

Mikrocontroller in der Leistungselektronik

Dimmen einer Lampe

Praktikum zur Lehrveranstaltung Mikrorechentchnik II
Professur für Leistungselektronik
Praktikumsort GÖR/320

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Übersicht | 1 |
| 2 | Leistungselektronische Grundlagen | 2 |
| 2.1 | Ohmsche Last | 2 |
| 2.2 | Phasenanschnittsteuerung mittels Thyristoren | 5 |
| 2.3 | Ohmsch-induktive Last | 7 |
| 3 | Der Versuchsstand | 10 |
| 4 | Versionsverwaltung mit Git | 11 |
| 5 | Aufgabenstellung im Praktikum | 12 |
| 5.1 | Testen des Beispielprogramms und Anlegen des Git Repository . . | 12 |
| 5.2 | Testen der Tastereingaben | 13 |
| 5.3 | Testen des Spannungsnulldurchgangs | 13 |
| 5.4 | Einstellen eines festen Zündwinkels | 13 |
| 5.5 | Dimmen mithilfe der Taster | 14 |
| 5.6 | Minimaler und maximaler Zündwinkel | 14 |
| 5.7 | Nutzen von Interrupts | 14 |
| 5.8 | Blinkende Lampe | 14 |
| 6 | Protokoll | 14 |

1 Übersicht

In diesem Versuch werden Sie ein Programm für einen Mikrocontroller schreiben, mithilfe dessen Sie die Helligkeit einer Glühlampe über einen einfachen Wechselstromsteller (Dimmer) einstellen werden. Ziel des Praktikums ist, Ihnen die Grundlagen dieses Wechselstromstellers zu vermitteln, sowie Ihre Kenntnisse in der Programmiersprache C zu vertiefen. Zudem sollen Sie die Versionsverwaltung Git und das Programmieren mithilfe von Interrupts kennenlernen.

Dazu wird Ihnen in den nachfolgenden Kapiteln zuerst die eingesetzte Schaltung vorgestellt und einige Sachverhalte aus vergangenen Semestern wiederholt. Daraufhin wird der Versuchstand und der eingesetzte Mikrocontroller eingeführt, sowie die notwendigen Informationen zur Programmierung gegeben. Es folgt eine detaillierte Praktikumsanleitung und Hinweise zum Protokoll.

Beachten Sie: Im Laufe der Anleitung finden Sie im Kapitel 2 immer wieder Kontrollfragen. Diese Kontrollfragen bilden die Grundlage für den Eingangstest, den Sie zu Beginn des Praktikums schreiben werden.

2 Leistungselektronische Grundlagen

2.1 Ohmsche Last

Eine Glühlampe kann sehr gut als ohmscher Widerstand modelliert werden, der die elektrische Leistung als Licht und Wärme abgibt. Schließt man sie direkt an eine Wechselspannungsquelle an, so ist die Leistung der Glühlampe über

$$P_L = \frac{U_{\text{eff}}^2}{R_L} \quad (1)$$

bestimmt. Die einfachste Art die in der Glühlampe umgesetzte Leistung und damit die Helligkeit der Glühlampe zu steuern, ist einen einstellbaren Vorwiderstand zu nutzen, so wie es in Abbildung 1 dargestellt ist.

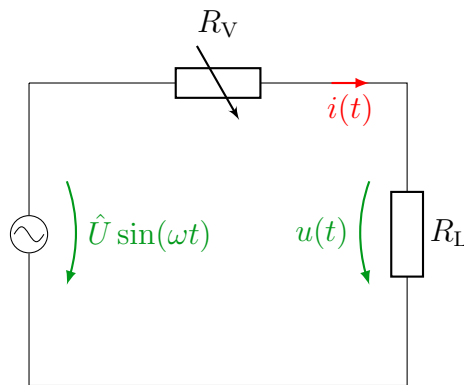


Abbildung 1: Ohmsche Last und verstellbarer Vorwiderstand an Wechselspannungsquelle

Kontrollfrage: Berechnen Sie den Wirkungsgrad dieser Schaltung in Abhängigkeit des Vorwiderstandes. Der Wirkungsgrad ist hier über

$$\eta = \frac{P_L}{P_{\text{ges}}} \quad (2)$$

definiert. Bestimmen Sie zusätzlich noch die Verluste, d.h. die in dem Vorwiderstand umgesetzten Leistung in Abhängigkeit des Vorwiderstandes. Stellen Sie

beides qualitativ grafisch dar.

Kurzlösung:

$$\eta(R_V) = \frac{R_L}{R_L + R_V} \quad P_V = U_{\text{eff}}^2 \frac{R_V}{(R_L + R_V)^2} \quad (3)$$

Eine Einstellung der Lichtstärke über einen Vorwiderstand führt jedoch zu erheblichen Verlusten im Vorwiderstand.

Eine weitere Möglichkeit die Helligkeit der Glühlampe zu variieren, ist die Glühlampe über einen periodisch arbeitenden Schalter mit der Spannungsquelle zu verbinden. Dies zeigt Abbildung 2.

