

# LED-Treiber

Die technischen Eigenschaften von Leuchtdioden (= LED = light emitting diode) wurden in den letzten Jahren massiv verbessert.

LEDs sind in allen Farben (infrarot, rot, gelb, grün, blau, ultraviolett) und verschiedenen Weiss-Tönen (Lichttemperatur: 2500K bis 7000K) mit gutem Farbwiedergabeindex erhältlich.

Der physikalische Wirkungsgrad erreicht 30%, die Lichtausbeute rund 100 Lumen/Watt, was den Energiesparlampen entspricht.

Unschlagbar ist die Lebensdauer von bis zu 100'000 Stunden (= 11 Jahre Dauerbetrieb).

Weil die technischen Eigenschaften laufend besser werden und die Preise weiterhin stark sinken, werden LED-Lampen in wenigen Jahren die dominante Beleuchtungs-Technologie sein.

Dieser Text behandelt ausschliesslich die für LED-Lampen eingesetzte Treiber-Elektronik. Es werden die typischen Schaltungen vorgestellt und diskutiert.

Die Theorie wird mit Übungsaufgaben ergänzt. Die detaillierten Lösungswege sind im Anhang.

Für das Verständnis dieses Textes werden Elektronik-Grundkenntnisse vorausgesetzt sowie vertieftes Verständnis der Funktionsweise der getakteten DC-DC-Wandler, welche z.B. in [www.zhaw.ch/~hhrt/EK1/LeistungsFETundIGBT.pdf](http://www.zhaw.ch/~hhrt/EK1/LeistungsFETundIGBT.pdf) beschrieben werden.

Tipp: Wikipedia bietet eine umfassende Sicht auf LEDs: [de.wikipedia.org/wiki/Led](http://de.wikipedia.org/wiki/Led)

**Warnung: nicht direkt/ungeschützt in eine Leistungs-LED blicken.**

Original-URL: [www.zhaw.ch/~hhrt/EK1/LED-Treiber.pdf](http://www.zhaw.ch/~hhrt/EK1/LED-Treiber.pdf)

© Hanspeter Hochreutener, [hhrt@zhaw.ch](mailto:hhrt@zhaw.ch) , 3. Mai 2011

Zentrum für Signalverarbeitung und Nachrichtentechnik, [zsn.zhaw.ch](http://zsn.zhaw.ch)

School of Engineering [www.engineering.zhaw.ch](http://www.engineering.zhaw.ch)

Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften [www.zhaw.ch](http://www.zhaw.ch)

## Inhaltsverzeichnis

1. LED-Kennlinien.....	2
1.1. Typische Daten einer Power-LED.....	2
1.2. Lineare Ersatzschaltung.....	3
1.3. Lange Lebensdauer bei tiefer Temperatur.....	4
2. LED an Gleichspannung.....	5
2.1. Betrieb mit Vorwiderstand.....	5
2.2. Stromkonstant-Schaltung.....	5
2.3. Getakteter Abwärtswandler.....	6
2.4. Batterie-Betrieb mit getaktetem Aufwärtswandler.....	10
3. LED an Netz-Wechselspannung von 230V / 50Hz.....	11
3.1. Kapazitives Vorschaltgerät.....	11
3.2. Gleichrichter und Abwärtswandler.....	13
4. Links.....	13
5. Musterlösungen zu den Übungsaufgaben.....	14

## 1. LED-Kennlinien

Der **Lichtstrom** ist **proportional zum Strom** durch die LED.

### 1.1. Typische Daten einer Power-LED

Die Tabellen und Grafiken stammen aus dem Datenblatt der Z-Power LED von Seoul Semiconductors: [www.acriche.com/en/popup/pop\\_product\\_search.asp?seq=205](http://www.acriche.com/en/popup/pop_product_search.asp?seq=205)

4-1 Electro-Optical characteristics at  $I_F=350\text{mA}$ ,  $T_A=25^\circ\text{C}$

Parameter	Symbol	Value			Unit
		Min	Typ	Max	
Luminous Flux <sup>[1]</sup>	$\Phi_V$ <sup>[2]</sup>	-	72	-	lm
Correlated Color Temperature <sup>[3]</sup>	CCT	-	4000	-	K
CRI	$R_a$	-	93	-	-
Forward Voltage <sup>[4]</sup>	$V_F$	3.0	3.25	4	V
View Angle	$2\theta$ 1/2	124			deg.
Thermal resistance <sup>[5]</sup>	$R_{\theta_{j-B}}$	8.8			$^\circ\text{C} / \text{W}$
Thermal resistance <sup>[6]</sup>	$R_{\theta_{j-c}}$	7.2			$^\circ\text{C} / \text{W}$

Bei 350mA hat die LED (natural white S42182) eine Lichtausbeute von 72lm, die Lichttemperatur ist 4000K und der Farbwiedergabeindex 93.

Die Durchlassspannung streut stark und liegt zwischen 3.0 und 4.0V.

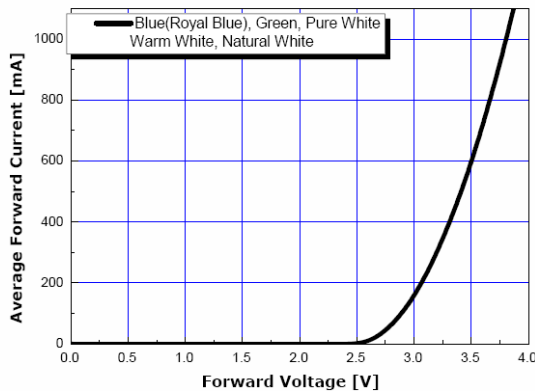
Der Wärmedurchgangswiderstand zwischen LED-Halbleiter (j = junction = Sperrschicht) und der Metallplatte (c = case = Gehäuse) ist  $7.2^\circ\text{C}/\text{W}$ . Zwischen Halbleiter und Luft muss mit ca.  $50^\circ\text{C}/\text{W}$  gerechnet werden.



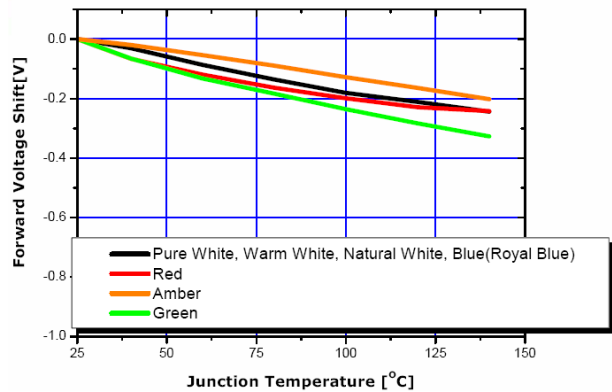
## 1.2. Lineare Ersatzschaltung

Der Verlauf der Kennlinie und ihre Temperatur-Abhängigkeit sind typisch für eine Diode.

Forward Voltage vs. Forward Current ,  $T_A=25\text{ }^\circ\text{C}$



2. Forward Voltage Shift vs. Junction Temperature at  $I_F=350\text{mA}$



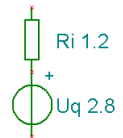
### Übungsaufgabe 1

Bestimmen sie die lineare Ersatzschaltung im Arbeitspunkt bei 350mA.

Tipp: Die detaillierten Lösungswege befinden sich im Anhang.

#### Resultat

Lineare Spannungsquelle:  $U = U_q + R_i \cdot I$  mit  $U_q = 2.8\text{V}$  und  $R_i = 1.2\Omega$



### Übungsaufgabe 2

Bestimmen sie den Temperatur-Koeffizienten der Spannung (für die weisse LED) und ergänzen sie die Formel der linearen Ersatzquelle.

#### Resultat

$$c = \Delta U / \Delta T = -2.2\text{mV/K}$$

Lineare Spannungsquelle:  $U = U_q + c \cdot \Delta T + R_i \cdot I$  mit  $U_q = 2.8\text{V}$ ,  $R_i = 1.2\Omega$ ,  $c = -2.2\text{mV/K}$

### Übungsaufgabe 3

Die LEDs unterliegen Fertigungstoleranzen. Eine LED mit tiefer und eine LED mit hoher Durchlassspannung werden an einer Spannungsquelle mit  $U = 3.5\text{V}$  parallel angeschlossen. Berechnen sie die Ströme (ohne Berücksichtigung der Erwärmung) für folgende Zahlenwerte:  $U_{q\text{LED}1} = 2.8\text{V}$ ,  $U_{q\text{LED}2} = 3.2\text{V}$ ,  $R_i = 1.2\Omega$

Die LEDs werden ohne Kühlkörper betrieben und durch Konvektion gekühlt. Der Wärmeübergangswiderstand zur Umgebungsluft beträgt ca.  $R_{th} = \Delta T / \Delta P = 50\text{K/W}$ . Um welche Temperatur erwärmt sich jede LED?

Durch die Erwärmung steigt der Strom an. Berechnen sie (eine Iteration) die sich so einstellenden Ströme und Temperaturerhöhungen.

Fakultativ: Temperatur-Erhöhungen berechnen als Endwert einer geometrischen Reihe.

