



## TAKE-HOME EXAM IM WINTERSEMESTER 2020/21

### „Grundsaltungen der Leistungselektronik“

**Termin:** 27.02.2020

**Zeit:** 09:45 - 11:45

**Zugelassene Hilfsmittel:** Alle außer Hilfe durch andere Personen.

Hinweise zur Bearbeitung:

- Verwenden Sie ihr eigenes Papier oder einen Tablet-PC.
- Verwenden Sie mindestens für Diagramme Kästchenpapier.
- Schreiben Sie auf jede Seite Ihren Vornamen, Nachnamen und Ihre Matrikelnummer.
- Beschriften Sie Ihre Lösungen zu den Aufgaben nach der entsprechenden Aufgabe, z. B. 1a)
- Scannen Sie Ihre Lösungen als ein zusammenhängendes Dokument. Verwenden Sie das Dateiformat .pdf.
- Das gescannte Dokument muss leserlich sein und es darf nicht mit einem Passwortschutz versehen sein.
- Benennen Sie das gescannte Dokument wie folgt:  
Vorname\_Nachname\_Matrikelnummer.pdf.
- Laden Sie das gescannte Dokument in Ihrer Stud.IP-Gruppe bis spätestens 12:00 Uhr hoch.
- Laden Sie die Eigenständigkeitserklärung in Ihrer Stud.IP-Gruppe bis spätestens 12:00 Uhr hoch. Benennen Sie das Dokument der Eigenständigkeitserklärung wie folgt:  
Erklärung\_Vorname\_Nachname\_Matrikelnummer.pdf
- Beachten Sie auch die Hinweise in der Mail vom 11.02.2021

### Aufgabe 1: Leistungselektronische Bauelemente [25 P.]

**1a)** Welche zwei passiven Energiespeicher werden oft in der Leistungselektronik verwendet?  
Nennen Sie je ein Einsatzbeispiel!

Geben Sie jeweils die Formel für den Energieinhalt sowie die Differentialgleichung für den Zusammenhang zwischen Spannung und Strom des Bauteils an!

**1b)** Nehmen Sie an, dass an einer Induktivität eine konstante Spannung anliegt. Skizzieren und begründen Sie durch die Differentialgleichung aus **1a)** den Zeitverlauf des Stroms durch diese Induktivität.

- 1c)** Nehmen Sie nun an, dass eine konstante Spannung über einer Drossel mit einem Ferritkern anliegt. Ergänzen Sie in 1b) den Stromverlauf für den Fall, dass die Spannung sehr lange über der Drossel anliegt. Skizzieren Sie auch den Verlauf der relativen magnetischen Permeabilität über der Zeit.
- 1d)** Skizzieren und beschriften Sie die Hysteresekurve eines magnetischen Materials! Wie ändert sich diese Kurve, wenn ein Luftspalt in das Material eingefügt wird?
- 1e)** Beschreiben Sie kurz, wie die parasitären Größen eines MOSFETs das Ein- und Ausschaltverhalten beeinflussen! Skizzieren Sie ein Ersatzschaltbild für einen MOSFET mit diesen parasitären Größen!
- 1f)** Begründen Sie welche parasitäre Größe aus **1e)** zum ungewollten Einschalten des MOSFETs führen kann. Fertigen Sie eine Skizze eines MOSFETs mit parasitären Größen und einer Gatetreiberbeschaltung an, die das ungewollte Einschalten verhindert. Die Gatetreiberbeschaltung soll nur aus einem Gatewiderstand, der Spannungsversorgung und dem Gatetreiber, der als Verstärkersymbol dargestellt wird, bestehen.

Gegeben sei nun folgender Datenblattauszug eines Siliziumkarbid-MOSFETs.

