

## Transistor als Schalter Intro

### Quellenhinweis

Grundlagen:

[1] <https://www.elektroniktutor.de/analogverstaerker/schaltrr.html>

- Allgemeines
- Betriebsarten
- Schaltvorgänge/Schaltzeiten
- Schalten einer ohmschen Last

Weiterführend:

[2] <https://www.elektronik-kompodium.de/public/schaerer/powsw1.htm>

Kapitel 2, Schalten mit npn und pnp Transistoren

- Spannungsteiler an der Basis

[3] <http://www.controllersandpcs.de/lehrarchiv/pdfs/elektronik/Transistorschaltungen.pdf>

- Schaltstufe mit Spannungsteiler

[4] Klaus Beuth, Elektronik 3, Grundsaltungen

- Schalten einer kapazitiven und induktiven Last

### Betriebsarten

Während Transistoren in Verstärkerschaltungen in einem definierten Arbeitspunkt arbeiten, wechseln sie im Schaltbetrieb zwischen den zwei Arbeitspunkten gesperrt (A1) und voll leitend (A3) hin und her (siehe Abb 1).

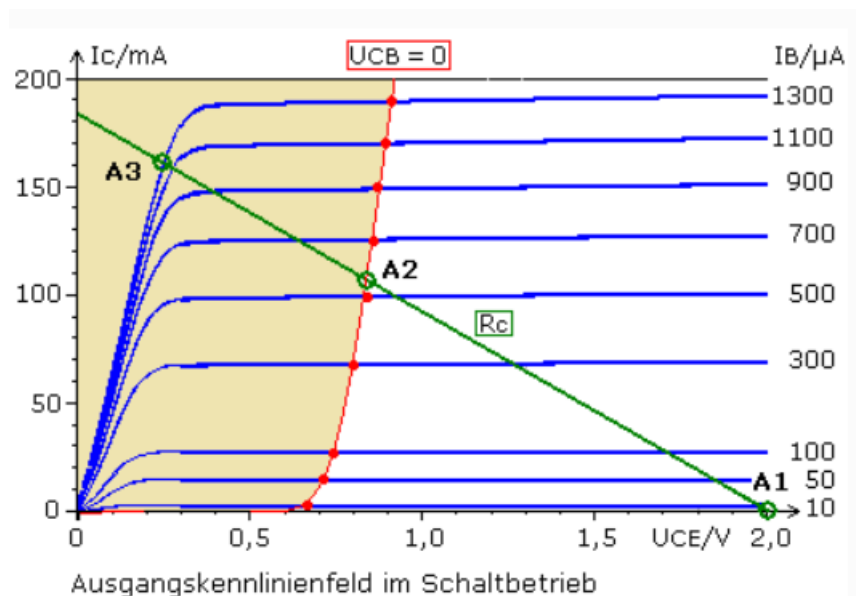


Abb 1: Arbeitspunkte im Schalterbetrieb des Transistors

Was kann zu den jeweiligen Bereichen gesagt werden? Studiere den entsprechenden Absatz im online Skriptum [1]. Die Durchsprache erfolgt im Unterricht.

**Sperrbereich** **A1**

**Aktiver Bereich** **A1 - A2 (nicht übersteuerter Bereich)****Sättigungszustand** **A2****Übersteuerter Zustand A3**

Wie ist der Übersteuerungsfaktor definiert?

$$I_{B0} = I_C / \beta \text{ daraus folgt } I_B = \ddot{u} \cdot I_{B0}$$

Dieser Faktor ist wählbar, Annahme  $\ddot{u} = 3 \dots 5$

**Schaltvorgänge des Transistors**

Als einführendes Beispiel sollte ein einfacher Transistorschalter betrachtet werden. Studiere dazu den Absatz „Schaltvorgänge am unbelasteten Transistorschalter“ in der Onlinedokumentation [1].

