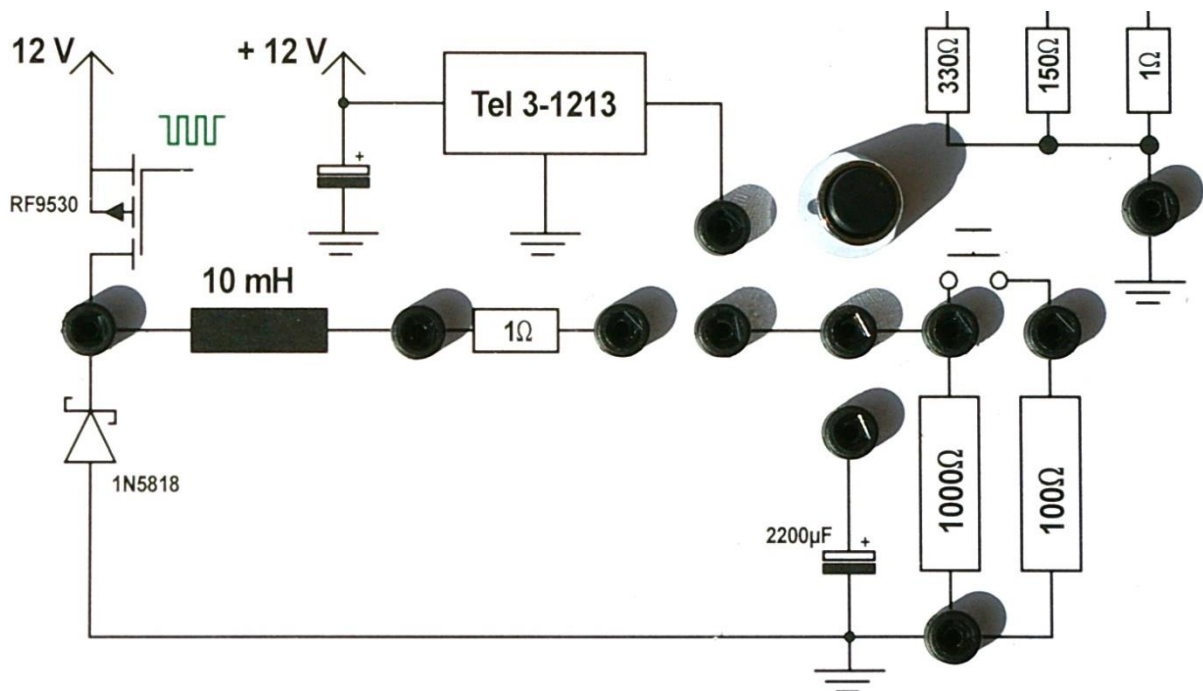


Verbundlabor Mechatronik
Labor für Elektronik und elektrische Antriebe

Praktikumsversuch FT

Schaltungen mit Feldeffekttransistoren



1 Einleitung

1.1 Aufbau und Funktion von MOSFETs

Feldeffekttransistoren, insbesondere sog. MOSFETs (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor), ersetzen mehr und mehr die klassischen Bipolartransistoren. Die Bezeichnung MOSFET deutet auf den internen Aufbau dieser Transistoren hin (Abbildung 1):

- Das Halbleiterelement ist mit einer sehr dünnen isolierenden Oxidschicht bedeckt.
- Auf der Oberfläche der Oxidschicht ist eine Metallschicht aufgedampft (Gate-Anschluss).
- Unterhalb der Oxidschicht befinden sich drei Halbleiterbereiche: ein p-leitendes Substrat mit zwei n-leitenden Inseln (Source- und Drain-Anschluss).

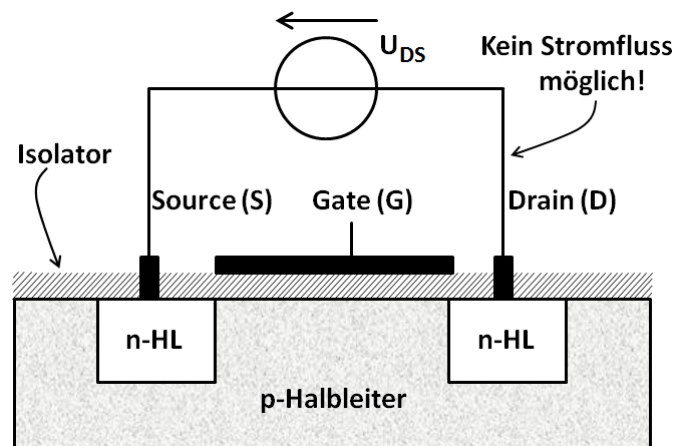


Abb. 1 – MOSFET ohne Gate-Spannung

Ohne Gate-Spannung kann zwischen Source und Drain zunächst kein Strom fließen: Zwischen dem p-leitenden Substrat und dem Source- bzw. Drain-Anschluss bildet sich jeweils ein pn-Übergang. Unabhängig vom Vorzeichen der Spannung U_{DS} ist stets einer dieser beiden pn-Übergänge gesperrt.

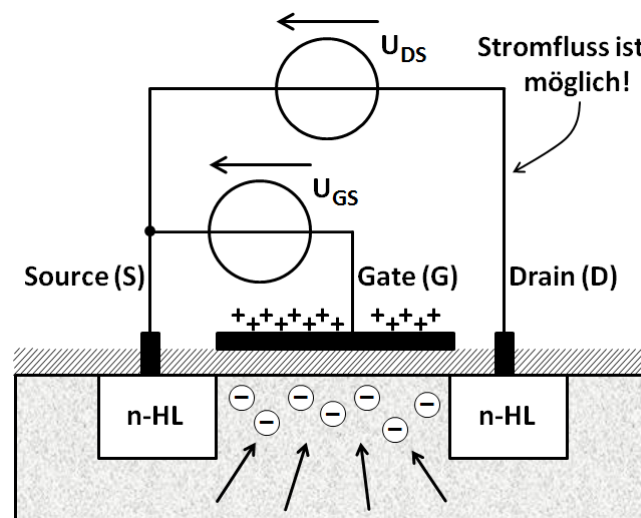


Abb. 2 – MOSFET mit Gate-Spannung

Wird zwischen Gate und Source eine positive Spannung angelegt, baut sich unterhalb der Gate-Elektrode ein elektrisches Feld auf. In diesem Feld wirken Kräfte auf die beweglichen Ladungsträger im p-Halbleiter. Aufgrund der sehr dünnen Isolierschicht unterhalb der Gate-Elektrode ist die elektrische Feldstärke (und damit die wirkenden Kräfte) sehr hoch, vergl. Plattenkondensator: $E = U/d$.

Die wenigen freien Elektronen im p-Halbleiter unterhalb des Gates sammeln sich daher direkt unterhalb der Oxidschicht, die vielen beweglichen Löcher werden nach unten abgestoßen. Ab einer gewissen Gate-Spannung gibt es direkt unterhalb der Gate-Elektrode fast keine Löcher mehr (Abbildung 2).

Normalerweise ist ein p-Halbleiter dadurch gekennzeichnet, dass sich in ihm viele positiv geladene Löcher und nur sehr wenige negativ geladene freie Elektronen befinden. Im Bereich unterhalb der Gate-Elektrode ist die Situation durch das starke elektrische Feld genau umgekehrt: etliche freie Elektronen und fast keine Löcher. Dies bezeichnet man als „Inversion“. Der Halbleiter ist unterhalb der Gate-Elektrode nicht mehr p- sondern n-leitend geworden, die pn-Übergänge zu Source und Drain verlieren dadurch ihre (sperrende) Wirkung, Strom kann zwischen Drain und Source fließen!

Zusammenfassung:

- Wird keine oder eine negative Gate-Spannung an einen MOSFET (genauer: an einen n-Kanal-Anreicherungstyp) angeschlossen, ist kein Stromfluss zwischen Drain und Source möglich.
- Eine positive Gate-Spannung führt dazu, dass zwischen Drain und Source Strom fließen kann.
- Durch Ein- bzw. Ausschalten der Gate-Spannung kann ein Laststrom zwischen Drain und Source ein- und ausgeschaltet werden.
- Auch bei angelegter Gate-Spannung fließt durch die isolierende Oxidschicht kein Gate-Strom in den MOSFET. Dies ist ein großer Vorteil gegenüber den klassischen Bipolartransistoren. Bipolartransistoren benötigen bei Leistungselektronik-Anwendungen oft Basisströme im Amperebereich!