**CHARGES, CAPACITANCES & GATE RESISTANCE**

Input Capacitance	$C_{ISS}$	$V_{GS} = 0 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz},$ $V_{DS} = 450 \text{ V}$		4415		pF
Output Capacitance	$C_{OSS}$			295		
Reverse Transfer Capacitance	$C_{RSS}$			25		
Total Gate Charge	$Q_{G(TOT)}$	$V_{GS} = -5/15 \text{ V}, V_{DS} = 720 \text{ V},$ $I_D = 60 \text{ A}$		200		nC
Threshold Gate Charge	$Q_{G(TH)}$			42		
Gate-to-Source Charge	$Q_{GS}$			76		
Gate-to-Drain Charge	$Q_{GD}$			56		
Gate-Resistance	$R_G$	$f = 1 \text{ MHz}$		1.5		$\Omega$

- 1g)** Berechnen Sie die benötigte Treiberleistung bei einer Schaltfrequenz von 60 kHz und den im Datenblatt empfohlenen Gatespannungspegeln!
- 1h)** Berechnen Sie den maximalen Pulsstrom des Gatetreibers, wenn ein externer Gatewiderstand von 1,8 Ohm in Reihe zum internen Gatewiderstand  $R_G$  des MOSFETs geschaltet wird.
- 1i)** Berechnen Sie den Ableitstrom über die Millerkapazität  $C_{RSS}$ , wenn die Spannungssteilheit  $dU_{DS}/dt$  beim Schalten 80 V/ns beträgt.

## Aufgabe 2: Gleichstromsteller [25 P.]

- 2a)** Skizzieren und beschriften Sie je einen Tiefsetzsteller, Hochsetzsteller und Inverswandler! Für welche Aufgabe werden die drei verschiedenen Wandler jeweils prinzipiell benötigt? Nennen Sie je ein Anwendungsbeispiel! Geben Sie jeweils die formalen Beziehungen zwischen Tastverhältnis und Ein- und Ausgangsspannung an!

Im Folgenden wird ein **Tiefsetzsteller** betrachtet. Nehmen Sie zunächst alle Bauteile als ideal an! Die Schaltung befindet sich bei Nennbetrieb weit entfernt vom lückenden Betrieb.

- 2b)** Zeichnen und beschriften Sie die zeitlichen Verläufe der Ströme durch den MOSFET, durch die Diode und in der Induktivität!  
Zeichnen Sie weiterhin die Verläufe der Spannungen über den drei Bauelementen!
- 2c)** Leiten Sie den formalen Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung in Abhängigkeit vom Tastverhältnis  $T_e/T$  für den nichtlückenden Betrieb her!

Es seien jetzt folgende Betriebsparameter gegeben:

$$\begin{aligned}U_E &= 48 \text{ V} \\U_A &= 12 \text{ V} \\f_s &= 100 \text{ kHz} \\R_L &= 2 \Omega\end{aligned}$$

- 2d)** Bestimmen Sie das benötigte Tastverhältnis  $d=T_e/T$  und die Einschaltzeit  $T_e$ !
- 2e)** Berechnen Sie den Wert der Induktivität  $L$ . Nehmen Sie nun an, dass der Tiefsetzsteller sich an der Lückgrenze befindet.
- 2f)** Wie verhält sich die Ausgangsspannung wenn Sie die Induktivität kleiner wählen als in **2e)** berechnet?

### Aufgabe 3: Schaltnetzteil [25 P.]

- 3a)** Skizzieren und beschriften Sie die Schaltbilder eines Sperrwandlers und eines Eintaktdurchflusswandlers!
- 3b)** Was ist der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Schaltungen?  
Wie unterscheiden sich die benötigten Transformatoren?
- 3c)** Nennen Sie zu beiden Schaltungen jeweils zwei Vorteile und zwei Nachteile!

Ein Eintaktdurchflusswandler soll in einem Monitor-Netzteil eingesetzt werden.  
Folgende Betriebsgrößen sind gegeben:

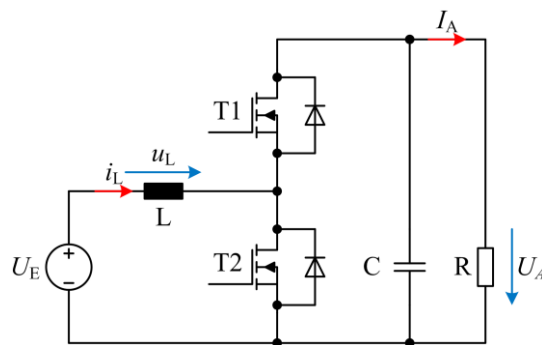
$$\begin{aligned}U_E &= 400 \text{ V (DC)} \\U_A &= 20 \text{ V} \\P_{A,\max} &= 50 \text{ W} \\f_s &= 100 \text{ kHz}\end{aligned}$$