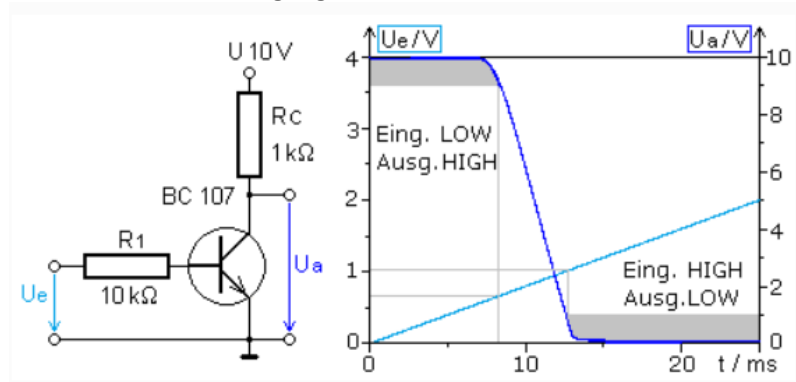


Abb 2: Einfacher Transistorschalter mit Basisvorwiderstand

**Beispiel 1:**

Dimensionierung eines npn Transistorschalters mit Basisvorwiderstand (siehe Abb 2).

Dazu sollte die Bedeutung des Begriffes „Übersteuerungsfaktor“ bereits geläufig sein (siehe Betrieb im übersteuerten Zustand). Annahme:  $\ddot{u} = 1$

Anbei eine grobe Beispielrechnung aus der Online-Doku. Was kann verbessert werden?

$$R_C = \frac{U}{I_C} = \frac{10V}{10mA} = 1k\Omega$$

$$I_{B0} = \frac{I_C}{\beta} = \frac{10mA}{200} = 50\mu A \text{ mit } I_B = \ddot{u} I_{B0}$$

$$R_1 = \frac{U_{e\min} - U_{BE}}{I_B} = \frac{1,25V - 0,7V}{50\mu A} = 11k\Omega$$

**Beispiel 2:**

Berechne selbständig den Widerstand R1 mit  $\ddot{u} = 5$ . Berücksichtige  $U_{CE,SAT}$  des Transistors.

**Beispiel 3:**

Dimensionierung einer Schalterstufe zur Ansteuerung eines Buck Converters.

Die Angabe zu dieser Aufgabenstellung ist in den Arbeitsunterlagen zu finden. Berechne R1, R2, R3.

Nach der erfolgten Dimensionierung zeige in einer Arbeitspunktsimulation (.op) bei Ansteuerung mit  $U_{ST} = 5V$  die Bestätigung der Annahmen aus der Berechnung.

Zeige in einer transienten Simulation (.trans) das Schaltverhalten der Stufe. Als Steuerspannung verwende ein Rechtecksignal 5V/1kHz.

Zeige den Signalverlauf der Transistorgrößen  $I_C$ ,  $I_B$ ,  $U_{BE}$ ,  $U_{CE}$ .

Zeige in einem eigenen „Plot-Pane“ den Vergleich von  $U_{ST}$  zu  $U_{BE}$  des Transistors T2. Was fällt Dir dabei auf?