1.2 Pulsweitenmodulation (PWM)

Häufig werden große Verbraucher (Elektromotoren, Heizungen, Lampen) elektronisch ein- und ausgeschaltet oder sogar stufenlos angesteuert. Zum Beispiel, wenn die Drehzahl eines Elektromotors oder die Helligkeit einer Lampe variiert werden sollen.

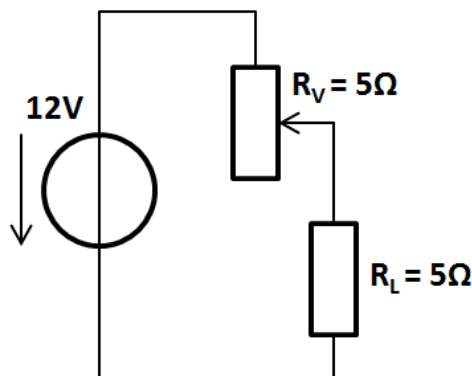


Abb. 3 – Einstellung des Verbraucherstroms mittels Vorwiderstand

Abbildung 3 zeigt, wie der Strom durch einen Verbraucher R_L durch einen Vorwiderstand R_V eingestellt werden könnte. Obwohl diese Lösung sehr einfach aussieht, wird sie in der Praxis aufgrund der großen auftretenden Leistungsverluste am Vorwiderstand kaum eingesetzt. Bei den abgebildeten Widerstandswerten fließt ein Strom von $I = 12\text{V}/10\Omega = 1,2\text{A}$. Der Verbraucher R_L nimmt eine Leistung von $P_L = I^2 \cdot R_L = 7,2\text{W}$ auf. Dieselbe Leistung geht am Vorwiderstand als Wärme verloren!

In der Praxis werden Verbraucher daher auf eine andere Art, nämlich mittels Pulsweitenmodulation (PWM) angesteuert. Der Verbraucher wird dabei mit einem Rechtecksignal versorgt. Das Rechtecksignal hat eine konstante Amplitude und eine konstante Frequenz, der Tastgrad ist dagegen variabel. Solche Rechtecksignale können mit modernen Halbleiterschaltern problemlos bereitgestellt werden:

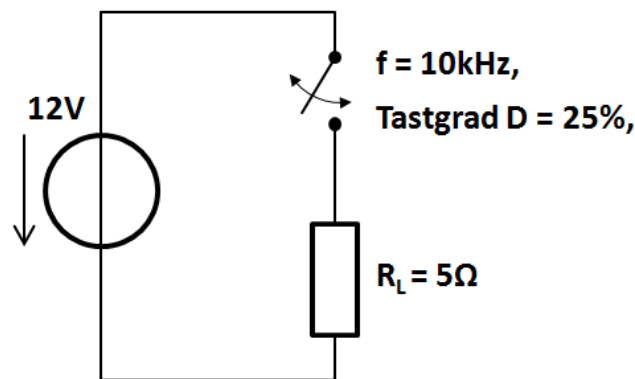


Abb. 4 – Ansteuerung eines Verbrauchers mittels Pulsweitenmodulation (PWM)

Der Verbraucher in Abbildung 4 wird während 25% der Zeit direkt an die Versorgungsspannung von 12V angeschlossen, er nimmt dann eine Leistung von $P_L = (12V)^2/5\Omega = 28,8W$ auf. Während der übrigen 75% ist der Schalter geöffnet. Im zeitlichen Mittel ergibt sich wie in Abbildung 1 eine Leistungsaufnahme von 7,2W. Allerdings treten am (idealen) Schalter keinerlei Verluste auf, weder bei geöffnetem (kein Stromfluss → keine Verlustleistung) noch beim geschlossenen Schalter (kein Spannungsabfall am Schalter → ebenfalls keine Verlustleistung).

Reale Schalter arbeiten freilich nicht ganz verlustlos: Wenn bei geschlossenem Schalter der Laststrom durch den Schalter fließt, ist der Spannungsabfall am Schalter nicht exakt gleich null. Bei klassischen Bipolartransistoren liegt zwischen Kollektor und Emitter zumindest eine geringe Sättigungsspannung U_{CESat} an. Und auch bei den in diesem Versuch eingesetzten Feldeffekttransistoren (MOSFETs) ist im leitenden Zustand ein geringer Restwiderstand R_{DSOn} zu berücksichtigen.

Die direkte Ansteuerung eines Verbrauchers mittels PWM ist nur bei vergleichsweise „trägen“ Lasten wie elektrischen Antrieben oder Heizungen möglich. Viele Verbraucher erlauben es dagegen nicht, einfach die Versorgungsspannung mit hoher Frequenz ein- und auszuschalten. In diesen Fällen kann die Schaltung aus Abbildung 4 um weitere Bauteile, insbesondere um eine Spule, ergänzt werden. Es ergeben sich sog. Gleichspannungswandler, die in diesem Praktikum ebenfalls behandelt werden.

2 Beschreibung des Versuchsaufbaus

- (1) Im Bereich „Messung des Gate-Stroms“ ist an einem Kühlkörper ein MOSFET des Typs IRL-530N angebracht, dessen Gate-Spannung über einen regelbaren Widerstand stufenlos eingestellt werden kann. Ab einer bestimmten Gate-Spannung beginnt der MOSFET zu leiten und die im Laststromkreis angebrachte Leuchtdiode leuchtet. Über den Taster Nr. 1 kann zusätzlich zur Leuchtdiode ein Leistungswiderstand (20Ω , max. 50W) in den Laststromkreis geschaltet werden.
- (2) Im Bereich „MOSFET als Schalter“ wird die Ansteuerung von Verbrauchern mittels Pulsweitenmodulation (PWM, siehe Abschnitt 1.1) gezeigt. Der hier angebrachte MOSFET wird mit einer Frequenz von ca. 15 kHz ein- und ausgeschaltet, der Tastgrad kann zwischen 25% und 100% gewählt werden. Neben einer Leuchtdiode kann auch hier ein Leistungswiderstand in den Laststromkreis geschaltet werden, dazu dient der Taster Nr. 2.
- (3) Im Bereich „DC/DC-Wandler“ befinden sich zwei Gleichspannungswandler: Ein diskret aufgebauter „Step-Down-Wandler“, der eine größere in eine kleinere Gleichspannung umwandelt. Und ein als Modul erhältlicher „Step-Up-Wandler“, der eine kleinere in eine größere Gleichspannung umwandelt. An beide Wandler können unterschiedliche Lastwiderstände angeschlossen und die resultierenden Spannungs- und Stromverläufe gemessen werden.

