



e-CAD, SIMULATION
SOMMERSEMESTER 2016

Dokumentation Projekt Abwärtswandler

Autor:
Lukas Kiechle

Studiengang:
Elektrotechnik Dual Bachelor

betreuernder Dozenten:
Christoph Vonach

Lehrveranstaltung:
E-CAD

24. Mai 2016

Inhaltsverzeichnis

1 Abwärtswandler (Buck Converter)	4
1.1 Einleitung	4
1.2 Vorgaben	5
1.3 Schaltung	5
1.3.1 Prinzip, Aufbau	5
1.3.2 Aufgetretene Probleme	5
1.4 Diskussion der Aufgaben	6
1.4.1 Aufgabe a: Bestimme Bauteile	6
1.4.2 Aufgabe b: Berechnung Induktivität beim Spitzenstrom 50mA Eingenschalten	8
1.4.3 Aufgabe c: Einschwingdauer der Schaltung	8
1.4.4 Aufgabe d: Leitungen mit hohen bzw. gepulsten Strömen	8
1.4.5 Aufgabe e: Toleranzanalyse	11
1.4.6 Aufgabe f: Einfluss der Komponenten bei Toleranzanalyse	11
1.4.7 Aufgabe g: Regelung Strom durch Induktivität maximal 20mA	11
1.4.8 Aufgabe h: Ausgangsspannung nach Einbau von Regelung	14
1.5 Matlab Skripte	16
1.5.1 Parameters Skript	16
1.5.2 Toleranz Analyse Skript	17
1.5.3 Toleranz Einstellungen Skript	18
1.5.4 Toleranz Simulation Skript	19

Abbildungsverzeichnis

1.1	Prinzipschaltung eines Inverswandlers	6
1.2	reale Simulationsschaltung Abwärtswandler	6
1.3	Strom Regler für den Abwärtswandler	7
1.4	Ausgangsspannung, Strom durch Induktivität und PWM Signal	7
1.5	Einschwingdauer von Strom und Spannung	8
1.6	Strom durch die Diode	9
1.7	Strom durch den MOSFET	9
1.8	Strom durch den Lastwiderstand	10
1.9	Strom durch die Induktivität	10
1.10	Strom in den Kondensator	11
1.11	Toleranzanalyse Induktivität 10%	12
1.12	Toleranzanalyse Frequenz 10%	12
1.13	Toleranzanalyse Lastwiderstand 10%	13
1.14	Abwärtswandler mit Stromregelung (Begrenzung) 0.5ms Darstellung	13
1.15	Abwärtswandler mit Stromregelung (Begrenzung) 1ms Darstellung	14
1.16	Abwärtswandler mit Stromregelung (Begrenzung)	15
1.17	Gesamtübersicht der Simulationsblöcke	15

1 Abwärtswandler (Buck Converter)

1.1 Einleitung

In diesem Dokument werden die erarbeiteten Aufgaben a bis h von dem Abschlussprojekt dokumentiert.

Für die Berechnungen und Simulationen wurde Matlab R2015b und Simulink als Rechen- und Simulationsunterstützung herangezogen. Die diversen Bauteile wie MOSFET, El. Schalter, usw., welche für die Simulation von der Schaltung benötigt wurden, stammen aus der Simscape Bibliothek von Simulink.

Die verwendeten Formeln für die Dimensionierung und Analyse der Schaltung werden nicht hergeleitet. Sie wurden aus Fachbüchern entnommen welche am Ende des Dokuments aufgelistet sind.

1.2 Vorgaben

- Erstelle einen Buck-Converter
- Die Eingangsspannung ist 200V
- Die Frequenz beträgt 80kHz
- Die Duty-Cycle beträgt 40%
- Die Last ist $10k\Omega$ und $10\mu F$

1.3 Schaltung

1.3.1 Prinzip, Aufbau

Ein schematischer Aufbau eines Abwärtswandlers ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Die Schaltung wird mit Gleichspannung versorgt und am Ausgang kann eine kleinere Ausgangsspannung als die Versorgungsspannung abgegriffen werden, welche in Abhängigkeit vom Tastverhältnis des Schalters einstellbar ist.

Funktionsbeschreibung: Es gibt zwei Zustände der Schaltung, und zwar Schalter offen oder geschlossen. Wenn der Schalter geschlossen ist liegt an der Spule die Versorgungsspannung minus die Ausgangsspannung an und es fließt ein ansteigender Strom. Wird nun der Schalter geöffnet möchte der Strom durch die Induktivität wegen dem noch bestehenden Magnetfeld seine Richtung und Größe beibehalten. Deshalb wird die Diode den erforderlichen Strom leiten und auf der Kathoden-Seite der Diode bildet sich ein negatives Potenzial gegenüber dem Bezugspotenzial.

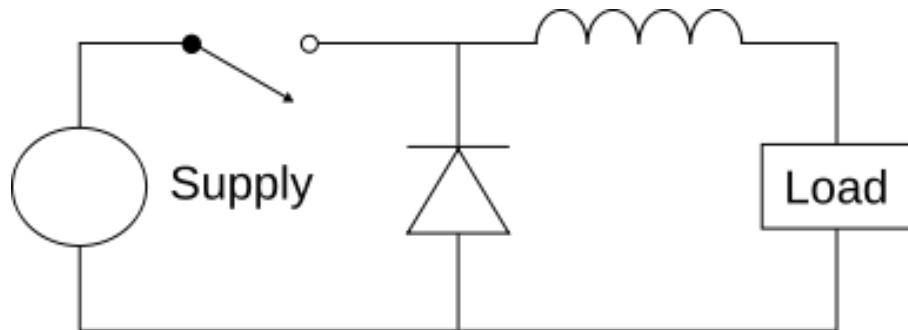
1.3.2 Aufgetretene Probleme

Bei der ersten Simulation ist mir sofort aufgefallen, dass die Ausgangsspannung nicht mit dem Berechneten Werte übereinstimmt, $U_{out} = D * U_{in}$. Nach einer Analyse (Berechnungen, Simulation) der Schaltung kam ich zum Schluss, dass die Schaltung mit der Berechneten Induktivität im Discontinuous Conduction Mode (DCM) arbeitet und somit die Allgemeinen Berechnungen (Formeln) von den Continuous Conduction Mode (CCM) nicht mehr stimmen. Deshalb probierte ich andere Berechnungen um eine Induktivität zu finden welche eventuell besser auf die Schaltung, Vorgaben passt. Leider konnte ich keine zufriedenstellende Lösung finden.

Da keine Angaben zur gewünschten Betriebsart der Schaltung (Strom- oder Spannungsquelle) vorhanden sind habe ich mit der Berechneten Induktivität die Simulationen durchgeführt obwohl die Formel nicht für diesen Betrieb der Schaltung gültig ist.

Meiner Analyse der Schaltung ist der gewünschte Maximalstrom von $50mA$ für diese Last von $10k\Omega$ zu groß.