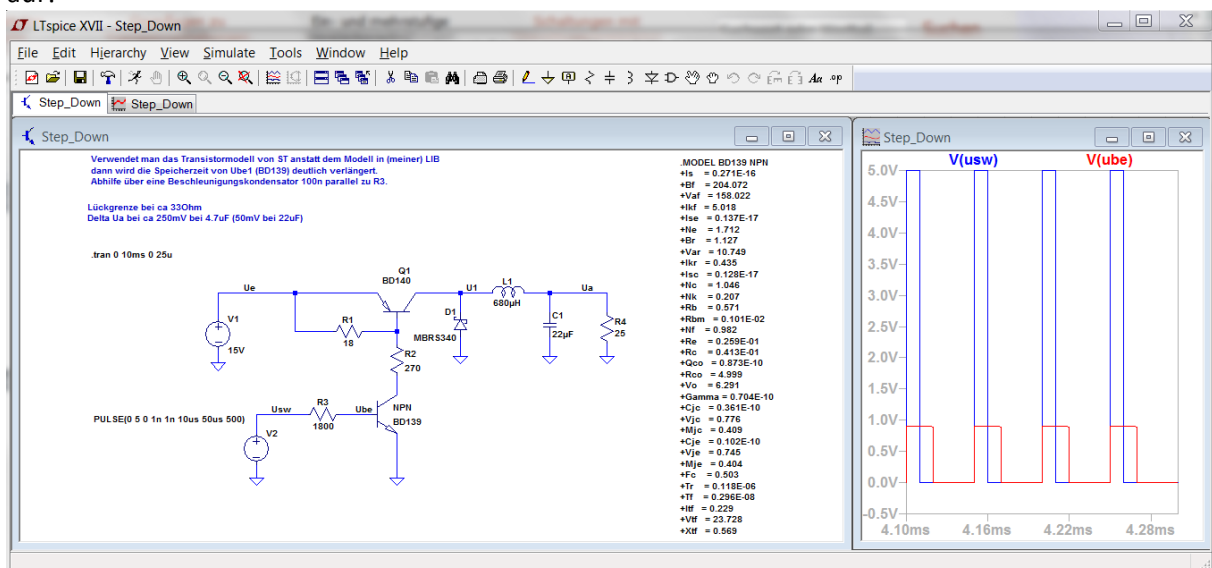


Abb 3: Schalterstufe eines Buck Converters. Deutlich zu sehen ist die Ausschaltverzögerung am NPN Transistor.

Es zeigt sich im Simulationsergebnis sehr deutlich eine Ausschaltverzögerung zwischen  $U_{ST}$  und  $U_{BE}$ . Begründe das Schaltverhalten mit Hilfe der Grundlagen aus dem nachfolgenden Kapitel „Schaltzeiten“.

## Schaltzeiten des Transistors

Studiere das Kapitel „Schaltzeiten des Transistors als Schalter“ unter dem Link Grundlagen [1]. Die Durchsprache erfolgt im Unterricht.

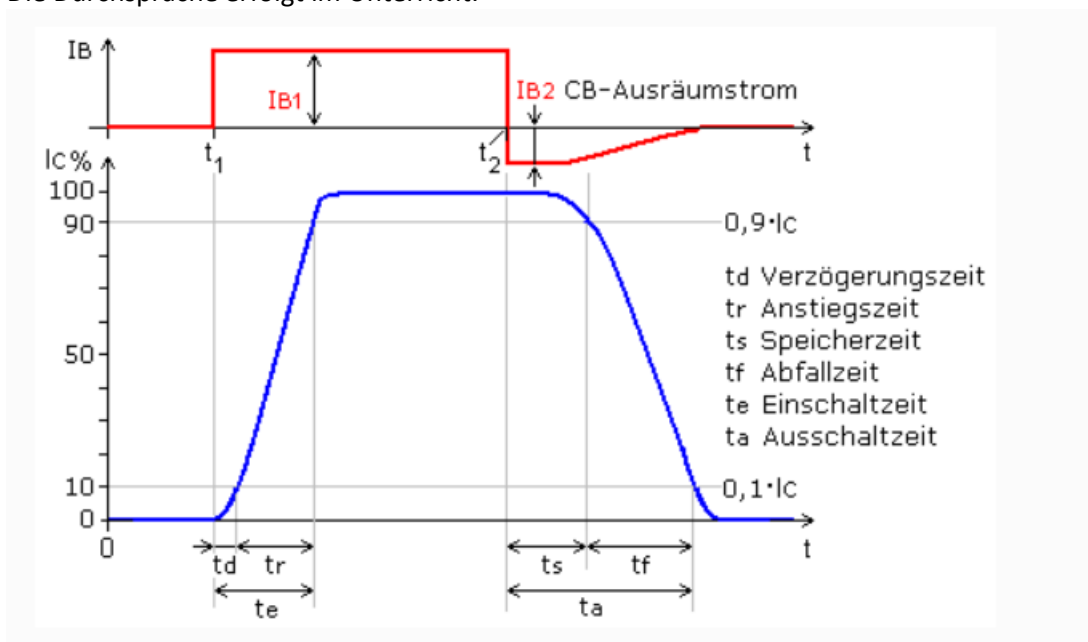
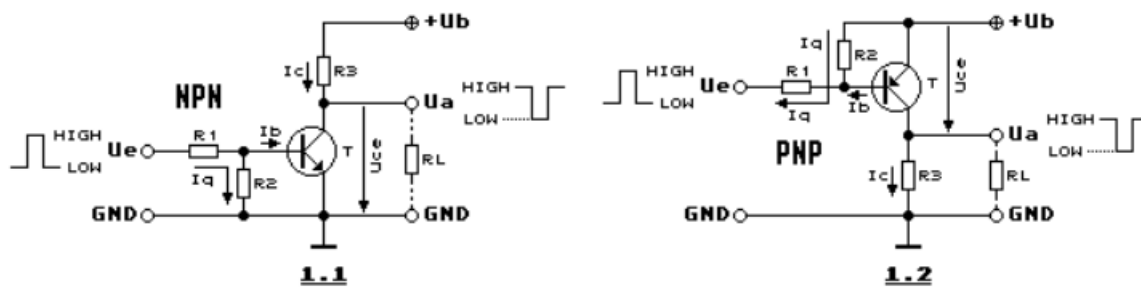


Abb 4: Ein- und Ausschaltverhalten einer einfachen Transistorschalterstufe.