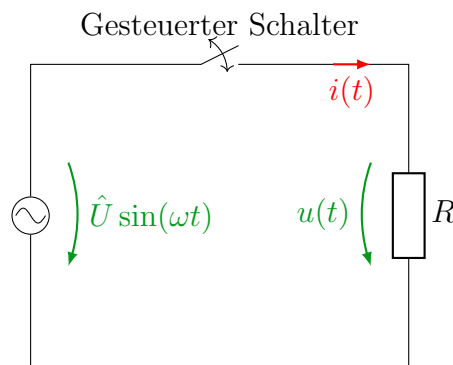


Abbildung 2: Ohmsche Last mit gesteuertem Schalter

Bei der sogenannten Phasenanschnittsteuerung wird der Schalter im Nulldurchgang der Versorgungsspannung geöffnet und zu einem festen Zeitpunkt t_S nach dem Nulldurchgang wieder geschlossen. Es ergeben sich die Strom- und Spannungsverläufe von Abbildung 3 in der Glühlampe. Bei einer konstanten Frequenz der Versorgungsspannung von 50 Hz, kann diese Zündverzögerungszeit auch über einen Zündwinkel α ausgedrückt werden. Die Umrechnung erfolgt mit

$$\alpha = t_S \cdot \frac{180^\circ}{10 \text{ ms}} \quad (4)$$

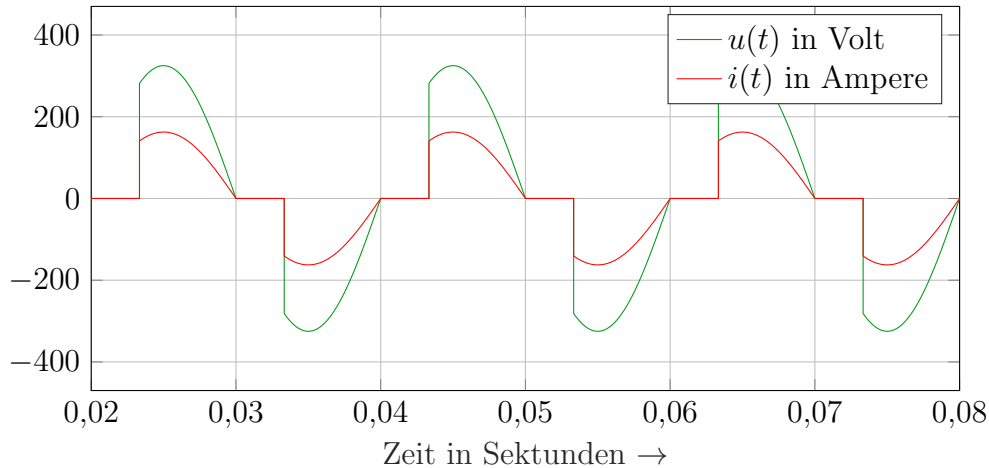


Abbildung 3: Strom und Spannungsverlauf bei Netzspannung ($U_N = 230 \text{ V}$), einem Widerstand von $R = 2 \Omega$ und einem Zündwinkel von $\alpha = 60^\circ$. Der Zündwinkel entspricht einer Zündverzögerungszeit von $t_s = 3.33 \text{ ms}$

Kontrollfrage: Bestimmen Sie die in der Glühlampe umgesetzte Leistung in Abhängigkeit des Zündwinkels. Berechnen Sie dazu in einem ersten Schritt den Effektivwert der Spannung über der Glühlampe bei Phasenanschnittsteuerung in Abhängigkeit des Zündwinkels. Zeigen Sie dann in einem nächsten Schritt, dass die in der Glühlampe umgesetzte mittlere Leistung

$$P_L = \frac{U_{\text{eff}}^2}{R_L} \quad (5)$$

beträgt. Was ist der Wirkungsgrad dieser Schaltung bei einem verlustlosen Schalter?

Zeichnen Sie zusätzlich in Abbildung 3 den Verlauf des Laststroms für einen Widerstand $R_L = 4 \Omega$ ein.

Hinweis 1: Bei der Berechnung von Effektivwert und mittlerer Leistung kann sowohl über die Zeit, als auch über den Winkel integriert werden.

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u(t))^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (u(\omega t))^2 d\omega t} \quad (6)$$

$$P_L = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) \cdot i(\omega t) d\omega t \quad (7)$$

Welchen Weg sollten Sie nutzen?

Hinweis 2:

$$\sin(x) \cdot \sin(y) = \frac{1}{2} (\cos(x - y) - \cos(x + y)) \quad (8)$$

Kurzlösung:

$$U_{\text{eff}} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin(2\alpha) \right)} \quad \eta = 1 \quad (9)$$

2.2 Phasenanschnittsteuerung mittels Thyristoren

Ein realer leistungselektronischer Schalter, der die Phasenanschnittsteuerung verwirklichen kann, ist der Thyristor. In Abbildung 4 erkennt man, dass der Thyristor drei Anschlüsse hat. Das Gate wird zum Ansteuern des Thyristors genutzt, während die Strecke zwischen Anode und Kathode entweder positive und negative Spannungen u_{AK} sperren oder positive Ströme i_A führen kann. Ein Thyristor hat

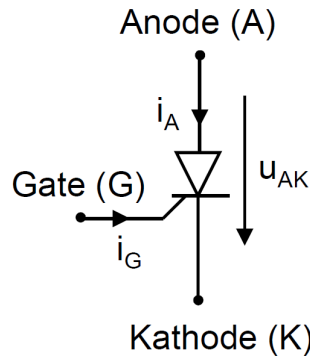


Abbildung 4: Symbol des Thyristors

drei erlaubte Arbeitsbereiche, die in Abbildung 5 zu erkennen sind.