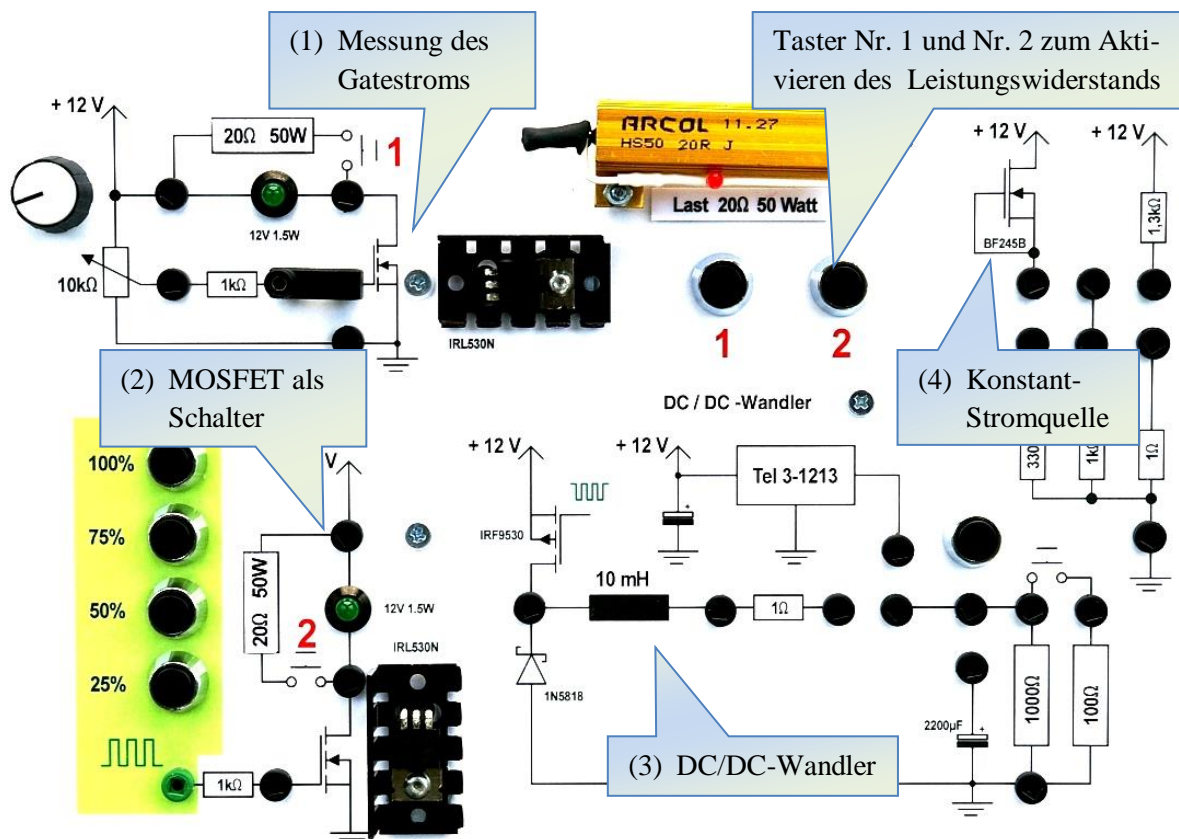


Abb. 5 – Frontplatte der Experimentierbox

- (4) Ein weiteres Anwendungsgebiet von Feldeffekttransistoren wird im Bereich „Konstantstromquelle“ gezeigt. Ein Feldeffekttransistor (genauer: ein n-Kanal Verarmungstyp) dessen Source- und Gate-Anschlüsse direkt miteinander verbunden sind, sorgt in einem Stromkreis für eine konstante Stromstärke – auch wenn sich die Größe des Lastwiderstands verändert!

3 Vorbereitung auf den Versuchstermin

Im Rahmen des Praktikums werden Schaltungen behandelt, die Gleichspannungen nach oben (Step-Up-) oder nach unten transformieren (Step-Down-Wandler). Die Spannungen und Ströme in einem solchen Gleichspannungswandler werden nicht zuletzt durch eine Spule bestimmt, die sich im Stromkreis befindet und vom Laststrom durchflossen wird. Ebenfalls im Stromkreis eingebaut ist ein MOSFET, der mit hoher Frequenz ein- und ausgeschaltet wird.

Schaltvorgänge in Stromkreisen mit Spulen und Kondensatoren bilden ein eigenes Kapitel in der Lehrveranstaltung „Grundlagen der Elektrotechnik“. Es ist wichtig, dass Sie vor Beginn des Praktikums (!) die wesentlichen Grundlagen dieses Kapitels wiederholen und die Aufgaben auf den folgenden Seiten bearbeiten!

3.1 Stromkreis mit Spule, Einschaltvorgang

In einem Stromkreis befindet sich eine Spule $L = 10\text{mH}$ und ein Lastwiderstand $R = 100\Omega$. Zum Zeitpunkt $t = 0\text{s}$ wird der Schalter eingeschaltet ($U_E = 12\text{V}$). Für den Stromverlauf in Spule und Widerstand gilt (vergl. Lehrveranstaltung „Grundlagen der Elektrotechnik“):

$$i(t) = \frac{U_E}{R_L} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \text{ mit } \tau = \frac{L}{R}$$

Direkt nach dem Einschalten steigt die Stromstärke also zunächst schnell an, danach nähert sie sich asymptotisch ihrem Endwert.

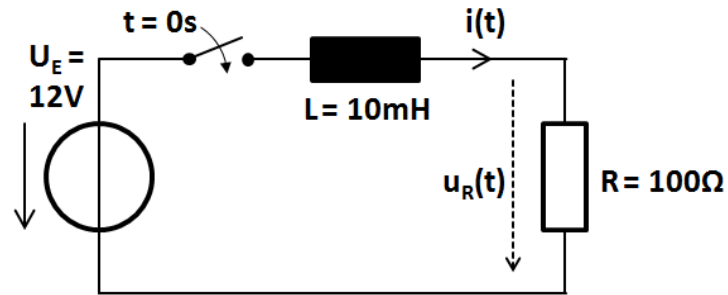


Abb. 6 – Stromkreis mit Spule, Einschaltvorgang

Frage 1: Wie groß ist die Zeitkonstante τ ?

... Mikrosekunden

Frage 2: Wie groß ist der Endwert des Stromes nach langer Zeit t ?

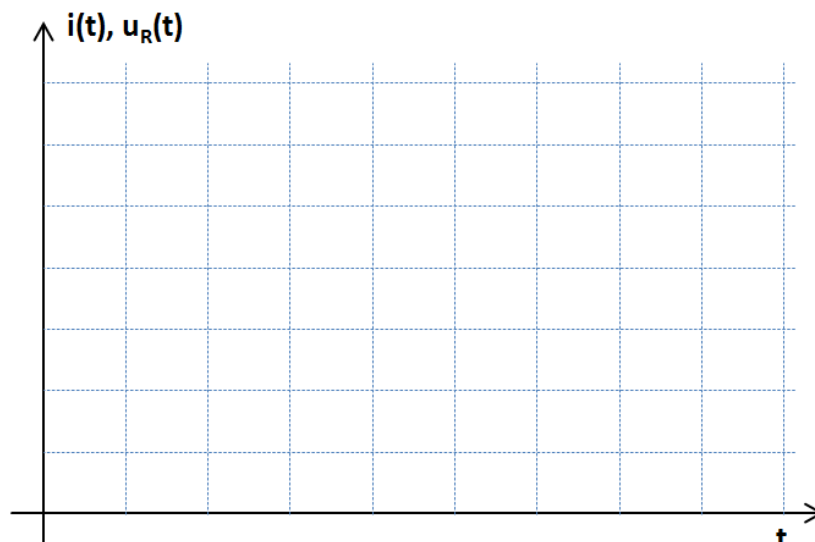
... Milliampere

Frage 3: Wie schnell steigt die Stromstärke unmittelbar nach dem Einschalten an?

... Milliampere pro Mikrosekunde

Frage 4: Wie lautet die Formel zur Berechnung der Spannung $u_R(t)$ am Widerstand?
(Tipp: Den Stromverlauf kennen Sie bereits – ohmsches Gesetz benutzen!)

Frage 5: Zeichnen Sie den Verlauf von $i(t)$ und $u_R(t)$ in das folgende Diagramm.



3.2 Stromkreis mit Spule, Ausschaltvorgang

Betrachten Sie nun den Stromkreis in Abbildung 7. Der Schalter befindet sich bereits seit langer Zeit in der oberen Position, $i(t)$ hat also den Endwert von $12\text{V}/100\Omega = 120\text{mA}$ erreicht und ändert sich nicht mehr. Zum Zeitpunkt $t = 0\text{s}$ wird schlagartig der Schalter in die untere Position umgeschaltet. Die Spule ist danach also nicht mehr an die Spannungsquelle U_E angeschlossen.

