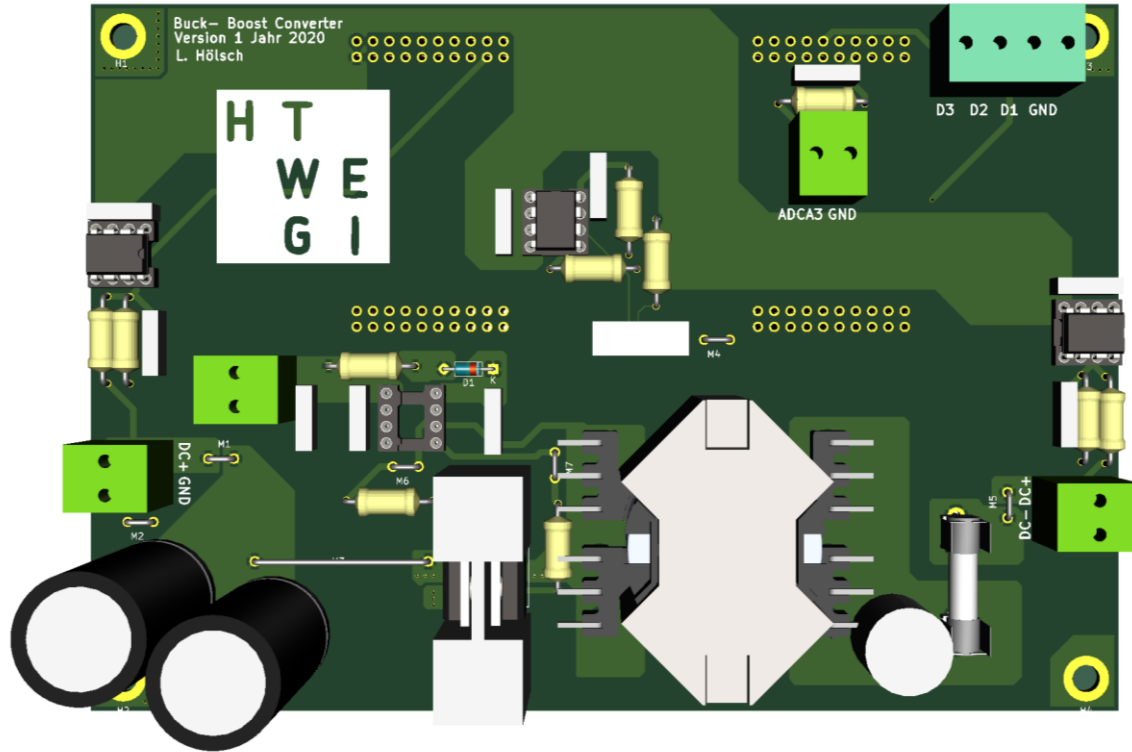


Hoch- Tiefsetzsteller

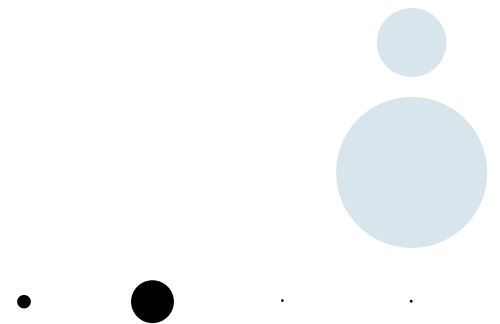
Entwicklung und Inbetriebnahme eines Hoch-
Tiefsetzstellers mit Regelung in MATLAB/ Simulink

Erstellt: Lukas Hölsch
Betreut: Prof. Dr. Heinz Rebolz



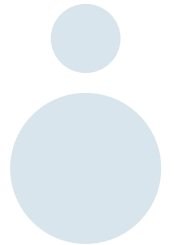
Inhaltsverzeichnis

- Ziele und Einleitung
- Vorteile MATLAB/ Simulink
- Tiefsetzsteller und Struktur des Reglers
- LaunchPad und μC
- Setup Simulink für Hardware
- Aufbau Simulink
- Block ePWM
- Aufbau Messung
- Ergebnis Messung
- Probleme
- Ergebnis und Ausblick
- Anhang und Literatur



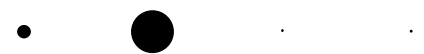
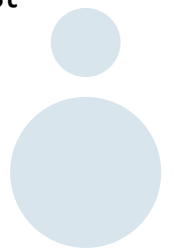
Ziele

- Die Bauelemente eines Tiefsetzsteller kennen lernen
- Die Funktionsweise sowie die Strom und Spannungsverläufe verstehen
- Wissen von Regelungstechnik I vertiefen
- Verbindung zwischen Leistungselektronik und Regelungstechnik herstellen



Einleitung

- Der Tiefsetzsteller gehört zu der Gruppe der Gleichspannungswandler. Es liegt somit am Eingang und am Ausgang eine Gleichspannung an
- Durch periodisches Ein- und Ausschalten eines Leistungshalbleiters, wird am Ausgang des Tiefsetzstellers eine Spannung erzeugt, die kleiner als die Eingangsspannung ist
- Die Ausgangsspannung ist von dem sogenannten Duty-Cycle D abhängig

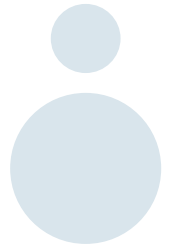


Einleitung II

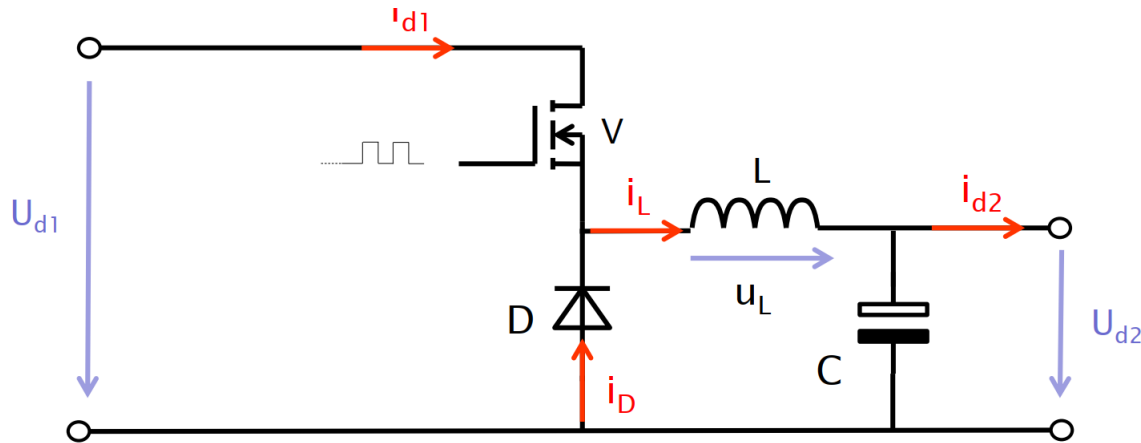
- Damit die Ausgangsspannung auch bei einer Laständerung konstant bleibt, muss der Tiefsetzsteller die Ausgangsspannung nach regeln
- Ebenso soll die Ausgangsspannung bei Änderung der Eingangsspannung konstant bleiben
- Die Regelung soll digital erfolgen. Normalerweise müsste dafür ein μC programmiert werden, was den Aufwand und auch die Fähigkeiten des Entwicklers stark erhöht
- Hier soll jetzt die Automatische c-Code Generierung von MATLAB/ Simulink genutzt werden

Vorteile MATLAB/ Simulink

- Die aufwendige und komplizierte Programmierung des μC durch setzen von einzelnen Registern entfällt
- MATLAB bietet eine große Auswahl an Toolboxen, die zur Entwicklung und Analyse der Regelung helfen können
- Die Implementierte Regelstruktur ist sehr ähnlich mit dem Blockschaltbild der Regelstrukturen aus RT 1 und erleichtert das Verständnis des Reglers erheblich



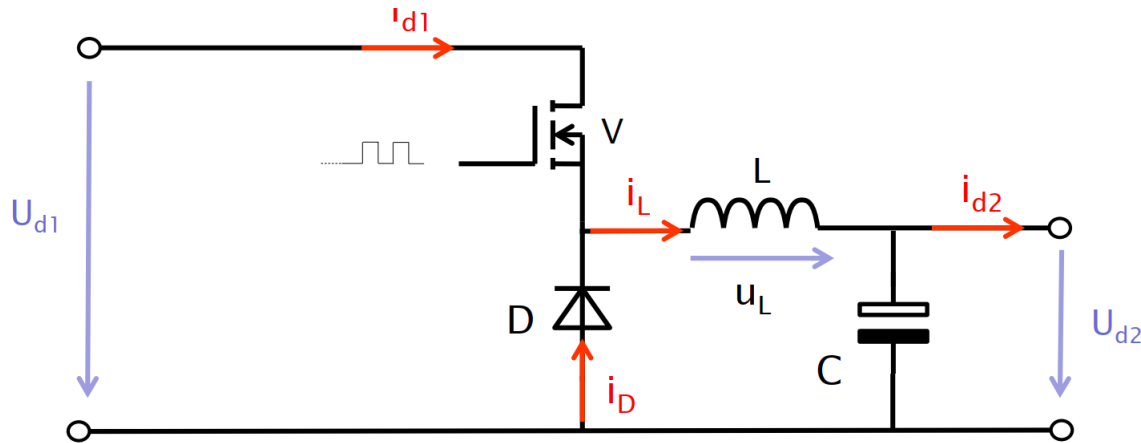
Aufbau Tiefsetzsteller



[1] „LE_Kapitel_5_DC_DC_Converter“, Prof. Dr. Heinz Rebholz, SS2019

- Prinzip-Schaltbild des Tiefsetzstellers mit:
- Leistungshalbleiter V
 - Freilaufdiode D
 - Induktivität L
 - Glättungskondensator C