- Liegt eine negative Spannung u_{AK} über dem Thyristor an, so befindet sich der Thyristor im **Sperrzustand** und führt einen vernachlässigbar kleinen Strom. Wird die Sperrdurchbruchspannung U_{RRM} unterschritten, so steigt der Betrag des Stromes im Thyristor stark an, was zur thermischen Zerstörung des Bauelements führt und dementsprechend vermieden werden muss.
- Liegt eine positive Spannung u_{AK} über dem Thyristor an, so befindet sich der Thyristor zunächst im **Blockierzustand** und führt einen vernachlässigbar kleinen Strom. Ein Überschreiten der Blockierdurchbruchspannung U_{B0} führt wiederum zu einem starken Anstieg des Stromes und einem meist unerwünschten Wechsel in den Durchlasszustand.
- Liegt eine positive Spannung u_{AK} über dem Thyristor an und wird zusätzlich am Gate ein ausreichend großer positiver Gatestrom i_G eingespeist, so wechselt der Thyristor in den **Durchlasszustand**. Das Einspeisen eines Gatestroms in den Thyristor wird auch **Zünden** genannt. Nun führt der Thyristor positive Ströme i_A bei einem sehr kleinen Spannungsfall u_{AK} . Überschreitet der Strom i_A den **Einraststrom** I_{HT} , so verbleibt der Thyristor auch nach Abschalten des Gatestroms im Durchlasszustand. Unterschreitet der Strom den **Haltestrom** I_H wechselt der Thyristor in den Sperrzustand.

Der Thyristor ist somit aktiv durch Einprägen eines Gatestroms einschaltbar, wenn eine positive Spannung u_{AK} über ihn anliegt. Gleichzeitig schaltet er sich selbst passiv aus, wenn der Strom i_A den Haltestrom unterschreitet.

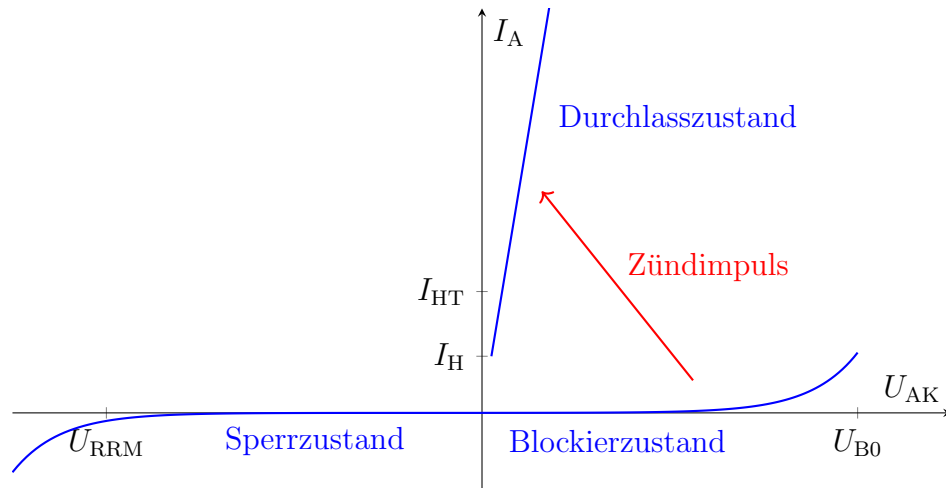


Abbildung 5: Strom-Spannungskennlinie eines Thyristors

Kontrollfrage: Sie haben sich bereits in dem Fach Elektroenergietechnik im dritten Semester mit realen und idealen Schaltern beschäftigt. Dort haben Sie unter anderem die reale und ideale Strom-Spannungskennlinie einer Diode kennengelernt. Überlegen Sie, wie die ideale Strom-Spannungskennlinie eines Thyristors aussieht. Sie sollten zudem das Schaltsymbol, die Schaltzustände und Wirkungsweise des Thyristors verinnerlicht haben.

Wird statt des idealen Schalters in Abbildung 2 ein idealer Thyristor genutzt (Abbildung 6), der periodisch zu einem beliebigen Zeitpunkt während der positiven Halbschwingung der Versorgungsspannung gezündet wird, so ergeben sich die Strom- und Spannungsverläufe aus Abbildung 7. Ein Zünden des Thyristors in der negativen Halbschwingung hat keinen Effekt, da der Thyristor im Normalbetrieb nur positive Ströme führen kann.

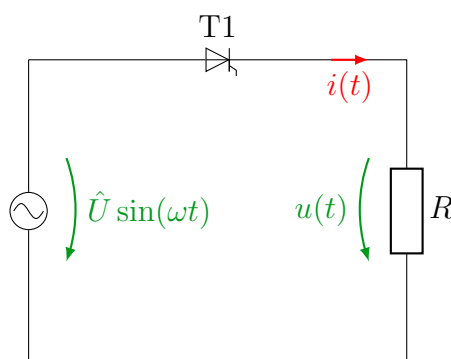


Abbildung 6: Ohmsche Last mit einem Thyristor

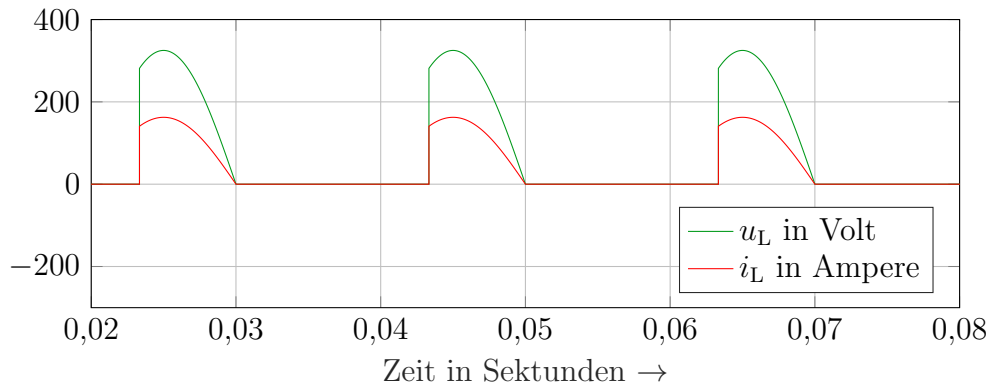


Abbildung 7: Strom und Spannungsverlauf aus Abbildung 3, wenn statt eines idealen Schalters ein idealer Thyristor eingesetzt wird.

