachtung wird eine Wechselspannung angenommen, wodurch Koppelkondensatoren als Kurzschluss mit verschwindender Impedanz approximiert werden. Gleichspannungsquellen können in dem AC-Betrieb ebenfalls als **Kurzschluss** betrachtet werden. Für den differentiellen Eingangswiderstand r_{BE} sowie die Steilheit S gilt:

$$r_{BE} = \frac{\beta}{S}, \quad S = \frac{I_{C,A}}{U_T} \quad (7)$$

3 Zusammenfassung Tutorium 3

Sperrschicht-Feldeffekttransistor, JFET:

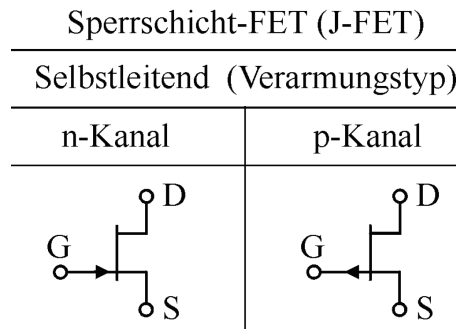


Abbildung 12: JFET Schaltsymbole

Bei einem n-Kanal JFET sind folgende Eigenschaften zu beachten:

$$U_{GS} \leq 0 \quad (8)$$

$$U_{GS} = 0 \Rightarrow I_D = I_{D,max} = I_{D0} \quad (9)$$

Die Ersatzschaltbilder des JFET sind in Abbildung 13 sowie 14 dargestellt. Im Kleinsignalerersatzschaltbild kann der differentielle Widerstand r_{DS} bei Vernachlässigung des Early-Effektes ebenfalls als Leerlauf approximiert werden.

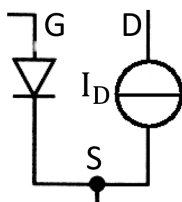


Abbildung 13: JFET-Großsignalersatzschaltbild

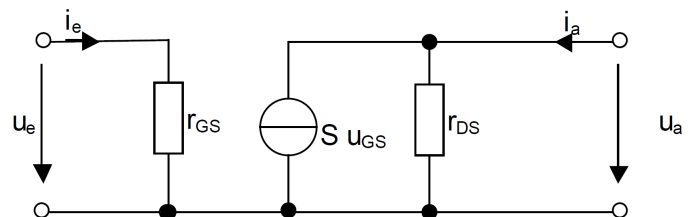


Abbildung 14: JFET-Kleinsignalerersatzschaltbild

Isolierschicht-Feldeffekttransistor, MOSFET:

Bei Isolierschicht-Feldeffekttransistoren wird zwischen n- und p-Kanal MOSFETS unterschieden. Zudem wird je nach der Richtung des Drainstroms I_D eine Unterscheidung in MOSFETS des Verarmungstyps oder des Anreicherungstyps durchgeföhrt. Die I-U-Kennlinien der verschiedenen MOSFETS sind im Skript auf Seite 84 visualisiert.

| Isolierschicht-FET (MOSFET) | | | |
|-------------------------------|---------|-----------------------------------|---------|
| Selbstleitend (Verarmungstyp) | | Selbstsperrend (Anreicherungstyp) | |
| n-Kanal | p-Kanal | n-Kanal | p-Kanal |
| | | | |

Abbildung 15: MOSFET Schaltsymbole

Ersatzschaltbilder:

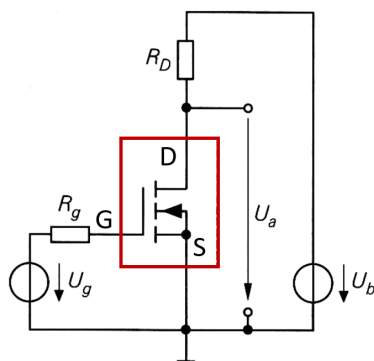


Abbildung 16: n-Kanal MOSFET, Anreicherungstyp, Sourceschaltung

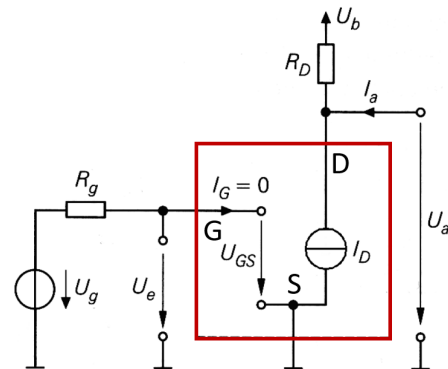


Abbildung 17: Großsignalersatzschaltbild, n-Kanal MOSFET

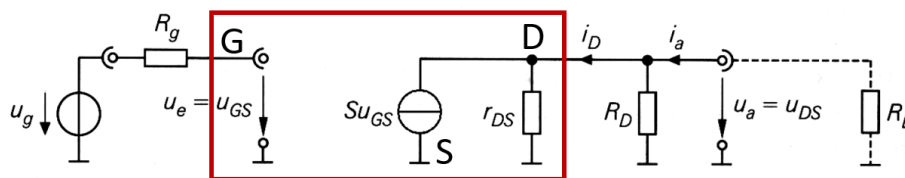


Abbildung 18: Kleinsignalersatzschaltbild, n-Kanal MOSFET

Weitere wichtige Formeln und Zusammenhänge, welche in der Formelsammlung nicht aufgeführt werden, sind:

$$S = \frac{dI_D}{dU_{GS}} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{2 \cdot I_{D0}}{U_{th}^2} \quad (11)$$

linearer Bereich: $U_{DS} \leq U_{GS} - U_{th}$

Sättigungsbereich: $U_{DS} \geq U_{GS} - U_{th}$

Early-Effekt:

Der Early-Effekt beschreibt die Abhängigkeit der Transistorkennlinie von der Drain-Source Spannung U_{DS} .

Fall 1: Der differentielle Widerstand r_{DS} konvergiert gegen einen unendlich großen Widerstandswert und kann als Leerlauf approximiert werden, wenn gilt:

$$\frac{dI_D}{dU_{DS}} = \frac{1}{r_{DS}} = 0 \quad (12)$$

In diesem Fall tritt keine Early-Spannung U_A im Kennlinienfeld auf, da sich die verlängerten Geraden der Kennlinien in keinem Punkt schneiden.

Fall 2: Der differentielle Widerstand r_{DS} konvergiert nicht gegen einen unendlich großen Widerstandswert und muss aufgrund dessen in die Berechnungen miteinbezogen werden.

$$\frac{dI_D}{dU_{DS}} = \frac{1}{r_{DS}} = \frac{I_{D,A}}{|U_A| + U_{DS,A}} \neq 0 \quad (13)$$

In diesem Fall tritt eine Early-Spannung U_A im Kennlinienfeld auf, da sich die verlängerten Geraden der Kennlinien in der Early-Spannung, auf der Koordinaten-Achse, schneiden.