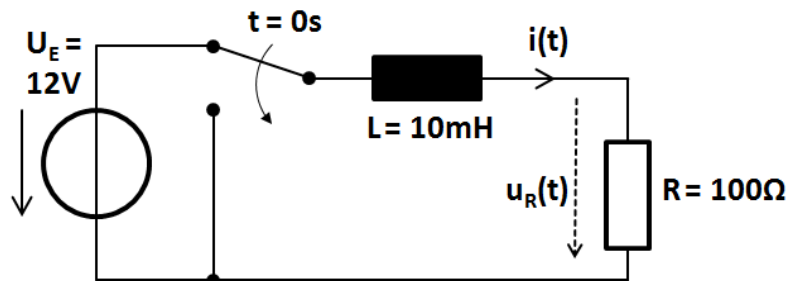


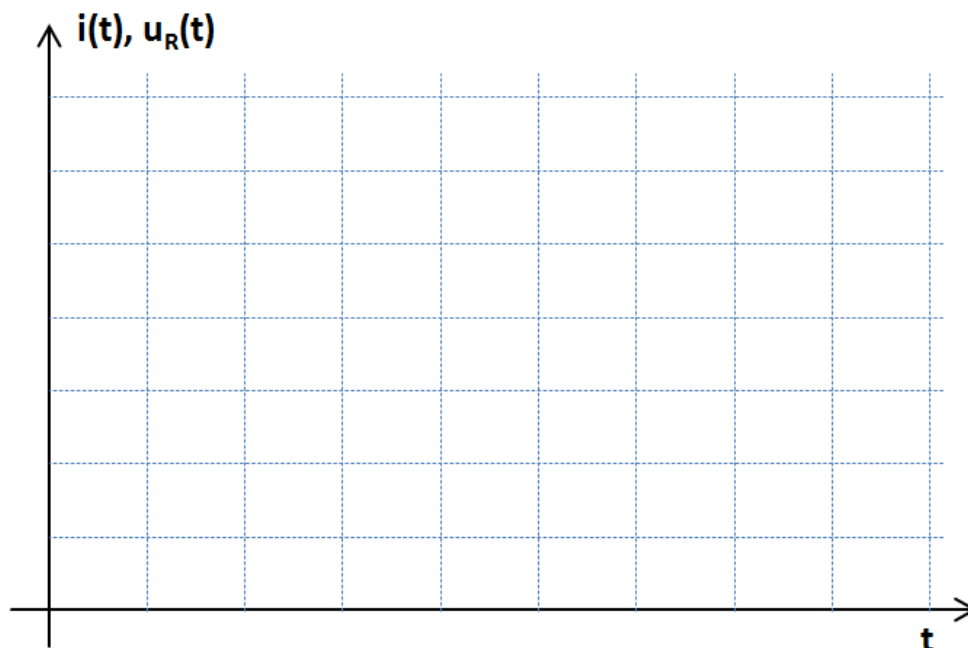
Abb. 7 – Stromkreis mit Spule, Ausschaltvorgang

Die im magnetischen Feld der Spule gespeicherte Energie wird am Widerstand R in Wärme umgesetzt, dabei sinkt die Stromstärke $i(t)$ immer weiter ab.

Für den Stromverlauf gilt:

$$i(t) = \frac{U_E}{R_L} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{mit } \tau = \frac{L}{R}$$

Frage 6: Skizzieren Sie den Verlauf von $i(t)$ und $u_R(t)$, es gilt $i(t = 0\text{s}) = 120\text{mA}$.

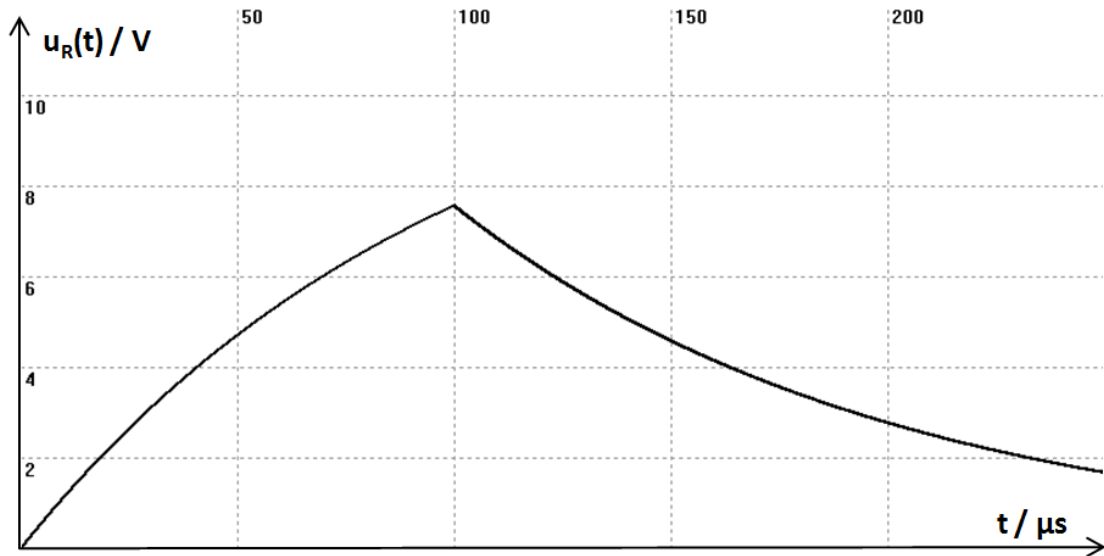




Frage 7: Nun wird der Schalter zum Zeitpunkt $t = 0\mu\text{s}$ nach oben geschaltet („eingeschaltet“) und zum Zeitpunkt $t = 100\mu\text{s}$ wieder nach unten geschaltet („ausgeschaltet“). Das folgende Diagramm zeigt den Spannungsverlauf $u_R(t)$ am Lastwiderstand $R = 100\Omega$.

Wie sieht der Spannungsverlauf am Lastwiderstand aus, wenn der Schalter bei $t = 125\mu\text{s}$ wieder eingeschaltet, bei $t = 150\mu\text{s}$ ausgeschaltet, bei $t = 175\mu\text{s}$ eingeschaltet, bei $t = 200\mu\text{s}$ ausgeschaltet und bei $t = 225\mu\text{s}$ wieder eingeschaltet wird?

Zeichnen Sie den zu erwartenden Verlauf von $u_R(t)$ in das folgende Diagramm.
(Hinweis: keine Berechnung erforderlich, Skizze genügt!)



Frage 8: Welche mittlere Spannung stellt sich in diesem Fall am Lastwiderstand ein?

... Volt

4 Versuchsdurchführung

4.1 Messung von Gate-Spannung und Gate-Strom

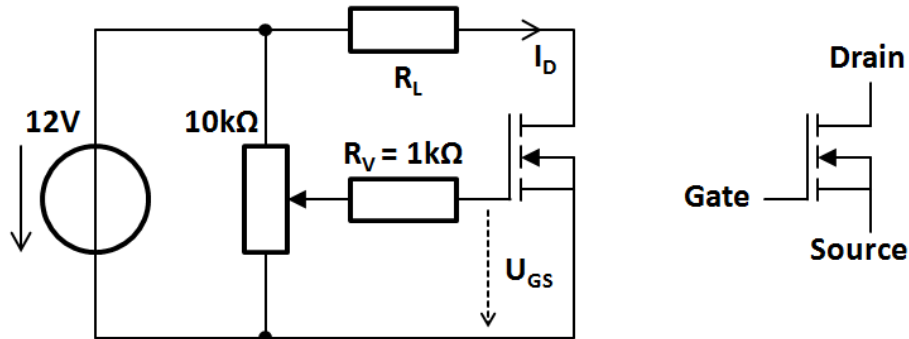


Abb. 8 – Messung von Gate-Spannung und Gate-Strom

Wird eine positive Spannung U_{GS} zwischen Gate und Source angelegt, beginnt ein Laststrom I_D zwischen Drain und Source zu fließen. Der Laststrom I_D kann über U_{GS} stufenlos gesteuert werden.

Versuch 1a:

Verbinden Sie das Gate des MOSFETs über eine Steckbrücke mit dem $1k\Omega$ -Vorwiderstand. Schließen Sie ein Spannungsmessgerät mit der Plusleitung (rotes Kabel) am Gate und mit der Minusleitung (schwarzes Kabel) an Masse an. Verändern Sie nun mit dem regelbaren Widerstand die Gate-Spannung. Bei welcher Gate-Spannung U_{GS1} beginnt der Laststrom I_D zu fließen und die Leuchtdiode (LED) zu leuchten?

$U_{GS1} =$	Volt
-------------	------

Versuch 1b:

Der Gate-Anschluss ist durch eine Oxidschicht vom Rest des MOSFETs isoliert. Zur Ansteuerung des Gates ist daher kein Stromfluss erforderlich sondern lediglich eine Gate-Spannung. Dies ist ein Vorteil gegenüber klassischen Bipolartransistoren, die oft erhebliche Basisströme zur Ansteuerung benötigen.

Entfernen Sie die Steckbrücke am Gate des MOSFETs wieder. Schließen Sie ein erstes Kabel am Gate des MOSFETs an, verbinden Sie ein zweites Kabel mit +12V. Überbrücken Sie nun mit Ihrem Finger beide Kabel, sodass das Gate über Ihren Finger mit +12V verbunden ist. Fließt ein Laststrom, der die LED zum Leuchten bringt?