Kontrollfrage: Betrachten Sie den Aufbau aus Abbildung 6 unter der Voraussetzung, dass nun ein realer Thyristor mit einem Einraststrom $I_{HT} = 30 \text{ mA}$ und einem Haltestrom $I_H = 20 \text{ mA}$ eingesetzt wird. Die Spannungsquelle hat eine Amplitude von $\hat{U} = \sqrt{2} \cdot 230 \text{ V}$ und der Widerstand der ohmschen Last beträgt $R_L = 1 \text{ k}\Omega$. Berechnen Sie den minimalen Zündwinkel α_{\min} , bei dem der Thyristor eingeschaltet werden kann und den Winkel γ an dem sich der Thyristor passiv abschaltet. Rechnen Sie den Zündwinkel auch in eine Zündverzögerungszeit t_{\min} bei einer Frequenz der Netzspannung von $f = 50 \text{ Hz}$ um.

Hinweis 1: Ein Thyristor wird meist nur einige Mikrosekunden lang gezündet. Nehmen Sie hier vereinfachend an, dass der Zündimpuls infinitesimal kurz ist.

Hinweis 2: Der Spannungsfall U_{AK} über dem Thyristor kann hier vernachlässigt werden.

Kurzlösung: $\alpha_{\min} = 5.29^\circ$ $t_{\min} = 294 \mu\text{s}$ $\gamma = 176.47^\circ$

Möchte man nun den Strom- und Spannungsverlauf aus Abbildung 3 mithilfe von Thyristoren realisieren, so können statt des einen Thyristors auch zwei antiparallele Thyristoren eingesetzt werden, die mit dem gleichen Signal angesteuert werden.

Kontrollfrage: Zwei antiparallele Thyristoren mit einer Ansteuerung kann man auch direkt als ein Bauelement kaufen, dem **Triac**: Recherchieren Sie das Schalt-symbol des Triacs, sowie seine Strom- und Spannungs-kennlinie. Ein einfache Suche in Google genügt hier. Alternativ können Sie auch in [michel'leistungselektronik'2011] im dritten Kapitel nachschauen. Dort finden Sie auch bei Bedarf vertiefende Informationen zum Thyristor.

2.3 Ohmsch-induktive Last

Dieses Kapitel ist fakultativ. Damit werden die Aufgabe im Eingangstest, die aus diesem Kapitel resultieren, auch nur Zusatzaufgaben sein.

Eine Glühlampe kann gut als reine ohmsche Last modelliert werden. Viele weitere Lasten sind jedoch ohmsch-induktiv. Abbildung 8 zeigt diese Last. Bei ohmsch

induktiver Last muss bei einer Phasenanschnittsteuerung beachtet werden, dass nicht alle Zündwinkel das gewünschte Ergebnis erzielen. Um dies zu zeigen, ist in Abbildung 9 der Verlauf von Strom und Spannung über einer ohmsch-induktiven Last dargestellt.

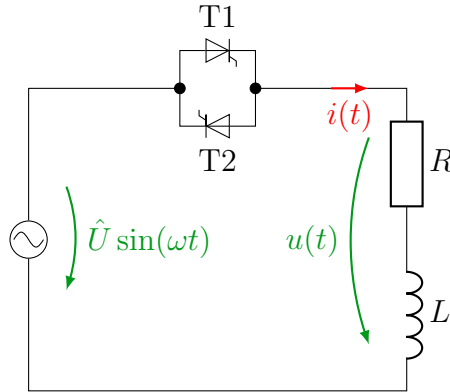


Abbildung 8: Ohmsch-induktive-Last mit zwei antiparallelen Thyristoren

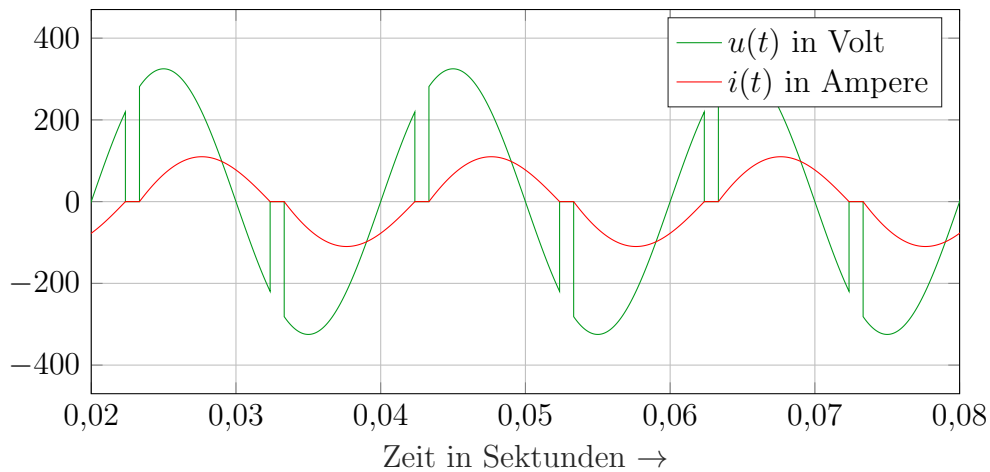


Abbildung 9: Strom und Spannungsverlauf bei Netzspannung ($U_N = 230 \text{ V}$), einem Widerstand von $R = 2 \Omega$, einer Induktivität von $L = 6 \text{ mH}$ und einem Zündwinkel von $\alpha = 60^\circ$. Der Zündwinkel entspricht einer Zündverzögerungszeit $t_s = 3.33 \text{ ms}$.