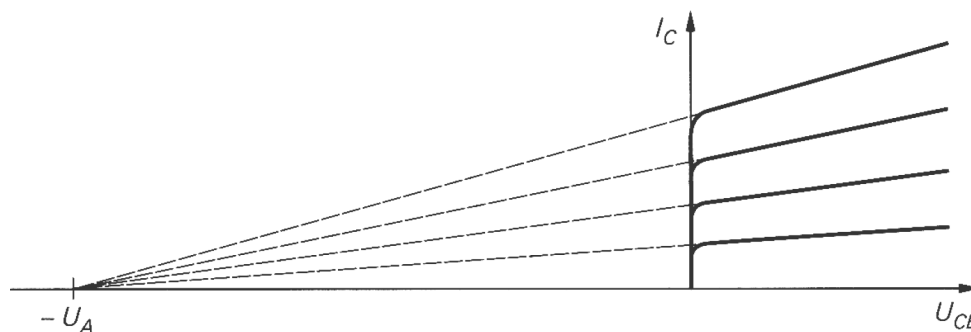


Abbildung 19: Early-Effekt mit endlichem r_{DS}

4 Zusammenfassung Tutorium 4

Ein **Operationsverstärker** ist ein aktives Bauteil, da er eine externe Spannungsversorgung ($V+$ und $V-$) benötigt. Die Ausgangsspannung U_a des OpAmp wird durch diese Spannungsversorgung begrenzt.

$$V- \leq U_a \leq V+ \quad (14)$$

Für einen idealen OpAmp gelten folgende Eigenschaften:

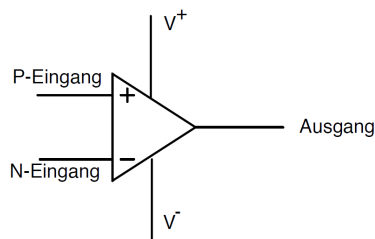


Abbildung 20: Schaltsymbol OpAmp

$$R_{ein} \rightarrow \infty, \quad R_{aus} \rightarrow 0, \quad A = \frac{U_a}{U_e} \rightarrow \infty \quad (15)$$

Bei OpAmps mit Gegenkopplung (Ausgang auf invertierenden Eingang rückgekoppelt) gelten drei **Goldene Regeln**:

- 1) die Spannungsdifferenz U_d zwischen den zwei Eingängen ist Null, $U_d = 0$
- 2) es fließt kein Strom in die Eingänge des OpAmps, $I_{in+} = I_{in-} = 0$
- 3) lege NIEMALS eine Masche durch den OpAmp

Grenzfrequenz:

Die Grenzfrequenz ist die maximale Frequenz, mit welcher man die Schaltung bei der gewünschten Schaltungsfunktion betreiben kann.

Bei mehreren Operationsverstärkern in derselben Schaltung ist der OP mit der größten Verstärkung A dominant und entscheiden für die Grenzfrequenz.

OP-Schaltungen:

Wichtige OP-Schaltungen sind der nicht-/invertierende Verstärker, der nicht-/invertierende Integrator, der nicht-/invertierende Differenzierer, der Addierer, der Subtrahierer sowie der Differenzverstärker. Die Übertragungsfunktionen und Schaltbilder sind ab Seite 110 im ES-Skript sowie im Anhang dargestellt.

5 Zusammenfassung Tutorium 5

Inverter:

In der Digitaltechnik existieren lediglich zwei Betriebszustände, der High- und der Low-Zustand. Zur Erzeugung dieser zwei Spannungspegel wird beispielsweise eine Inverterschaltung verwendet. Ihr Ausgang kann lediglich einen high oder einen low Spannungspegel annehmen.

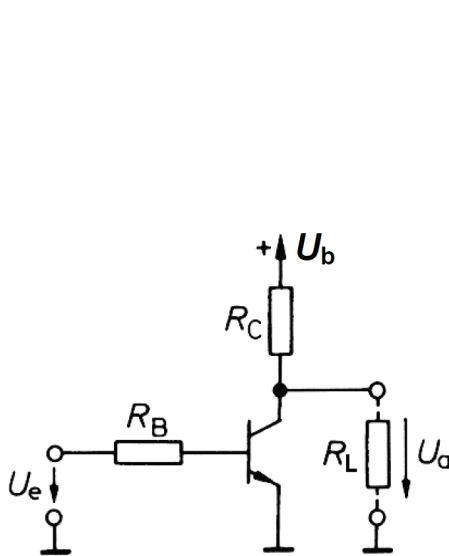


Abbildung 21: Emitter-schaltung als Inverter

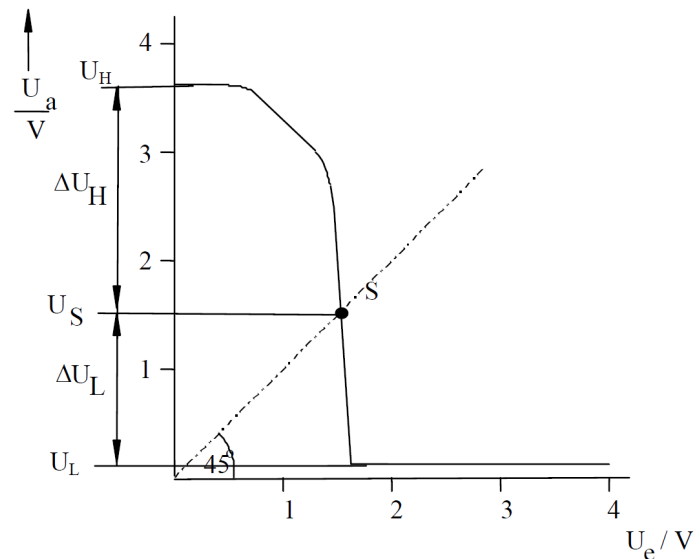


Abbildung 22: TTL-Inverter, Übertragungskennlinie

In Abbildung 22 ist die Übertragungskennlinie eines TTL-Inverters visualisiert. Der Inverter besitzt die zwei Spannungspegel U_H und U_L . Die Spannung im Schaltpunkt, U_S , ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Kennlinie mit der ersten Winkelhalbierenden. Die Einzelstörabstände ΔU_H und ΔU_L können aus der Übertragungskennlinie entnommen werden. Für sie gilt:

$$\Delta U_H = U_H - U_S \quad (16)$$

$$\Delta U_L = U_S - U_L \quad (17)$$

$$\Delta U_{ges} = \Delta U_H + \Delta U_L \quad (18)$$

Ein weiteres Merkmal von Invertoren stellen die relativen Störabstände Z_H und Z_L dar.

$$Z_H = \frac{\Delta U_H}{\Delta U_{ges}}, \quad Z_L = \frac{\Delta U_L}{\Delta U_{ges}} \quad (19)$$

Es gilt zudem der Zusammenhang: $Z_H + Z_L = 1$.

Die Verzögerungszeiten t_{pdHL} und t_{pdLH} der Vorder- und Rückflanken sind jeweils als die Zeitdifferenz definiert, bei welchem der Spannungspegel am Eingang sowie am Ausgang 50 Prozent der gesamten Spannungsdifferenz ΔU_{ges} annimmt.