Lassen Sie nun die beiden Kabel wieder los. Sie werden feststellen, dass die LED erst nach einiger Zeit wieder ausgeht. Wie erklären Sie sich diesen Effekt? (Sie können die LED wieder ausschalten, indem Sie das Gate über ein Kabel direkt mit Masse verbinden.)

Warum geht die LED nicht sofort aus?



Versuch 1c:

Der hier eingesetzte MOSFET ist bei entsprechender Kühlung für Lastströme bis über 10A geeignet. Nun soll ein Lastwiderstand $R_L = 20\Omega$ vom MOSFET mit Strom versorgt werden.

Verbinden Sie zunächst zwei Spannungsmessgeräte mit der Experimentierbox: Das erste Messgerät soll die Spannung U_{GS} zwischen Gate und Masse anzeigen, das zweite Messgerät die Spannung U_{DS} zwischen Drain und Source.

Schalten Sie den Lastwiderstand durch Druck auf den Taster Nr. 1 ein und verändern Sie mit dem einstellbaren Widerstand die Gate-Spannung. Bis zu welcher Gate-Spannung $U_{GS,off}$ sperrt der MOSFET (in diesem Fall ist $U_{DS} = 12V$)? Bei welcher Gate-Spannung $U_{GS,on}$ leitet der MOSFET so gut, dass nur noch eine Spannung von 0,2 Volt zwischen Drain und Source abfällt?

Gate-Spannung: $U_{GS,off} =$	Volt	$U_{GS,on} =$	Volt
-------------------------------	------	---------------	------

Stellen Sie nun eine Drain-Source-Spannung $U_{DS} = 6V$ ein. Achten Sie darauf, dass der Lastwiderstand wieder aktiviert ist! Lassen Sie den Laststrom ca. eine Minute lang fließen. Prüfen Sie mit Ihrem Finger die Temperatur des MOSFETs und die Temperatur des Lastwiderstands.

Berechnen Sie die Leistung, die am Lastwiderstand und am MOSFET in Wärme umgesetzt wird. (Am Widerstand gilt $P_R = U^2 / R$. Die Verlustleistung des MOSFETs berechnet sich nach $P_V = U_{DS} \cdot I_D$.)

Lastwiderstand: $P_R =$	Watt	MOSFET: $P_V =$	Watt
-------------------------	------	-----------------	------

Versuch 1d:

Lassen Sie die Stellung des einstellbaren Widerstands unverändert! Messen Sie mit einem Spannungsmessgerät den Spannungsabfall U_V über dem Gate-Vorwiderstand $R_V = 1k\Omega$, wenn der Lastwiderstand aktiviert ist. Berechnen Sie über das ohmsche Gesetz die Größe des Gate-Stroms. Stimmt es wirklich, dass zur Ansteuerung des MOSFETs kein Gate-Strom erforderlich ist?

Vorwiderstand: $U_V =$	mV	Gate-Strom: $I_G =$	μA
------------------------	----	---------------------	---------

Versuch 1e:

Erhöhen Sie die Gate-Spannung auf den Maximalwert von 12 Volt. Achten Sie darauf, dass der Lastwiderstand wieder aktiviert ist! Überzeugen Sie sich davon, dass nun deutlich mehr Leistung am Lastwiderstand in Wärme umgesetzt wird: Prüfen Sie die Temperatur des Lastwiderstands mit dem Finger! Überprüfen Sie auch die Temperatur des MOSFETs, durch den jetzt ein größerer Laststrom fließt als in Versuch 1c/1d. Ist der MOSFET wärmer oder kälter als im Versuch 1c/1d? Warum?

Der MOSFET ist im Vergleich zum Versuch 1c/1d <input type="checkbox"/> wärmer / <input type="checkbox"/> kälter.
--

Begründung:

4.2 Der MOSFET als Schalter

Wenn große Verbraucher (Elektromotoren, Heizungen, Lampen) elektronisch ein- und ausgeschaltet oder sogar stufenlos angesteuert werden müssen, geschieht dies häufig mittels Pulsweitenmodulation (PWM). Der Verbraucher wird dabei mit einem Rechtecksignal versorgt. Das Rechtecksignal hat eine konstante Amplitude und eine konstante Frequenz, der Tastgrad ist dagegen variabel.

(Eine stufenlose Ansteuerung großer Verbraucher über regelbare Vorwiderstände verbietet sich aus Effizienzgründen: Zuviel Energie ginge im Vorwiderstand als Wärme verloren, vergl. Abschnitt 1.2.)

Versuch 2a:

Verbinden Sie das Oszilloskop mit den beiden Kontakten ober- und unterhalb des Lämpchens, um dort (bzw. am Lastwiderstand R_L) den zeitlichen Verlauf der Spannung U_L zu untersuchen. Überbrücken Sie außerdem den $1k\Omega$ -Vorwiderstand am Gate des MOSFETs.

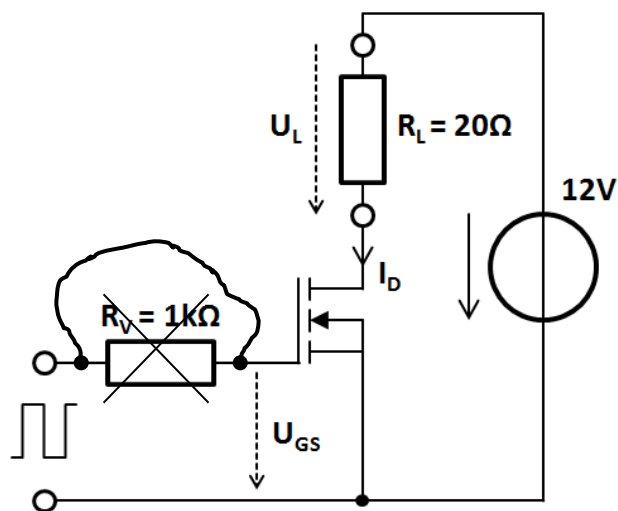


Abb. 9 – MOSFET als Schalter

Der MOSFET wird über die 25%-, 50%-, 75%, und 100%-Taster mit unterschiedlichen PWM-Signalen angesteuert. Die Taktfrequenz ist dabei konstant, nur der Tastgrad ändert sich. Messen Sie zunächst die Periodendauer des PWM-Signals und berechnen Sie daraus dessen Frequenz.

Periodendauer: T =	μs	Frequenz: f =	kHz
--------------------	----	---------------	-----

Versuch 2b:

Aktivieren Sie den Lastwiderstand R_L durch Druck auf den Taster Nr. 2. Steuern Sie den MOSFET mit einem Tastgrad von 50% an und ermitteln Sie mit dem Oszilloskop die Maximalwerte von Spannung U_L und Strom I_D am Lastwiderstand R_L . Wie groß ist die mittlere Leistung, die bei einem Tastgrad von 25%, 50%, 75% bzw. 100% vom Lastwiderstand R_L aufgenommen wird?

Max. Spannung: $U_{L,max} =$	Volt	Max. Strom.: $I_{D,max} =$	Ampere
$P_{RV,25\%} =$	Watt	$P_{RV,50\%} =$	Watt
$P_{RV,75\%} =$	Watt	$P_{RV,100\%} =$	Watt

Versuch 2c:

Aktivieren Sie den Lastwiderstand R_L durch Druck auf den Taster Nr. 2. Steuern Sie den MOSFET mit einem Tastgrad von 50% an und warten Sie ca. zwei Minuten.

Prüfen Sie anschließend mit Ihrem Finger die Temperatur des Lastwiderstands R_L sowie des MOSFETs. Vergleichen Sie die Ergebnisse mit denen aus Versuch 1C.

Beobachtung:

4.3 DC/DC-Wandler

Die direkte Ansteuerung eines Verbrauchers mittels PWM ist nur bei vergleichsweise „trägen“ Lasten wie elektrischen Antrieben oder Heizungen möglich (siehe Versuch 2c). Viele Verbraucher erlauben es dagegen nicht, einfach die Versorgungsspannung mit hoher Frequenz ein- und auszuschalten.

In solchen Fällen kann die Schaltung aus Abbildung 9 um weitere Bauteile, insbesondere um eine Spule, ergänzt werden. Es ergeben sich sog. Gleichspannungswandler (DC/DC-Wandler), die in den folgenden Abschnitten untersucht werden sollen.