1 Abwärtswandler (Buck Converter)



Quelle: Wikipedia, Abwärtswandler [1]

Abbildung 1.1: Prinzipschaltung eines Inverswandlers

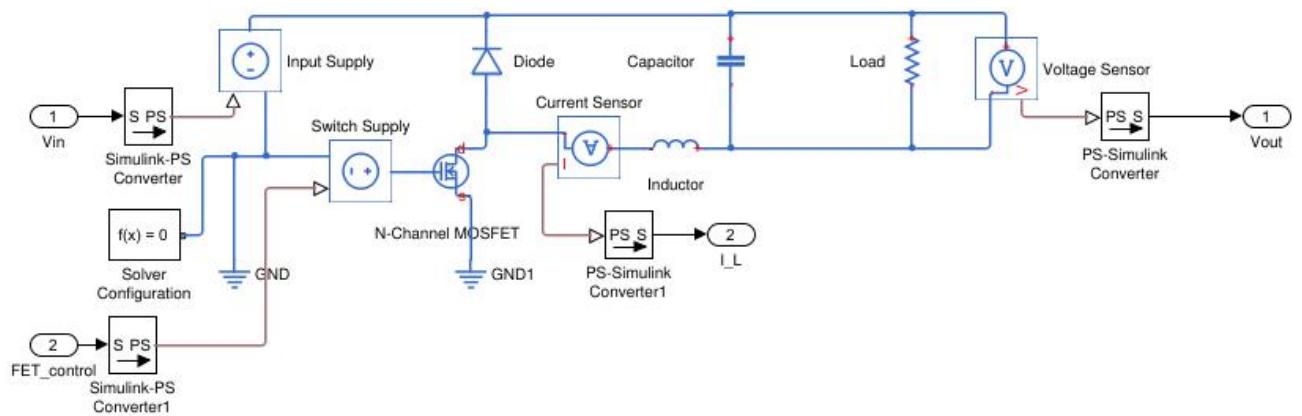


Abbildung 1.2: reale Simulationsschaltung Abwärtswandler

1.4 Diskussion der Aufgaben

1.4.1 Aufgabe a: Bestimme Bauteile

Da beinahe reale Bauteile für die Simulation verwendet wurden mussten ein paar parasitäre Parameter bestimmt werden. Die einzigen parasitären Eigenschaften der Bauteile welche nicht berücksichtigt wurden sind die Kapazitäten der Halbleiterbauelemente. Diese wurden alle mit Null Farad definiert. Es traten Probleme beim Simulieren auf, deswegen wurden sie aus simulationstechnischen Gründen nicht mit berücksichtigt. Die definierten Bauteilparameter können dem Matlab Parameters Skript entnommen werden. Für den MOSFET wurden die maximal Werte der Schaltung ermittelt und mit Hilfe dieser Werte wurde ein passendes Bauteil gesucht. Bei den anderen Werten wurden Standard Größen verwendet.

Als MOSFET wurde der **IPB17N25S3** von **infineon** ausgewählt. Wegen den gegebenen Anforderungen 200V Eingangsspannung und einem maximal ermittelten Strom von ca. 0.5A (Simulation) wurde dieser FET ausgewählt, da er den Anforderungen entspricht. (Datenblatt von IPB17N25S3-100)

Die Kapazität wurde aus simulationstechnischen Gründen geändert, verkleinert damit die Schaltung schneller einen eingeschwungenen Zustand erreicht. Grund dafür ist die Einsparung der Simulationszeit bei der Toleran-