Die Impulsdauer t_D ist die Zeitdifferenz zwischen den Zeitpunkten, bei welchen die steigende und die fallende Flanke den halben maximalen Spannungspegel ΔU_{ges} annehmen. Zur Berechnung der Anstiegszeit t_r und der Abfallzeit t_f wird die Differenz der Zeitpunkte herangezogen, bei welchen die Spannungsflanken 10 Prozent oder 90 Prozent der gesamten Spannungsdifferenz ΔU_{ges} annehmen. Für die Gatterlaufzeit gilt:

$$t_{pd} = \frac{t_{pdLH} + t_{pdHL}}{2} \quad (20)$$

Die Verlustleistung P des Inverters sowie dessen Steilheit S können wie folgt berechnet werden:

$$P = U_{DD} \cdot I_D \quad (21)$$

$$S = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \quad (22)$$

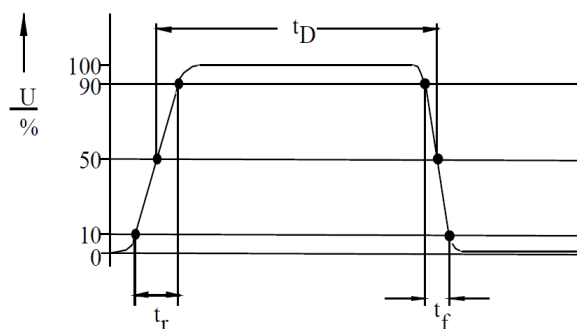


Abbildung 23: Anstiegs- und Abfallzeit

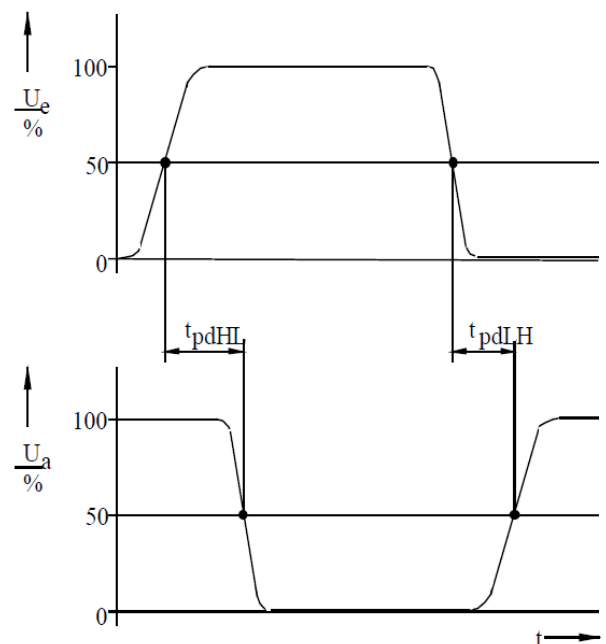


Abbildung 24: Verzögerungszeiten

6 Zusammenfassung Tutorium 6

Flip-Flops:

Eine sequentielle Logik wird mit Flip-Flops realisiert. Alle Flip-Flops können durch genormte Schaltsymbole dargestellt werden und besitzen zwei stabile Zustände. Flip-Flops werden nach ihrer Art der Ansteuerung klassifiziert und in Gruppen eingeteilt. Die verschiedenen Flip-Flop-Gruppen sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

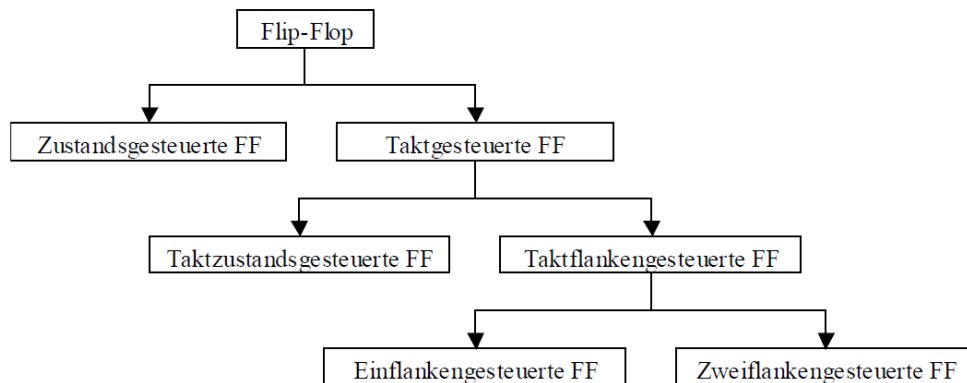


Abbildung 25: Flip-Flop-Gruppen

Der Ausgang der zustandsgesteuerten Flip-Flops ist nur vom Zustand der Eingangsspannung abhängig. Bei getakteten Flip-Flops existiert ein zusätzliches Taktsignal. Die Übernahme der Information der Eingänge erfolgt bei der Taktsteuerung nur, wenn das Taktsignal vorhanden ist. Bei taktzustandsgesteuerten Flip-Flops ist eine Änderung des Ausgangs nur möglich, wenn das Taktsignal einen high-Pegel annimmt. Taktflankengesteuerte Flip-Flops übernehmen hingegen die Information des Eingangs auf den Ausgang, wenn das Taktsignal eine Flanke bzw. einen Spannungssprung aufweist.



Abbildung 26: Taktzustandssteuerung

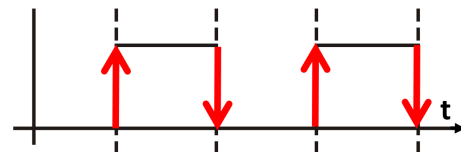


Abbildung 27: Taktflankensteuerung

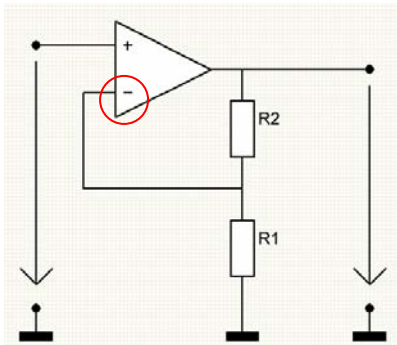
Jump-Kill-Flip-Flops:

J-K-FF besitzen eine ähnliche Funktion wie RS-FF, jedoch ohne undefinierten Ausgangszustand. Wenn am J- und am K-Eingang ein high-Pegel anliegt, wird der Zustand des Ausgangs bei jeder Ansteuerung gewechselt. Diese permanente Zustandsänderung des Ausgangs wird als Toggeln bezeichnet.

7 Anhang 1: OP-Schaltungen

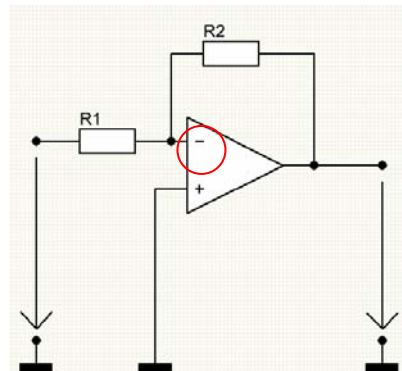
Quelle: T. Merkel. ES-Zusammenfassung, 15. Juli 2012.