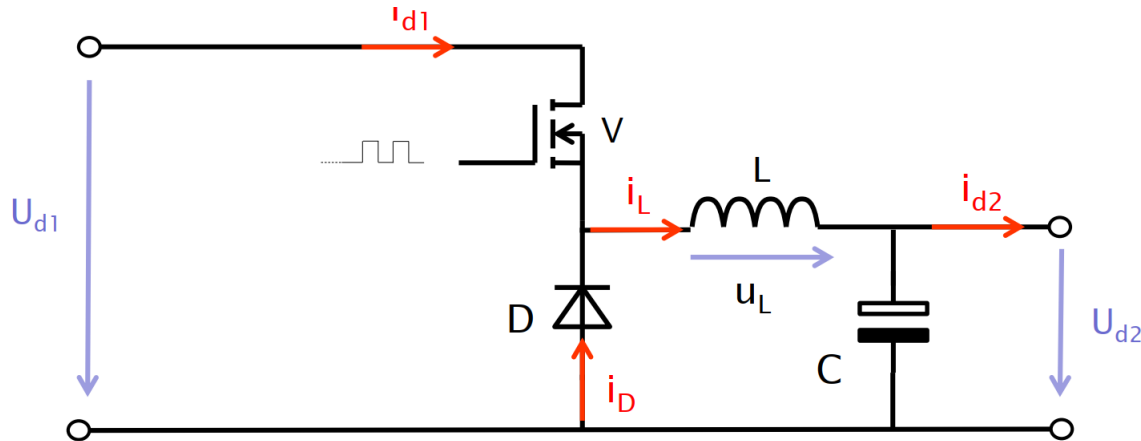
Tiefsetzsteller Schalter ZU



[1] „LE_Kapitel_5_DC_DC_Converter“, Prof. Dr. Heinz Rebholz, SS2019

- Strom durch Halbleiter V und Induktivität L
- Kein Strom durch Diode D
- Strom in L steigt linear an

Tiefsetzsteller Schalter OFFEN

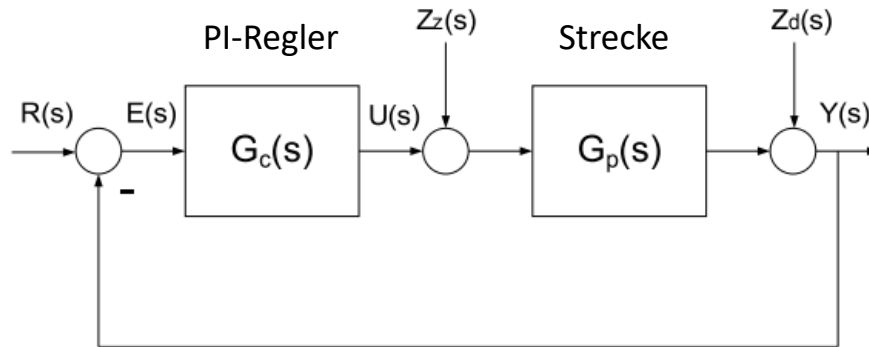


- Strom durch Induktivität
L muss weiter fließen
- Strom durch Diode D
- Strom durch L fällt linear
ab

[1] „LE_Kapitel_5_DC_DC_Converter“, Prof. Dr. Heinz Rebolz, SS2019

Aufbau Regler

Für die Regelung wurde ein PI-Regler entworfen. Dafür wird die Spannung an der Last $Y(s)$ zurückgekoppelt.



- $R(s)$ Führungsgröße (Soll-Spannung)
- $E(s)$ Regeldifferenz
- $U(s)$ Stellgröße
- $Y(s)$ Regelgröße (Ist-Spannung)
- $Zz(s)$ Störung am Streckeneingang
- $Zd(s)$ Störung am Streckenausgang

[2] „Regelungstechnik 1“, Prof. Dr. Johannes Reuter SS18

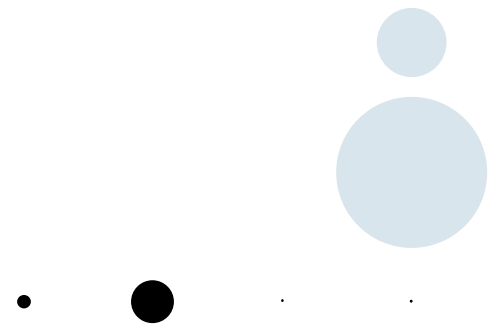
LaunchPad TI FM28069M

Entwicklungsboard mit:

- μ Controller Piccolo FM28069
- 4x20 Pin-Connectors
- USB-Schnittstelle
- Programmierbare LEDs
- Und viele weitere Schnittstellen

µController TI FM28069

- 32-Bit Real Time Microcontroller
- 90 MHz Taktfrequenz
- 12-bit ADC
 - 0V... 3.3V
 - Bis zu 16 Kanäle
 - Bis zu 90 MHz Abtastfrequenz
- 16 PWM Kanäle

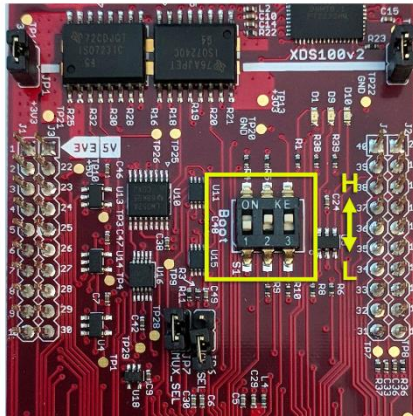


Setup Simulink für Hardware

- Toolbox „Embedded Coder Support Package for Texas Instruments C2000 Processors“ installieren
- Code Composer Studio (CSS) installieren
- Das Lauchpad wird über USB an den Computer angeschlossen
- In Simulink muss unter dem Punkt Hardware->Hardware Settings->Target Hardware resources->External mode der richtige Serial Port ausgewählt werden. (COMxx)*

Setup Simulink für Hardware II

- Die Boot-Switches müssen wie folgt gesetzt werden



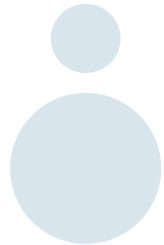
Durch das setzen der Boot-Switches läuft der erzeugte Code auf dem Computer, nicht auf dem μC

1 Low

2 High

3 High

[3] „LAUNCHXL-F28069M Overview“, S.7, Mach 2019, Texas Instruments

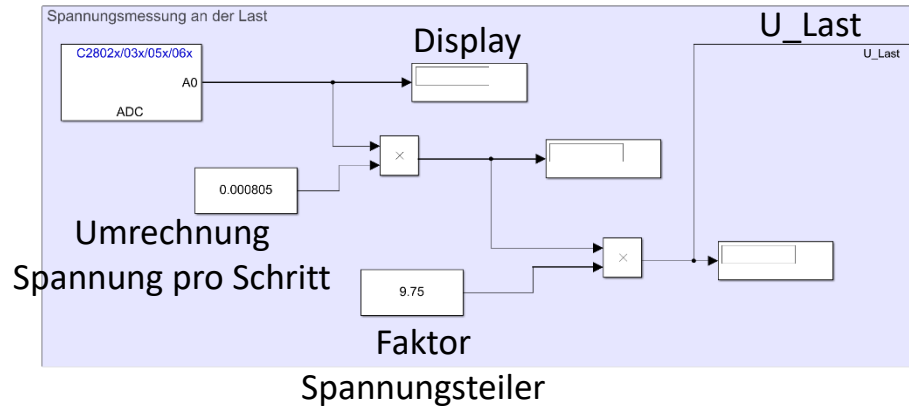


Aufbau Simulink

Zuerst werden die einzelnen Komponenten der Simulation erklärt. Dazu gehört:

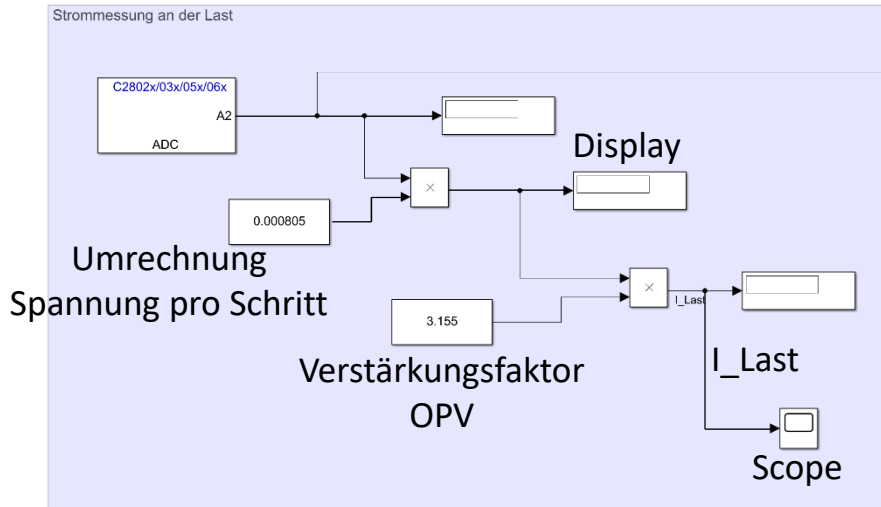
- Spannungsmessung an der Last
- Strommessung durch Last
- P- und I-Anteil des Reglers
- Erzeugung PWM-Signal für die Ansteuerung

Spannungs-Messung



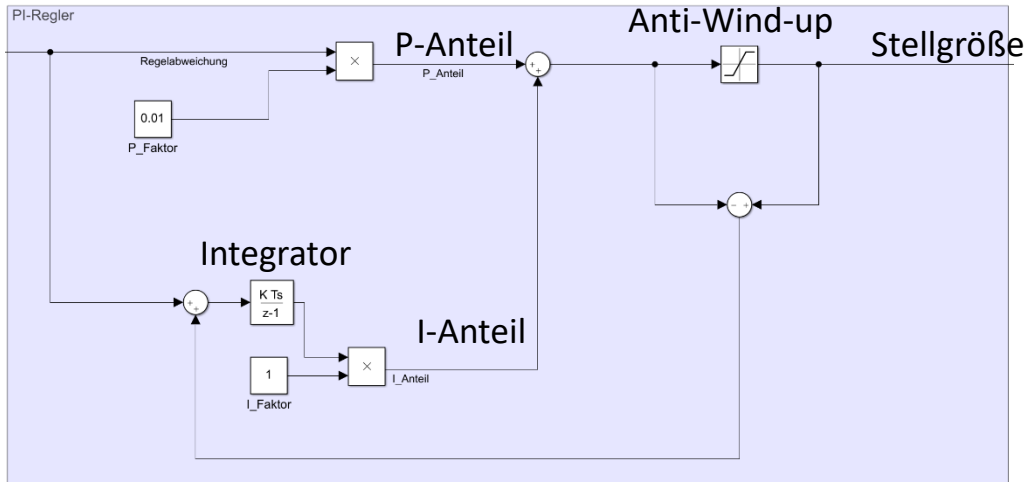
- Der Spannungswert wird über den Block ADC eingelesen.
 - Umrechnung auf Spannung pro Schritt
- $$\frac{3,3V}{2^{12}} = 0,000805$$
- Multiplizieren mit dem Faktor des Spannungsteilers vor dem OPV*

Strom-Messung



- Einlesen des Spannungswerts an Kanal A2
- Umrechnung Spannung pro Schritt
- Multiplikation mit Verstärkungsfaktor der OPV-Schaltung*

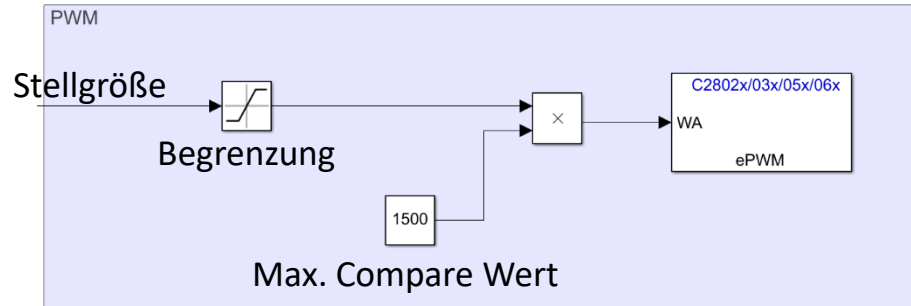
P- und I-Anteil Regler



- Aufteilung in P- und I-Anteil
- Faktor P = 0.01
- Faktor I = 1

Anti-Wind-up wird benötigt um den I-Anteil des Integrators anzuhalten, wenn der I-Anteil größer als die Stellgröße ist.

Erzeugung PWM-Muster



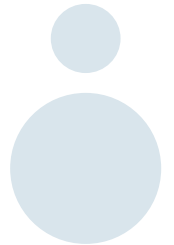
- Erzeugung der PWM in Block ePWM
- Begrenzung min. 0,05*
- Begrenzung max. 0,95*
- Multiplikation mit dem maximalen Compare Wert

Block ePWM

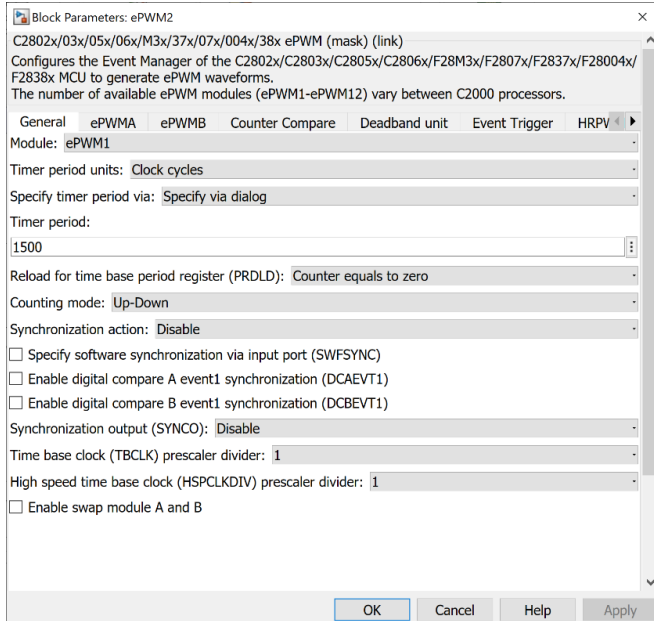
In dem Simulink Block ePWM müssen einige Einstellungen vorgenommen werden. Dazu gehört:

- Aktivierung ePWMA
- Einstellungen des Counters
- Und die Einstellung der Totzeit

Diese Punkte werden in den nächsten Folien ausführlich behandelt.

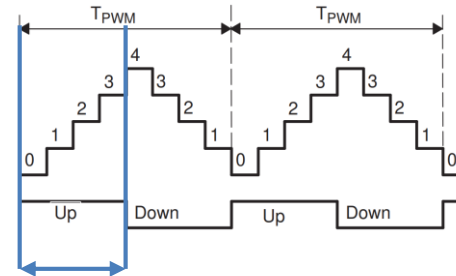


General



Hochschule Konstanz

- Schaltfrequenz = 30 kHz
- Prescaler = 1
- $\frac{90\text{Mhz}}{30\text{ kHz}} = 3000 \frac{\text{counts}}{\text{Periode}}$
- Up- Down mode -> 2*Timer period
- -> Timer period = 1500



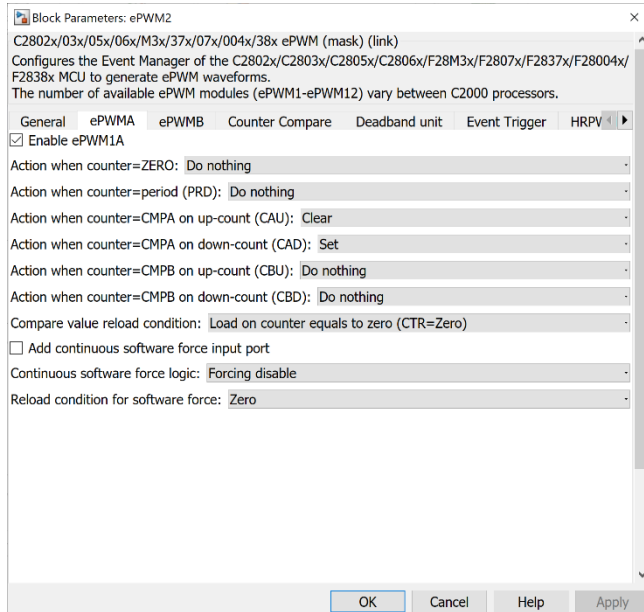
Timer periode

[4] „TMS320x2806x - Technical Reference Manual“, S. 255, November 2019, Texas Instruments