Welche Schlussfolgerungen ziehen sie daraus?

#### Resultat

$$I_{\text{LED}1} = 583\text{mA} \quad I_{\text{LED}2} = 250\text{mA} \quad \Delta T_{\text{LED}1} = 102\text{K} \quad \Delta T_{\text{LED}2} = 44\text{K}$$

Temperatur-Einfluss mit einer Iteration berücksichtigt:

$$I_{\text{LED}1} = 770\text{mA} \quad I_{\text{LED}2} = 331\text{mA} \quad \Delta T_{\text{LED}1} = 135\text{K} \quad \Delta T_{\text{LED}2} = 58\text{K}$$

In dieser einen Iteration erwärmt sich die bereits wärmere LED1 um weitere 33K und die kühlere LED2 nur um 14K.

Temperatur-Erhöhungen berechnen als Endwert einer geometrischen Reihe:

$$\Delta T_{LED1} = 151K \quad \Delta T_{LED2} = 65K$$

Die besser leitende LED1 erwärmt sich um 151K, die LED2 nur um 65K.

Schlussfolgerungen:

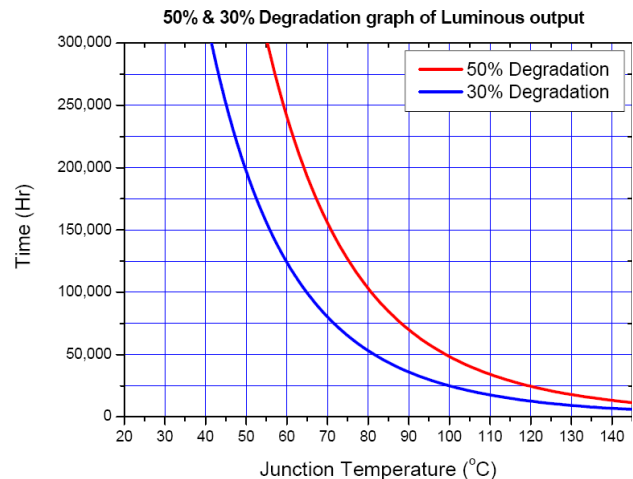
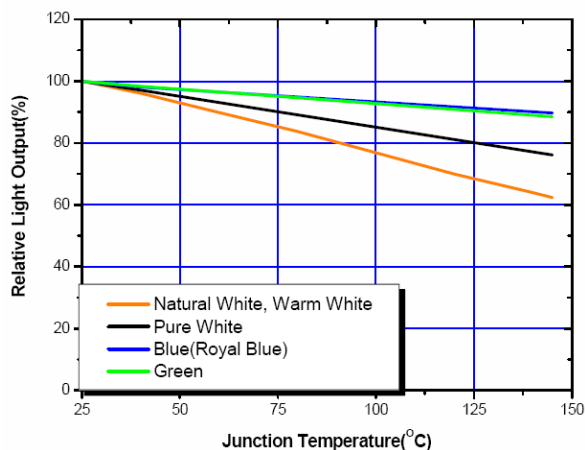
**LEDs dürfen (ohne Vorwiderstand) nicht an einer Spannungsquelle betrieben werden.**

**LEDs dürfen (ohne Vorwiderstand) nicht parallel geschaltet werden, da die wärmere LED resp. jene mit tieferer Durchlassspannung (fast) den ganzen Strom übernimmt und durch Überstrom oder Überhitzung zerstört werden kann.**

### 1.3. Lange Lebensdauer bei tiefer Temperatur

Mit zunehmender Halbleiter-Temperatur sinken Wirkungsgrad und Lebensdauer markant, wie den folgenden Grafiken entnommen werden kann.

1. Relative Light Output vs. Junction Temperature at  $I_f=350mA$



#### Übungsaufgabe 4

Bestimmen sie die relative Lichtausbeute und die Lebensdauer (Lichtausbeute auf 50% abgefallen) für eine gut gekühlte (natural-white) LED mit 60°C Halbleiter-Temperatur und eine schlecht gekühlte mit 100°C.

#### Resultat

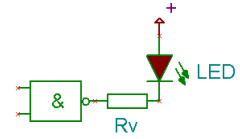
LED bei 60°C:	Lichtausbeute = 95%	Lebensdauer = 240'000h
LED bei 100°C:	Lichtausbeute = 85%	Lebensdauer = 45'000h

**Niedrige LED-Temperatur ist vital!** Das kann erreicht werden durch gute Kühlung (grosser Kühlkörper) oder Betrieb mit kleineren Strömen (z.B. doppelt so viele LED bei halbem Strom).

## 2. LED an Gleichspannung

### 2.1. Betrieb mit Vorwiderstand

Signal-LEDs werden oft direkt von digitalen Ausgängen angesteuert. Der Strom für die Signal-LEDs beträgt ca. 10mA und wird üblicherweise mit einem Widerstand begrenzt/eingestellt.



#### Übungsaufgabe 5

Wie gross muss der Vorwiderstand gewählt werden für eine LED mit Arbeitspunkt 2V@10mA an 5V Speisung. Und wie gross ist der (elektrische) Wirkungsgrad?

Ist diese Schaltung für LED-Lampen geeignet?

#### **Resultat**

$$R_v = 300\Omega \quad \eta = 40\%$$

Bei LED-Lampen ist der Wirkungsgrad entscheidend für eine hohe Energieeffizienz.

### 2.2. Stromkonstant-Schaltung

#### Übungsaufgabe 6

Wie gross müsste der Spannungsabfall am Vorwiderstand gewählt werden, damit der Strom höchstens um 10% sinkt, wenn anstelle einer 3V- eine 4V-LED (= Exemplarstreuung gemäss Datenblatt) verbaut wird?

Der Spannungsabfall am Vorwiderstand müsste mindestens 10V betragen!

Für LED-Lampen werden darum fast ausschliesslich Stromkonstant-Schaltungen verwendet.

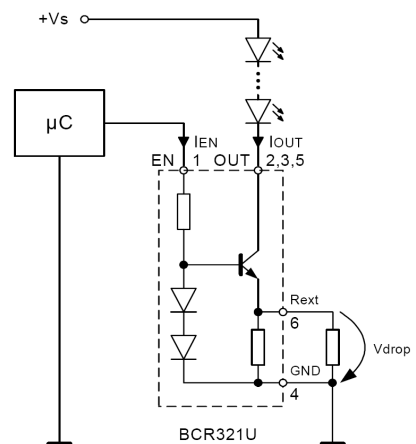
Der hier abgebildete BCR321U ist ein Stromkonstant-IC.

Wenn der Mikro-Controller den ENable-Eingang auf high setzt, steigt die Spannung an der Basis auf  $2 \cdot 0.7V = 1.4V$  (= Flussspannung beider Dioden).

Weil an der Basis-Emitter-Diode 0.7V abfallen, verbleiben 0.7V am Strommess-Widerstand RE beim Emitter und der Emitter-Strom ergibt sich zu  $I_E = 0.7V/RE$ .

Und für den Collector-Strom gilt  $I_C \approx I_E = 0.7V/RE$

Er ist somit konstant und kann über den Wert des Emitter-Widerstandes eingestellt werden.



#### Übungsaufgabe 7

Angaben aus dem Datenblatt des BCR321U:

Widerstand am ENable-Eingang = 1.5kΩ. Interner Strommess-Widerstand am Emitter = 90Ω. Minimale Strom-Verstärkung des Transistors = 200.

Wie gross muss der externe Strommess-Widerstand sein, für einen Strom von 100mA?

Welche Steuerspannung von Mikro-Controller wird minimal benötigt?

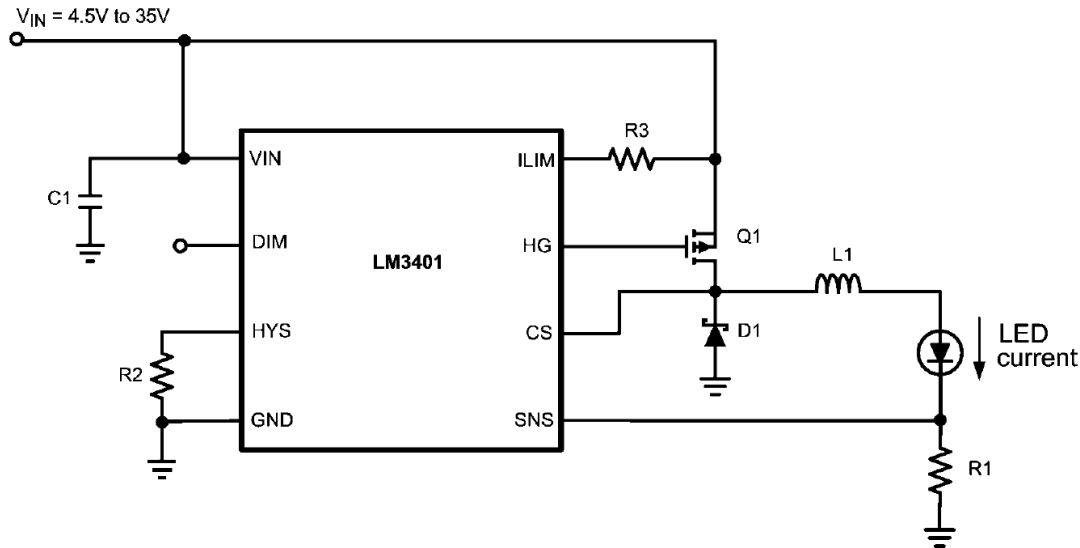
#### **Resultat**

$$R_{ext} = 7.6\Omega \quad U_{EN} = 2.15V \quad \text{Ein 3.3V-Micro-Controller kann verwendet werden.}$$

## 2.3. Getakteter Abwärtswandler

Wenn eine Gleichspannung von mindestens 5V zur Verfügung steht, wird vorzugsweise der getaktete Abwärtswandler eingesetzt, da der elektrische Wirkungsgrad bei ca. 90% liegt.