1 Abwärtswandler (Buck Converter)

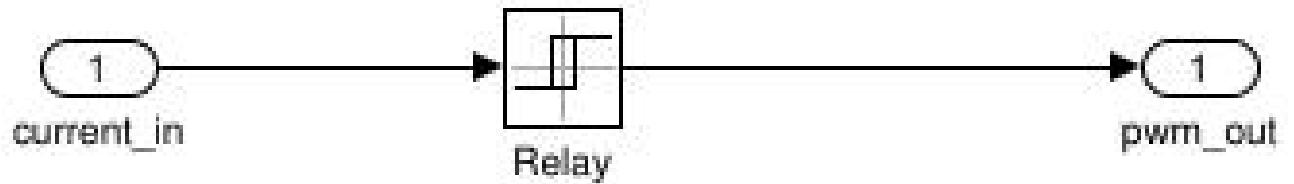


Abbildung 1.3: Strom Regler für den Abwärtswandler

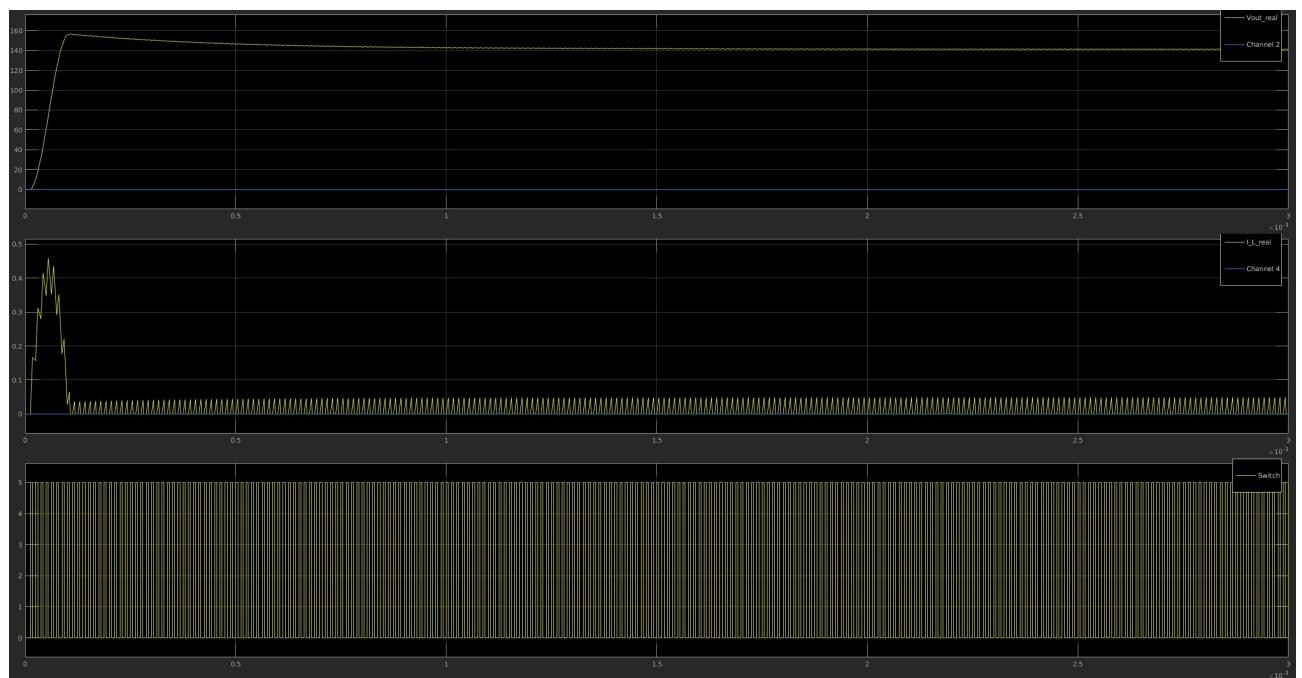


Abbildung 1.4: Ausgangsspannung, Strom durch Induktivität und PWM Signal

1 Abwärtswandler (Buck Converter)

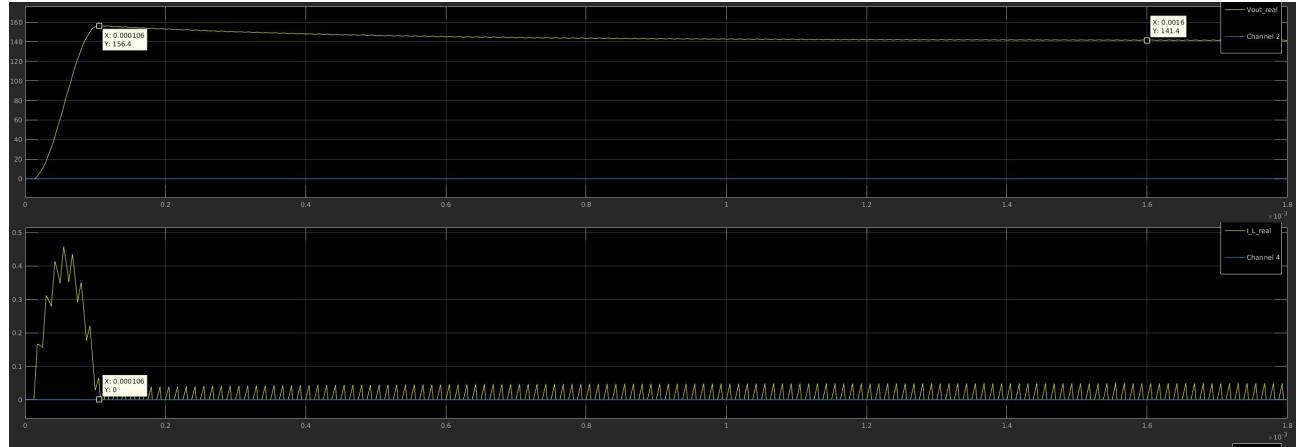


Abbildung 1.5: Einschwingdauer von Strom und Spannung

zanalyse.

1.4.2 Aufgabe b: Berechnung Induktivität beim Spitzenstrom 50mA Eingenschalten

Die Induktivität wurde mit der Standartformel für die Berechnung der Spule eines Abwärtswandlers berechnet. Die ermittelte Induktivität für die Speicherdiode ist in Gleichung 1.1 zu entnehmen.

$$L = \frac{U_{in} \cdot (1 - D)}{2 * I_{Lmax}} \cdot T \cdot D = 6mH \quad (1.1)$$

1.4.3 Aufgabe c: Einschwingdauer der Schaltung

Der Strom durch die Spule ist schon bei ca. 0.1 ms Eingeschwungen, siehe Abbildung 1.5. Da der Kondensator beim Einschalten noch geladen werden muss ist der Strom am Beginn noch so groß. Spannung an der Induktivität ist beim Einschaltzeitpunkt gleich der Eingangsspannung und wird danach kleiner während der Kondensator sich aufladet, $i(t) = 1/L * \int u(t)dt$.

Bei der Ausgangsspannung dauert der Vorgang etwas länger bis die Ausgangsspannung einen stationären Zustand einnimmt. Etwa länger als 1.6ms konnte aus der Simulation ermittelt werden.

$$\tau = R_{load} \cdot C = 1.6ms \quad (1.2)$$

1.4.4 Aufgabe d: Leitungen mit hohen bzw. gepulsten Strömen

Durch den FET, die Spule und die Diode fließen gepulste Ströme. Durch diese drei Bauteile fließt auch der höchste Strom. (siehe Abbildung 1.6, 1.7, 1.8, 1.9)

In den Kondensator fließt ebenfalls ein etwas hoher Strom aber kleiner als in den drei oben genannten Bau- teilen da der Rest in den Lastwiderstand fließt. (siehe Abbildung 1.10)