Man erkennt, dass der Strom nun nicht im Spannungsnulldurchgang abgeschaltet wird, da der Stromfluss zu diesem Zeitpunkt noch nicht null ist und der leitende Thyristor erst zum Stromnulldurchgang ausschaltet.

Kontrollfrage: Zeigen Sie dass der in Abbildung 9 dargestellte Stromverlauf korrekt ist. Stellen Sie dazu zuerst die Differentialgleichung auf, die den Stromverlauf der Schaltung in Abbildung 8 beschreibt, wenn einer der beiden Thyristoren leitend ist. Zeigen Sie dann, dass

$$i(t) = K_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t} + \hat{U} \frac{R}{R^2 + \omega^2 L^2} \sin(\omega t) - \hat{U} \frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} \cos(\omega t) \quad (10)$$

die Differentialgleichung allgemein löst und lösen Sie die Differentialgleichung auch selbst, indem erst die homogene und dann die partikuläre Lösung bestimmen. Da die Methode der *Variation der Konstanten* hier umständlich ist können Sie zur Bestimmung der partikulären Lösung auch den Ansatz

$$i_p(t) = A \sin(\omega t) + B \cos(\omega t) \quad (11)$$

nutzen. Bestimmen Sie zuletzt die Konstante K_0 , die durch die Anfangsbedingung in Abhängigkeit des Zündwinkels gegeben ist. Nutzen Sie zweckmäßig für $t=0$ den positiven Spannungsnulldurchgang der Versorgungsspannung und mit $\alpha = \omega t_{\text{Zünd}}$ den Zündwinkel des Thyristors, der einen positiven Strom führt.

Vergewissern Sie sich zusätzlich, dass Sie auch noch die *Variation der Konstanten* beherrschen, indem sie den Spannungsverlauf über einen Kondensator berechnen, der über einen in Reihe geschalteten Widerstand zum Zeitpunkt $t = 0$ an eine Gleichspannungsquelle angeschlossen wird.

Hinweis Sie können die Differentialgleichung natürlich auch über die Laplace-Transformation lösen.

Lösung Differentialgleichung:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = \hat{U} \sin \omega t \quad (12)$$

Konstante K_0 aus Anfangsbedingung $i(\frac{\alpha}{\omega}) = 0$:

$$K_0 = \hat{U} \left(-\frac{R}{R^2 + \omega^2 L^2} \sin(\alpha) + \frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} \cos(\alpha) \right) e^{\frac{R}{L} \frac{\alpha}{\omega}} \quad (13)$$

Differentialgleichung für Kondensator und Widerstand in Reihe an Gleichspannungsquelle:

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = U_{DC} \quad (14)$$

Lösung, wenn Gleichspannung zum Zeitpunkt $t=0$ eingeschaltet wird:

$$U_C(t) = U_{DC} \left(1 - e^{-\frac{1}{RC}t} \right) \quad (15)$$

Da der Strom je nach L/R -Verhältnis so lang fließt, dass zum nächsten Zündzeitpunkt, ein Thyristor noch Strom führt, kann der zweite Thyristor nicht zünden und nur einer der beiden Thyristoren führt einen periodischen Strom.

Kontrollfrage: Skizzieren Sie den Strom- und Spannungsverlauf bei rein induktiver Last für einen Zündwinkel von 45° . Funktioniert die Phasenanschnittsteuerung noch wie gewünscht? Bestimmen sie den minimalen Zündwinkel α_{\min} , bei dem beide Thyristoren des Triacs korrekt gezündet werden.

Hinweis: Bestimmen sie zunächst den Winkel oder den Zeitpunkt, bei dem der ideale Thyristor ($I_H = 0 \text{ A}$) wieder ausschaltet. Nutzen die dazu die Strom-Spannungsbeziehung über der Induktivität:

$$i_L(t_1) = \frac{1}{L} \int_{t_0}^{t_1} u_L(t) dt + i(t_0) \quad (16)$$

Dabei entspricht t_0 dem Zeitpunkt der Zündung des Triacs.

Kurzlösung: $\alpha_{\min} = 90^\circ$

Weitere Informationen zur Phasenanschnittsteuerung finden Sie bei Bedarf in [michel'leistungselektronik'2011] im achten Kapitel.