31.03.2020

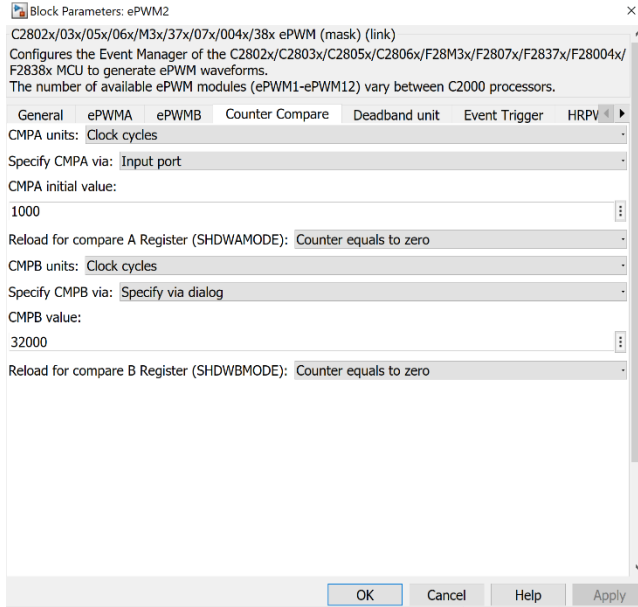
21

ePWMA



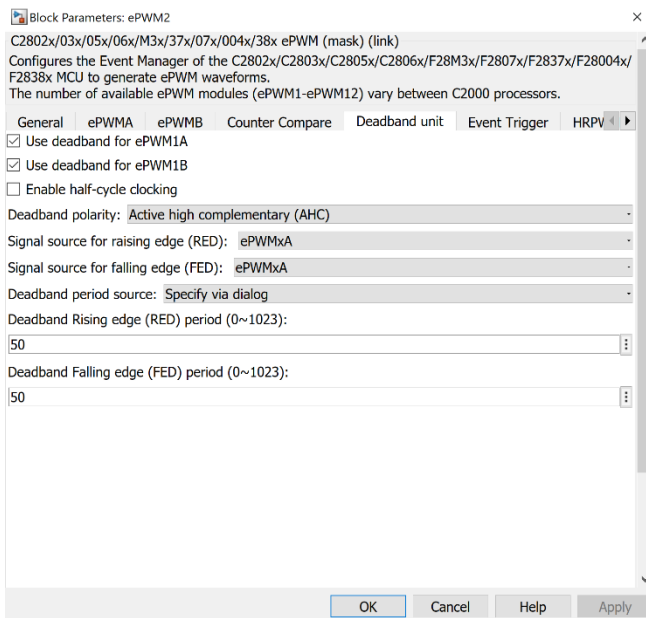
- Die ePWM1A muss eingeschalten werden
- CMPA = Counter Compare Register A
- Wenn Sollwert größer CMPA, dann lösche Bit
- Wenn Sollwert kleiner CMPA, dann setze Bit

Counter Compare



- CMPA wird über Input port von dem Regler vorgegeben
- Initialwert CMPA ist 1000
- CMPB Wert spielt keine Rolle, da ePWM1A und ePWM1B komplementär Takten, siehe Deadband unit

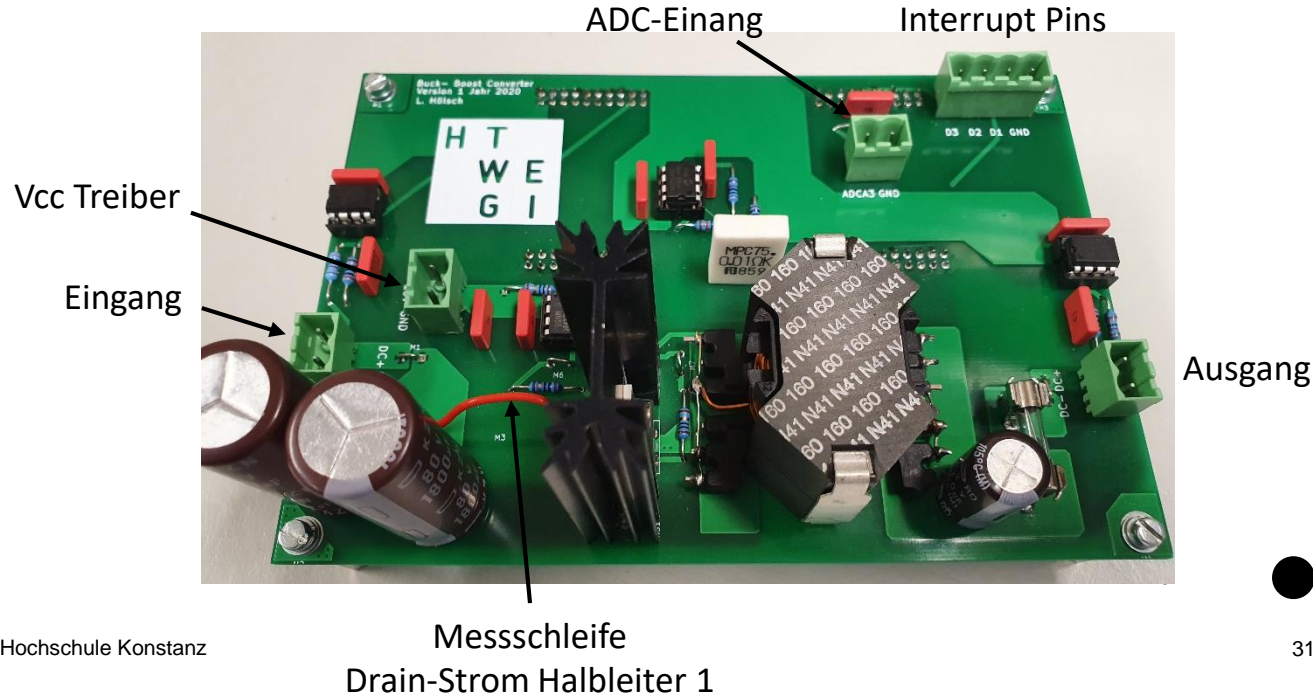
Deadband unit – bidirektional*



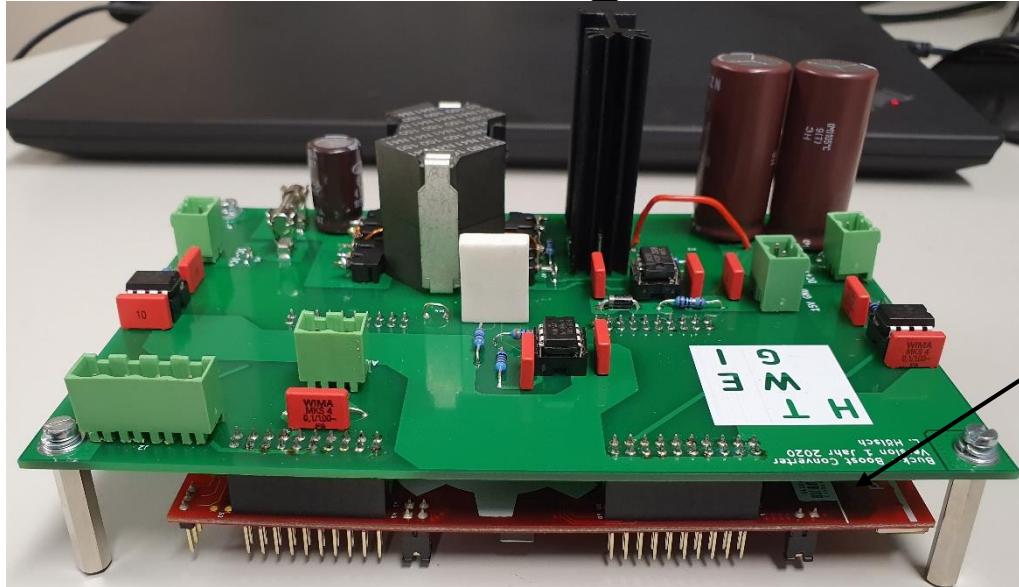
- Modus: komplementär
- Signal ePWM1A wird beim Ein- und Ausschalten verzögert
- $T_{tot} = \frac{1}{90MHz} * 50 = 556 ns$

*Die Schaltung wurde für einen bidirektionalen Betrieb ausgelegt. Es sind zwei Halbleiter vorhanden, die komplementär zueinander Takten müssen.

Aufbau der Messung



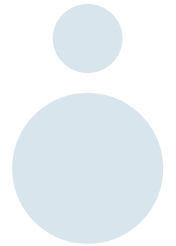
Aufbau der Messung II



TI-Board sitzt auf der Unterseite der Platine

Arbeitsbereich der Schaltung

- Eingangsspannung: 30V ... 60V
- Ausgangsspannung: 0V ... 60V
- Maximaler Strom: 8A
- Versorgungsspannung Treiber: 15V
- Schaltfrequenz: 30kHz



Starten der Messung

- Starten der Simulation in Simulink mit Monitore & Tune (Code läuft auf Computer)



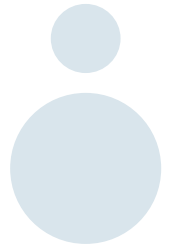
- -> Hardware beginnt zu arbeiten
- Eingangsspannung und Treiberspannung aktivieren
- Lasts mit einstellbarem Widerstand einstellen
- -> Regler Performance kann in Simulink beobachtet werden