Mit Gleichspannungswandlern ist es möglich, aus einer kleineren eine größere Gleichspannung zu erzeugen („Step-Up-Wandler“). Ebenso existieren Gleichspannungswandler, die aus einer größeren eine kleinere Gleichspannung erzeugen („Step-Down-Wandler“).

Es soll zunächst ein Step-Down-Wandler untersucht werden, dessen Schaltung in Abbildung 10 gezeigt ist. Die Bauelemente haben folgende Daten: $U_E = 12\text{V}$, $L = 10\text{mH}$, $R = 100\Omega$. Der Glättungskondensator ist noch nicht angeschlossen.

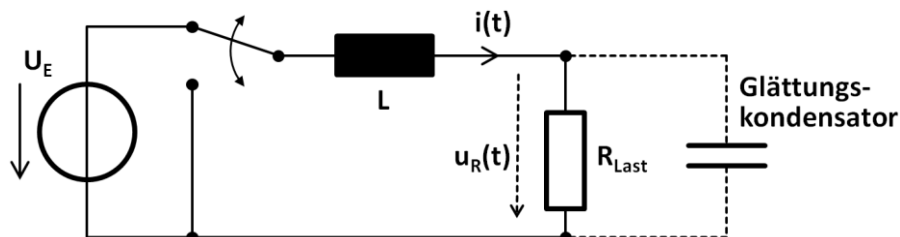


Abb. 10 – Step-Down-Wandler

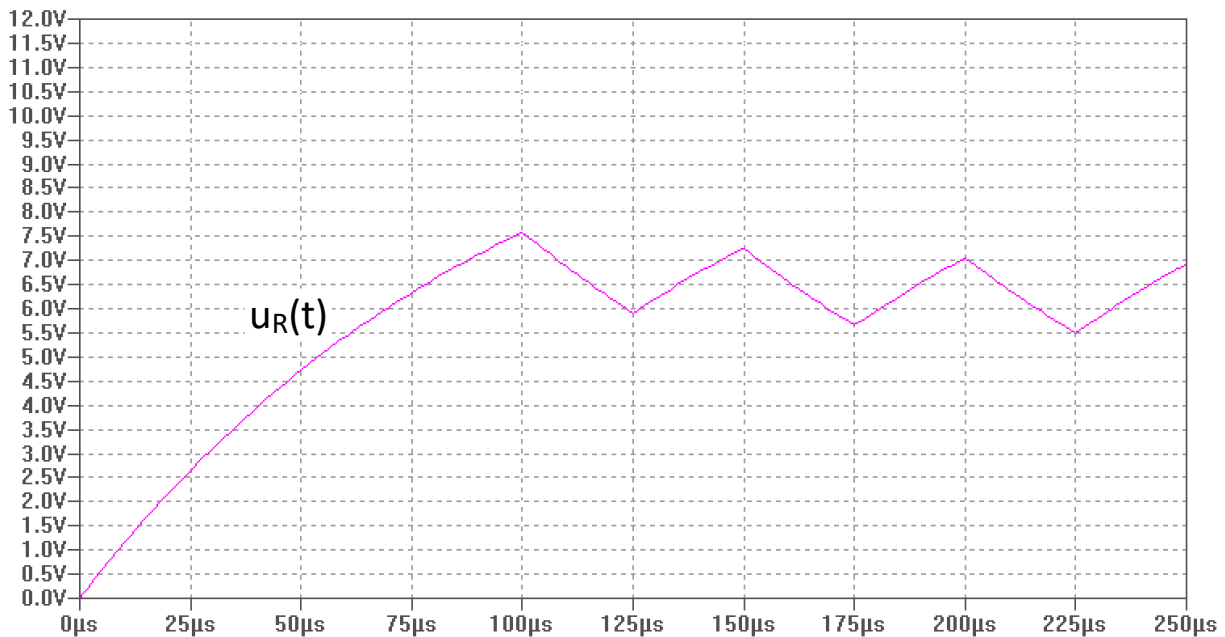
Abb. 11 – Zeitlicher Verlauf der Spannung $u_R(t)$ am Lastwiderstand

Abbildung 11 zeigt den Spannungsverlauf am Lastwiderstand, wenn der Schalter bei $t = 125\mu\text{s}$ eingeschaltet, bei $t = 150\mu\text{s}$ ausgeschaltet, bei $t = 175\mu\text{s}$ eingeschaltet, bei $t = 200\mu\text{s}$ ausgeschaltet und bei $t = 225\mu\text{s}$ wieder eingeschaltet wird.

Durch das schnelle Umschalten wird der Lastwiderstand mit einer „mehr oder weniger konstanten“ Gleichspannung versorgt - in diesem Beispiel mit ca. 7 Volt.

Der Mittelwert der Spannung am Lastwiderstand hängt vom Tastgrad ab:

$$U_R = U_E \cdot D$$

(U_R = mittlere Spannung am Lastwiderstand, U_E = Eingangsspannung, D = Tastgrad im Bereich 0...1)

Da die Ausgangsspannung U_R stets geringer als die Eingangsspannung U_E ist, bezeichnet man diese Schaltung auch als Step-Down-Wandler.

Abgesehen vom ohmschen Widerstand der Spule (und natürlich dem Verbraucherwiderstand) befinden sich keine ohmschen Widerstände im Stromkreis. Dadurch kann diese Schaltung mit relativ geringen Verlusten betrieben werden. Ein Wirkungsgrad im Bereich von $\eta = 80\ldots 90\%$ ist in der Praxis ohne große Probleme realisierbar. Vergleichen Sie dies mit der Schaltung in Abbildung 3!

Versuch 3a:

Statt eines mechanischen (Um-)Schalters in Abbildung 10 wird im Praktikum ein MOSFET in Kombination mit einer Diode eingesetzt. Zusätzlich wird ein Kondensator $C = 2200\mu\text{F}$ parallel zum Lastwiderstand geschaltet, um die Welligkeit der Ausgangsspannung zu minimieren.

Stellen Sie die beiden in Abbildung 12 gezeigten Verbindungen her und schließen Sie ein Voltmeter am Verbraucherwiderstand an.

Berechnen Sie zunächst mit der bei Versuch 3a angegebenen Formel die zu erwartende Spannung am Verbraucher bei einem Tastgrad von $D = 25\%$, 50% bzw. 75% . Messen Sie anschließend die tatsächlichen Spannungen jeweils an einem Verbraucherwiderstand $R_L = 1000\Omega$ und $R_L = 90\Omega$ (Parallelschaltung von 1000Ω und $100\Omega \rightarrow$ Tastschalter R_L betätigen!).

Tragen Sie die Ergebnisse in die vorbereitete Tabelle auf der folgenden Seite ein.

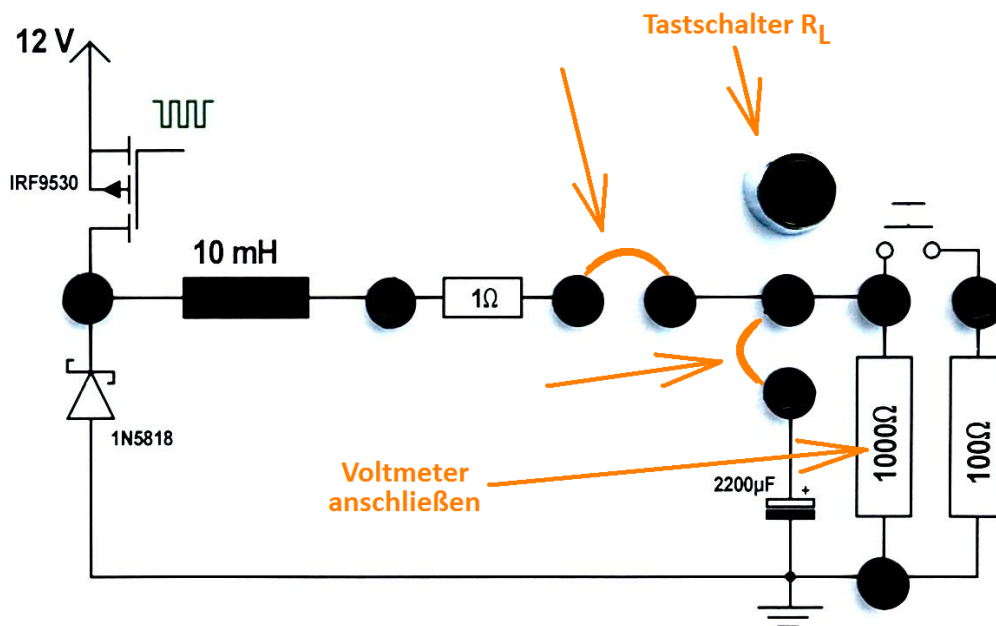


Abb. 12 – Messungen an einem Step-Down-Wandler

Vorsicht Falle: Bei dieser Schaltung (Abbildung 12) wird ein p-Kanal-MOSFET eingesetzt. Seine Ansteuerung geschieht genau umgekehrt im Vergleich zu den bisher betrachteten n-Kanal-MOSFETs: Bei Betätigung des 25%-Tastschalters ist der MOSFET zu 75% der Zeit geöffnet (Tastgrad $D = 75\%$). Bei Betätigung des 75%-Tastschalters ist der MOSFET zu 25% der Zeit geöffnet ($D = 25\%$) usw.