3 Der Versuchsstand

Abbildung 10 zeigt grob den Aufbau des Versuchsstandes. Der elektronische Schalter wird dabei durch einen Triac realisiert. Als Mikrocontroller wird ein XMC1100

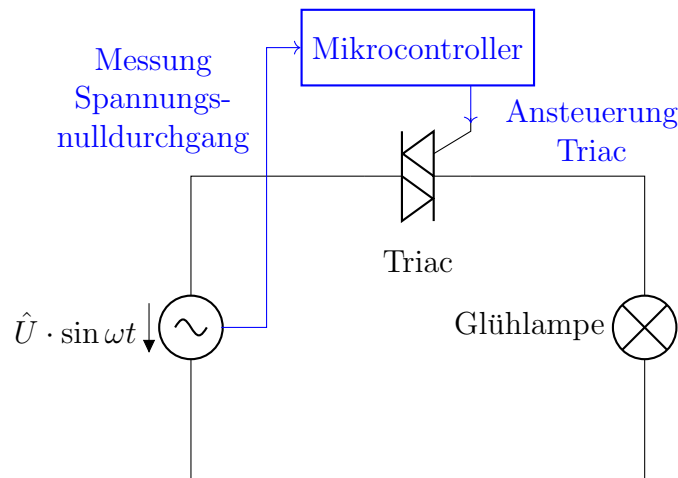


Abbildung 10: Schematischer Aufbau des Versuchsstands

der Firma Infineon genutzt, der auf dem Evaluationsboard XMC 2Go aufgebracht ist. Das Board hat 16 Pins, einen CPU-Takt von 32 MHz sowie zwei LEDs, die man zum Debuggen nutzen kann. Sie finden weitere Informationen sowie die Pinbelegung auf der Webseite <https://github.com/Infineon/XMC-for-Arduino/wiki/XMC-2Go>. Die ihn umgebende Schaltung liefert die notwendigen Eingangssignale für den Mikrocontroller und verstärkt die Ausgangssignale, sodass die Ansteuerungsaufgabe erfüllt werden kann. Eine genaue Kenntnis dieser Schaltung ist nicht erforderlich, es genügt die Funktionen der Eingangs- und Ausgangspins des Mikrocontrollers zu kennen. Da in diesem Praktikum die Arduino IDE genutzt wird, ist die Pinbelegung für das Programmieren mit solcher angegeben.

- **Pin 0, Eingangspin:** Erkennt Tastendruck auf Taster 1. Wird high, wenn Taster gedrückt.
- **Pin 1, Eingangspin:** Erkennt Tastendruck auf Taster 2. Wird high, wenn Taster gedrückt.
- **Pin 3, Ausgangspin:** Prägt einen Gatestrom in den Triac ein, wenn auf high.
- **Pin 6, Eingangspin:** Messung des Spannungsnulldurchgangs, wird zum Zeitpunkt des Spannungsnulldurchgangs high.

- **Pin 9, Interruptfähiger Pin:** Messung des Spannungsnulldurchgangs, wird zum Zeitpunkt des Spannungsnulldurchgangs high
- **Pin 14, Eingangspin:** Kann die Led1 an- und ausschalten. Led leuchtet, wenn Pin auf high.
- **Pin 15, Ausgangspin:** Kann die Led2 an- und ausschalten. Led leuchtet, wenn Pin auf high.

Die beiden Leds können zum Debuggen eingesetzt werden. Der Mikrocontroller arbeitet mit der Programmiersprache C, deren Anwendung durch die Arduino IDE jedoch ziemlich vereinfacht ist. Sie finden den Befehlssatz unter <https://www.arduino.cc/reference/en/> und können sich die Entwicklungsumgebung unter <https://www.arduino.cc/en/main/software> herunterladen, um Ihren Code schon im Vorfeld testweise zu kompilieren.

4 Versionsverwaltung mit Git

Git ist eine freie Software, die man zur Versionsverwaltung von Dateien und Programmen nutzen kann und die dezentrales Coden im Team stark vereinfacht. Um die Relevanz von Git zu demonstrieren, hier der sinnngemäße Kommentar eines Studenten der Informationstechnik.

Git?

*Das schreibt man mittlerweile nicht mehr in die Bewerbung mit rein.
Das wird vorausgesetzt!*

In diesem Praktikum sollen Sie mithilfe von Git eine Versionshistorie erstellen, die die einzelnen Arbeitsschritte im Praktikum abbildet. Eine ausführliche Beschreibung von Git, sowie die Erläuterung der wichtigsten Kommandos würde den Umfang dieser Anleitung sprengen. Deswegen legen wir Ihnen ans Herz, Git mithilfe des folgenden Video Tutorials *Git Grundkurs* kennenzulernen. <https://katalog.slub-dresden.de/id/0-1688284834/#detail>

Das Tutorial ist in Einzelvideos unterteilt, die es ermöglichen gleichzeitig am eigenen Rechner die Schritte nachzuvollziehen. Für das Praktikum sind insbesondere die Kapitel eins und zwei wichtig. Die Bearbeitung des ganzen Tutorials nimmt ungefähr zwei Stunden in Anspruch. Zugang erhalten Sie mit ihrem Slublogin. Zusätzlich empfehlen wir Ihnen die Lektüre von folgenden Blogeintrag: <https://nvie.com/posts/a-successful-git-branching-model/>. Der Blogeintrag zeigt, wie man gut im Team mit Git ein komplexeres Programm entwickeln kann.

Während die oben erwähnten Quellen die Grundlage für dieses Praktikum darstellen, gibt es natürlich noch viel weiterführende Literatur. Eine deutsches Buch, dass Git kurz umreißt ist *Git-kurz und gut* [riedel'git'2014] und eine etwas längere Prosa, die man auch über die Slub downloaden kann ist *Git: Dezentrale Versionsverwaltung im Team, Grundlagen und Workflows* [preisel'git'2014]. Wer ein englisches Buch präferiert kann es mit *Pro Git* [chacon'pro'2014] versuchen, das man auch direkt über die Slub herunterladen kann.