Operationsverstärkerschaltungen auf einen Blick



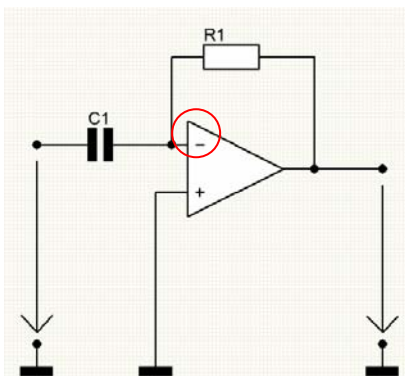
Nichtinvertierender Verstärker

$$u_a = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot u_e$$



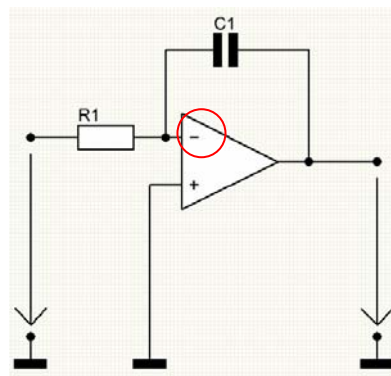
Invertierender Verstärker

$$u_a = -\frac{R_2}{R_1} \cdot u_e$$



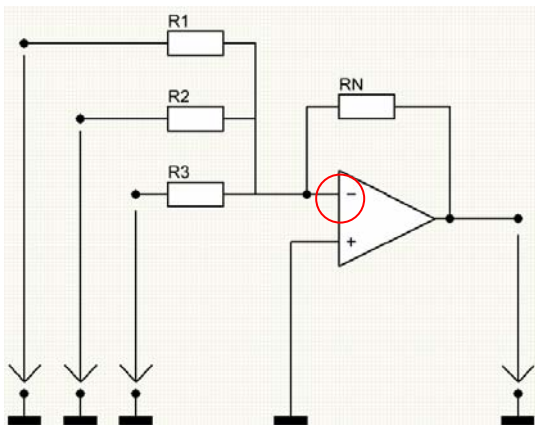
Invertierender Differenzierer

$$u_a = -R_1 \cdot C_1 \cdot \frac{du_e}{dt}$$



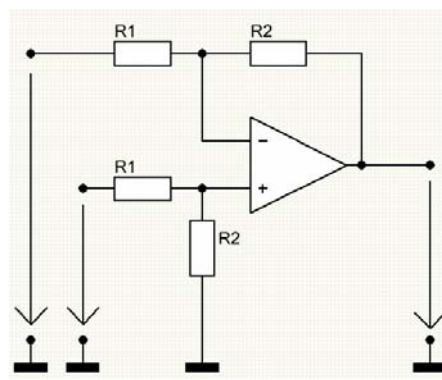
Invertierender Integrator

$$u_a = -\frac{1}{R_1 \cdot C_1} \int_0^t u_e(t) dt + u_a(t=0)$$



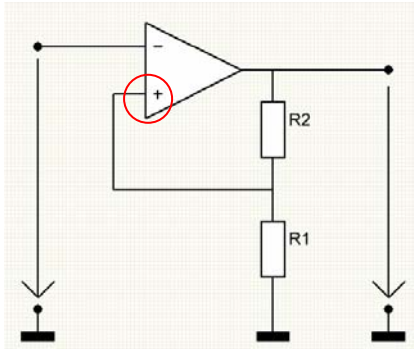
Invertierender Addierer

$$u_a = -\left(\frac{R_N}{R_1} \cdot u_{e1} + \frac{R_N}{R_2} \cdot u_{e2} + \frac{R_N}{R_3} \cdot u_{e3}\right)$$



Subtrahierer

$$u_a = \frac{R_2}{R_1} \cdot (u_{e2} - u_{e1})$$



Invertierender Schmitt-Trigger

$$u_a = \pm U_b$$

$$u_{a-} = -U_b$$

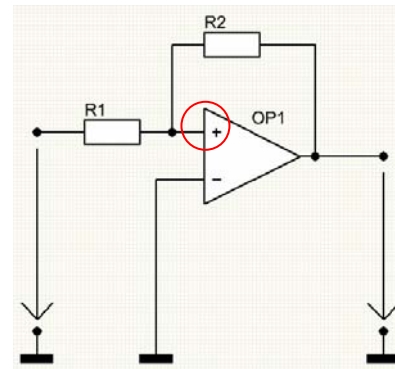
$$u_{a+} = +U_b$$

Einschaltswelle:

$$u_{ein} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_{a-}$$

Ausschaltswelle:

$$u_{aus} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_{a+}$$



Nichtinvertierender Schmitt-Trigger

$$u_a = \pm U_b$$

$$u_{a-} = -U_b$$

$$u_{a+} = +U_b$$

Einschaltswelle:

$$u_{ein} = -\frac{R_1}{R_2} \cdot u_{a-}$$

Ausschaltswelle:

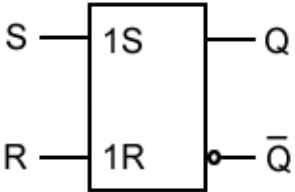
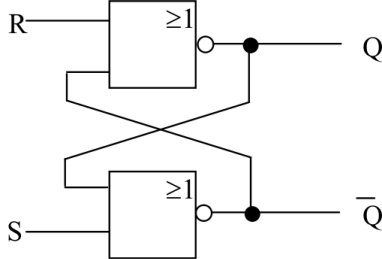
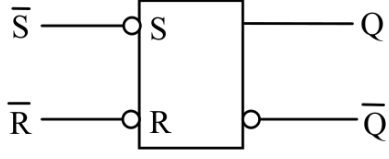
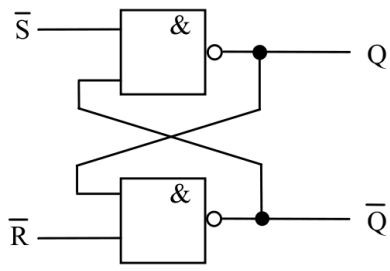
$$u_{aus} = -\frac{R_1}{R_2} \cdot u_{a+}$$

8 Anhang 2: Flip-Flops

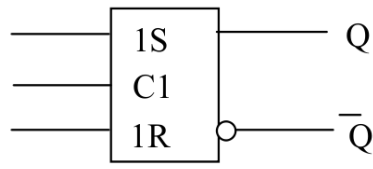
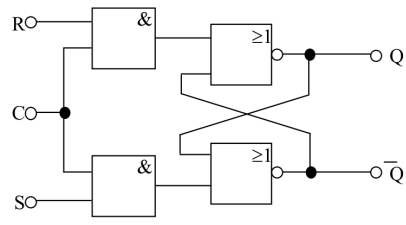
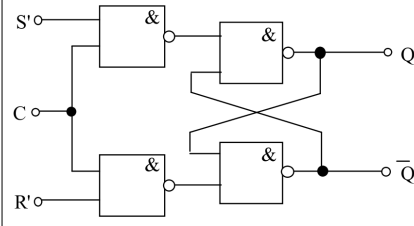
Quelle: T. Merkel. ES-Zusammenfassung, 15. Juli 2012.

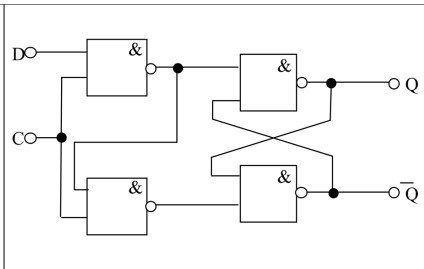
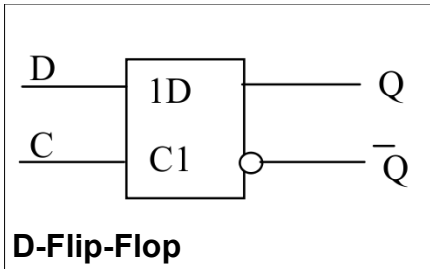
Flip-Flop Schaltungen