## Massnahmen zur Verbesserung des Schaltverhaltens

### Eingangsspannungsteiler

Eine Schaltungsvariante ist es die Eingangsspannung über einen Spannungsteiler  $R_1$ ,  $R_2$  zu führen.



#### Beispiel 4:

Studiere die Literaturangabe [2], [3] unter dem Link „Weiterführend“ und beantworte die nachfolgenden Fragen.

- 1) Warum wird ggf ein Spannungsteiler für die Eingangsspannung verwendet?  
Dafür gibt es drei Argumente: a), b), c)
- 2) Wie ist das Verhältnis von Basisstrom  $I_B$  und dem Querstrom  $I_Q$  durch  $R_1$  und  $R_2$ ?
- 3) Welche Schaltschwelle  $U_{e, \text{ein}}$  für den Transistor ergibt sich bei Verwendung eines Spannungsteilers? Leite die Berechnung her.
- 4) Dimensioniere obiges Beispiel 1 mit Spannungsteiler für  $U_e$ , Berechne die Einschaltsschwelle.

### Speed-up Kondensator

Damit der Transistor schnell einschaltet, muß ihm ein kräftiger Basisstrom zugeführt werden. Andererseits ist dafür zu sorgen, daß beim Ausschalten die Basiszone schnell ausgeräumt wird. Ein Ansatz: den Basisspannungsteiler so dimensionieren, daß der Transistor "gerade mal" in Sättigung betrieben wird (wenn die Verlustleistung nicht allzu hoch ist, könnte sogar ein Arbeitspunkt im aktiven (linearen) Bereich eingestellt werden), und den kräftigen Stromstoß beim Einschalten über einen Kondensator zuführen (Speedup-Kondensator).

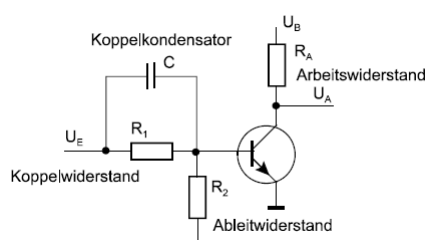


Abb 5: Textauszug aus der Internetquelle unter [3].

Eine solche Schaltungsvariante ist in Abb 9 zu sehen. Die Entladezeit des Speed-up Kondensators ist zu beachten.

## Schalten einer kapazitiven Last

Nähere Erläuterungen sind unter dem Lehrbuch Grundsaltungen, Kap 5.4 [4] zu entnehmen.

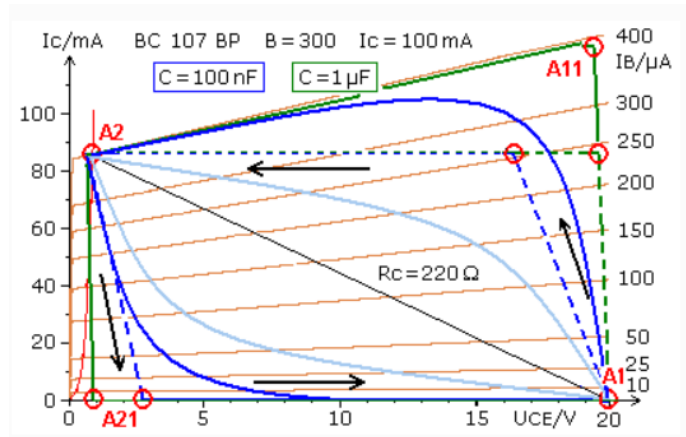


Abb 6: Schaltverhalten eines Transistors bei kapazitiver Last.