1 Abwärtswandler (Buck Converter)

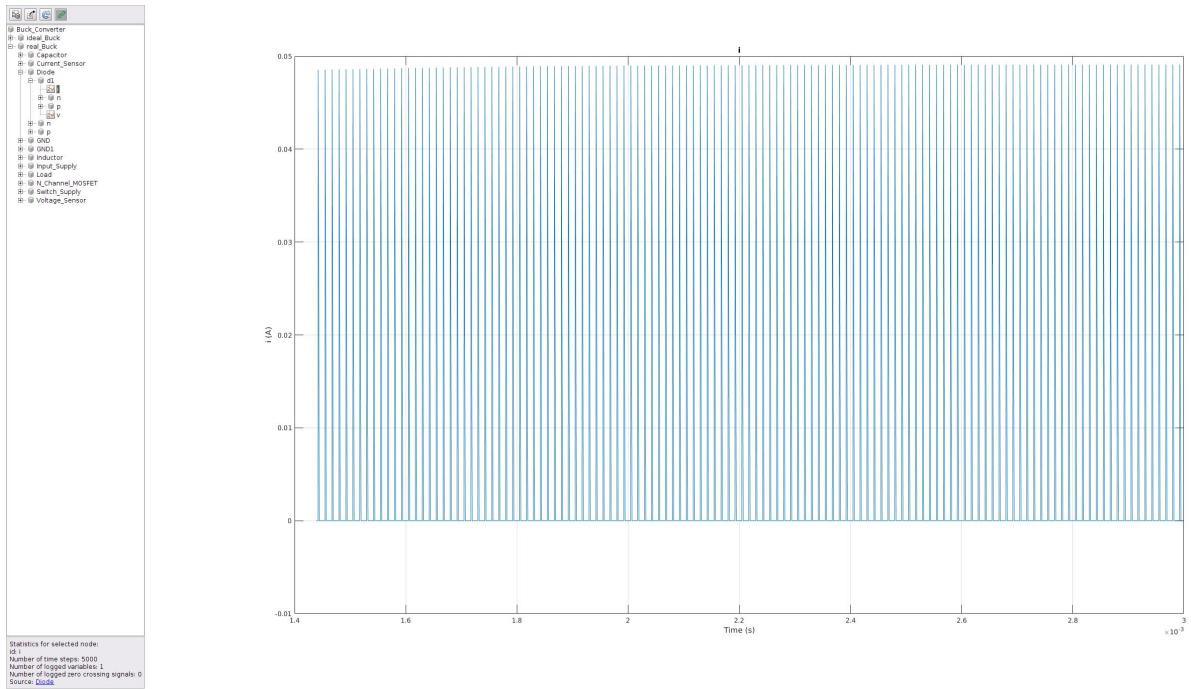


Abbildung 1.6: Strom durch die Diode

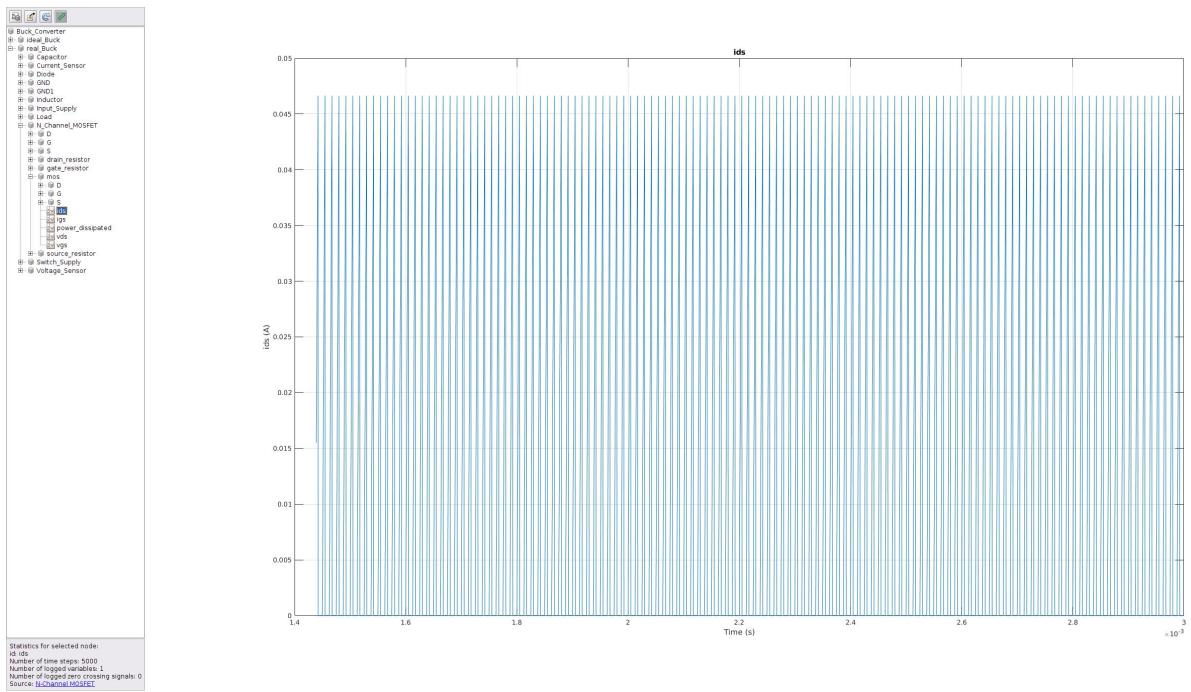


Abbildung 1.7: Strom durch den MOSFET

1 Abwärtswandler (Buck Converter)

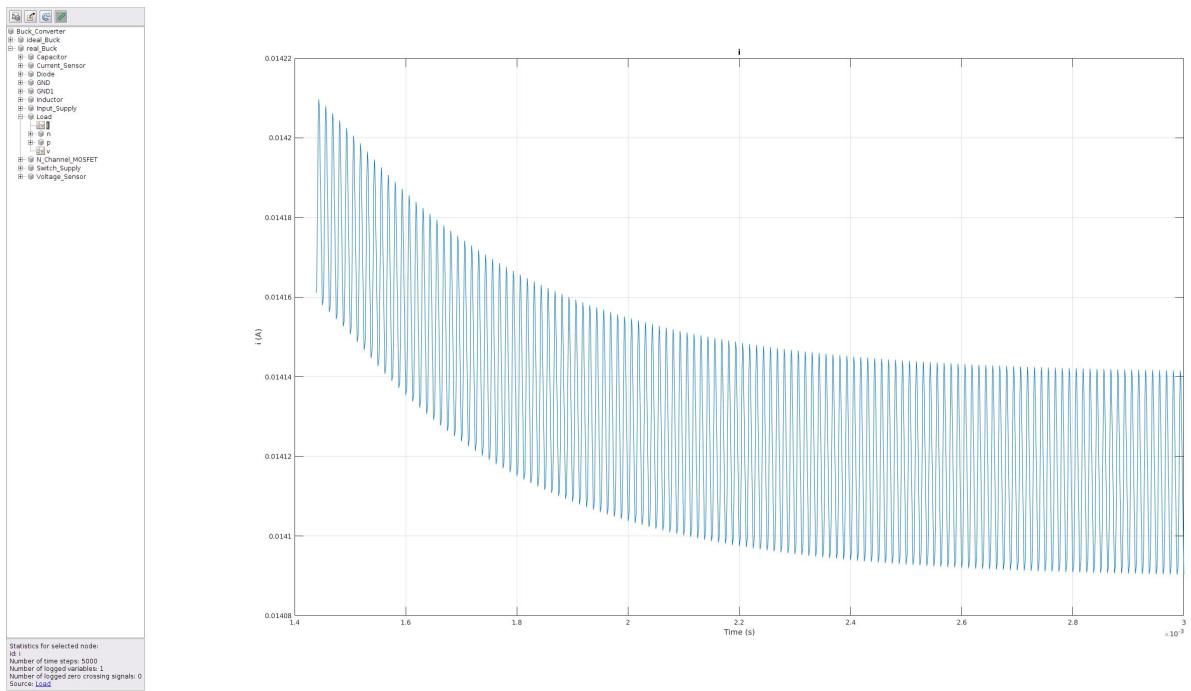


Abbildung 1.8: Strom durch den Lastwiderstand

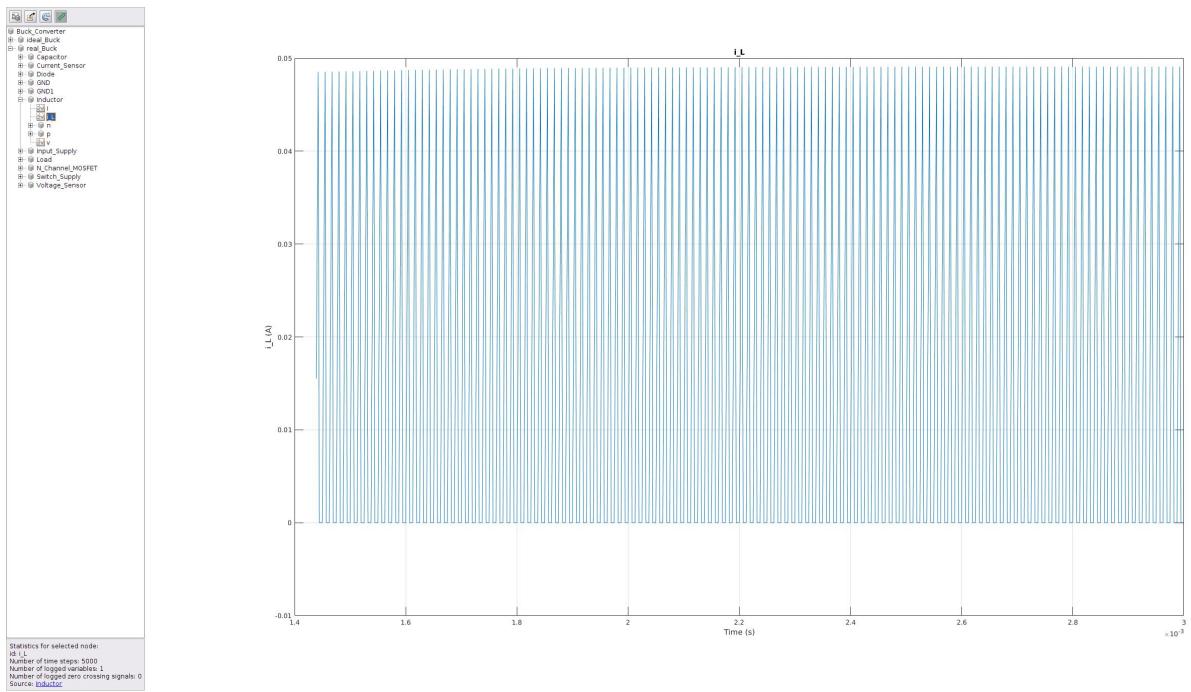


Abbildung 1.9: Strom durch die Induktivität

1 Abwärtswandler (Buck Converter)

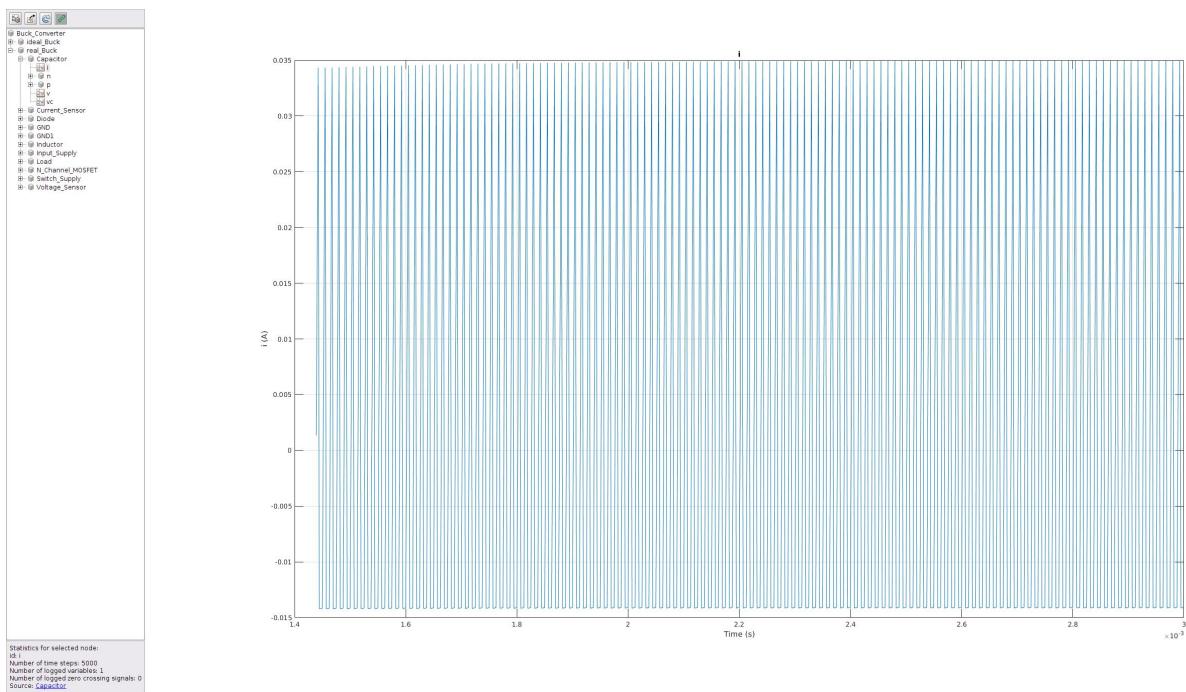


Abbildung 1.10: Strom in den Kondensator

1.4.5 Aufgabe e: Toleranzanalyse

Bei der Analyse der Toleranzeinwirkung von 10% Änderung der Bauteilwerte, konnten keine gravierende Änderung der Ausgangsspannung festgestellt werden. Graphische Darstellungen der Analyse sind in Abbildung 1.13, 1.12 und 1.11 visualisiert.

Geradengleichungen der Simulierten Toleranzanalyse Datensätze:

$$\text{Induktivität: } y = -31.5 * x + 173$$

$$\text{Frequenz: } y = -27.3 * x + 169$$

$$\text{Lastwiderstand: } y = 34.7 * x + 107$$

Die Simulation wurde mit Matlab Skripten gesteuert, welche am Ende des Dokuments hinterlegt sind, siehe Toleranz Analyse Skript, Toleranz Einstellungen Skript und Toleranz Simulation Skript.

1.4.6 Aufgabe f: Einfluss der Komponenten bei Toleranzanalyse

Es konnte kein gravierender Unterschied zwischen den drei verschiedenen Bauteilen festgestellt werden. Begründungen siehe Unterabschnitt 1.4.5.

1.4.7 Aufgabe g: Regelung Strom durch Induktivität maximal 20mA

Die Implementierung eines Stromreglers wurde in Simulink mit dem Block "Relay" realisiert, siehe Abbildung 1.3. Die geregelte Strom durch die Spule wird in Abbildung 1.14 dargestellt.