- 3d)** Skizzieren und beschriften Sie die Spannungs- und Stromverläufe am Trafo primärseitig (Hauptwicklung) und sekundärseitig sowie am Transistor!
- 3e)** Das maximale Einschalttastverhältnis  $T_e/T$  des Eintaktdurchflusswandlers beträgt 50 %. Warum?
- 3f)** Berechnen Sie das benötigte Windungszahlverhältnis  $n_s/n_p$  für eine minimale Eingangsgleichspannung von 280 V ( $T_e/T = 50 \%$ )!
- 3g)** Berechnen Sie für dieses Windungszahlverhältnis nun das Einschalttastverhältnis  $T_e/T$  für die nominale Eingangsspannung und nichtlückenden Betrieb!

- 3h) Bei 20 W Ausgangsleistung und nominaler Eingangsspannung soll der Wandler an der Lückgrenze arbeiten.  
Skizzieren Sie den zeitlichen Verlauf des Stromes  $i_L$  in der Ausgangsdrossel!
- 3i) Berechnen Sie für diesen Betriebsfall den mittleren und maximalen Wert des Stromes  $i_L$ ! Welchen Induktivitätswert muss die Ausgangsdrossel haben?
- 3j) Der Wandler wird nun mit seiner maximalen Leistung von 50 W betrieben.  
Skizzieren und beschriften Sie erneut den Verlauf des Stromes  $i_L$  in der Ausgangsdrossel!

## Aufgabe 4: Kühlungsauslegung [25 P.]

- 4a) Nennen Sie die vier in Leistungshalbleitern auftretenden Arten von Verlusten!
- 4b) Nennen Sie die Verlustmechanismen in einer Ferritdrossel!



Der dargestellte synchrone Hochsetzsteller mit zwei Galliumnitrid Leistungshalbleitern hat den folgenden Nennbetriebspunkt:

$$\begin{aligned} U_E &= 200 \text{ V} \\ I_E &= 11 \text{ A} \\ U_A &= 400 \text{ V} \\ f_s &= 100 \text{ kHz} \\ \Delta I_L &= 6 \text{ A} \\ R_{\text{Kupfer}} &= 100 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

Der Wandler wird synchron betrieben, der Strom fließt also immer in einem der beiden MOSFETs. Ein Stromfluss in den Dioden ist vernachlässigbar. Gegeben ist weiterhin der folgende Datenblattauszug.

Parameter	Symbol	Value	Units
Thermal Resistance (junction-to-case) – top side	$R_{\theta JC}$	0.27	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
Maximum Soldering Temperature (MSL3 rated)	$T_{\text{SOLD}}$	260	$^{\circ}\text{C}$

Parameters	Sym.	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
Drain-to-Source Blocking Voltage	$V_{(BL)DSS}$	650			V	$V_{GS} = 0\text{ V}$ $I_{DSS} = 100\text{ }\mu\text{A}$
Drain-to-Source On Resistance	$R_{DS(on)}$		25	32	m $\Omega$	$V_{GS} = 6\text{ V}$ $T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$ $I_{DS} = 18\text{ A}$
Drain-to-Source On Resistance	$R_{DS(on)}$		65		m $\Omega$	$V_{GS} = 6\text{ V}$ $T_J = 150\text{ }^\circ\text{C}$ $I_{DS} = 18\text{ A}$
Gate-to-Source Threshold	$V_{GS(th)}$	1.1	1.7	2.6	V	$V_{DS} = V_{GS}$ $I_{DS} = 14\text{ mA}$