5 Aufgabenstellung im Praktikum

In diesem Praktikum sollen Sie den Mikrocontroller so programmieren, dass ein fester Zündwinkel zum Dimmen der Glühlampe eingestellt wird. Zusätzlich soll durch Drücken der Taster die Lampe gedimmt werden und die Lampe in einem periodischen Abstand blinken.

Im Folgenden finden Sie eine Schritt-für-Schritt-Anleitung, der Sie im Praktikum folgen können. Beachten Sie: Da das Praktikum nur ungefähr drei Stunden dauert, ist es notwendig, sich schon im Vorfeld mit dem Befehlssatz auseinanderzusetzen zu haben und im besten Fall schon Programme für die Aufgabenstellungen vorbereitet zu haben. Im Praktikum selbst sollen Sie jedoch mit Git arbeiten, um die einzelnen Versionen ihres Programmes zu verwalten, d.h. dort werden sie die einzelnen Aufgabenstellungen nochmals programmieren müssen. Am Ende des Praktikums sollten Sie mindestens für jede Teilaufgabe ein Commit erzeugt haben und dies grafisch darstellen können. Die Commits sollten sinnvoll benannt sein.

Am Versuchsstand werden Sie den Editor von *Visual Studio Code* nutzen. Dieser bietet eine grafische Benutzeroberfläche für Git und hat auch Erweiterungen mit denen das Programm direkt auf den Mikrocontroller gespielt werden kann. Sie können auch Ihren eigenen Laptop mitbringen und damit den Versuchsstand betreiben. Das bietet Ihnen die Möglichkeit, die Software, die Sie benutzen werden, schon vorher kennenzulernen. Eine Schritt-für-Schritt Anleitung zur Installation der Software finden Sie in einem separaten Dokument.

5.1 Testen des Beispielsprogramms und Anlegen des Git Repository

Auf dem Linux-PC, den Sie zum Programmieren des Mikrocontrollers nutzen, werden Sie in der Entwicklungsumgebung folgendes bereits geschriebenes Programm vorfinden. Das Programm liegt auch in einer Textfile *Blink.txt* im Opal-Ordner.

```
void setup() {  
  // Initialisiert Pin 14 (LED1) als output.  
  pinMode(14, OUTPUT);  
}  
  
// LED1 blinkt im Zweisekudentakt  
void loop(){  
  digitalWrite(14, HIGH);           // LED1 an  
  delay(1000);                      // 1000 ms warten  
  digitalWrite(14, LOW);            // LED1 aus  
  delay(1000);                      // 1000 ms warten  
}
```

Die Funktionen *void setup()* sowie *void loop()* sind in jedem Arduino Programm zu finden. Mit *setup()* werden Voreinstellungen festgelegt und die Funktion *loop()*

läuft im Anschluss unendlich lang in wiederkehrenden Schleifen durch. Im Praktikum werden Sie dieses Beispielprogramm stückweise anpassen und neue Features dazu schreiben. Testen Sie nun zuerst dieses Beispielprogramm indem Sie es kompilieren und ausführen. Blinkt die Led wie gewünscht?

Legen Sie nun ein Git Repository an und speichern Sie hier das Beispielprogramm ab. Dies wird die Grundlage Ihres Master Branches. Legen Sie daraus ausgehend einen Develop-Branch an, um Stück für Stück das Programm zu erweitern.

5.2 Testen der Tastereingaben

Testen Sie nun als erstes, ob sie die Eingabe durch die Taster auslesen können, indem sie das Programm so verändern, dass sie die Lampe mit einer Taste an- und mit der anderen Taste wieder ausschalten können. Welchen Befehl aus <https://www.arduino.cc/reference/en/> brauchen Sie dazu?

Dies wäre nun ein ersten Feature für das Sie auch einen Branch anlegen können.

5.3 Testen des Spannungsnulldurchgangs

Der Pin, der den Spannungsnulldurchgang anzeigt, hat den in Abbildung 11 dargestellten zeitlichen Verlauf. Er geht kurz vor dem Spannungsnulldurchgang auf low und genau im Spannungsnulldurchgang auf high.

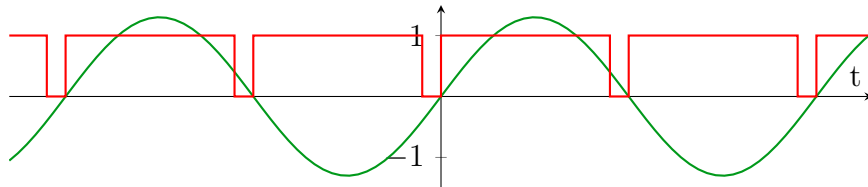


Abbildung 11: Messung des Spannungsnulldurchgangs. In grün ist der zeitliche Verlauf der Netzspannung dargestellt und in rot der zeitliche Verlauf des Pin, der den Spannungsnulldurchgang anzeigt.

Verändern Sie das Programm nun so, dass Sie die Spannungsnulldurchgänge zählen und damit die Lampe periodisch zum Blinken bringen, indem sie zeitweise eine Gatestrom in den Triac einspeisen. Überlegen Sie, bevor sie ihre Änderungen committen, ob dies ein neues Feature darstellt oder ob Sie in ihrem aktuellen Branch weiterarbeiten können.