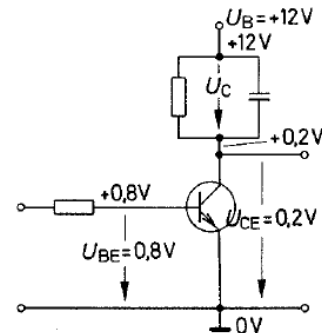


Bild 5.23 Transistor-Schalterstufe mit Spannungsangaben für den Sättigungszustand

### Anmerkungen zum Schaltverhalten.

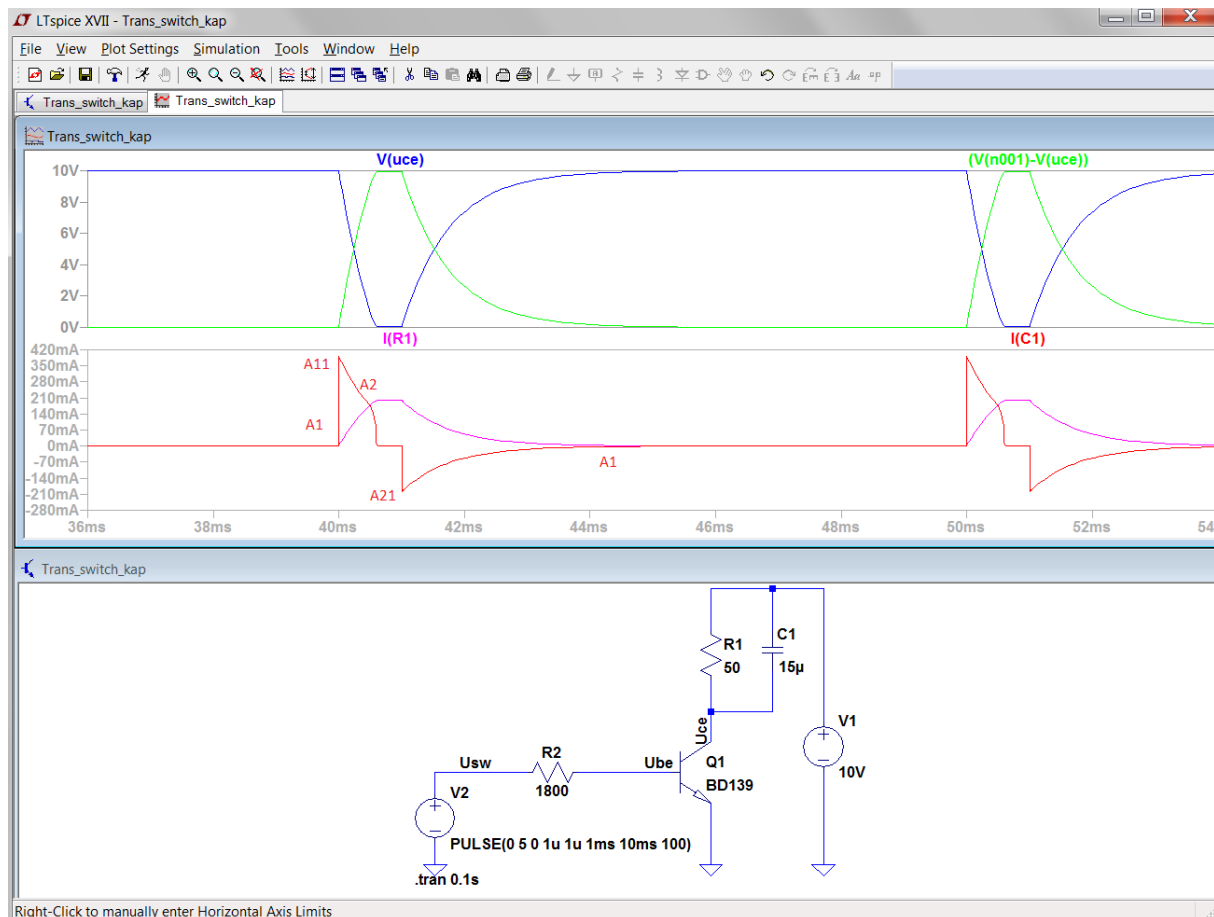
- 1) Die Schaltung ist bereits auf einen bestimmten Basisstrom dimensioniert ( $I_{B1} = 400\mu A$ ). Der Transistor ist gesperrt, und hat den Arbeitspunkt A1 im Kennlinienfeld.
- 2) Zum Zeitpunkt  $t_0$  wird ein Basisstrom  $I_{B1}$  in die Schalterstufe eingespeist ( $\ddot{u} > 1$ ). Der Kondensator ist ungeladen, der Widerstand gleich Null. Der Strom steigt senkrecht zum Punkt A11, wo die Kennlinie für konstanten Basisstrom erreicht wird.
- 3) Der Arbeitspunkt A11 wird, mit zunehmender Aufladung des Kondensators, und sinkender Spannung  $U_{CE}$ , in Richtung in Richtung A2 verlassen. Hier ist der AP für den Sättigungszustand erreicht.  $I_C$  fließt nur noch über den Widerstand.
- 4) Zum Zeitpunkt  $t_1$  beginnt das Schalten in den Sperrzustand. Der Transistor ist bereits gesperrt, während der Kondensator noch auf  $U_C$  geladen ist. Die Spannung  $U_{CE}$  kann nicht ansteigen und "muss" auf  $U_{CE,SAT}$  verharren (AP21).
- 5) Der Kondensator entlädt sich nachfolgend über  $R_C$  und  $U_{CE}$  kann ansteigen. Es gilt zu jedem Zeitpunkt  $U_B = U_{CE} + U_C$ . Der AP bewegt sich entlang der Kennlinie für  $I_B = 0$  zurück nach A1.