Zustandsgesteuerte FF

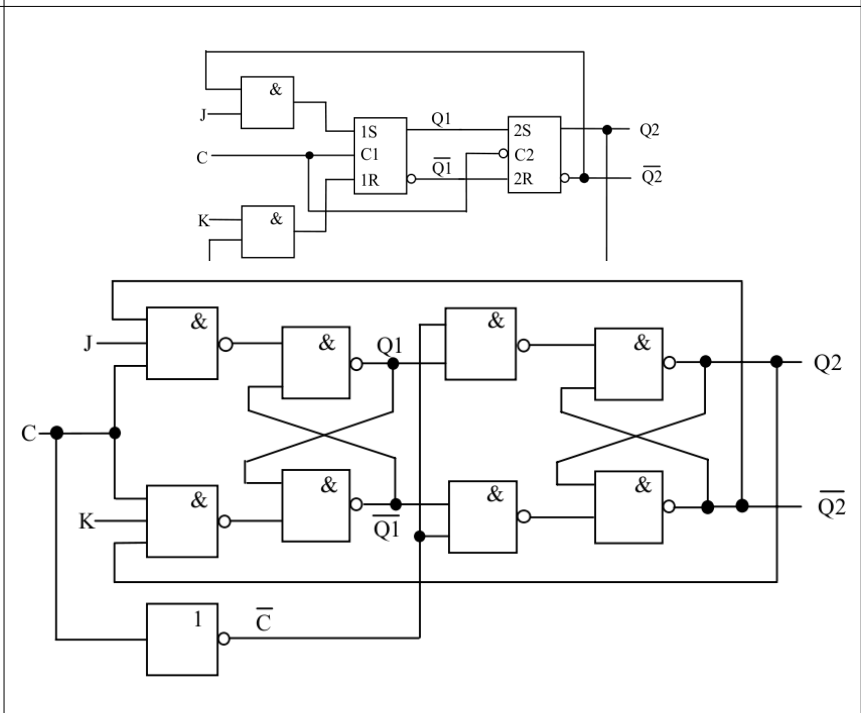
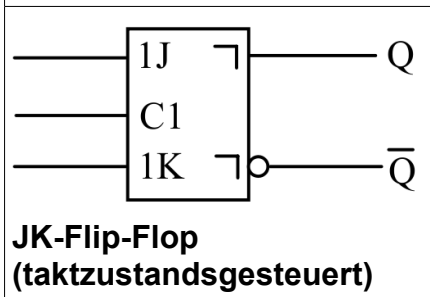
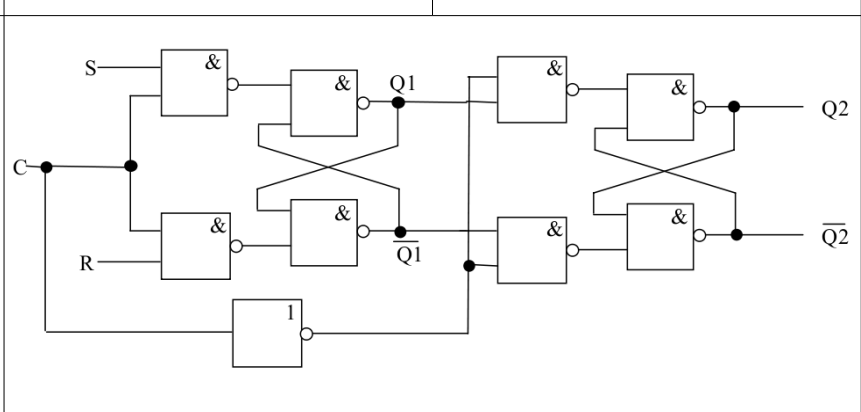
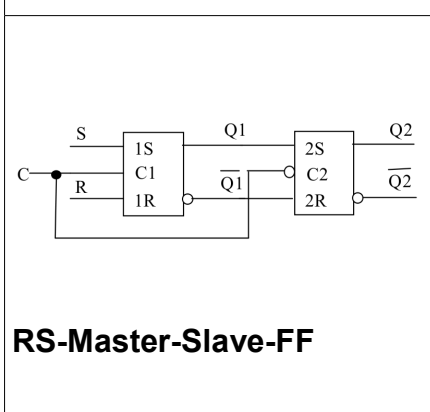
| DIN-Symbol | Schaltbild mit Log. Symb. | Wahrheitstabelle | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|---|----------------|-----------|---|-----------|---|---|----------|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----------|----------------|
|  <p>RS-Flip-Flop</p> |  | <table border="1"> <thead> <tr> <th>S</th> <th>R</th> <th>Q</th> <th>\bar{Q}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>Q_{-1}</td> <td>\bar{Q}_{-1}</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> | S | R | Q | \bar{Q} | 0 | 0 | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| S | R | Q | \bar{Q} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 1 | 0 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  <p>RS-Flip-Flop</p> |  | <table border="1"> <thead> <tr> <th>\bar{S}</th> <th>\bar{R}</th> <th>Q</th> <th>\bar{Q}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>Q_{-1}</td> <td>\bar{Q}_{-1}</td> </tr> </tbody> </table> | \bar{S} | \bar{R} | Q | \bar{Q} | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} |
| \bar{S} | \bar{R} | Q | \bar{Q} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 1 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 0 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Taktzustandsgesteuerte RS-Flipflops

|  <p>Taktzustandsgestr. RS-FF</p> |  | <table border="1"> <thead> <tr> <th>C</th> <th>S</th> <th>R</th> <th>Q</th> <th>\bar{Q}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>x</td> <td>x</td> <td>Q_{-1}</td> <td>\bar{Q}_{-1}</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>Q_{-1}</td> <td>\bar{Q}_{-1}</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> | C | S | R | Q | \bar{Q} | 0 | x | x | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | 1 | 0 | 0 | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
|--|---|--|----------|----------------|----|---|-----------|---|---|---|----------|----------------|---|---|---|----------|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C | S | R | Q | \bar{Q} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | x | x | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 0 | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| |  | <table border="1"> <thead> <tr> <th>C</th> <th>S'</th> <th>R'</th> <th>Q</th> <th>\bar{Q}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>x</td> <td>x</td> <td>Q_{-1}</td> <td>\bar{Q}_{-1}</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>Q_{-1}</td> <td>\bar{Q}_{-1}</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table> | C | S' | R' | Q | \bar{Q} | 0 | x | x | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | 1 | 0 | 0 | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| C | S' | R' | Q | \bar{Q} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | x | x | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 0 | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |



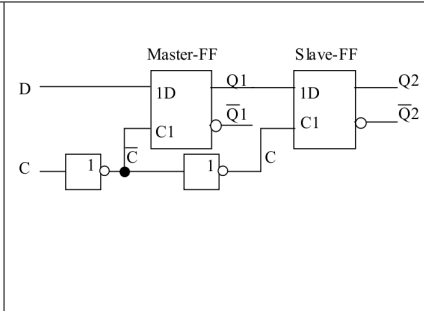
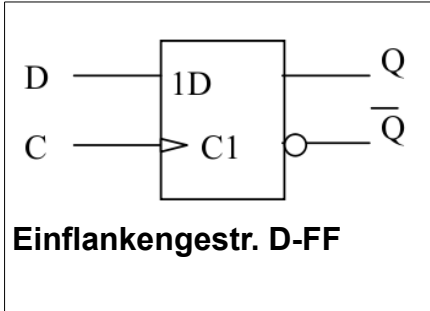
| C | D | Q | \bar{Q} |
|---|---|----------|----------------|
| 0 | x | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} |
| 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 |