1 Abwärtswandler (Buck Converter)

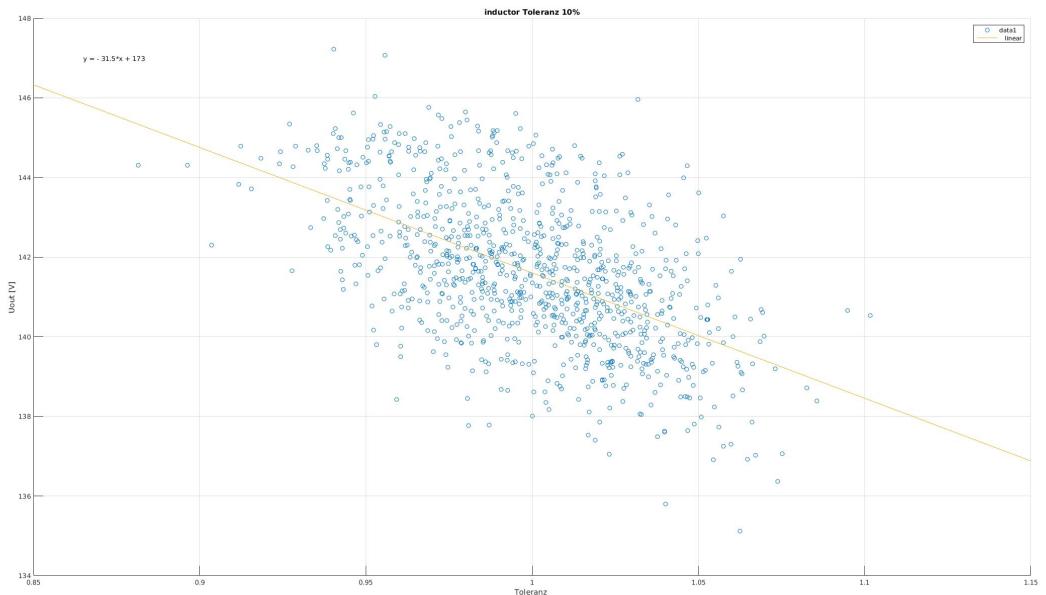


Abbildung 1.11: Toleranzanalyse Induktivität 10%

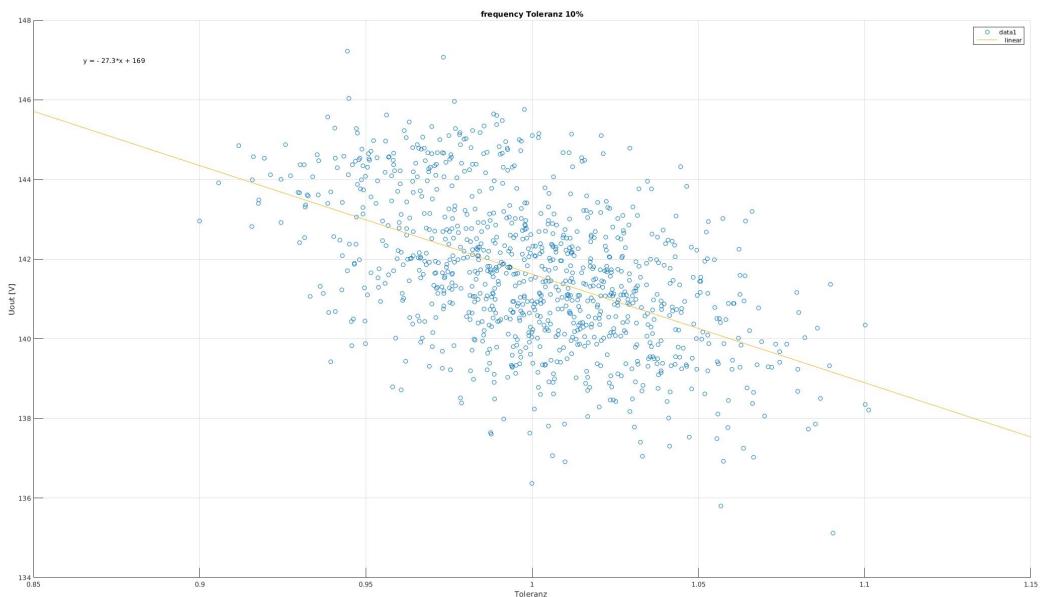


Abbildung 1.12: Toleranzanalyse Frequenz 10%

1 Abwärtswandler (Buck Converter)

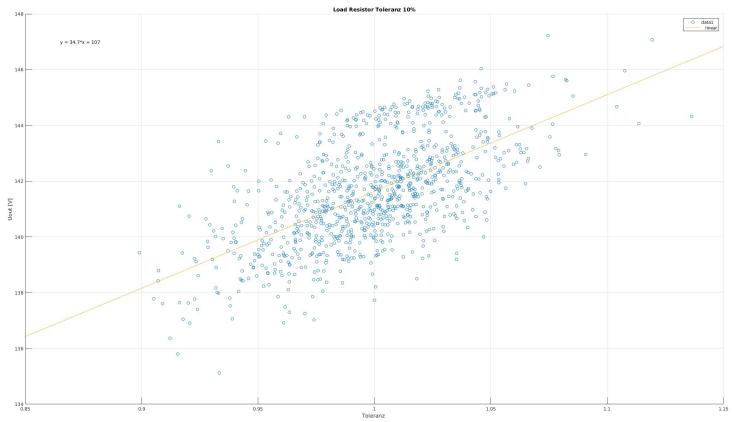


Abbildung 1.13: Toleranzanalyse Lastwiderstand 10%

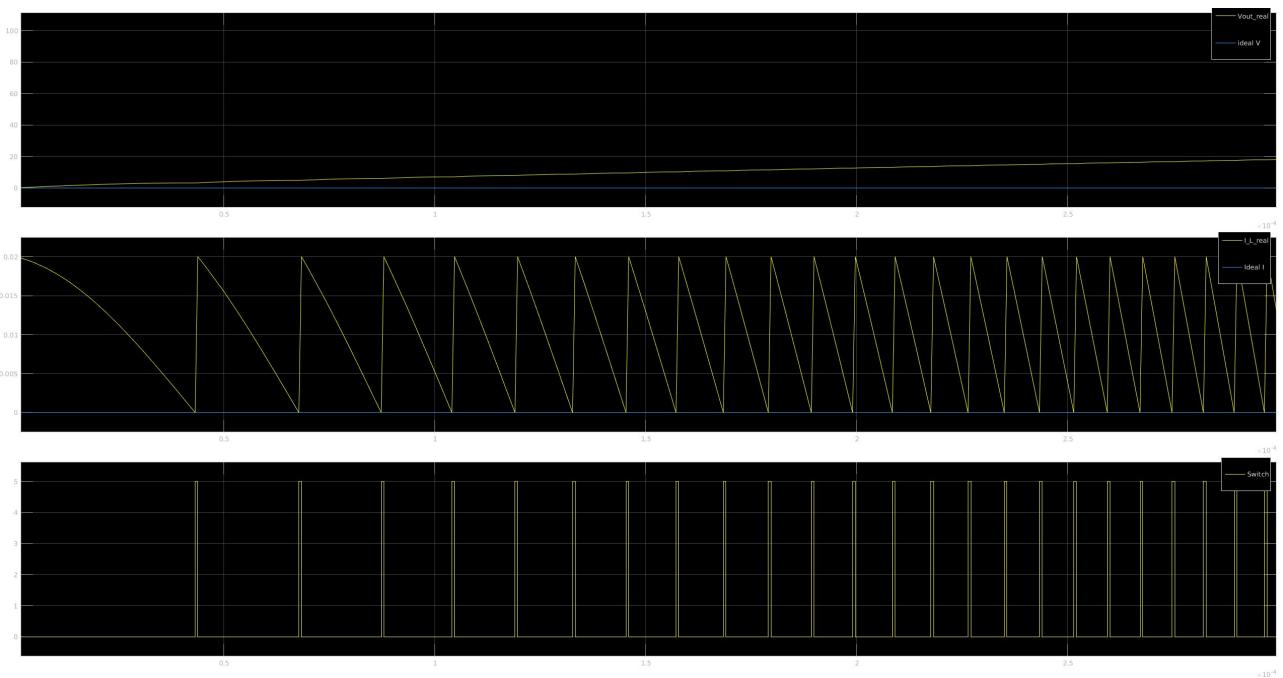


Abbildung 1.14: Abwärtswandler mit Stromregelung (Begrenzung) 0.5ms Darstellung

1 Abwärtswandler (Buck Converter)