### Aufgabe:

Eigenstudium der Literaturangabe aus Beuth3

Vorbereitung der Simulation eines Transistorschalters mit kapazitiver Last.

Transistor BD139,  $B=100$ ,  $I_C = 100mA$



## Schalten einer induktiven Last

Nähere Erläuterungen sind aus dem Lehrbuch Grundsaltungen, Kap 5.2 [4] zu entnehmen.

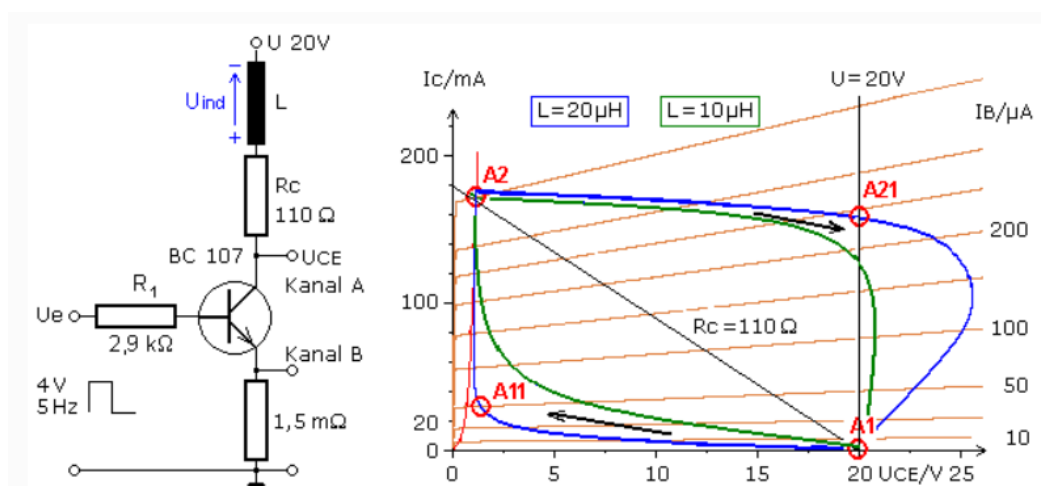


Abb 7: Schaltverhalten eines Transistors bei induktiver Last.

### Anmerkungen

- 1) Die Schaltung ist wiederum so dimensioniert, sodass ein bestimmter Basisstrom eingestellt ist ( $I_{B1} = 400\mu A$ ). Der Transistor ist gesperrt, und hat den Arbeitspunkt A1 im Kennlinienfeld.
- 2) Zum Zeitpunkt  $t_0$  wird der Transistor aufgesteuert und geht in den niederohmigen Zustand über ( $u > 1$ ). Während des Durchsteuerns nimmt  $U_{Last}$  zu, und  $U_{CE}$  ab. Die Induktivität ist