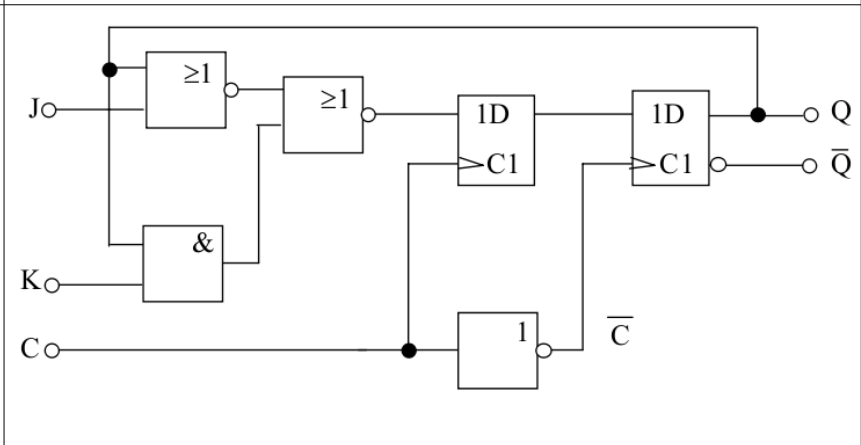
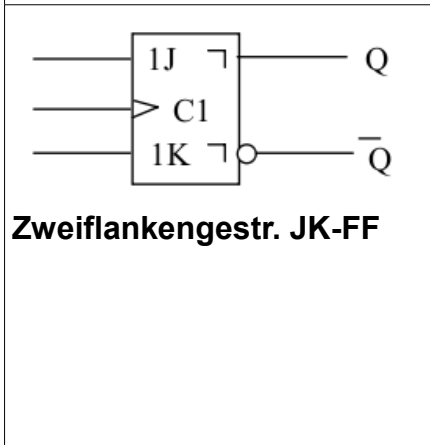
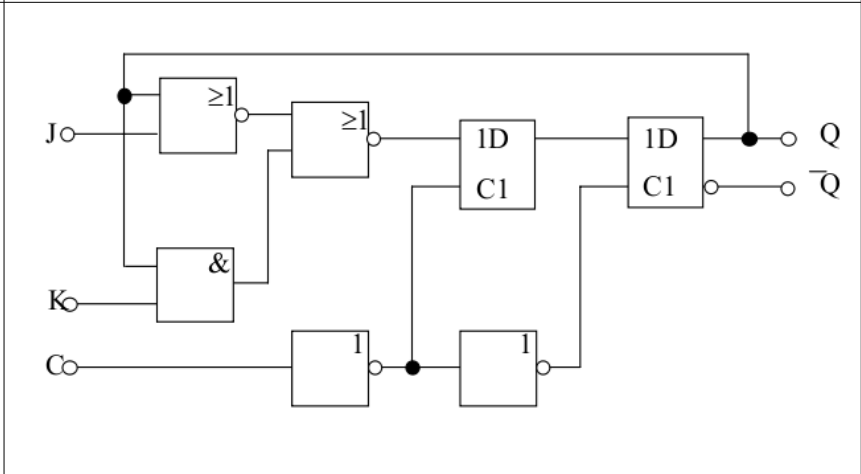
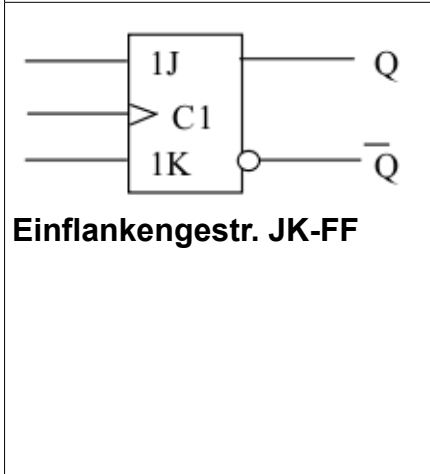
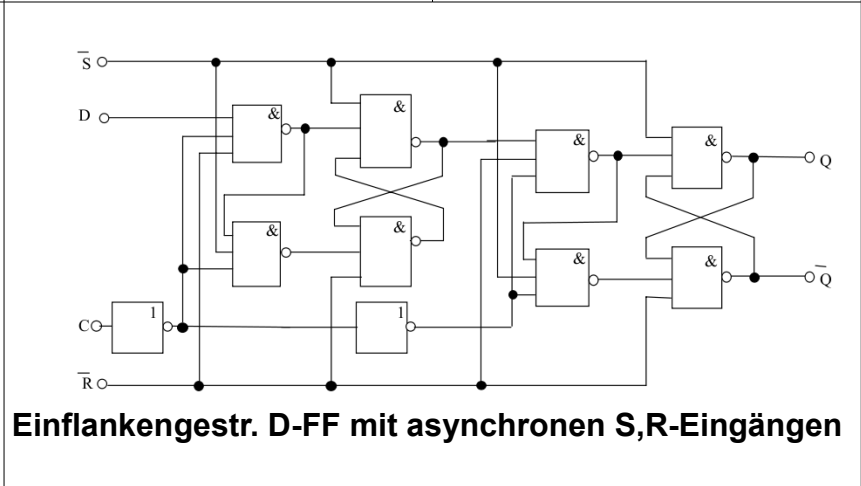
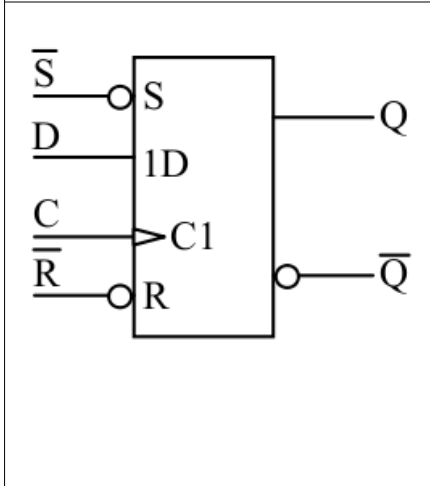
**JK-Flip-Flop
(taktzustandgesteuert)**

| C | J | K | Q | \bar{Q} |
|-----------|---|---|----------------|----------------|
| 0 | x | x | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} |
| \square | 0 | 0 | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} |
| \square | 0 | 1 | 0 | 1 |
| \square | 1 | 0 | 1 | 0 |
| \square | 1 | 1 | \bar{Q}_{-1} | Q_{-1} |

Taktflankengesteuerte Flip-flops

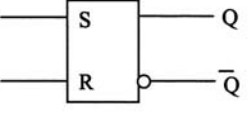
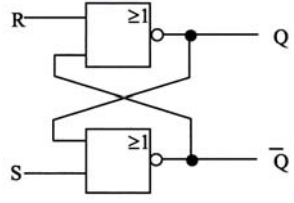
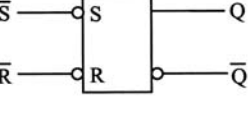
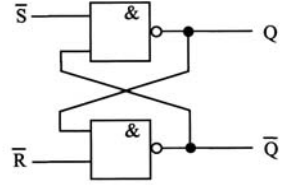
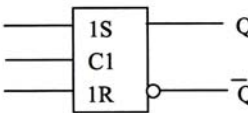
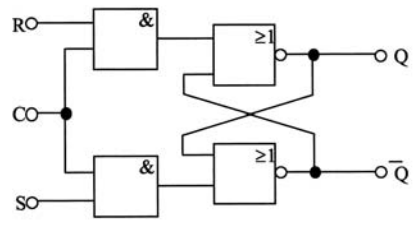
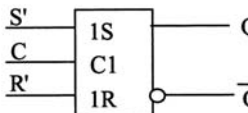
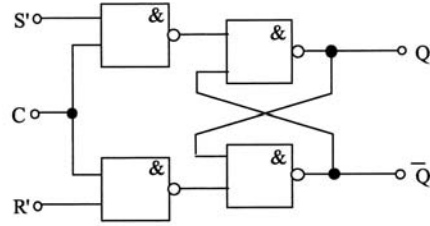


| C | D | Q | \bar{Q} |
|--------------|---|----------|----------------|
| 0 | x | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} |
| 1 | x | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} |
| \downarrow | 0 | 0 | 1 |
| \downarrow | 1 | 1 | 0 |