Der Treiber-IC LM3401 für diese klassische Schaltung wird hier exemplarisch besprochen.

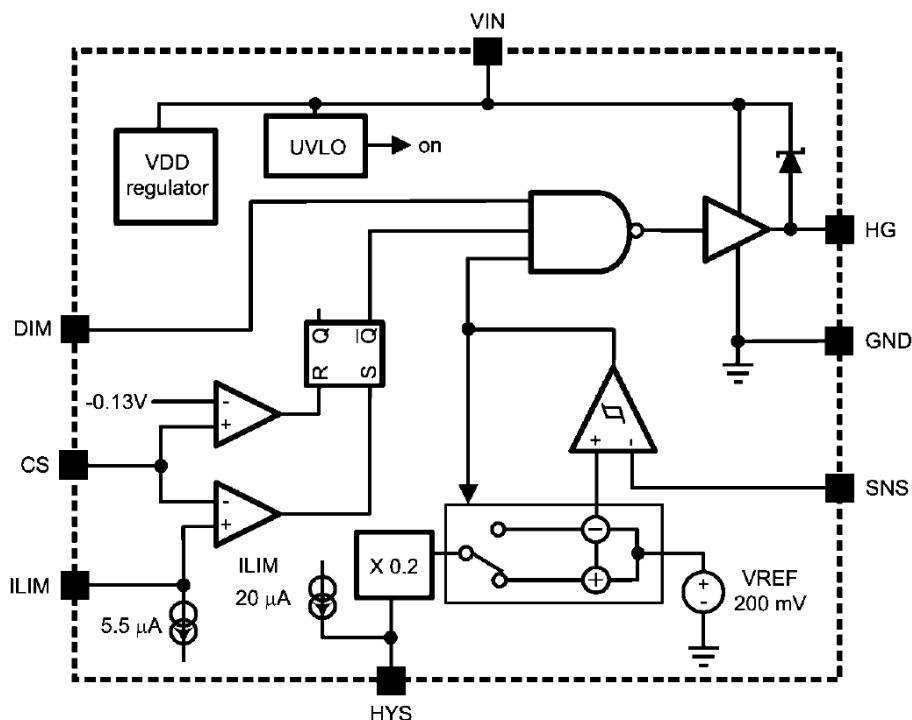


Der Leistungsteil eines getakteten Abwärtswandlers besteht aus dem Umschalter, gebildet aus dem Transistor Q1 und der Diode D1 sowie der Speicherdrossel L1. Mit dem Tastverhältnis (= Einschaltzeit des Transistors / Periodendauer) kann die Ausgangsspannung stufenlos von 0 bis VIN variiert werden.

Eine detaillierte Beschreibung der Abwärtswandler mit Kurvenformen und Dimensionierungsregeln finden sie in [www.zhaw.ch/~hrrt/EK1/LeistungsFETundIGBT.pdf](http://www.zhaw.ch/~hrrt/EK1/LeistungsFETundIGBT.pdf).

Bei Schaltnetzteilen wird das Tastverhältnis so geregelt, dass die Ausgangsspannung konstant gehalten wird. Bei LED-Treibern hingegen wird auf konstanten Ausgangs-Strom geregelt.

Die Funktionsweise der Schaltung wird nun anhand des Blockschaltbildes des LM3401 erklärt.



Am SNS-Eingang (sense = fühlen) wird der Spannungsabfall am Strommess-Shunt R1 erfasst (= Strom-Istwert). Der Comparator vergleicht diesen mit VREF (= Sollwert).

Istwert > Sollwert+Hysterese => Transistor Q1 via Ausgang HG ausschalten => Strom sinkt

Istwert < Sollwert-Hysterese => Transistor Q1 via Ausgang HG einschalten => Strom steigt

Die Hysterese dieser Schmitt-Trigger-Schaltung kann mit einem Widerstand am HYS-Anschluss eingestellt werden. Sie beeinflusst zusammen mit dem Wert der Speicherdrossel L1 die Schaltfrequenz.

Über den DIM-Eingang (dim = abdunkeln), kann mit einem PWM-Signal von einem Micro-Controller der Strom stufenlos reduziert werden.

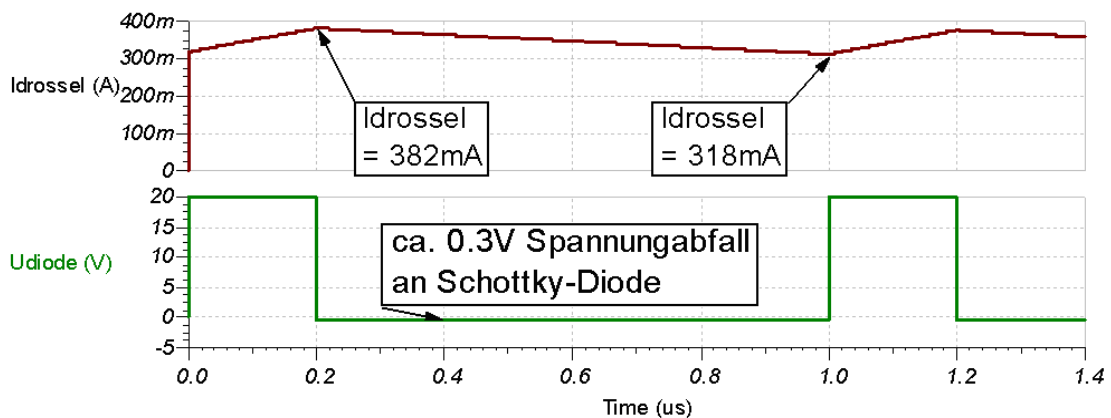
Der CS-Eingang (= current sense) bietet ein Überstrom-Kurzschluss-Schutz mit Vorrang gegenüber dem Soll-Istwert-Regelkreis. Der Abschaltstrom kann über einen Widerstand am ILIM-Anschluss (= I limit) eingestellt werden.

### **Übungsaufgabe 8**

Gegeben: Versorgungsspannung  $V_{IN} = 20V$ , Schaltfrequenz  $f = 1MHz$ ,  $L1 = 50\mu H$ ,  $U_{LED} = 4V$  (konstant),  $I_{LED} = 350mA$  (im Mittel),  $UR1$  wird vernachlässigt (da  $\ll U_{LED}$ )

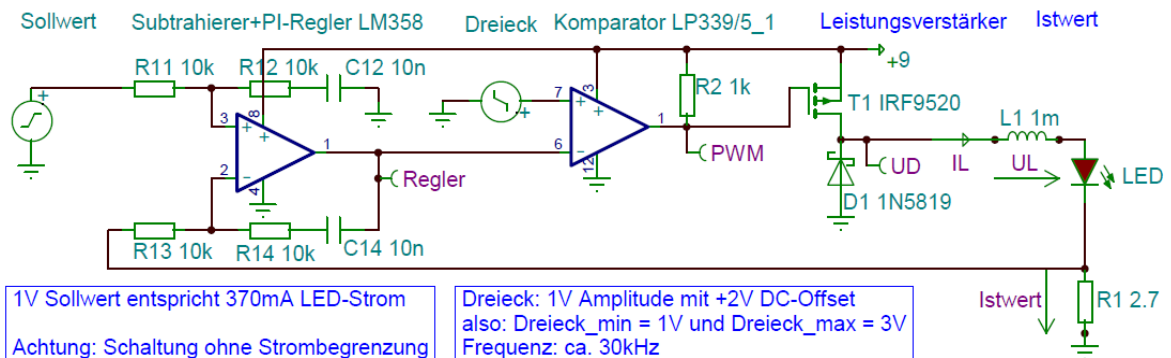
Gesucht: Kurvenverläufe von Drain-Spannung (= Dioden-Spannung) und Speicherdrossel-Strom mit Zahlenangaben bei den Umschaltpunkten.

### **Resultat**



## Übungsaufgabe 9

Natürlich kann man den Abwärtswandler auch mit diskreten Bauteilen aufbauen:



### Funktionsbeschreibung

T1, D1 und L1 bilden den Leistungs-Verstärker, einen getakteten Abwärtswandler, welcher über ein PWM-Signal am Gate von T1 gesteuert wird.