5.4 Einstellen eines festen Zündwinkels

Nun soll die Phasenanschnittssteuerung, die in den vorherigen Kapiteln diskutiert wurde, realisiert werden. Der Triac soll folglich eine von Ihnen festgelegte Zeit nach dem Spannungsnulldurchgang zünden. Für die Ansteuerung des Triacs ist es ausreichend, den vorgegebenen Ausgang für eine Zeit von etwa $10\mu\text{s}$ auf high zu legen. Nach dieser Zeit hat der Strom durch den Triac den Einraststrom überschritten, solange es die ihn umgebende Beschaltung möglich macht.

5.5 Dimmen mithilfe der Taster

Verändern Sie ihr Programm so, dass Sie nun mithilfe der beiden Taster die Helligkeit der Lampe anpassen können.

5.6 Minimaler und maximaler Zündwinkel

Passen Sie ihr Programm so an, dass ein minimaler sowie ein maximaler Zündwinkel eingehalten wird, um den Triac immer sicher zu zünden. Da Sie nun den ersten großen Teil der Aufgabenstellung gelöst haben, ist es ein guter Zeitpunkt, um ihren Develop-Branch in ihren Master-Branch zu mergen.

5.7 Nutzen von Interrupts

Aktuell prüft ihr Mikrocontroller vermutlich regelmäßig, ob gerade der Nulldurchgang stattgefunden hat. Dies ist höchst ineffizient, wenn Sie gleichzeitig mit dem Mikrocontroller auch noch andere Aufgaben erledigen wollen. Eine Alternative bilden sogenannte **Interrupts**. Interrupts müssen schon in der Hardware eines Mikrocontrollers angelegt sein. Tritt ein Interruptereignis ein, so unterbricht die CPU das aktuelle Programm und führt die Interruptroutine aus. In dem hier verwendeten Mikrocontroller bietet der Pin 9 die Möglichkeit einen Interrupt zu werfen. Dieser Pin ist mit der Messung des Spannungsnulldurchgangs verbunden. Verändern Sie ihr Programm so, dass Sie nun den Spannungsnulldurchgang mittels Interrupt detektieren. Belesen Sie sich zu Interrupts im Arduino hier:

<https://www.arduino.cc/reference/de/language/functions/external-interrupts/attachinterrupt/>

Nehmen Sie den Strom- und Spannungsverlauf der Glühlampe mit dem Oszilloskop für zwei verschiedene Zündwinkel auf und speichern Sie die Messdaten auf einem USB-Stick ab.

5.8 Blinkende Lampe

Passen Sie ihr Programm so an, dass zusätzlich zur Dimmfunktion die Lampe im Sekundentakt blinkt.

Sie haben bereits bereits die Lampe blinken lassen. Können Sie diesen Feature-Branch nutzen, um gleich ein neues Commit mit der gewünschten Funktion zu erzeugen? Machen Sie abschließend ein Bildschirmfoto von ihrem *Git-Graph*. Das Foto kommt später in ihr Protokoll. Vergessen Sie nicht den finalen Quelltext ihres Programms mitzunehmen. Auch den brauchen Sie für Ihr Protokoll.

6 Protokoll

Fertigen Sie nach erfolgreicher Durchführung des Praktikums ein Protokoll an und geben Sie es innerhalb von zwei Wochen entsprechend der Anweisungen des Betreuers ab. Die Titelseite sollte den Namen des Praktikums, die Namen der

teilnehmenden Studierenden, deren Unterschriften sowie das Datum der Versuchsdurchführung und den Namen des Betreuers enthalten. Folgende Punkte sind thematisch mindestens im Protokoll zu berücksichtigen:

1. Zeichnen Sie einen Programmablaufplan. Der Programmablaufplan kann auch von Hand gezeichnet werden.
2. Zeichnen Sie einen Zeitgraphen, indem Sie eine Halbschwingung der Versorgungsspannung skizzieren und darstellen, zu welchem Zeitpunkt welcher Teil ihres Programms aktiv ist. Der Zeitgraph kann auch von Hand gezeichnet werden.
3. Stellen den Quelltext ihres Programms dar. In den integrierten Kommentaren sollte die Verbindung zwischen den Befehlen und den Elementen Ihres Programmablaufplans erkennbar sein, um ein schnelles Verständnis Ihres Programms zu ermöglichen.
4. Stellen Sie den Strom- und Spannungsverlauf für zwei verschiedene Zündwinkel mithilfe Ihrer Messergebnisse grafisch dar.
5. Stellen Sie Ihre Git Versionshistorie dar. Sie können hier einfach das aufgenommene Bildschirmfoto nutzen.
6. Beschreiben Sie, was Sie bei Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung des Praktikums neu gelernt und wieder aufgefrischt haben.
7. Geben Sie ein kurzes Feedback. Was hat Ihnen an dem Praktikum gut gefallen und Ihnen beim Lernen geholfen? Üben Sie dann gerne noch konstruktive Kritik an Anleitung, Versuchsstand, Betreuung und Protokoll. Da dieses Praktikum stark verändert wurde, ist von besonderem Interesse, ob in der Anleitung wichtige Informationen gefehlt haben oder ob bestimmte Sachverhalte nicht schlüssig dargestellt wurden.

Vergessen Sie bitte nicht, dass zu jedem Punkt kurze Erläuterungen und Auswertungen gehören!

Nutzen Sie bei ausgedruckten Protokollen bitte Heftstreifen zum Zusammenheften der Seiten. Diese erleichtert die Verwahrung Ihrer Protokolle, da sie durch die Heftstreifen leicht in Ordnern einsortiert werden können.