Ergebnisse Messung Simulink

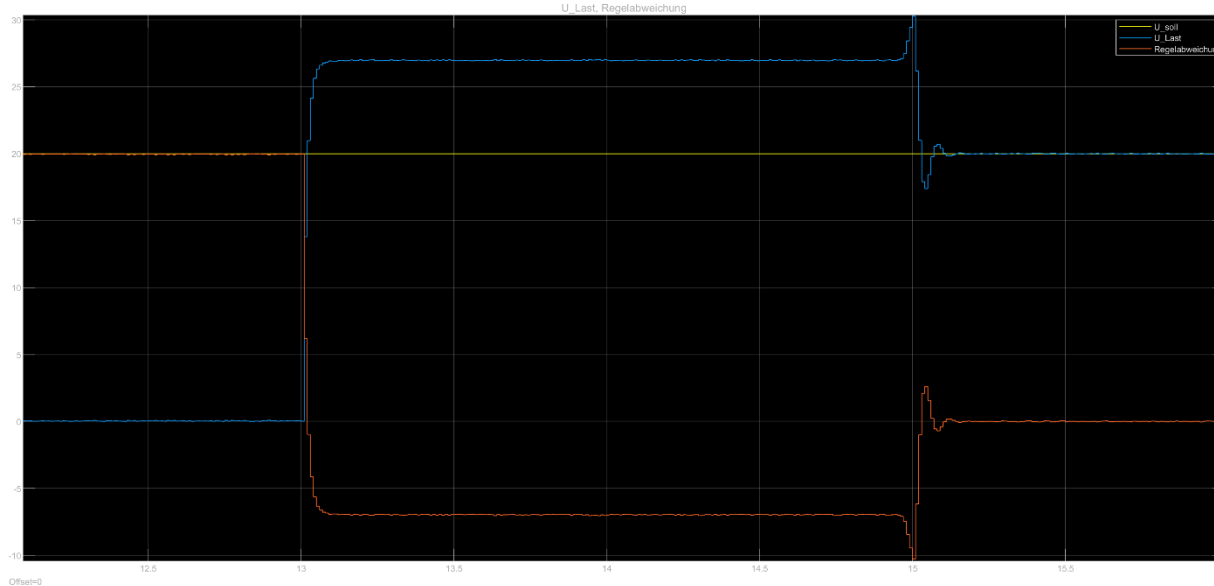
Im folgenden Teil werden die Ergebnisse der Messung in Simulink analysiert. Dabei wird

- Die Soll-Spannung im Vergleich zu der Ist-Spannung
- Der Ausgangsstrom
- Und die Aufteilung zwischen P- und I-Anteil des Reglers

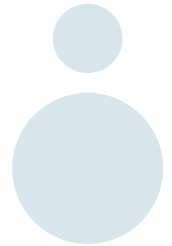
miteinander verglichen.



Soll- und Ist- Spannung



- Gelb: Soll-Spannung (20V)
- Blau: Ist-Spannung



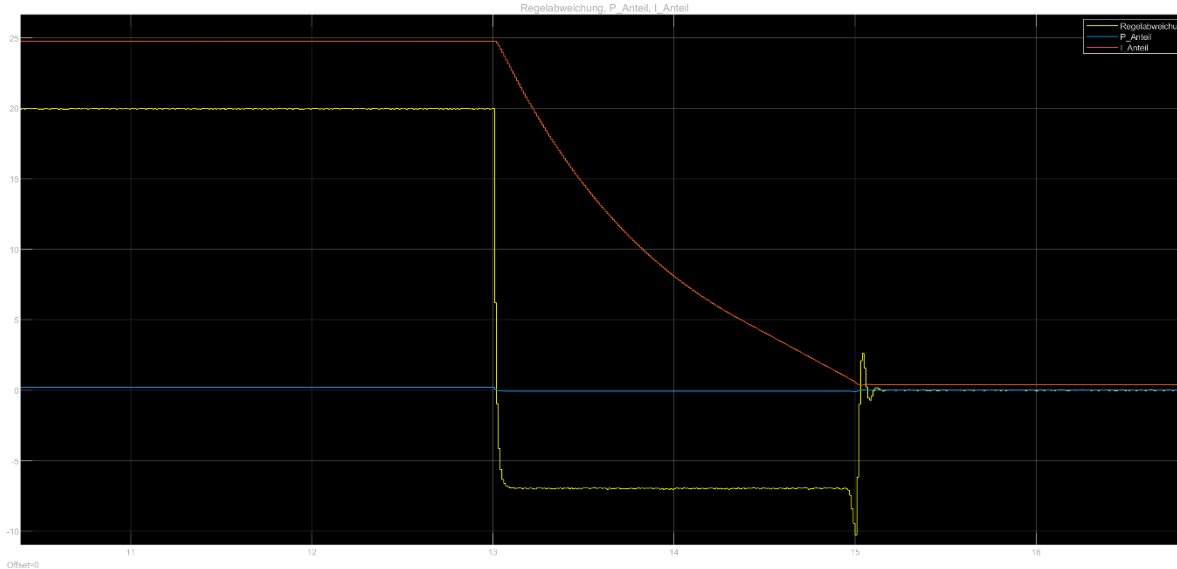
Ausgangs- Strom



Gelb:
Ausgangsstrom

Der Strom stellt sich durch die Spannung am Ausgang und dem Widerstand am Ausgang ein.

P- und I- Anteil



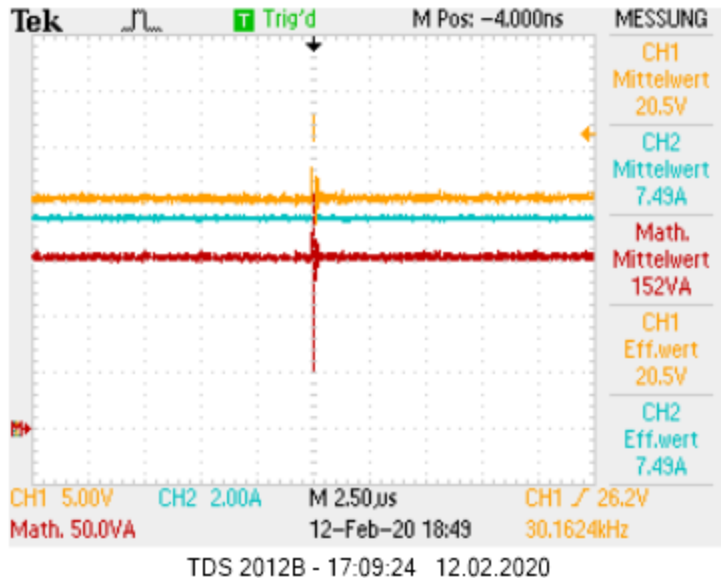
- Gelb:
Regelabweichung

- Blau: P-Anteil

- Rot: I-Anteil

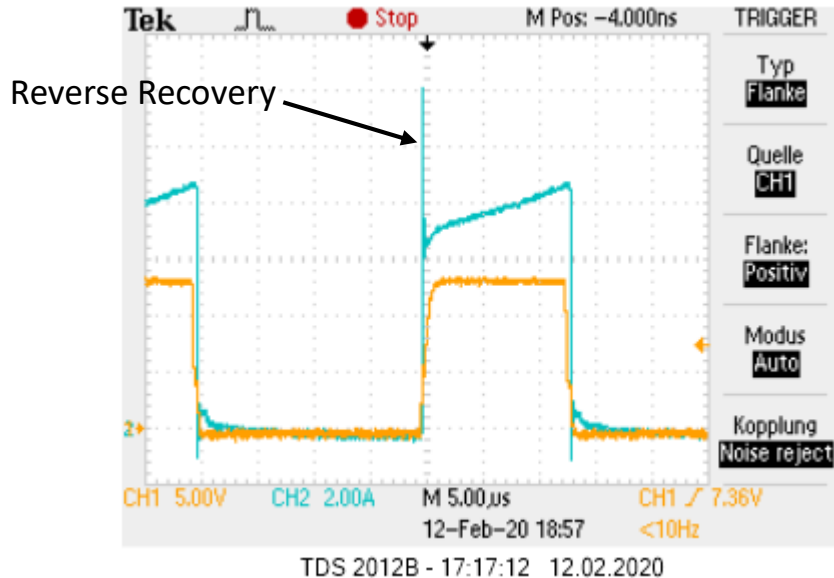
Der P-Anteil ist sehr gering und reagiert sehr schnell. Der I-Anteil läuft verzögert nach.