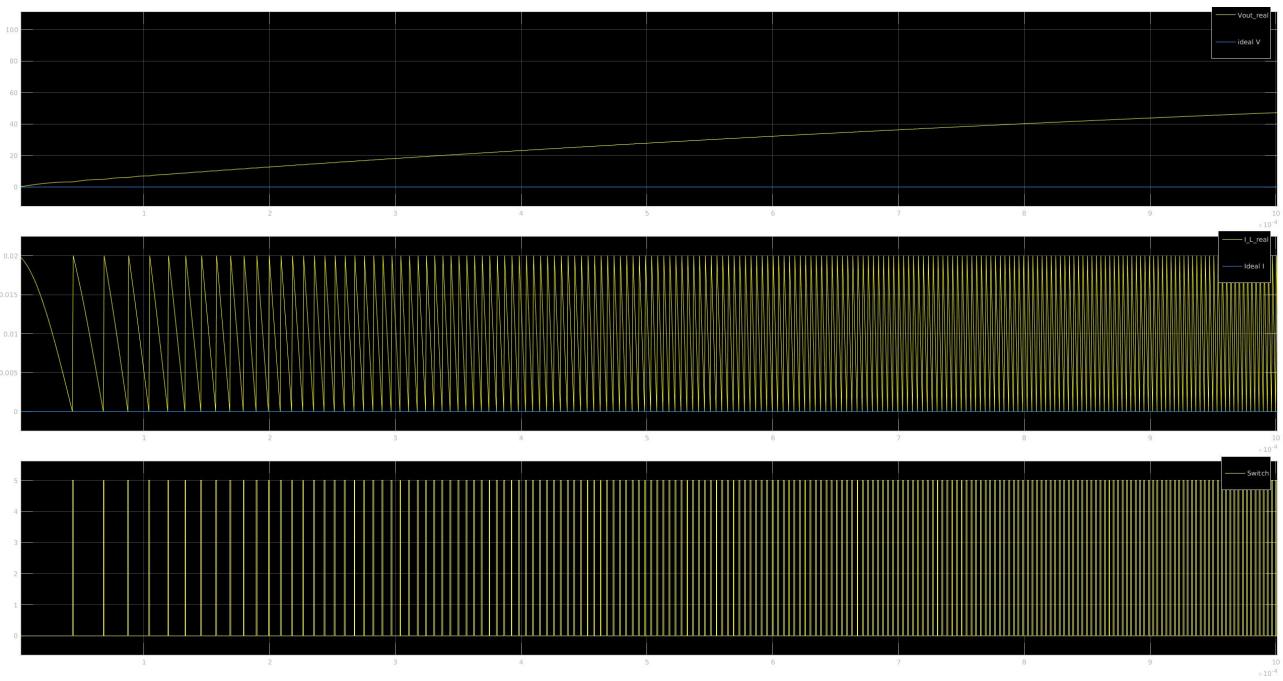


Abbildung 1.15: Abwärtswandler mit Stromregelung (Begrenzung) 1ms Darstellung

1.4.8 Aufgabe h: Ausgangsspannung nach Einbau von Regelung

Nach der Strombegrenzung mit der Schaltung aus Abbildung 1.3 wird der Strom durch die Spule auf 20mA begrenzt und die Ausgangsspannung der Schaltung ist nun bei 100V.

1 Abwärtswandler (Buck Converter)

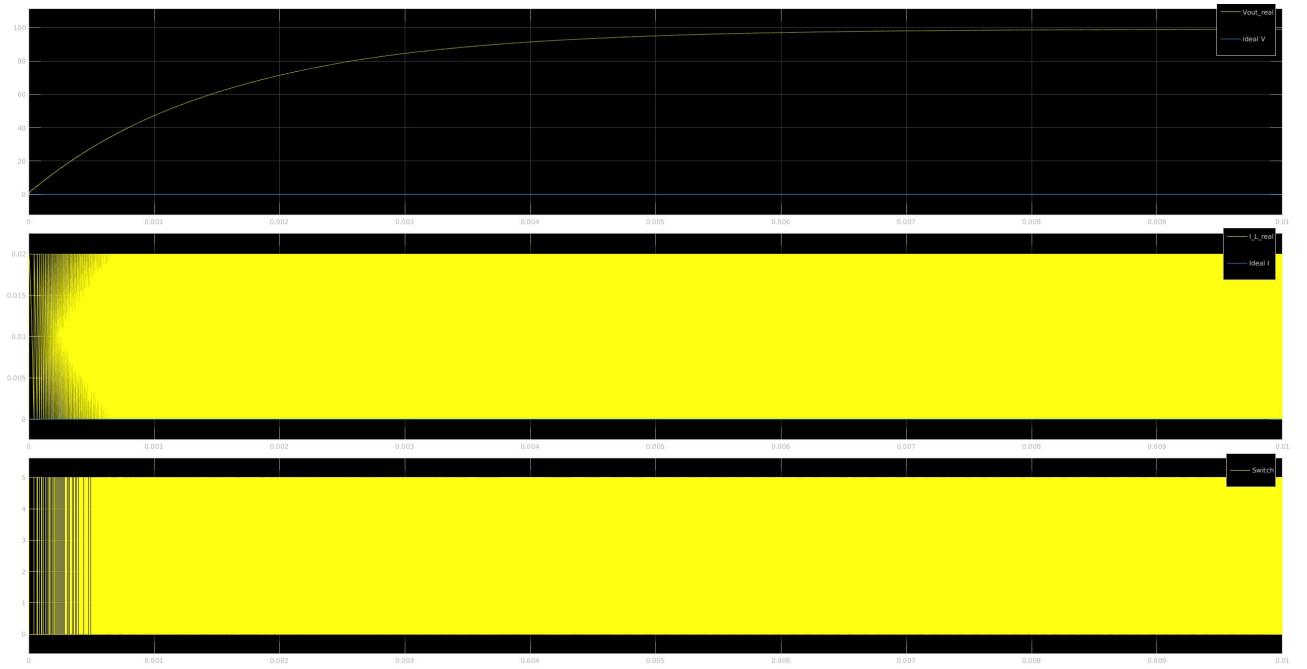


Abbildung 1.16: Abwärtswandler mit Stromregelung (Begrenzung)