Der Spannungsabfall an R1 ist proportional zum LED-Strom. Dieser Istwert wird vom gewünschten Sollwert subtrahiert mit Hilfe der Subtrahier-Schaltung links im Schema.

Die Regelabweichung (= Sollwert - Istwert) wird im Proportional-Integral-Regler (PI-Regler) aufbereitet. R12 und R14 (= P-Anteil) bestimmen, wie die Schaltung auf schnelle Störungen reagiert. P-Regler haben eine kurze Reaktionszeit, aber sind relativ ungenau. C12 und C14 (= I-Anteil) bewirken, dass die Fehler des P-Reglers allmählich auskorrigiert werden (Regler-Einstellung z.B. mit dem Verfahren von Ziegler und Nichols [http://de.wikipedia.org/wiki/Faustformelverfahren\\_\(Automatisierungstechnik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Faustformelverfahren_(Automatisierungstechnik))). Der PI-Regler ist im obigen Schema im Subtrahierverstärker integriert.

Das PWM-Signal wird durch den Komparator erzeugt, indem ein Dreieck-Signal (mit der gewünschten PWM-Frequenz) mit dem Regler-Ausgang verglichen wird.

### Komparator mit Open-Collector-Ausgang

Ein Open-Collector-Ausgang besteht lediglich aus einem Transistor der gegen Ground schaltet. Es braucht den Pull-Up-Widerstand R2, damit die Ausgangsspannung positiv werden und den FET ausschalten kann.

### Unbenutzte Ein- und Ausgänge

Der LM358 hat zwei Operations-Verstärker und der LM339 vier Komparatoren im selben Gehäuse. Die Eingänge der unbenutzten Teile dürfen nicht offen gelassen werden, weil sonst störende parasitäre Schwingungen auftreten können.

Unbenutzter Operations-Verstärker: nicht-invertierenden Eingang an Ground legen und invertierenden Eingang mit dem Ausgang verbinden.

Unbenutzte Komparatoren: Alle Eingänge an Ground legen.

### Speisespannung mit keramischem Kondensator abblocken

, da sonst, via Leitungs-Induktivität störende Schwingungen im MHz-Bereich entstehen können. 100nF sind ausreichend, um die hochfrequenten Störungen abzublocken.

### Single-Supply-Angabe im Datenblatt

Damit man für den Operations-Verstärker und den Komparator keine separate negative Speisung benötigt, wurden für single-supply geeignete Bausteine verwendet. Eingangsspannungsbereich (= input common mode voltage range) und Ausgangsspannungsbereich (= output voltage swing) müssen also bis an die negative Speisung reichen.

Wo im Datenblatt des LM358 resp. des LM339 stehen diese Information?



## **Berechnungen**

Für die Schaltungs-Dimensionierung können sie folgende Werte annehmen:  
Uspeisung = 9V, ULED = 3.5V. Usollwert = Uistwert = 0...1V für ILED = 0...350mA.

Wie gross muss der Widerstand R1 gewählt werden?

Berechnen sie das Tastverhältnis des PWM-Signals und den Strom-Ripple  $\Delta I_{LED}$ .

Mit welcher maximalen Speisespannung darf die Schaltung betrieben werden?

## **Resultate**

$R1 = 2.86\Omega$

PWM-Verhältnis = 50%

$\Delta I_L = 75\text{mA}$

Uspeisung\_max = 20V

## **Übungsaufgabe 10**

Vielleicht möchten sie vor dem Aufbauen der Schaltung diese mit den berechneten Werten simulieren und allfällige Fehler ohne Verbrennungsgefahr lokalisieren und beheben.

Bauen sie die Schaltung auf, schliessen sie einen Leistungswiderstand ( $10\Omega$ , 5W) anstelle der LEDs an und überprüfen sie, ob sich der Strom ILED über den ganzen Bereich 0...350mA stufenlos einstellen lässt.

Stimmen die Spannungen und Ströme (Kurvenform und Amplitude) mit den simulierten Werten überein? Wie lassen sich Abweichungen erklären?

## **Übungsaufgabe 11**

Messen sie Speise-Spannung und -Strom, sowie Spannung und Strom am Lastwiderstand beim Nennstrom von 350mA und berechnen sie daraus den elektrischen Wirkungsgrad der Schaltung.

Wie könnte der Wirkungsgrad verbessert werden?

## **Resultate**

$\eta = 70\%$

R1 verkleinern und die Sollwert- und Istwert-Spannungen senken.

**Wenn alle diese Tests erfolgreich durchgeführt wurden, kann der Lastwiderstand endlich durch eine Leistungs-LED ersetzt werden.**

**Warnung: nicht direkt/ungeschützt in eine Leistungs-LED blicken.**

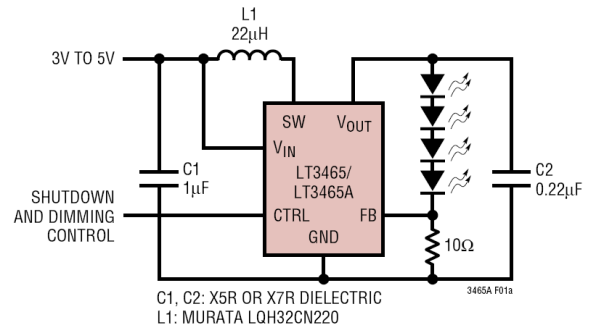
## **Optimierte Schaltung für getakteten Abwärtswandler mit diskreten Bauteilen**

Im Anhang finden sie eine Schaltung, welche mit nur einem Operations-Verstärker und ohne externe Signale funktioniert.

## 2.4. Batterie-Betrieb mit getaktetem Aufwärtswandler

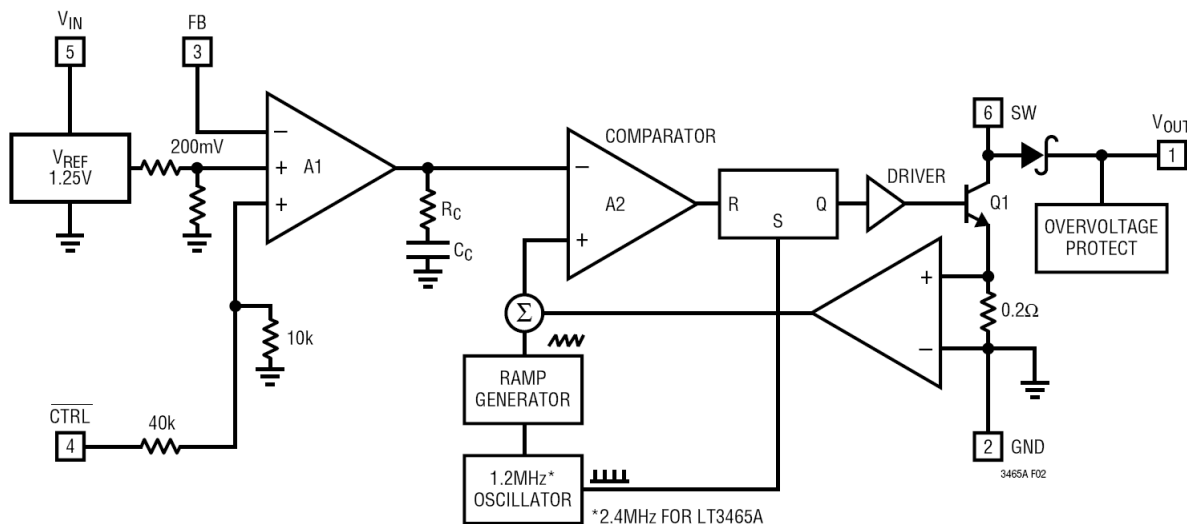
Weisse LEDs benötigen je nach Exemplar 3.0 bis 4.0V. In Taschenlampen, Mobiltelefonen, Kameras, etc. wird oft ein Lithium-Ionen-Akku mit 3.6V Nennspannung verwendet. Je nach Ladezustand variiert die Spannung zwischen 2.5 und 4.2V. Die Batteriespannung muss darum heraufgesetzt werden. Die Regelung muss dabei den LED-Strom konstant halten.

Der IC LT3465 wurde für diesen Zweck entwickelt. Bis auf Speicherdrossel, Strommess-Widerstand und Siebkondensatoren sind alle Bauteile integriert. Der maximale Eingangsstrom beträgt 250mA, womit LED-Ströme bis ca. 20mA möglich sind.



Eine detaillierte Beschreibung der Aufwärtswandler mit Kurvenformen und Dimensionierungsregeln finden sie in [www.zhaw.ch/~hhr/EK1/LeistungsFETundIGBT.pdf](http://www.zhaw.ch/~hhr/EK1/LeistungsFETundIGBT.pdf).

Die Funktionsweise der Schaltung wird nun anhand des Blockschaltbildes des LT3465 erklärt.