Tastgrad	Verbraucherspannung, berechnet	Verbraucherspannung, gemessen an 1000Ω	Verbraucherspannung, gemessen an 90Ω
$D = 25\%$			
$D = 50\%$			
$D = 75\%$			

Versuch 3b:

Abschließend soll am Step-Down-Wandler der genaue zeitliche Verlauf der Verbraucherspannung und des Spulenstroms mit Hilfe des Oszilloskops ermittelt werden.

Zur Darstellung der Verbraucherspannung schließen Sie das Oszilloskop direkt am Verbraucherwiderstand an (anstelle des Voltmeters in Versuch 3b). Zur Darstellung des Verbraucherstroms schließen Sie das Oszilloskop am 1Ω -Widerstand rechts neben der Spule an. Die am Oszilloskop dargestellte Spannung in Volt entspricht dem Spulenstrom in Ampere (ohmsches Gesetz: $I = U / R$ mit $R = 1\Omega$).

Führen Sie Ihre Messungen an einem Verbraucher $R_L = 90\Omega$ durch (Tastschalter R_L drücken).

Ermitteln Sie den zeitlichen Verlauf des Spulenstroms und der Verbraucherspannung einmal mit und einmal ohne Glättungskondensator. Zeichnen Sie den zeitlichen Verlauf des Spulenstroms und der Verbraucherspannung in das vorbereitete Diagramm auf der folgenden Seite (Beschriftung der t- und y-Achse nicht vergessen!).

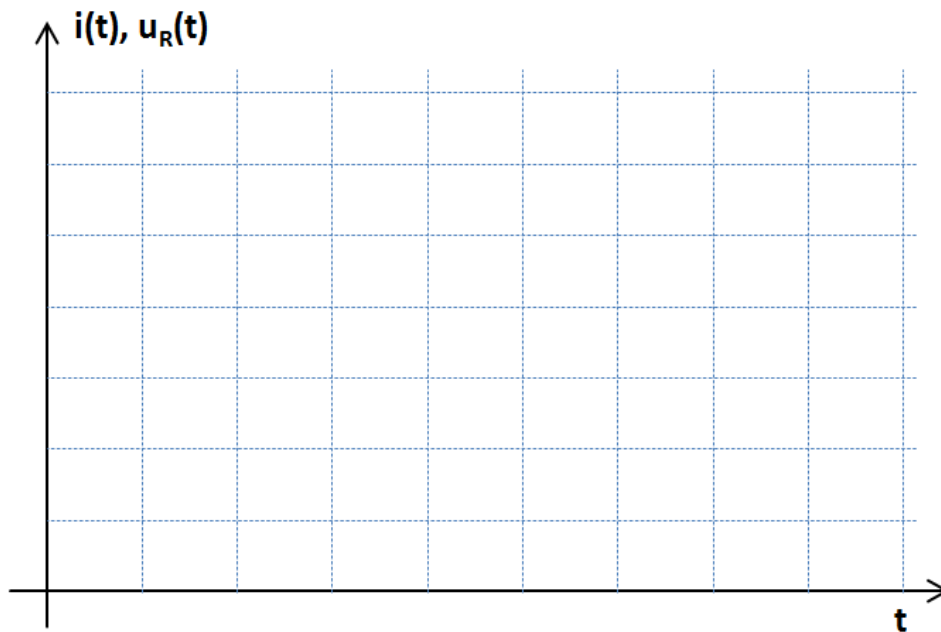


Abb. 13 – Spulenstrom und Verbraucherspannung beim Step-Down-Wandler

Versuch 3c:

Abbildung 14 zeigt die Schaltung eines Step-Up-Wandlers. Bei dieser Schaltung ist es möglich, aus einer kleineren Eingangsspannung eine größere Ausgangsspannung zu erzeugen. Auf die genaue Funktion dieser Schaltung soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden, stattdessen sei auf entsprechende Quellen in der Literatur bzw. im Internet verwiesen.¹

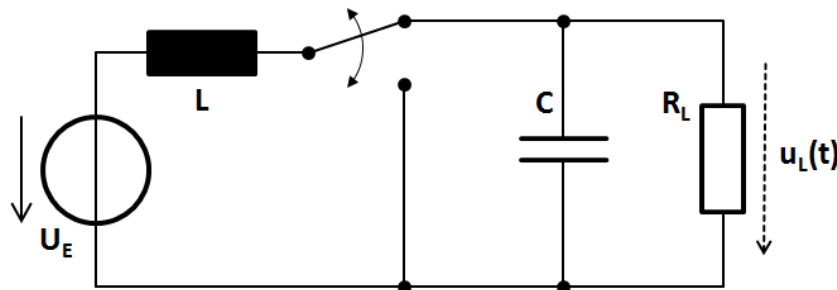


Abb. 14 – Schaltung eines Step-Up-Wandlers

Gleichspannungswandler sind für unterschiedlichste Spannungen und Leistungsklassen als fertige Module erhältlich. Ein Step-Up-Wandler TEL 3-1213 der Firma Traco ist in der Experimentierbox eingebaut. Er wird mit einer Eingangsspannung von 12 Volt betrieben.

Welche Ausgangsspannungen liefert dieser Wandler an den Verbraucherwiderständen $R_L = 1000\Omega$, $R_L = 90\Omega$ und im Leerlauf? Versuchen Sie, mit dem Oszilloskop die Frequenz zu ermitteln, mit der dieser Wandler betrieben wird (Herstellerangabe lt. Datenblatt: $f \approx 300\text{kHz}$).

Tipp: Stellen Sie zur Messung der Schaltfrequenz den Kopplungsmodus des Oszilloskops wie in Abbildung 15 gezeigt auf „AC“. Ermitteln Sie nun den zeitlichen Verlauf der Ausgangsspannung $u_L(t)$. Durch die AC-Kopplung wird der Gleichanteil der Ausgangsspannung ausgeblendet und nur der – hier interessierende – überlagerte Wechselanteil dargestellt. (Keinen Glättungskondensator anschließen!)

¹ Siehe zum Beispiel: Gert Hagmann, Leistungselektronik, Grundlagen und Anwendungen in der elektrischen Antriebstechnik (AULA-Verlag, 2009) oder die Internetseite „Aufwärtswandler“ in Wikipedia, die freie Enzyklopädie, <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Aufw%C3%A4rtswandler&oldid=128718649>.

Ausgangsspannung bei $R_L = 1000\Omega$	Ausgangsspannung bei $R_L = 90\Omega$	Ausgangsspannung im Leerlauf	Schaltfrequenz

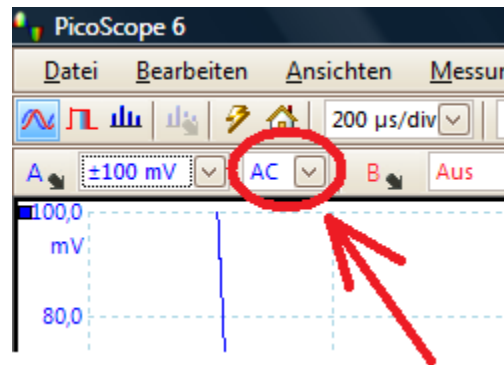


Abb. 15 – Kopplungsmodus „AC“

4.4 Konstantstromquelle

Die bislang betrachteten Feldeffekttransistoren sind sog. Anreicherungstypen (engl.: enhancement-mode field-effect transistor). Es ist eine Gate-Spannung U_{GS} von einigen Volt erforderlich, damit zwischen Drain und Source ein leitfähiger Kanal entsteht und ein Laststrom fließen kann (vergl. Einleitung, Abschnitt 1.1).