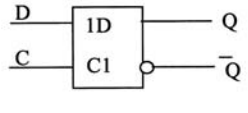
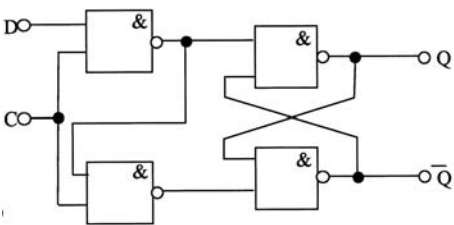
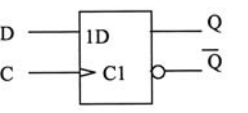
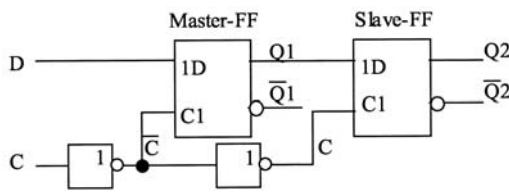


Flip-Flop-Schaltungen auf einen Blick

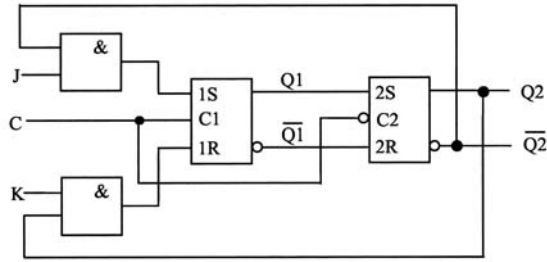
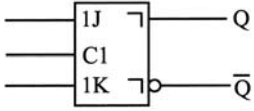
S-R-Flip-Flops

|  |  | <table border="1"> <thead> <tr> <th>S</th> <th>R</th> <th>Q</th> <th>\bar{Q}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>Q_{-1}</td> <td>\bar{Q}_{-1}</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> | S | R | Q | \bar{Q} | 0 | 0 | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | | | | | | | | | | |
|---|---|--|----------------|----------------|----|-----------|-----------|---|----------|----------------|----------|----------------|---|---|---|----------|----------------|---|---|---|----------|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| S | R | Q | \bar{Q} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 1 | 0 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | <table border="1"> <thead> <tr> <th>\bar{S}</th> <th>\bar{R}</th> <th>Q</th> <th>\bar{Q}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>Q_{-1}</td> <td>\bar{Q}_{-1}</td> </tr> </tbody> </table> | \bar{S} | \bar{R} | Q | \bar{Q} | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | | | | | | | | | | |
| \bar{S} | \bar{R} | Q | \bar{Q} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 1 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 0 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | <table border="1"> <thead> <tr> <th>C</th> <th>S</th> <th>R</th> <th>Q</th> <th>\bar{Q}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>x</td> <td>x</td> <td>Q_{-1}</td> <td>\bar{Q}_{-1}</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>Q_{-1}</td> <td>\bar{Q}_{-1}</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> | C | S | R | Q | \bar{Q} | 0 | x | x | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | 1 | 0 | 0 | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| C | S | R | Q | \bar{Q} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | x | x | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 0 | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | <table border="1"> <thead> <tr> <th>C</th> <th>S'</th> <th>R'</th> <th>Q</th> <th>\bar{Q}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>x</td> <td>x</td> <td>Q_{-1}</td> <td>\bar{Q}_{-1}</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>Q_{-1}</td> <td>\bar{Q}_{-1}</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table> | C | S' | R' | Q | \bar{Q} | 0 | x | x | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | 1 | 0 | 0 | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| C | S' | R' | Q | \bar{Q} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | x | x | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 0 | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

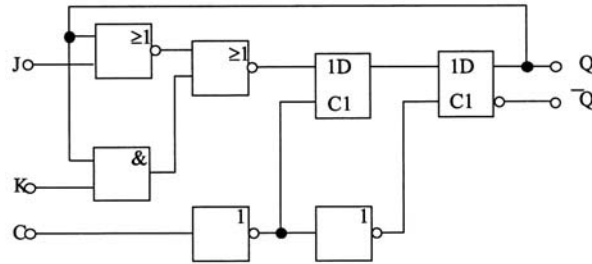
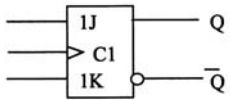
D-Flip-Flops

|  |  | <table border="1"> <thead> <tr> <th>C</th> <th>D</th> <th>Q</th> <th>\bar{Q}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>x</td> <td>Q_{-1}</td> <td>\bar{Q}_{-1}</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> | C | D | Q | \bar{Q} | 0 | x | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
|---|--|--|----------------|---|---|-----------|---|---|----------|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C | D | Q | \bar{Q} | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | x | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 0 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | <table border="1"> <thead> <tr> <th>C</th> <th>D</th> <th>Q</th> <th>\bar{Q}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>x</td> <td>Q_{-1}</td> <td>\bar{Q}_{-1}</td> </tr> <tr> <td>↑</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>↑</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> | C | D | Q | \bar{Q} | 0 | x | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | ↑ | 0 | 0 | 1 | ↑ | 1 | 1 | 0 |
| C | D | Q | \bar{Q} | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | x | Q_{-1} | \bar{Q}_{-1} | | | | | | | | | | | | | | | |
| ↑ | 0 | 0 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| ↑ | 1 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |

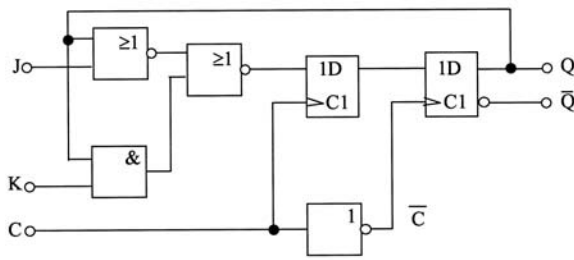
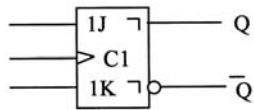
J-K-Flip-Flops



| C | J | K | Q |
|---|---|---|---------------------|
| 0 | x | x | Q_{-1} |
| 1 | 0 | 0 | Q_{-1} |
| 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | $\overline{Q_{-1}}$ |



| C | J | K | Q |
|---|---|---|---------------------|
| 0 | x | x | Q_{-1} |
| J | 0 | 0 | Q_{-1} |
| J | 0 | 1 | 0 |
| J | 1 | 0 | 1 |
| J | 1 | 1 | $\overline{Q_{-1}}$ |



| C | J | K | Q |
|---|---|---|---------------------|
| 0 | x | x | Q_{-1} |
| J | 0 | 0 | Q_{-1} |
| J | 0 | 1 | 0 |
| J | 1 | 0 | 1 |
| J | 1 | 1 | $\overline{Q_{-1}}$ |

9 Anhang 3: ES Formelsammlung

Formelsammlung zur Klausur "Elektronische Schaltungen"

E 24 – Reihe: |1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,5 | 1,6 | 1,8 | 2,0 | 2,2 | 2,4 | 2,7 | 3,0 | 3,3 | 3,6 | 3,9 | 4,3
| 4,7 | 5,1 | 5,6 | 6,2 | 6,8 | 7,5 | 8,2 | 9,1|

Diode:

$$I = I_S \cdot \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) \quad \text{mit} \quad U_T = \frac{k_B \cdot T}{e}$$