Ein interner Oszillator setzt jeweils zu Beginn einer Clock-Periode ein RS-Flip-Flop, welches den Transistor Q1 einschaltet. Der Strom durch die Speicherdrossel L1 (Anschluss SW = switch) steigt langsam an und speichert magnetische Energie. Der Spannungsabfall durch den externen Strommess-Widerstand (Anschluss FB = feedback = Istwert) wird verglichen mit dem internen Sollwert (200mV). Sobald der Sollwert erreicht ist, wird das RS-Flip-Flop zurückgesetzt und der Transistor schaltet aus. Die im Magnetfeld der Speicherdrossel gespeicherte Energie fließt nun über die Diode zum Ausgang (VOUT). Zum Schutz vor Überstrom/Kurzschluss bewirkt der Spannungsabfall am Emitter-Widerstand zusätzlich eine schnelle Abschaltung.

### Übungsaufgabe 12

Gegeben: Batteriespannung  $V_{IN} = 3.6V$ ,  $V_{OUT} = 14V$  (4 LEDs in Serie),  $I_{LED} = 20mA$ , Wirkungsgrad = 80%

Gesucht: mittlerer Eingangsstrom, Tastverhältnis =  $\text{Transistor\_ein} / \text{Clock\_Periode}$ , mittlerer Speicherdrosselstrom

### Resultat

Mittlerer Eingangsstrom = 97mA, Tastverhältn. = 74%, Transistor-Spitzenstrom = 131mA

### 3. LED an Netz-Wechselspannung von 230V / 50Hz

Wenn LEDs andere Lampentypen ersetzen sollen, müssen sie direkt an Netz-Wechselspannung betrieben werden können und mit den gängigen Schraubfassungen angeboten werden.

#### 3.1. Kapazitives Vorschaltgerät

Die Idee ist dieselbe wie beim Betrieb mit Vorwiderstand (siehe oben). Eine relativ grosse Impedanz wird in Serie zu den LEDs geschaltet, um den Strom zu begrenzen.

Bei Wechselspannung kommen als Impedanzen neben Widerstand auch Kapazität oder Induktivität in Frage. Die letzteren haben den Vorteil, dass sie keine Wirkleistung verheizen und somit den Wirkungsgrad nicht verschlechtern.

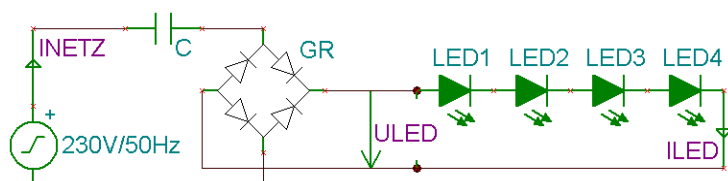
Das Schaltungsprinzip ist nachfolgend gezeigt.

#### Warnungen:

**Die LEDs sind vom Netz elektrisch nicht isoliert: Lebensgefahr beim Berühren!**

**Schaltung unbrauchbar, da sehr grosse Spitzenströme beim Einschalten auftreten.**

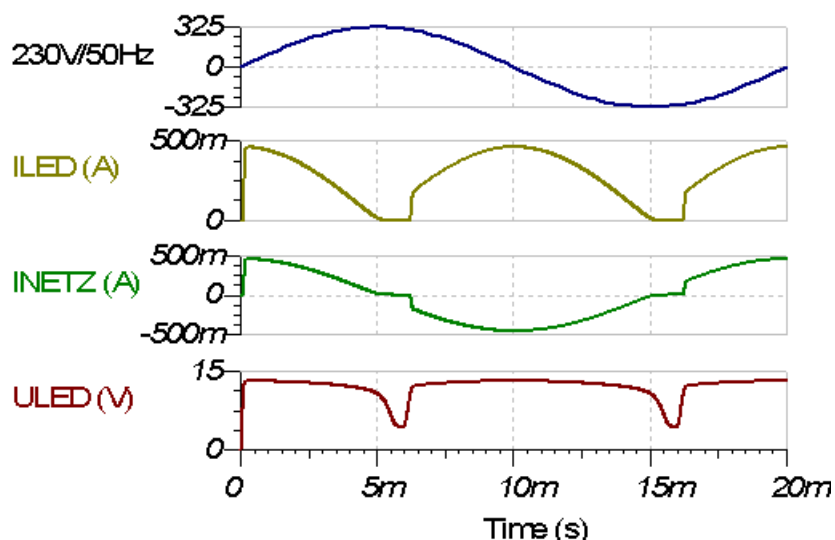
**In der Praxis bewährte Schaltung siehe weiter unten.**



Da der Spannungsabfall an den LEDs relativ klein ist im Vergleich zur Netzspannung, liegt am Kondensator praktisch ein Sinus von 230V/50Hz an. Es fließt ein Netzstrom  $I = U \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C$ . Der Strom muss vor den LEDs noch gleichgerichtet werden.

Weil die Spannung an C viel grösser ist als die Spannung an den LED, hat die LED-Spannung praktisch keinen Einfluss auf den Strom. Der Netzstrom ist praktisch sinusförmig und 90° voreilend. Die Schaltung verursacht viel kapazitive Blindleistung.

In einem 230V-Netz können bis ca. 30 LEDs so in Serie geschaltet werden.



### Übungsaufgabe 13

Berechnen sie für obige Schaltung (mit den Spannungen und Strömen in der Grafik) den Kondensator, die Wirkleistung, die Blindleistung und den elektrischen Wirkungsgrad.

#### Resultat

$$C = 4.9\mu\text{F} \quad P = 4.6\text{W} \quad Q = 81\text{var} \quad \text{Wirkungsgrad} \approx 90\%$$

Die Blindleistung ist beachtlich. 30 so aufgebaute Lampen würden eine 10A Hausinstallation bereits auslasten!

### Übungsaufgabe 14

Als strombegrenzende Impedanz soll anstelle eines Kondensators eine Spule verwendet werden. Berechnen sie die Induktivität.

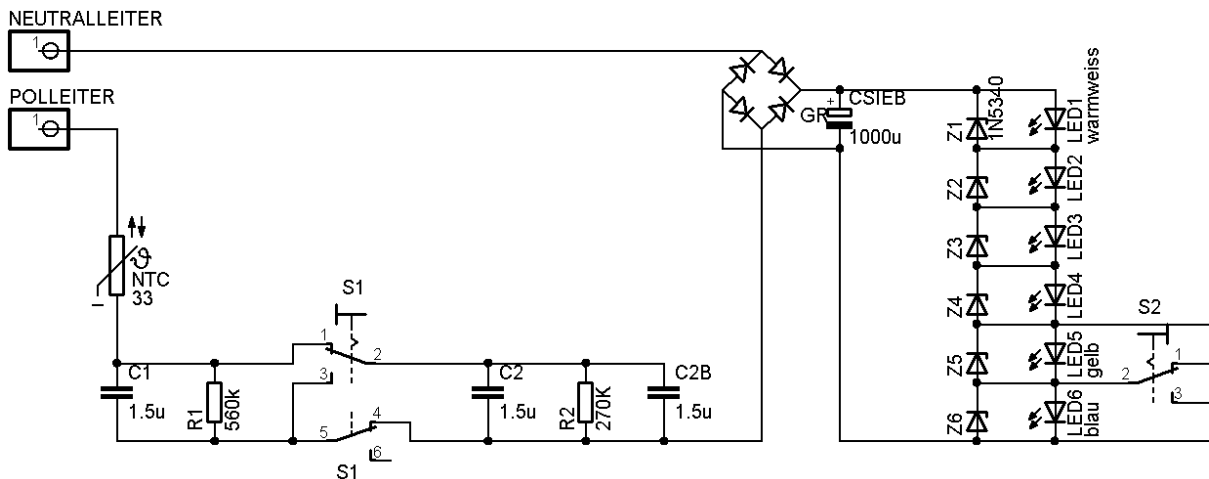
#### Resultat

$$L = 2.1\text{H}$$

Eine solche Induktivität wäre gross und teuer und wird bei LEDs nicht verwendet.

Bei Leuchtstoffröhren hingegen wird die Variante induktives Vorschaltgerät standardmässig zur Strombegrenzung verwendet, da kapazitive Vorschaltgeräte die Lebensdauer der Röhren massiv verkürzen.

Nun zur praxis-tauglichen Schaltung für eine Tischlampe.



Zur Begrenzung des Einschaltstromes wird ein NTC in den Polleiter geschlauft. Mit der Zeit erwärmt er sich und sein Widerstand sinkt. Damit sinkt auch der durch ihn verursachte Verlust.

Mit dem Schalter S1 (Mittelstellung = aus) können die Kondensatoren C1 und C2 in Serie (=  $1\mu\text{F}$ ) oder parallel (=  $4.5\mu\text{F}$ ) geschaltet werden. Der Strom kann somit zwischen ca. 70mA und 300mA umgeschaltet werden. Das ergibt zwei Helligkeitsstufen. Die Widerstände R1 und R2 entladen die Kondensatoren langsam.

Der Siebkondensator glättet den gleichgerichteten Strom und verhindert 100Hz-Flackern.

Die Zener-Dioden überbrücken allenfalls ausfallende LEDs. Die anderen können somit weiterbrennen. Noch wichtiger ist das Verhindern von Überspannung, weil sonst der Siebkondensator explodieren könnte.