Auf dem Markt sind außerdem sog. Verarmungstypen erhältlich (engl.: depletion-mode field-effect transistor). Hier ist bereits bei einer Gate-Spannung $U_{GS} = 0V$ ein leitfähiger Kanal zumindest teilweise ausgebildet. Wird eine Gate-Spannung $U_{GS} \neq 0V$ angelegt, vergrößert oder verringert sich die Leitfähigkeit dieses Kanals (je nach der Polarität der Gate-Spannung U_{GS}). Abbildung 16 zeigt die Ausgangskennlinien eines solchen Verarmungstyps am Beispiel des Transistors BF245B.

Werden wie in Abbildung 17 die Gate- und Source-Anschlüsse direkt miteinander verbunden, haben dadurch Gate und Source dasselbe Potential. Die Spannung U_{GS} beträgt stets 0 Volt. Bei einem Verarmungstyp genügt dies, um einen Laststrom (I_D) fließen zu lassen.

Nun wird der Transistor über einen Lastwiderstand R_L an eine 12V-Spannungsquelle angeschlossen. Es zeigt sich, dass der Laststrom I_D auch bei einer Veränderung des Lastwiderstands R_L nahezu konstant bleibt. Zeichnet man für unterschiedliche Widerstände R_L die jeweiligen Arbeitsgeraden in das Ausgangskennlinienfeld, erkennt man leicht den Grund für den nahezu konstanten Laststrom: Solange der Lastwiderstand R_L einen bestimmten Maximalwert (in Abbildung 16 bei $R_{L,max} \approx 500\Omega$) nicht überschreitet, bleiben die Schnittpunkte von Arbeitsgerade und Transistorkennlinie im waagerechten Bereich der Transistorkennlinie, in diesem Beispiel bei $I_D \approx 10mA$.

Bei großen Widerstandswerten R_L sinkt der Laststrom ab. Im abgebildeten Beispiel ist bei $R_L = 1k\Omega$ immerhin noch $I_D = 9mA$, also lediglich 1mA weniger als im Leerlauf ($R_L = 0\Omega$).

Die Schaltung in Abbildung 17 bezeichnet man daher auch als Konstantstromquelle. Der Transistor sorgt dafür, dass der Laststrom I_D auch bei Veränderungen der Betriebsspannung und/oder des Lastwiderstands R_L konstant bleibt.

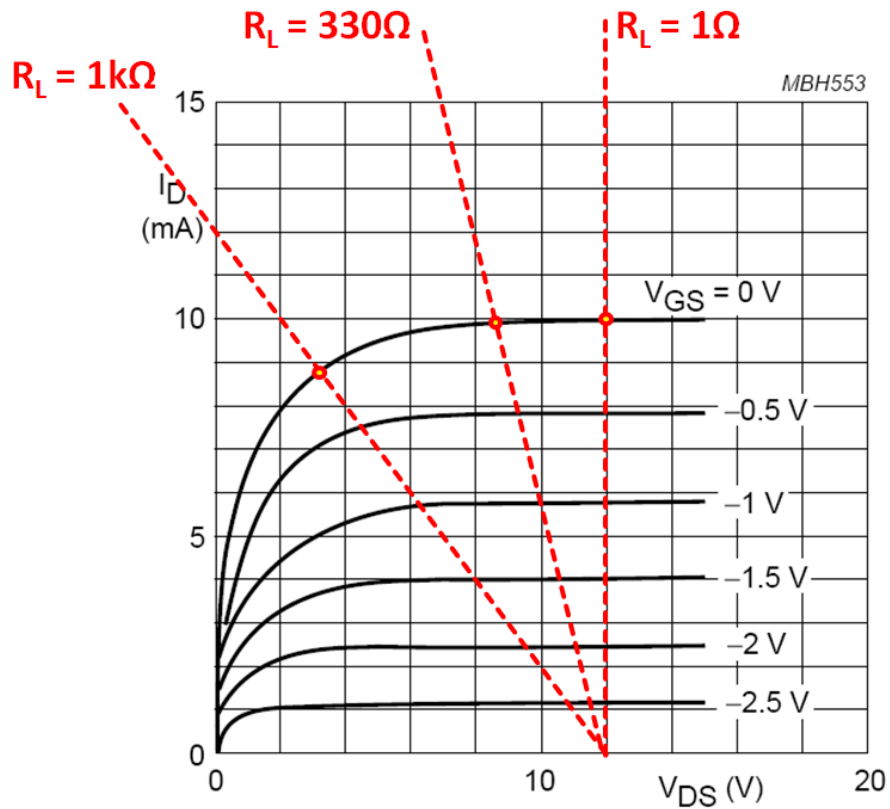


Abb. 16 – Ausgangskennlinien des Transistors BF245B² mit Arbeitsgeraden

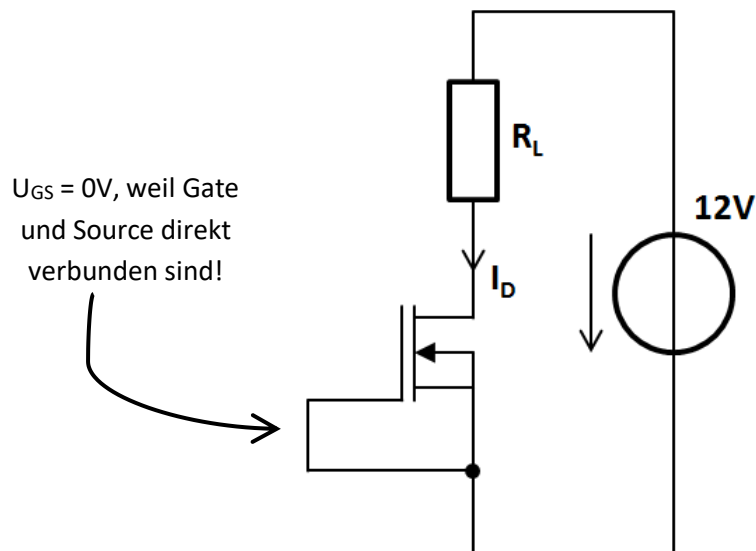


Abb. 17 – Konstantstromquelle mit n-Kanal-Verarmungstyp

² Aus dem Datenblatt des Transistors BF245B, Firma NXP B.V., 2010

Versuch 4a:

Verbinden Sie die Lastwiderstände (1Ω , 330Ω und $1k\Omega$), die sich im Bereich „Konstantstromquelle“ der Experimentierbox befinden, zunächst über einen Vorwiderstand $R_V = 1,3k\Omega$ und anschließend über den Transistor BF245B mit der Betriebsspannung von 12 Volt.

Messen Sie mit einem Strommessgerät (Amperemeter) den Strom, der jeweils durch den Lastwiderstand fließt. Tragen Sie die Messwerte in die folgende Tabelle ein:

Lastwiderstand	Laststrom bei einem Vorwiderstand $R_V = 1,3k\Omega$	Laststrom mit Transistor BF245B
1Ω		
330Ω		
$1k\Omega$		

Hinweis: Zum Aufbau von Konstantstromquellen sind Verarmungstyp-Transistoren erhältlich, bei denen Gate und Source bereits herstellereits direkt miteinander verbunden sind (Abbildung 18). Solche Bauelemente besitzen nur zwei Anschlussdrähte. Sie werden Stromregeldiode, Strombegrenzerdiode oder (engl.) „current regulator diode“ genannt. Beispiele für solche Stromregeldioden sind die bei vielen Distributoren erhältlichen Typen 1N5283...1N5314.

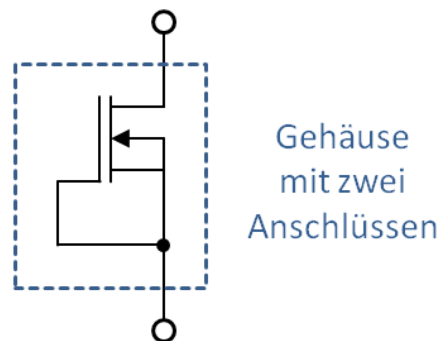


Abb. 18 – Stromregeldiode