Ausgangsspannung



- Orange: Ausgangsspannung
- Blau: Ausgangsstrom
- Rot: Ausgangsleistung

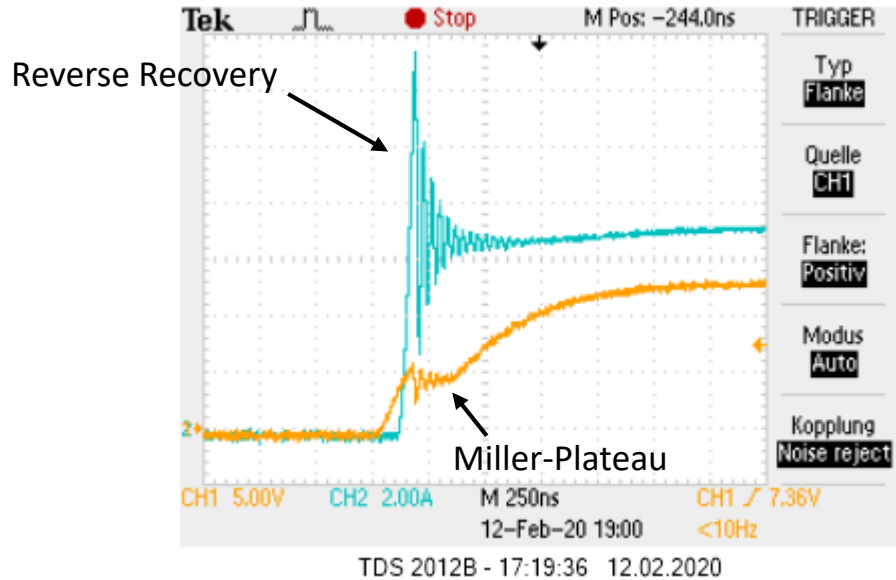
Einschaltvorgang MOSFET



- Orange: Gate-Source-Spannung
- Blau: Drain-Strom

Bei dem Einschaltvorgang ist eine deutliche Stromüberhöhung zu sehen. Die Stromüberhöhung kommt durch das abreißen des Stroms durch die Diode zustande (Reverse Recovery).

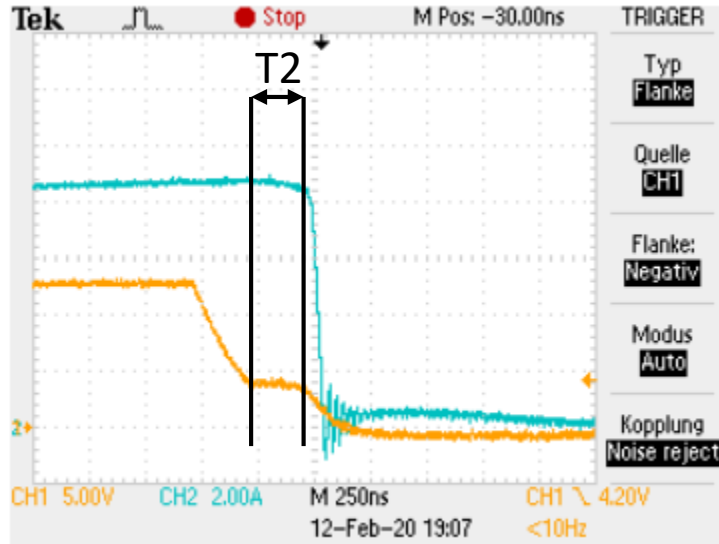
Zoom Einschaltvorgang MOSFET



- Orange: Gate-Source-Spannung
- Blau: Drain-Strom

Hier kann man gut das Miller-Plateau bei ca. 5 V erkennen.

Ausschaltvorgang MOSFET

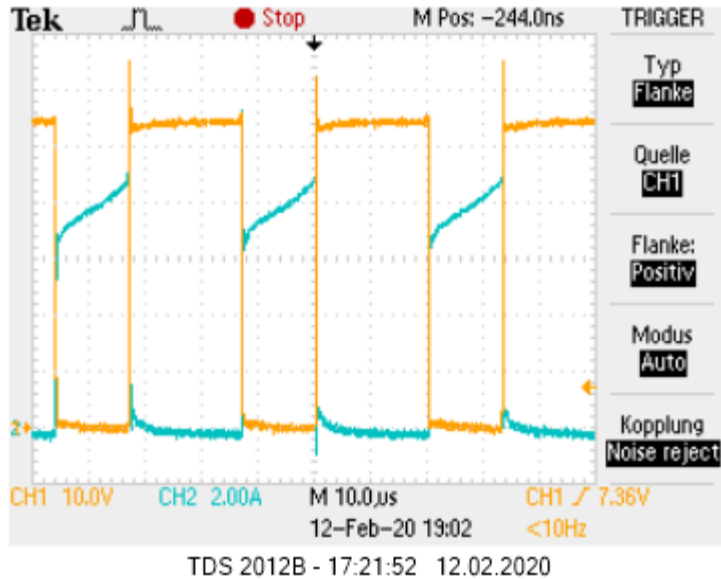


TDS 2012B - 17:27:09 12.02.2020

- Orange: Gate-Source-Spannung
- Blau: Drain-Strom

Im Zeitabschnitt T2 wird der gesamte Gate-Strom verwendet um die Gate-Drain Kapazität umzuladen, weshalb die Gate-Source Spannung in diesem Zeitraum konstant bleibt.

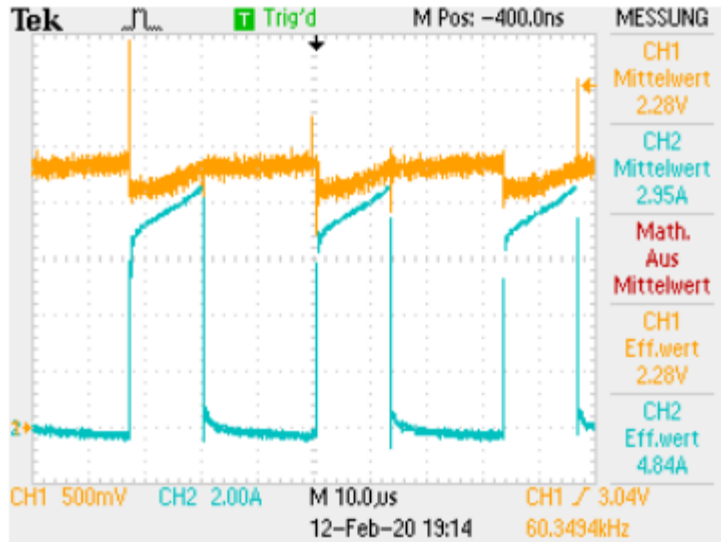
Strom-Verlauf durch MOSFET



- Orange: Drain-Source-Spannung
- Blau: Drain-Strom

Ist die Drain-Source Spannung ideal 0V, fließt ein Strom durch den MOSFET. Der Strom steigt linear an, wie wir es erwarten.

Strommessung Last



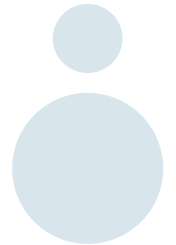
TDS 2012B - 17:33:32 12.02.2020

- Orange: Spannung am Ausgang des OPVs
- Blau: Drain-Strom

Die gemessene Spannung am OPV stellt keinen Sinnvollen Verlauf dar, da der Strom bzw. die Spannung keinen Dreieckförmigen Verlauf hat. Hier sollte nachgemessen werden.

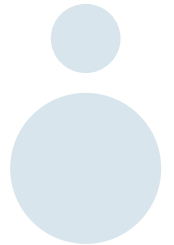
Probleme

- Anfangs Problem mit der Kommunikation von Simulink und der Hardware, konnte jedoch gelöst werden
- Spannungs- und Strommessung nicht konstant über den gesamten Bereich
 - -> Bauteiltoleranzen, Verwendung von SMD-Bauteilen
- Strommessung mit Shunt, Stromverlauf nicht schlüssig
 - Vorgehen: Spannung direkt an Shunt messen und mit Spannung am Ausgang des OPVs vergleichen



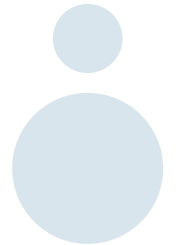
Ergebnis

- Nach dem Überwinden der ersten Hürden ein leicht bedienbares Tool zur Simulation und Überwachung von Regelstrukturen
- Die Register müssen nicht von Hand in C programmiert werden
- Aufbau des Reglers als Blockschaltbild sehr gut verständlich
- Interne Signale vom Regler, z.B. der I-Anteil kann visuell dargestellt werden
- Auswertung der Messdaten anschließend in MATLAB



Ausblick

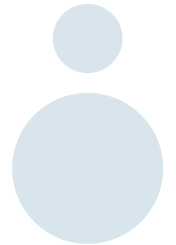
- Die Messwerte in Simulink wurden bis jetzt nicht gespeichert und waren nur temporär verfügbar, dies ist ein großer Nachteil bei der anschließenden Messauswertung
- Die Simulation in Simulink kann um die Automatische Speicherung der Messdaten erweitert werden
- Eine peak-Strombegrenzung kann implementiert werden, so dass bei einem Überstrom die Induktivität nicht in Sättigung geht



Anhang

Im Anhang werden noch folgende Punkte ergänzend angesprochen:

- Schaltplan
- Layout
- Berechnung der Drossel
- Vermessung der Drossel

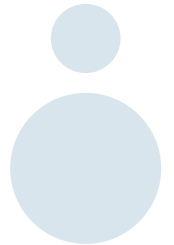


Schaltplan

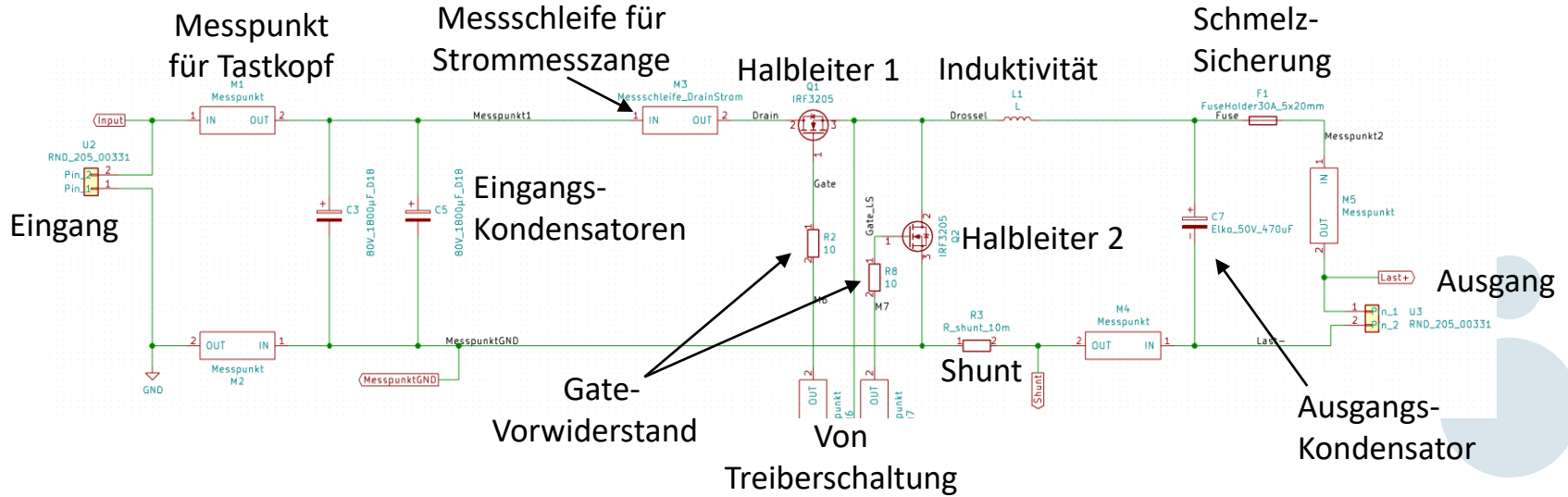
In den folgenden Folien werden die wichtigsten Schaltplanelemente vorgestellt.

Dazu gehört:

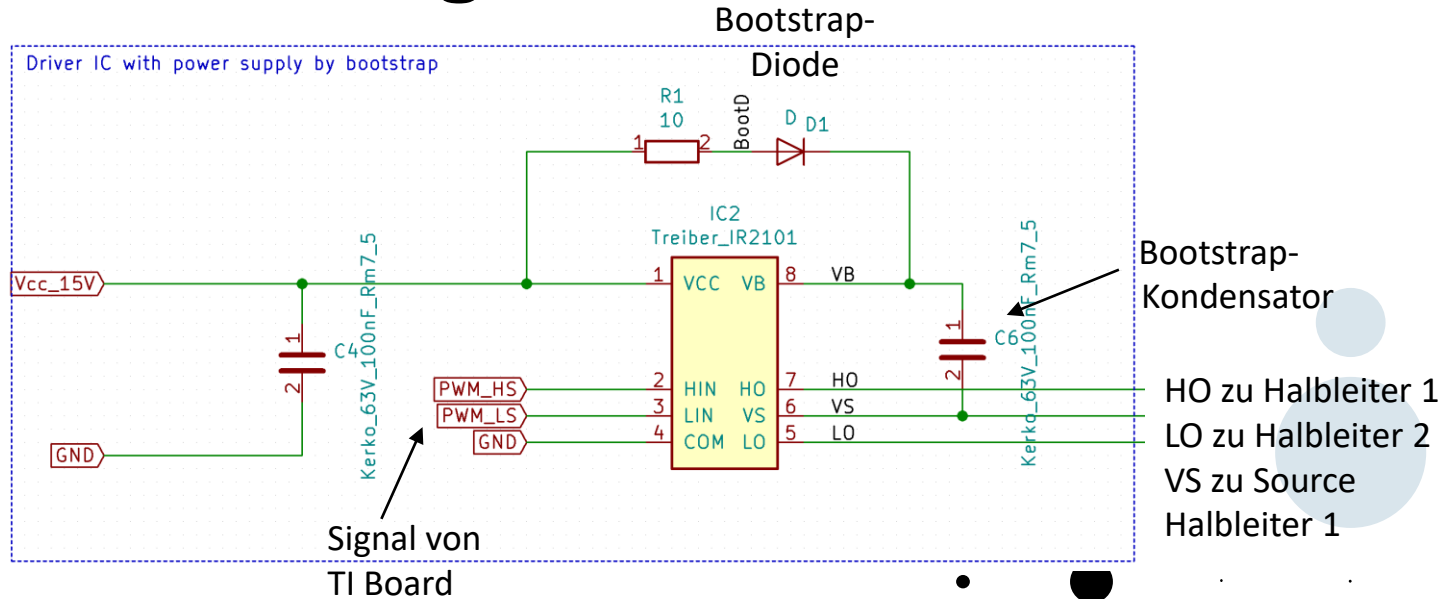
- Der Hoch- Tiefsetzsteller
- Die Treiberschaltung
- Exemplarisch die Spannungsmessung an der Last
- Die Verbindung der ePWM, der ADCs sowie der Interrupt Pins