- magnetisch ungeladen und somit hochohmig, daher kann  $I_C$  nicht entsprechend ansteigen. A11 wird waagrecht auf einem konstant kleinen Strom angenähert.
- 3) Der AP steigt ausgehend von A11 langsam an, dies erfolgt in dem Maß in dem die Induktivität magnetische Energie aufbaut, und somit ein Steigen von  $I_C$  zulässt. In A2 ist der Sättigungszustand erreicht.
  - 4) Vom Zeitpunkt  $t_1$  an sollte kein Basisstrom fließen. Der Transistor wird in den hochohmigen Zustand gesteuert. Die Induktivität ist bemüht  $I_C$  unverändert zu halten, und baut eine Selbstinduktionsspannung auf, die ein Abfallen von  $I_C$  verhindern soll ( $U_{ind}$ ).
  - 5) Die Spannung  $U_{CE}$  wird langsam größer bis in A21 die volle Betriebsspannung an der Kollektor–Emitter Strecke anliegt. Der Wert von  $U_{ind}$  ist zu diesem Zeitpunkt ungleich Null, sodass zwischen Kollektor und Emitter auch höhere Spannungen, bis hin zum Vielfachen der Betriebsspannung auftreten können.

Um das Entstehen gefährlicher Überspannungen zu verhindern ist es zweckmäßig eine Freilaufdiode dem Lastwiderstand parallel zu schalten.

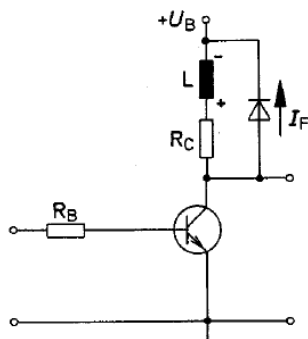


Abb 8: Verwendung einer Freilaufdiode bei induktiver Last.

### Aufgabe:

Simuliere den Transistorschalters mit induktiver Last und versuche das Schaltverhalten zu optimieren.

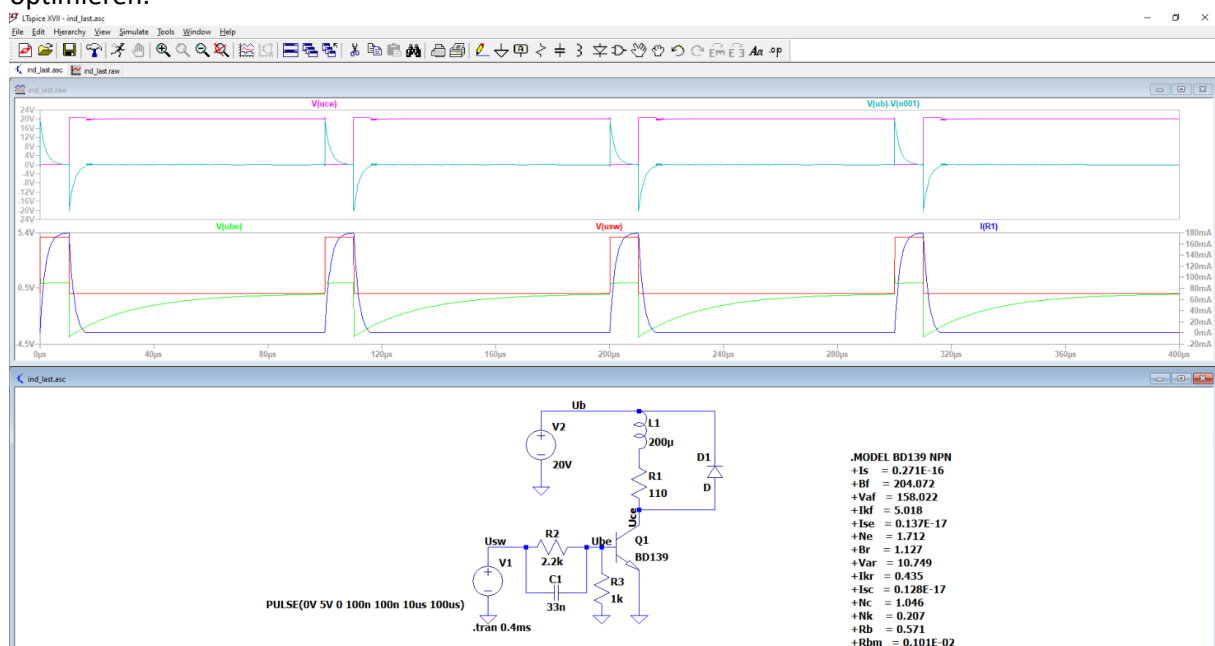


Abb 9: Simulation eines Transistorschalters mit induktiver Last, Lucas Walkner 3BHEL, 2020

## MOSFET als Schalter

Einfacher wird ein Transistorschalter, wenn statt eines BJT ein MOSFET zum Einsatz kommt. Es ist zu beachten, dass die Gate-Source Steuerspannung, welche meist von der Eingangsspannung kommt, ausreichend hoch ist. Bei den für 3,3V CMOS Logik zur Verfügung stehenden Spannungspegeln sollte dies mittels Datenblatt des Transistors überprüft werden.