Parameters	Sym.	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
Turn-On Delay	$t_{D(on)}$		4.6		ns	$V_{DD} = 400\text{ V}$ $V_{GS} = 0 - 6\text{ V}$ $I_D = 16\text{ A}$ , $R_{G(ext)} = 5\text{ }\Omega$ $T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$ (Note 5)
Rise Time	$t_R$		12.4		ns	
Turn-Off Delay	$t_{D(off)}$		14.9		ns	
Fall Time	$t_F$		22		ns	
Output Capacitance Stored Energy	$E_{OSS}$		17		$\mu\text{J}$	$V_{DS} = 400\text{ V}$ $V_{GS} = 0\text{ V}$ $f = 100\text{ kHz}$
Switching Energy during turn-on	$E_{on}$		134.1		$\mu\text{J}$	$V_{DS} = 400\text{ V}$ , $I_{DS} = 20\text{ A}$ $V_{GS} = 0 - 6\text{ V}$ $R_{G(on)} = 10\text{ }\Omega$ , $R_{G(off)} = 1\text{ }\Omega$ $L = 120\text{ }\mu\text{H}$ $L_P = 2\text{ nH}$ (Notes 6, 7)
Switching Energy during turn-off	$E_{off}$		17		$\mu\text{J}$	

Die Kernverluste  $P_{Kern}$  der Drossel lassen sich durch die Steinmetzformel berechnen:

$$\frac{P_{Kern}}{V_{Kern}} = k f_s^a B^b$$

$$\left[ \frac{P_{Kern}}{V_{Kern}} \right] = \frac{W}{cm^3}$$

Mit:

$k = 92 \cdot 10^{-6}\text{ W/(cm}^3\text{)}$

$a = 1$

$b = 2,44$

Flussdichte  $B = 0,2\text{ T}$

Kernvolumen  $V_{Kern} = 20\text{ cm}^3$

- 4c) Berechnen Sie die Kernverluste der Drossel mit Hilfe der Steinmetzformel. Hinweis: Setzen Sie  $f_s$  und  $B$  einheitenlos ein.
- 4d) Berechnen Sie die ohmschen Verluste der Drossel. Vernachlässigen Sie dafür den Stromrippel. Wie groß sind die Gesamtverluste der Drossel, wenn Sie nur die Kernverluste aus 4c) und die ohmschen Verluste aus 4d) betrachten?

- 4e)** Berechnen Sie Durchlassverluste in T1 und T2 unter Berücksichtigung der jeweiligen Einschaltzeiten unter Annahme einer Sperrschichttemperatur von 150 °C. Vernachlässigen Sie dafür den Stromrippel.
- 4f)** Berechnen Sie die Schaltverluste in T2. Hinweis: Vernachlässigen Sie nicht den Stromrippel.

Die Drossel befindet sich in einem Aluminiumgehäuse. Der Raum zwischen Drossel und Aluminiumgehäuse ist mit einer thermisch leitfähigen Masse ausgegossen. Von der Drossel zum Aluminiumgehäuse betrage der thermische Übergangswiderstand der Vergussmasse 1,4 K/W. Das Aluminiumgehäuse wird zusammen mit den Halbleitern auf einen Kühlkörper montiert. Dabei betrage der thermische Übergangswiderstand vom Aluminiumgehäuse zum Kühlkörper 0,2 K/W. Nehmen Sie die thermische Leitfähigkeit des Aluminiumgehäuses als ideal an. Die Halbleiter sind nebeneinander auf den Kühlkörper geschraubt. Der thermische Übergangswiderstand vom Halbleiter (Case) zum Kühlkörper (Sink) betrage 2,4 K/W je Halbleiter.

- 4g)** Zeichnen und beschriften Sie das statische thermische Ersatzschaltbild der Anordnung! Falls Sie die Aufgaben c) - f) nicht lösen konnten, rechnen Sie mit folgenden Zahlenwerten weiter: Verluste in T1: 4 W, Verluste in T2: 11 W, Verluste Drossel: 16 W.
- 4h)** Berechnen Sie den maximalen thermischen Widerstand des benötigten Kühlkörpers wenn sichergestellt sein soll, dass eine maximale Drosseltemperatur von 100 °C und eine maximale Sperrschichttemperatur von 150 °C bei einer Umgebungstemperatur von 50 °C nicht überschritten wird.