Die Lampe besteht aus vier warmweissen LEDs und einer gelben und blauen LED, welche mit dem Schalter S2 (Mittelstellung = alle LEDs an) wahlweise abgeschaltet werden können, um die Lichttemperatur zu variieren.

#### Warnungen:

**Die LEDs sind vom Netz elektrisch nicht isoliert: Lebensgefahr beim Berühren!**

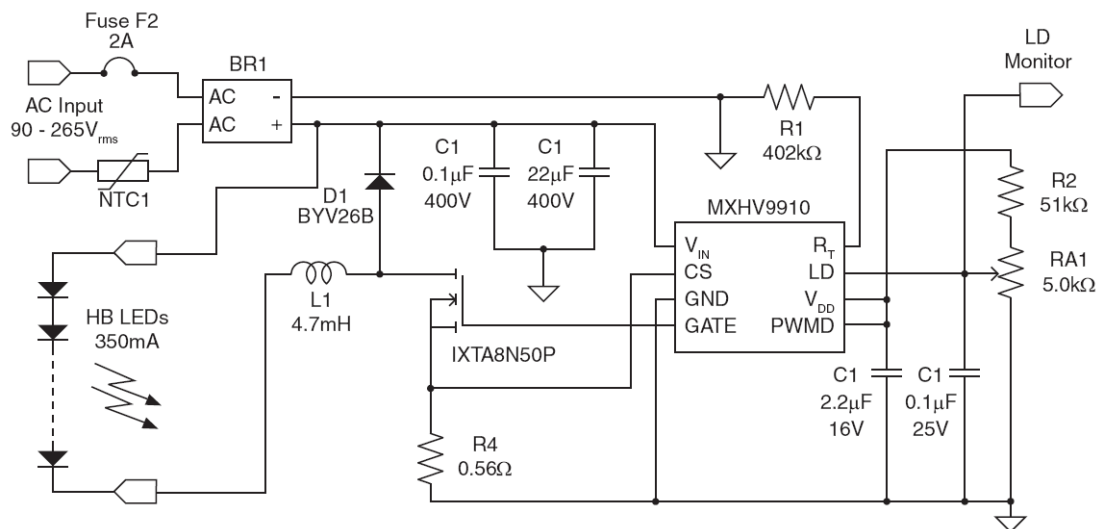
Die Bauteile müssen für die hohe Betriebsspannung geeignet sein.

Pro Lampe werden 80var Blindleistung erzeugt:  $\cos \phi = 0.07$  kapazitiv

## 3.2. Gleichrichter und Abwärtswandler

Nahe liegend ist die Idee die Netzspannung gleichzurichten und anschliessend einen getakteten Abwärtswandler einzusetzen.

Der MXHV9910 von Clare ist ein IC, welches für Schaltungen mit dieser hohen Spannung geeignet ist. Er ist zudem mittels Potentiometer oder PWM dimmbar. Für die Schaltungsauslegung sei auf die Application Note verwiesen.



### Warnungen:

**Die LEDs sind vom Netz elektrisch nicht isoliert: Lebensgefahr beim Berühren!**

**Die Bauteile müssen für die hohe Betriebsspannung geeignet sein.**

Zurzeit gibt es erst wenige Produkte, welche direkt am 230V-Netz betrieben werden können. Das wird sich vermutlich in den nächsten Monaten schnell ändern. Suchen sie einfach im Internet unter den Stichworten „offline led driver“. Achtung es werden auch ICs gefunden, welche für das 110V-Netz (USA) geeignet sind, aber nicht für 230V.

## 4. Links

Wikipedia bietet eine umfassende Sicht auf LEDs: [de.wikipedia.org/wiki/Led](http://de.wikipedia.org/wiki/Led)

Seoul Semiconductor, Hersteller-Seite: [www.acriche.com/en/product/prd/zpowerLED.asp](http://www.acriche.com/en/product/prd/zpowerLED.asp)

Datenblatt Z-Power LED: [www.acriche.com/en/popup/pop\\_product\\_search.asp?seq=205](http://www.acriche.com/en/popup/pop_product_search.asp?seq=205)

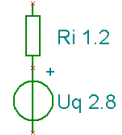
Lebensdauer LED: [www.acriche.com/en/product/prd/zpowerLED.asp](http://www.acriche.com/en/product/prd/zpowerLED.asp) => Reliability

# 5. Musterlösungen zu den Übungsaufgaben

## Übungsaufgabe 1

Die Kennlinie wird angenähert durch die Tangente an die Kennlinie im Arbeitspunkt  $I = 350\text{mA}$ .

Die Tangente  $U = U_q + R_i \cdot I$  wird beschrieben durch den Achsenabschnitt  $U_q$  (bei Strom = 0) und die Steigung  $R_i = \Delta U / \Delta I$ . Das ergibt diese Ersatzschaltung:



Lineare Spannungsquelle  $U = U_q + R_i \cdot I$  mit  $U_q = 2.8\text{V}$  und  $R_i = 1.2\Omega$

## Übungsaufgabe 2

$c = \text{Steigung} = \Delta U / \Delta T = -0.22\text{V}/100^\circ\text{C} = -2.2\text{mV}/\text{K}$

Lineare Spannungsquelle:  $U = U_q + c \cdot \Delta T + R_i \cdot I$  mit  $U_q = 2.8\text{V}$  und  $R_i = 1.2\Omega$

## Übungsaufgabe 3

$U = U_q + R_i \cdot I$  auflösen  $I = (U - U_q) / R_i$  und Zahlenwerte einsetzen

$$I_{\text{LED1}} = (3.5\text{V} - 2.8\text{V}) / 1.2\Omega = 583\text{mA}$$

$$I_{\text{LED2}} = (3.5\text{V} - 3.2\text{V}) / 1.2\Omega = 250\text{mA}$$

$$P_{\text{LED1}} = U \cdot I_{\text{LED1}} = 3.5\text{V} \cdot 583\text{mA} = 2.04\text{W}$$

$$P_{\text{LED1}} = U \cdot I_{\text{LED1}} = 3.5\text{V} \cdot 250\text{mA} = 0.88\text{W}$$

$$R_{\text{th}} = \Delta T / \Delta P$$

auflösen

$$\Delta T = P \cdot R_{\text{th}}$$

und Zahlenwerte einsetzen

$$\Delta T_{\text{LED1}} = P_{\text{LED1}} \cdot R_{\text{th}} = 2.04\text{W} \cdot 50\text{K}/\text{W} = 102\text{K}$$

$$\Delta T_{\text{LED2}} = P_{\text{LED2}} \cdot R_{\text{th}} = 0.88\text{W} \cdot 50\text{K}/\text{W} = 44\text{K}$$

Temperatur-Einfluss mit einer Iteration berücksichtigt:

$U = U_q + c \cdot \Delta T + R_i \cdot I$  auflösen  $I = (U - U_q - c \cdot \Delta T) / R_i$  und Zahlenwerte einsetzen

$$I_{\text{LED1}} = (3.5\text{V} - 2.8\text{V} + 2.2\text{mV} \cdot 102\text{K}) / 1.2\Omega = 770\text{mA}$$

$$I_{\text{LED2}} = (3.5\text{V} - 3.2\text{V} + 2.2\text{mV} \cdot 44\text{K}) / 1.2\Omega = 331\text{mA}$$

$$P_{\text{LED1}} = U \cdot I_{\text{LED1}} = 3.5\text{V} \cdot 770\text{mA} = 2.70\text{W}$$

$$P_{\text{LED1}} = U \cdot I_{\text{LED1}} = 3.5\text{V} \cdot 331\text{mA} = 1.16\text{W}$$

$$\Delta T_{\text{LED1}} = P_{\text{LED1}} \cdot R_{\text{th}} = 2.70\text{W} \cdot 50\text{K}/\text{W} = 135\text{K}$$

$$\Delta T_{\text{LED2}} = P_{\text{LED2}} \cdot R_{\text{th}} = 1.16\text{W} \cdot 50\text{K}/\text{W} = 58\text{K}$$

In dieser einen Iteration erwärmt sich die bereits wärmere LED1 nochmals um 33K und die kühlere LED2 nur um 14K.

Fakultativ: Temperatur-Erhöhungen berechnen als Endwert einer geometrischen Reihe:

$$\text{Aus } q = (T_\infty - T_2) / (T_\infty - T_1) = (T_\infty - T_1) / (T_\infty - T_0)$$

$$\text{ergibt sich } (T_\infty - T_2) \cdot (T_\infty - T_0) = (T_\infty - T_1) \cdot (T_\infty - T_1)$$

$$\text{und schlussendlich } T_\infty = (T_2 \cdot T_0 - T_1 \cdot T_1) / (T_2 + T_0 - 2 \cdot T_1)$$

$$\text{ergibt sich: } \Delta T_{(n \rightarrow \infty)} = (\Delta T_{(n=1)} \cdot \Delta T_{(n=1)} + \Delta T_{(n=0)} \cdot \Delta T_{(n=2)}) / (2 \cdot \Delta T_{(n=1)} + \Delta T_{(n=0)} + \Delta T_{(n=2)})$$

$$\Delta T_{\text{LED1}} = 151\text{K}$$

$$\Delta T_{\text{LED2}} = 65\text{K}$$

Die besser leitende LED1 erwärmt sich um 151K, die schlechter leitende LED2 nur um 65K.