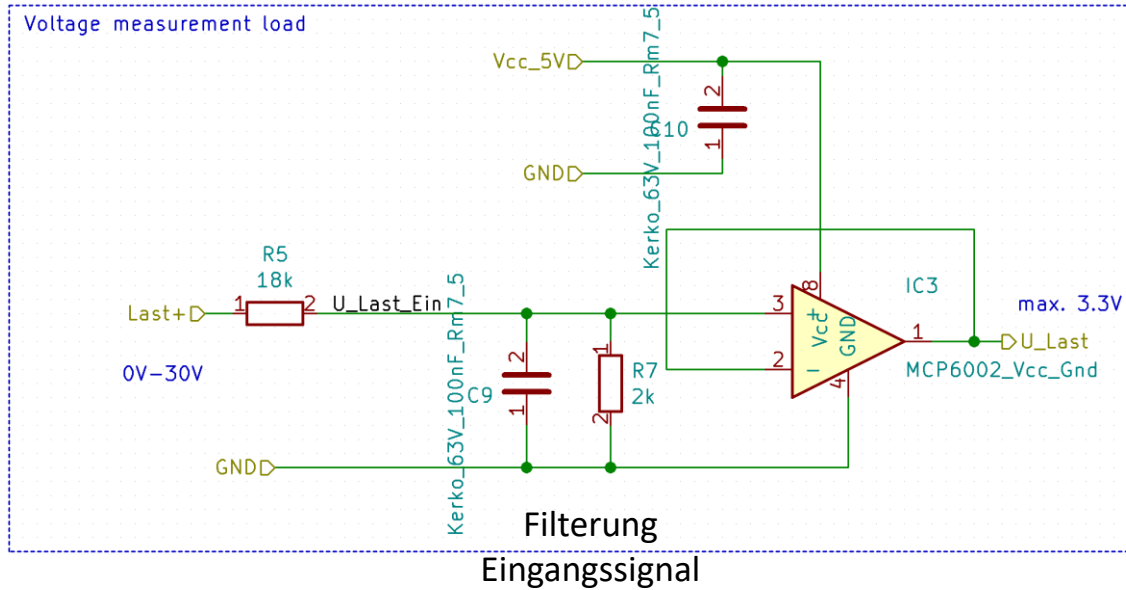
Hoch- Tiefsetzsteller



Treiberschaltung

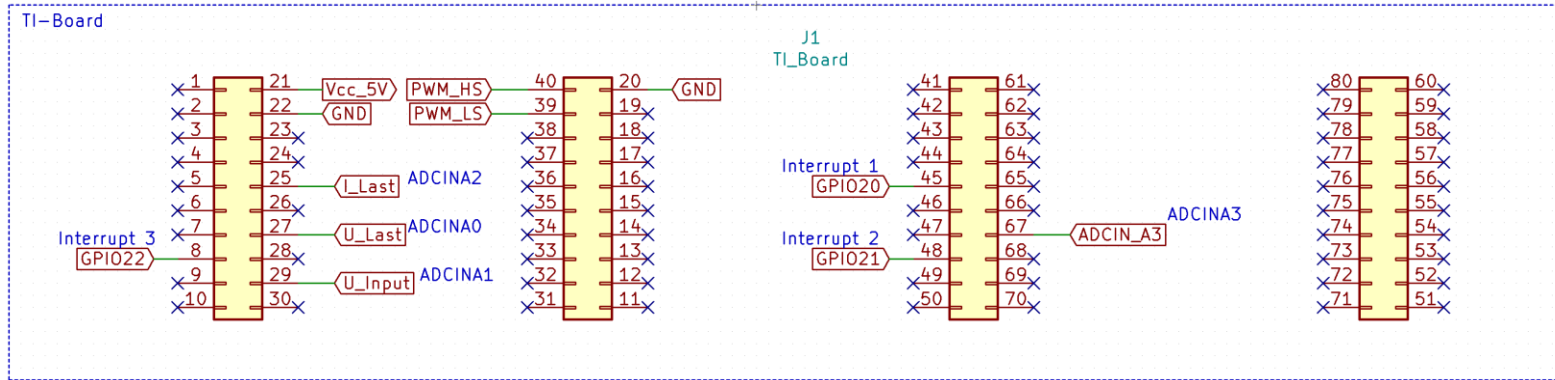


Spannungsmessung Last

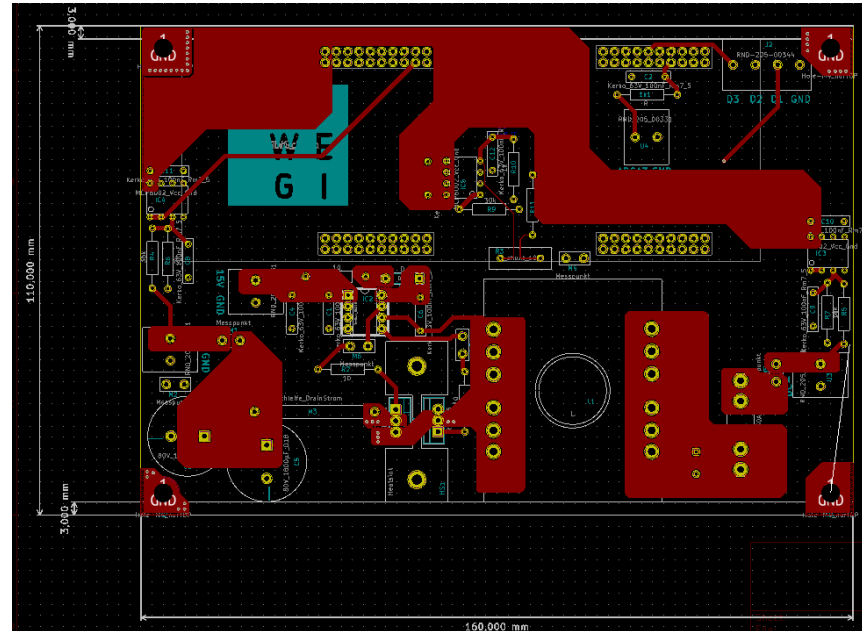


Übersetzungsverhältnis
 $\ddot{U} = 0.1$

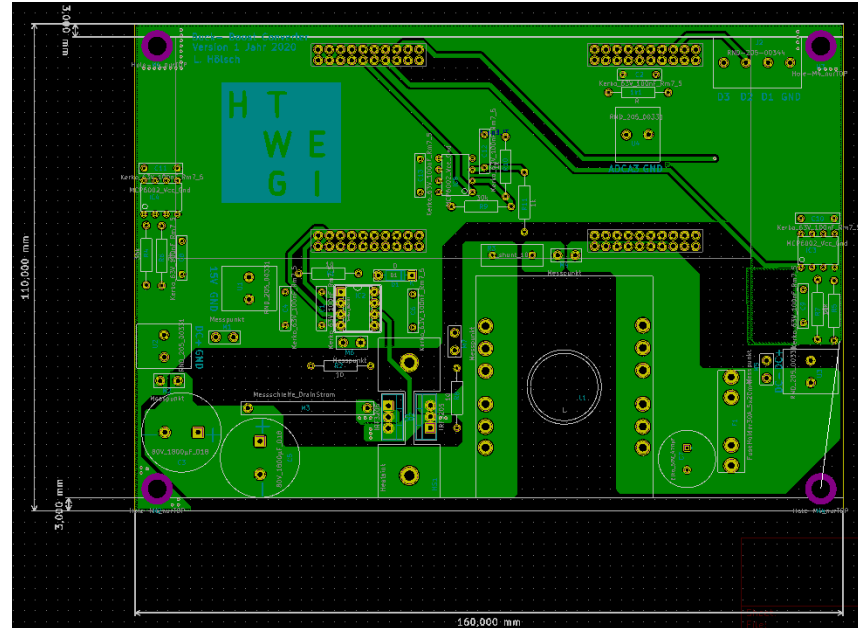
Verbindung TI Board



Layout Top



Layout Bottom




Berechnung Drossel

1. Induktivität bestimmen

$$u_L = L * \frac{d_i}{dt}$$

$$L = u_L * \frac{dt}{d_i} = 30V * \frac{16,6 \mu s}{1 A} = 500 \mu H$$

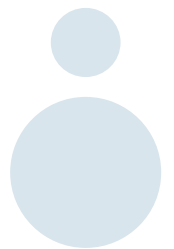
Max. zulässiger
Rippelstrom per
Definition festgelegt



2. Luftspaltvolumen Kern RM 14

$$V_L = A_{min} * I_L = 170 mm^2 * 1,9 mm = 323 mm^2$$

Werte aus Datenblatt

Berechnung Drossel II

3. Luftspaltvolumen

$$\frac{L * i_{max}^2 * \mu_0}{B_{max}^2} = \frac{500\mu H * 6A^2 * 4 * \pi * 10^{-7} \frac{Vs}{Am}}{0,3T^2} = 251mm^3$$

Sättigungsgrenze Ferrit
0,3T... 0,35T

$$251mm^3 < 323 mm^3$$

-> Das benötigte Luftspaltvolumen ist kleiner als das vorhandene Luftspaltvolumen des RM14 Kerns. Dieser Kern kann somit verwendet werden.

Berechnung Drossel III

4. Windungszahl berechnen

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{500 \mu H}{160 \text{ nH}}} = 56 \text{ Windungen}$$

5. Kontrolle Sättigungsgrenze

$$B_{max} = \frac{L * i_{max}^2}{N * A_{min}} = \frac{500 \mu H * 6 A^2}{56 * 170 \text{ mm}^2} = 0,315 \text{ T}$$

-> Die Sättigungsgrenze liegt bei ca. 0,30 T ... 0,35 T und wird somit eingehalten

Berechnung Drossel IV

6. Berechnung Querschnittsfläche

$$q_{\text{Draht}} = \frac{A_N}{N} * f_N = \frac{107 \text{ mm}^2}{56 \text{ Windungen}} * 0,5 = 0,96 \text{ mm}^2$$

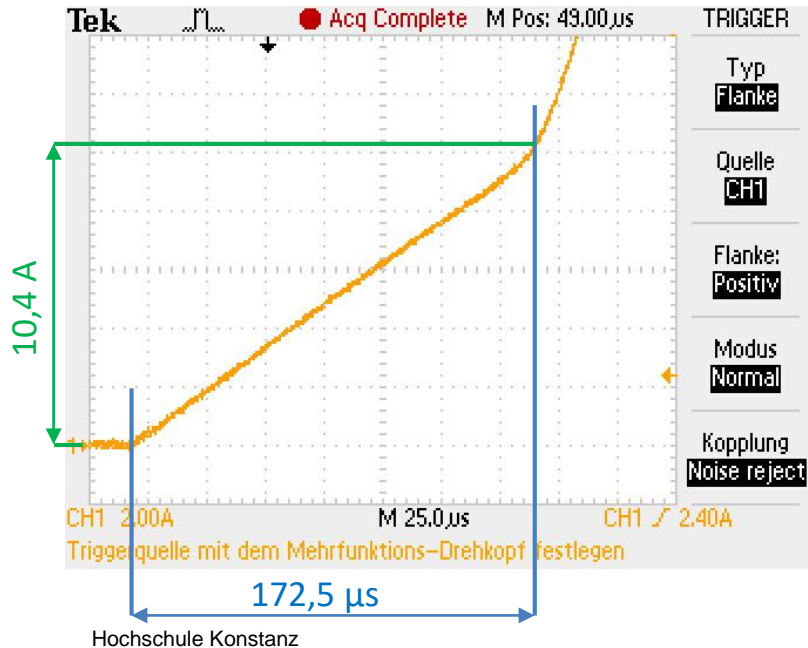
Wert aus Datenblatt

7. Berechnung Drahtdurchmesser

$$d_{cu} = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 0,96 \text{ mm}^2}{\pi}} = 1,1 \text{ mm}$$

Ein Füllfaktor von 50% sieht sehr gering aus, der vorhandene Wickelraum wird jedoch gut ausgenutzt

Vermessung Drossel



1. Aufladen der Kondensatorbank auf 30 V DC
2. Verbindung von Minus Pol Kondensator mit einem Anschluss der Drossel
3. Strommesszange über diese Leitung anbringen
4. Oszilloskop auf Single Shot einstellen
5. Pluspol des Kondensators mit Drossel verbinden

$$L = U_L * \frac{dt}{di} = 30V * \frac{172,5 \mu s}{10,2 A} = 507 \mu H$$

Literatur

[1] „*LE_Kapitel_5_DC_DC_Converter*“, SS2019, Prof. Dr. Heinz Rebholz

[2] „*Regelungstechnik 1*“, SS18, Prof. Dr. Johannes Reuter

[3] „*LAUNCHXL-F28069M Overview*“, Mach 2019, Texas Instruments

[4] „*TMS320x2806x - Technical Reference Manual*“, November 2019, Texas Instruments

[5] „*Beispiel zur Berechnung einer Speicherdrossel*“, SS19, Prof. Dr. Heinz Rebholz