Spannungsverstärkung und Ausgangswiderstand gelten bei Leerlauf am Ausgang

Bipolarer Transistor:

$$\text{Steilheit: } S = \frac{\partial I_C}{\partial U_{BE}} = \frac{I_{C,A}}{U_T}$$

$$\text{Kleinsignal-Eingangs-Widerstand: } r_{BE} = \frac{\beta}{S}$$

a) Emitterschaltung

$$\text{Kleinsignal-Spannungsverstärkung: } A = -S \cdot R_C$$

$$\text{Kleinsignal-Eingangswiderstand: } r_e = r_{BE}$$

$$\text{Kleinsignal-Ausgangswiderstand: } r_a = \left. \frac{\partial u_a}{\partial i_a} \right|_A = R_C$$

b) Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung

$$\text{Kleinsignal-Spannungsverstärkung: } A = \left. \frac{u_a}{u_e} \right|_{i_a=0} \approx -\frac{SR_C}{1 + SR_E} \stackrel{SR_E \gg 1}{\approx} -\frac{R_C}{R_E}$$

$$\text{Kleinsignal-Eingangswiderstand: } r_e = \frac{u_e}{i_e} \approx r_{BE} + \beta R_E = r_{BE} (1 + SR_E)$$

$$\text{Kleinsignal-Ausgangswiderstand: } r_a = \frac{u_a}{i_a} \approx R_C$$

c) Kollektorschaltung

$$\text{Kleinsignal-Spannungsverstärkung: } A = \left. \frac{u_a}{u_e} \right|_{i_a=0} \approx \frac{SR_E}{1 + SR_E} \stackrel{SR_E \gg 1}{\approx} 1$$

$$\text{Kleinsignal-Eingangswiderstand: } r_e = \left. \frac{u_e}{i_e} \right|_{i_a=0} \approx r_{BE} + \beta \cdot R_E \stackrel{SR_E \gg 1}{\approx} \beta \cdot R_E$$

$$\text{Kleinsignal-Ausgangswiderstand: } r_a = \frac{u_a}{i_a} \approx R_E \parallel \left(\frac{R_g}{\beta} + \frac{1}{S} \right)$$

d) Basisschaltung

Kleinsignal-Spannungsverstärkung: $A = \frac{u_a}{u_e} \Big|_{i_a=0} \approx \frac{\beta \cdot R_C}{r_{BE} + R_{BV}} \stackrel{r_{BE} \gg R_{BV}}{\approx} SR_C$

Kleinsignal-Eingangswiderstand: $r_e = \frac{u_e}{i_e} \approx R_E \parallel \left(\frac{1}{S} + \frac{R_{BV}}{\beta} \right) \stackrel{r_{BE} \gg R_{BV}}{\approx} R_E \parallel \frac{1}{S} \stackrel{R_E \rightarrow \infty}{\approx} \frac{1}{S}$

Kleinsignal-Ausgangswiderstand: $r_a = \frac{u_a}{i_a} \approx R_C$

Sperrschicht-Feldeffekttransistoren, selbstleitende Isolierschicht-Feldeffekttransistoren:

Eingangskennlinie: $I_D = I_{D0} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{th}} \right)^2 \Rightarrow I_D = \frac{I_{D0}}{U_{th}^2} (U_{GS} - U_{th})^2$

Steilheitskoeffizient: $\beta = 2 \cdot \frac{I_{D0}}{U_{th}^2}$

**Ohne Early-Effekt:
Drainstrom**

Linearer Bereich: $I_D = \beta \left[(U_{GS} - U_{th}) \cdot U_{DS} - \frac{(U_{DS})^2}{2} \right]$

(ohmscher Bereich)

Sättigungsbereich: $I_D = \frac{1}{2} \beta \cdot (U_{GS} - U_{th})^2$

(Arbeitsbereich)

Steilheit: $S = \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} = \beta (U_{GS} - U_{th})$

**Mit Early-Effekt:
Drainstrom:**

Linearer Bereich: $I_D = \beta \left[(U_{GS} - U_{th}) \cdot U_{DS} - \frac{(U_{DS})^2}{2} \right] \cdot \left(1 + \frac{U_{DS}}{U_A} \right)$

(ohmscher Bereich)

Sättigungsbereich: $I_D = \frac{1}{2} \beta \cdot (U_{GS} - U_{th})^2 \cdot \left(1 + \frac{U_{DS}}{U_A} \right)$

(Arbeitsbereich)

Steilheit: $S = \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} = \beta (U_{GS} - U_{th}) \cdot \left(1 + \frac{U_{DS}}{U_A} \right)$

Selbstsperrende Isolierschicht- Feldeffekttransistoren:

$$\text{Steilheitskoeffizient: } \beta = \mu_n C'_{ox} \frac{W}{l} = \mu_n \cdot \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{ox}}{t_{ox}} \cdot \frac{W}{l}$$

Alle Feldeffekttransistoren:**Source-Schaltung:**

$$\text{Kleinsignal-Spannungsverstärkung: } A = \left. \frac{u_a}{u_e} \right|_{i_a=0} = -S(R_D \parallel r_{DS}) \stackrel{r_{DS} \gg R_D}{\approx} -SR_D$$

$$\text{Kleinsignal-Eingangswiderstand: } r_e = \frac{u_e}{i_e} = \infty$$

$$\text{Kleinsignal-Ausgangswiderstand: } r_a = \frac{u_a}{i_a} = R_D \parallel r_{DS} \stackrel{r_{DS} \gg R_D}{\approx} R_D$$

Source-Schaltung mit Stromgegenkopplung:

$$\text{Kleinsignal-Spannungsverstärkung: } A = \left. \frac{u_a}{u_e} \right|_{i_a=0} = -\frac{SR_D}{1 + SR_S} \stackrel{SR_S \gg 1}{\approx} -\frac{R_D}{R_S}$$

$$\text{Kleinsignal-Eingangswiderstand: } r_e = \infty$$

$$\text{Kleinsignal-Ausgangswiderstand: } r_a = \frac{u_a}{i_a} \approx R_D$$

Drain-Schaltung:

$$\text{Kleinsignal-Spannungsverstärkung: } A = \left. \frac{u_a}{u_e} \right|_{i_a=0} \approx \frac{SR_S}{1 + (S + S_B)R_S} \stackrel{u_{BS}=0}{=} \frac{SR_S}{1 + SR_S}$$

$$\text{Kleinsignal-Eingangswiderstand: } r_e = \left. \frac{u_e}{i_e} \right|_{i_a=0} = \infty$$

$$\text{Kleinsignal-Ausgangswiderstand: } r_a = \frac{u_a}{i_a} \approx \frac{1}{S} \parallel \frac{1}{S_B} \parallel R_S \stackrel{u_{BS}=0}{=} \frac{1}{S} \parallel R_S$$

Gate-Schaltung:

$$\text{Kleinsignal-Spannungsverstärkung: } A = \left. \frac{u_a}{u_e} \right|_{i_a=0} \approx (S + S_B)R_D \stackrel{u_{BS}=0}{=} SR_D$$

$$\text{Kleinsignal-Eingangswiderstand: } r_e = \left. \frac{u_e}{i_e} \right|_{i_a=0} \approx \frac{1}{S + S_B} \stackrel{u_{BS}=0}{=} \frac{1}{S}$$

$$\text{Kleinsignal-Ausgangswiderstand: } r_a = \frac{u_a}{i_a} \approx R_D$$

Differenzverstärker

$$A_G \approx -\frac{R_C}{2R_E}$$

$$A_D \approx +\frac{1}{2}SR_C$$

Operationsverstärker

e-Funktionsgenerator: $u_a = R_N I_{CS} e^{-\frac{u_e}{U_T}}, u_e < 0$

Logarithmierer: $u_a = -U_T \ln 10 \cdot \log \frac{u_e}{I_{CS} R_1}, u_e > 0$

Instrumentationsverstärker: $u_a = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) \cdot (u_{e2} - u_{e1})$

Kondensator

Ladevorgang eines Kondensators:

Halbwertszeit: $t = \ln(2) \cdot \tau$

Gesamtladezeit: $t = 5 \cdot \tau$