Schlussfolgerungen

LEDs dürfen (ohne Vorwiderstand) nicht an einer Spannungsquelle betrieben werden.

LEDs dürfen (ohne Vorwiderstand) nicht parallel geschaltet werden, da die wärmere LED resp. jene mit tieferer Durchlassspannung (fast) den ganzen Strom übernimmt und durch Überstrom oder Überhitzung zerstört werden kann.

## Übungsaufgabe 4

Direkt aus der Grafik herauslesen ergibt:

LED bei  $60^\circ\text{C}$ : Lichtausbeute = 95% Lebensdauer = 240'000h

LED bei  $100^\circ\text{C}$ : Lichtausbeute = 85% Lebensdauer = 45'000h

### Übungsaufgabe 5

$$R_v = (5V - 2V) / 10mA = 300\Omega$$

$$\eta = P_{LED} / P_{total} = (2V \cdot 10mA) / (5V \cdot 10mA) = 40\%$$

Bei LED-Lampen ist der Wirkungsgrad ein entscheidender Punkt für eine hohe Energieeffizienz.

### Übungsaufgabe 6

Aus  $\Delta I = \Delta U / R_v$  folgt  $\Delta I / I = \Delta U / U$  und schliesslich  $U = \Delta U / (\Delta I / I) = 1V / 10\% = 10V$

Der Spannungsabfall am Vorwiderstand müsste mindestens 10V betragen!

### Übungsaufgabe 7

$$R_{Etotal} = 0.7V / 100mA = 7\Omega$$

$$R_{ext} = 1 / (1/R_{Etotal} - 1/R_{intern}) = 7.6\Omega$$

$$I_B = I_C / \beta_{min} = 100mA / 200 = 0.5mA$$

$$U_{EN} = 2 \cdot 0.7V + R_B \cdot I_B = 2.15V$$

Es kann problemlos ein 3.3V-Micro-Controller verwendet werden.

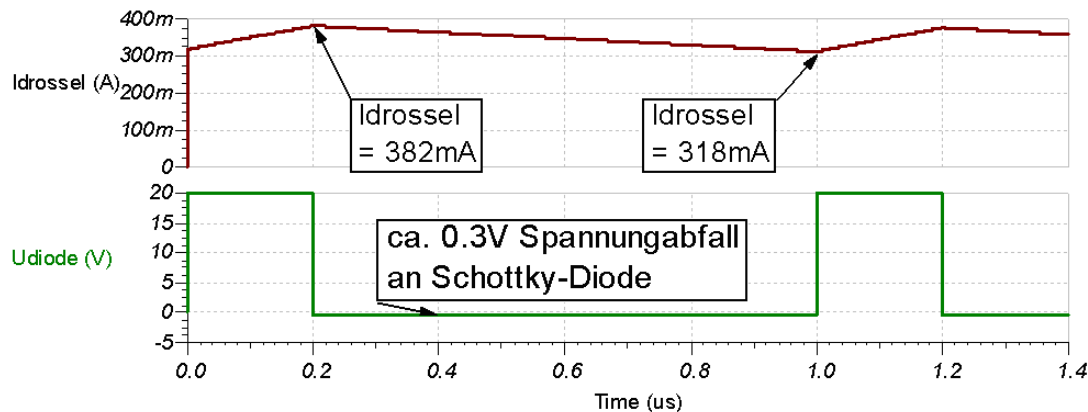
### Übungsaufgabe 8

Tastverhältnis =  $4V / 20V = 0.2$  => Transistor ein während  $0.2\mu s$ , aus während  $0.8\mu s$

$U = L \cdot di/dt$  weil  $U =$  Rechteck => Stromverlauf dreieckförmig

$$\text{Stromripple} = \Delta I = U / L \cdot \Delta t = (20V - 4V) / 50\mu H \cdot 0.2\mu s = 4V / 50\mu H \cdot 0.2\mu s = 64mA$$

Strom => Maximum, Minimum =  $350mA \pm 64mA / 2 = 318, 382mA$



### Übungsaufgabe 9

$$R_1 = U_{istwert} / I_{LED} = 1V / 350mA = 2.86\Omega$$

$$\text{PWM-Verhältnis} = U_{aus} / U_{speisung} = (U_{LED} + U_{istwert}) / 9V = 50\%$$

$$\Delta I_L = 1/L \cdot \int U_L \cdot dt = 1/1mH \cdot 4.5V \cdot 1/2 \cdot 1/30kHz = 75mA$$

$$U_{speisung\_max} = \min(\text{erlaubten Spannungen aus den Datenblättern}) = 20V$$

IRF9520:  $U_{DS} < 100V$ ,  $U_{GS} < 20V$

1N5819:  $U_{blocking} < 40V$

LM339:  $U_{supply} < 36V$

LM358:  $U_{supply} < 32V$

### Übungsaufgabe 10

Und wie sieht es aus?

### **Übungsaufgabe 11**

$$\eta = P_{\text{aus}}/P_{\text{speisung}} = (3.22\text{V} \cdot 384\text{mA})/(9\text{V} \cdot 197\text{mA}) = 1.24\text{W}/1.77\text{W} = 70\%$$

Von den Verlusten von insgesamt 0.53W entfallen 0.4W = 23% auf den Strommess-Widerstand R1! Wenn R1 auf 0.27Ω und die Sollwert- und Istwert-Spannungen von 1V auf 0.1V gesenkt werden, steigt der Wirkungsgrad auf 91%!

### **Übungsaufgabe 12**

Mittlerer Eingangsstrom:

$$P_{\text{IN}} = P_{\text{OUT}}/80\% \quad V_{\text{IN}} \cdot I_{\text{IN}} = V_{\text{OUT}} \cdot I_{\text{OUT}}/0.8 \quad I_{\text{IN}} = V_{\text{OUT}}/V_{\text{IN}} \cdot I_{\text{OUT}}/0.8 = 97\text{mA}$$

$$\text{Tastverhältnis} = 1 - V_{\text{OUT}}/V_{\text{IN}} = 1 - 3.6\text{V}/14\text{V} = 74\%$$

$$\text{Mittlerer Speicherdrosselstrom} = I_{\text{IN}}/74\% = 131\text{mA}$$

### **Übungsaufgabe 13**

$$I_{\text{NETZ}} = U_{\text{NETZ}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \quad \Rightarrow C = I_{\text{NETZ}}/(U_{\text{NETZ}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f) \approx 350\text{mA}/(230\text{V} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50\text{Hz}) = 4.9\mu\text{F}$$

$$P = U_{\text{LED}} \cdot I_{\text{LED}} \approx 13\text{V} \cdot 350\text{mA} = 4.6\text{W}$$

$$Q = U_C \cdot I_C \approx U_{\text{NETZ}} \cdot I_{\text{NETZ}} = 230\text{V} \cdot 350\text{mA} = 81\text{var}$$

$$\text{Wirkungsgrad: Verluste entstehen nur am Gleichrichter (1.4V)} \quad \Rightarrow \eta = 13\text{V}/(1.4\text{V}+13\text{V}) \approx 90\%$$

Die Blindleistung ist beachtlich. 30 so aufgebaute Lampen würden eine 10A Hausinstallation bereits auslasten!

### **Übungsaufgabe 14**

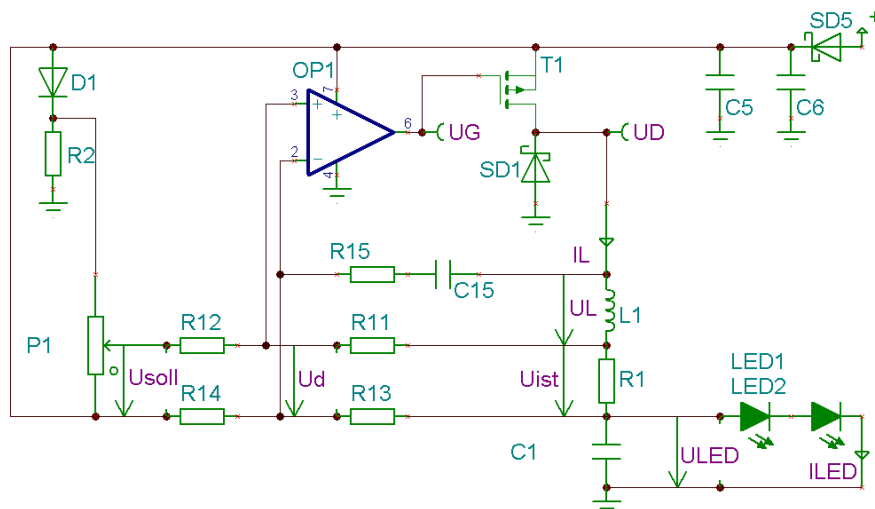
$$2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = U_{\text{NETZ}}/I_{\text{NETZ}} \quad \Rightarrow L = U_{\text{NETZ}}/(I_{\text{NETZ}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f) \approx 230\text{V}/(350\text{mA} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50\text{Hz}) = 2.1\text{H}$$

Eine solche Induktivität wäre gross und teuer und wird bei LEDs nicht verwendet.