Feldeffekt Transistoren werden leistungslos gesteuert, und benötigen am Eingang des Gates normalerweise keinen Vorwiderstand.

Um die Oszillationsneigung beim Umschaltvorgang, bewirkt durch die Gate-Source Kapazität (einige nF), zu verhindern, wird ein Widerstand von einigen  $100\Omega$  zwischen Steuereingang und Gate eingesetzt.

Sollten Steuereingänge offen bleiben, so ist der Gate Eingang mit einem zusätzlichen Widerstand ( $100k$ ) auf Ground Potential zu legen.

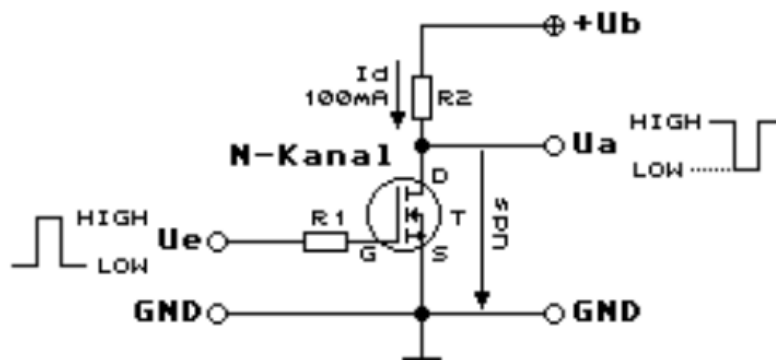


Abb 10: MOSFET als Schalter

### Aufgabe:

Simuliere einen MOSFET Schalter mit dem Transistor NTR4003. Geschaltet werden sollte ein Print Relais mit  $125\Omega$  Spulenwiderstand bei einer Spannung von 5V.

## Rechenübungen

### Aufgabe 4.10

Es ist der Sperrstrom des Transistors in Bild 4.39 bei Raumtemperatur (300 K) zu berechnen. Zu benutzen sind das Ebers-Moll-Modell und die Transistorparameter aus Aufgabe 4.2. Um welchen Faktor vergrößert sich der Sperrstrom, wenn die Bauelementtemperatur um  $30\text{ K}$  steigt? Der Temperaturbeiwert der Sättigungsströme beträgt  $C_R = 0,12\text{ K}^{-1}$ .

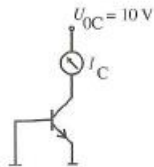


Bild 4.39 Sperrstrommessung

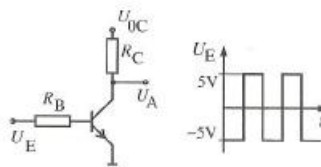


Bild 4.40 Transistorschalter

### Aufgabe 4.11

Für den Transistorschalter in Bild 4.40 sind die Ströme und Spannungen in den beiden Schaltzuständen zu berechnen.

Gegeben sind  $U_{0C} = 5\text{ V}$ ,  $R_B = 40\text{ k}\Omega$ ,  $R_C = 2\text{ k}\Omega$  und die Transistorparameter  $B_N = 175$ ,  $U_{BEF} = 0,7\text{ V}$ ,  $U_{CES} = 0,1\text{ V}$ ,  $I_{CED} = 0$ .

Wie stark wird der Transistor übersteuert?

### Aufgabe 4.12

Welche Störspannung kann den beiden Eingangsspannungspegeln  $\{-5\text{ V}, 5\text{ V}\}$  des Transistorschalters aus Aufgabe 4.11 überlagert werden, ohne dass der Transistor die Schaltzustände AUS (gesperrt) bzw. EIN (übersteuert) verlässt?

Berechne Aufgabe 4.11 mit  $B = 175$