Bei Leuchtstoffröhren hingegen wird die Variante induktives Vorschaltgerät standardmässig zur Strombegrenzung verwendet, da kapazitive Vorschaltgeräte die Lebensdauer der Röhren massiv verkürzen.



## Optimierte Schaltung für getakteten Abwärtswandler mit diskreten Bauteilen



### Funktions-Beschreibung

T1, SD1 und L1 bilden einen getakteten Abwärtswandler. C1 siebt die Spannung ULED.

OP1 arbeitet als Komparator. Am Potentiometer wird der Sollwert  $U_{soll}$  für den Strom ILED vorgegeben. Am Widerstand R1 fällt eine zum Strom IL proportionale Spannung, der Istwert  $U_{ist}$ , ab. Mit der Annahme  $R_{13} = R_{11}$  und  $R_{14} = R_{12}$  ergibt sich für die Regel-Abweichung  $U_d = (U_{ist} \cdot R_{12} - U_{soll} \cdot R_{11}) / (R_{11} + R_{12})$ . Falls  $U_d > 0$  ist, schaltet der Komparator den Transistor aus und der Strom sinkt. Falls  $U_d < 0$  ist, schaltet er den Transistor ein und der Strom steigt. Das Tastverhältnis stellt sich so ein, dass der Strom ILED den vorgegebenen Wert erreicht.

R15 bewirkt eine Mitkopplung. Das heisst OP1 arbeitet auch als Schmitt-Trigger. Damit ist garantiert, dass der Transistor T1 immer sauber ein- oder ausschaltet und nicht in einem halbleitenden Betrieb (mit hohen Verlustleistungen) verbleiben kann.

Nun sollen sie die Schaltung dimensionieren. Sie arbeitet mit Eingangsspannungen von 8...30V. Es können mehrere 350mA-LEDs in Serie geschaltet werden.

Bemerkung: common-mode-input-voltage-range des TL071 geht von +4V bis an die positive Speisung. Darum wurde das Sollwert-Poti auf die positive Speisung bezogen statt auf Ground.

### Schaltungsdimensionierung

Gegeben: Für die Schaltungs-Dimensionierung können sie folgende Werte annehmen:  
 $U_{ein} = 15V$ , OP1 = TL071 (TL081), T1 = IRF9520 (IRF9540), SD1 = SD5 = 1N5818,  
 $U_{LED} = 7.5V$ ,  $U_{soll} = U_{ist} = 0 \dots 0.7V$  @ ILED = 0...350mA, L1 = 1mH,  
 $\Delta I_L = 100mA$  @  $f_{takt} \approx 50kHz$ , P1 = 1k $\Omega$ , Potentiometer-Stellung = 100%

Gesucht: Alle Bauteilwerte. Wo die gegebenen Werte ein Bauteil nicht eindeutig bestimmen, soll eine sinnvolle und begründete Wahl getroffen werden. Tipp: Bauteile in der unten gegebenen Reihenfolge berechnen.

R1, R2 ( $I_{R2} \approx 2mA$ ), R11 bis R14 (Potentiometer auf 100%), R15, C15, C1, C5, C6

### Resultat

$$R1 = U_{ist} / I_{LED} = 0.7V / 350mA = 2\Omega$$

Wahl: 2.1 $\Omega$  in Serie

$$R2 = (15V - 0.7V) / 2mA = 7.1k\Omega$$

Wahl: 6.8k $\Omega$

Wenn der Strom stimmt, ist die Regelabweichung  $U_d = 0$ . Mit  $U_{soll} = U_{ist}$  folgt aus  $U_d = (U_{ist} \cdot R_{12} - U_{soll} \cdot R_{11}) / (R_{11} + R_{12})$ :  $R_{11} = R_{12} = R_{13} = R_{14}$  Wahl: 10k $\Omega$

R15 bestimmt die Hysterese (Annahme C15 ist so gross, dass er die Hysterese nicht beeinflusst). D.h. der Einfluss von R15 auf  $U_d$  muss gleich gross sein, wie der Einfluss von  $\Delta I_L$

auf  $U_d \Rightarrow 15V \cdot (R_{13} \parallel R_{14}) / (R_{15} + (R_{13} \parallel R_{14})) = 100mA \cdot R_1 \cdot R_{12} / (R_{11} + R_{12})$

$R_{15} = 15V \cdot (R_{13} \parallel R_{14}) / (100mA \cdot R_1 \cdot R_{12} / (R_{11} + R_{12})) - (R_{13} \parallel R_{14})$

$R_{15} = 15V \cdot 5k\Omega / (100mA \cdot 2\Omega \cdot 10k\Omega / 20k\Omega) - 5k\Omega = 745k\Omega$  Wahl:  $R_{15} = 820k\Omega$

$C_{15}$  und  $R_{15}$  bilden einen Hochpass. Damit die Hysterese immer wirkt, muss gelten

$\tau = R_{15} \cdot C_{15} > 1/f_{takt}$  Wahl:  $C_{15} = 100pF$

$C_1$  bildet mit  $L_1$  einen Tiefpass mit der Grenzfrequenz  $(2 \cdot \pi \cdot f_g)^2 = 1/(L_1 \cdot C_1)$ .

Wahl  $f_g = f_{takt}/20$  ergibt  $C_1 = 1/((2 \cdot \pi \cdot f_{takt}/20)^2 \cdot L_1) = 4.0\mu F$  Wahl:  $C_1 = 4.7\mu F$

$C_5$  muss ein keramischer Kondensator mit guten Hochfrequenz-Verhalten sein, um die schnellen Schalt-Transienten abzufangen Wahl  $C_5 = 1\mu F$

$C_6$  ist ein Elektrolyt-Kondensator, welcher einen allfälligen Ripple auf der Versorgungsspannung ausgleicht (ist ev. nicht nötig). Wahl  $C_6 = 1000\mu F$

### **Schaltungstest**

Simulieren sie die Schaltung mit den berechneten Werten und beheben sie allfällige Fehler.

Bauen sie die Schaltung auf, schliessen sie einen Leistungswiderstand ( $22\Omega$ ,  $5W$ ) anstelle der LEDs an und überprüfen sie, ob sich der Strom ILED über den ganzen Bereich  $0...350mA$  mit dem Potentiometer stufenlos einstellen lässt.

Wie hoch ist die Schaltfrequenz bei 100% Potentiometerstellung ( $350mA$ )?

Wie gross ist der effektive Strom-Ripple  $\Delta I_L$ ?

Was ist der Grund für diese Abweichungen? Machen sie Lösungsvorschläge?

### **Resultat**

Der Strom lässt sich stufenlos regeln aber erst ab ca.  $60mA$  bis zu  $360mA$ . Der Minimalstrom wird begrenzt durch die minimale Einschaltzeit, welche von der Geschwindigkeit des Operations-Verstärkers abhängt.

Statt der vorgesehenen  $50kHz$  ist die Frequenz effektiv nur ca.  $15kHz$ . Das ist schlecht, da es ein hohes Pfeifen im hörbaren Bereich verursacht.

Anstelle von  $100mA$  ist der Strom-Ripple effektiv  $200mA$ . Das hängt mit der tieferen Taktfrequenz zusammen, da der Strom mehr Zeit hat anzusteigen.

Die Abweichung stammt hauptsächlich von der Verzögerungszeit des Operationsverstärkers vom Vorzeichenwechsel bei der Eingangsspannung  $U_d$  bis zum Umschalten am Ausgang.

Lösungsvorschlag 1: schnelleren Operationsverstärker oder Comparator verwenden.

Lösungsvorschlag 2:  $C_{15}$  soweit verkleinern, dass  $\tau = R_{15} \cdot C_{15} \ll 1/f_{takt}$  wird. Die Hysterese ist damit nur noch kurzzeitig beim Umschalten wirksam. Verkleinern von  $C_{15}$  auf  $2.2pF$ , erhöht die Taktfrequenz auf  $33kHz$  und senkt den Strom-Ripple auf  $110mA$ .

### **Messaufgabe**

Messen sie Eingangs- und Ausgangsleistung und berechnen sie den Wirkungsgrad.

### **Resultat**

$\eta = P_{aus} / P_{ein} = (7.03V \cdot 319mA) / (15V \cdot 178mA) = 2.24W / 2.67W = 84\%$

Von den Verlusten von insgesamt  $0.43W$  entfallen  $0.2W = 8\%$  auf den Strommess-Widerstand  $R_1$  und  $0.1W = 4\%$  auf die beiden Schottky-Dioden!

Der Strommess-Widerstand kann verkleinert werden, wenn  $R_{11}$  bis  $R_{14}$  angepasst werden.

Die Verpolschutz-Diode kann entfallen bei fest verdrahteten Geräten.

Die Freilauf-Diode kann durch einen P-Kanal-FET ersetzt werden. Allerdings wird die Ansteuerung und der Schutz der FETs dadurch komplexer.