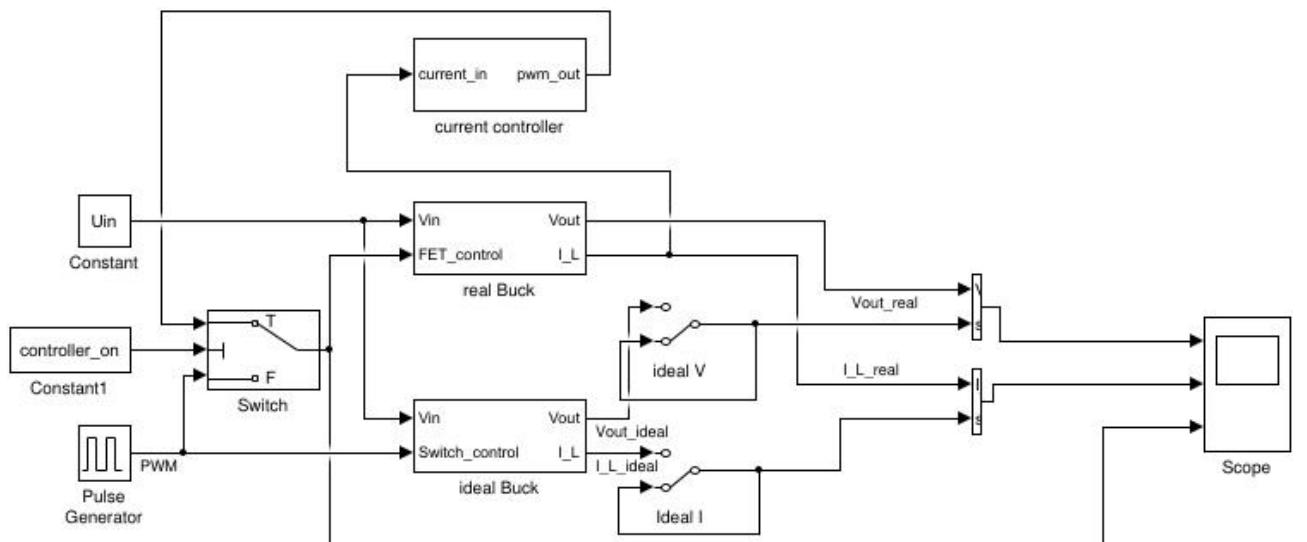


Abbildung 1.17: Gesamtübersicht der Simulationsblöcke

1.5 Matlab Skripte

1.5.1 Parameters Skript

```

1 %% setting parameter
2 controller_on = false;
3
4 %% given parameter
5 Uin = 200;
6 Rload = 10E+3;
7 f = 80E+3;
8 D = 0.4;
9 ILmax = 50E-3;
10 current_sense = 0.02; %[A] current throw inductor to switch off
11
12
13 %% self defined parameters
14 Uswitch = 5;
15 dUout = 1;%[V] , ripple voltage at output
16
17 %% parasitic element parameters
18 %
19
20 %Diode
21 U_Diode = 0.7; % [V] Forward Voltage
22 R_on_Diode = 0.1; % [Ohm] On resistance
23 G_off_Diode = 1E-9;%[S]Off conductance
24 C_Diode = 0;%[F] Junction capacitance, 5E-9F
25
26 %Capacitor
27 R_serie_C = 10E-3; % [Ohm] Series resistance:
28 G_II_C = 0; % [S] Parallel conductance:
29
30 %Inductor
31 R_serie_L = 0.5; %[V] Series resistance:
32 G_II_L = 0; %[S] Parallel conductance:
33
34 % FET (IPB17N25S3)
35 % C_iss = 1133E-9; %[F] Input capacitance, 1133pF, max 1500pF
36 % C_rss = 11E-9; %[F] Reverse transfer capacitance, 11 pF , max 23pF
37 % C_oss = 380E-9; %[F] Output capacitance, 480pF, max 625pF
38 %without capacitance
39 C_iss = 0; %[F] Input capacitance, 1133pF, max 1500pF
40 C_rss = 0; %[F] Reverse transfer capacitance, 11 pF , max 23pF
41 C_oss = 0; %[F] Output capacitance, 480pF, max 625pF
42 R_DS_on = 0.1; %[Ohm] Drain-source on resistance
43 Ids = 17; %[A] Drain current, Ids, for R_DS(on)
44 Vgs = 20; %[V] Gate-source voltage, Vgs, for R_DS(on):
45 Vth = 3; % [V] Gate-source threshold voltage
46 R_D_FET = 0.001;% [Ohm] Drain ohmic resistance:
47 R_S_FET = 1e-4;% [Ohm] Source ohmic resistance:
48
49
50
51 %% calculation parameters
52 %
53
54 T = 1/f;      % switching period
55 Ton = T*D;    % induction load time
56 Tdelay = T;

```

1 Abwärtswandler (Buck Converter)

```
57 Uout = D*Uin; %output voltage
58 Iin_m = D*ILmax/2;
59
60
61
62 L = (Uin-Uout)/(2*ILmax)*D*T; %calculation of induction
63 %L = Uin*D*(1-D)*T/(2*Iin_m);
64 %L = 1/ILmax*(Uin-Uout)*Ton; %0.0625
65 C = T^2/(8*L)*Uout/dUout*(1-D); % [F]
66 %C = 10E-6;
67 %defined in workshit but changed because of the long simulation time
```

1.5.2 Toleranz Analyse Skript

```
1 %Skript
2 clear;
3 close all;
4 clc
5
6 %load all parameters for Buck converter
7 parameters
8
9 %start simulink Model of Buck converter
10 Buck_Converter
11
12 close all;
13 name = 'init';
14 toleranz=0.1;
15 laps=1000;
16 ToleranzSetting
17 %analyse Load Resistor Toleranz
18 name = 'load';
19 ToleranzSetting
20
21 name = 'inductor';
22 ToleranzSetting
23
24 name = 'frequency';
25 ToleranzSetting
26
27 ToleranzSimulation
28
29 figure(1)
30 subplot(2,3,1)
31 scatter(toleranz.data.load.percent,toleranz.data.I_out)
32 title('Load Resistor Toleranz 10%')
33 xlabel('Toleranz ')
34 ylabel('Iout [A]')
35 grid on
36 subplot(2,3,4)
37 scatter(toleranz.data.load.percent,toleranz.data.U_out)
38 title('Load Resistor Toleranz 10%')
39 xlabel('Toleranz ')
40 ylabel('Uout [V]')
41 grid on
42
43 %analyse inductor Toleranz
44 subplot(2,3,2)
45 scatter(toleranz.data.inductor.percent,toleranz.data.I_out)
46 title('inductor Toleranz 10%')
```

1 Abwärtswandler (Buck Converter)

```
47 xlabel('Toleranz ')
48 ylabel('Iout [A]')
49 grid on
50 subplot(2,3,5)
51 scatter(toleranz.data.inductor.percent, toleranz.data.U_out)
52 title('inductor Toleranz 10%')
53 xlabel('Toleranz ')
54 ylabel('Uout [V]')
55 grid on
56
57 %analyse frequency Toleranz
58 subplot(2,3,3)
59 scatter(toleranz.data.frequency.percent, toleranz.data.I_out)
60 title('frequency Toleranz 10%')
61 xlabel('Toleranz ')
62 ylabel('Iout [A]')
63 grid on
64 subplot(2,3,6)
65 scatter(toleranz.data.frequency.percent, toleranz.data.U_out)
66 title('frequency Toleranz 10%')
67 xlabel('Toleranz ')
68 ylabel('Uout [V]')
69 grid on
```

1.5.3 Toleranz Einstellungen Skript

```
1 % name = 'load';
2 % toleranz=0.1;
3 % laps=10;
4
5
6 if not(ischar(name))
7     error(message('no name for toleranz defined'));
8 end
9
10 toleranz_data.I_out = zeros(laps,1);
11 toleranz_data.U_out = zeros(laps,1);
12
13 %init load toleranz setting
14
15
16 switch name
17     case 'init'
18         toleranz_data.load.values = ones(laps,1)*Rload;
19         R_saved = Rload;
20         toleranz_data.inductor.values = ones(laps,1)*L;
21         L_saved = L;
22         toleranz_data.frequency.values = ones(laps,1)*T;
23         T_saved = T;
24     case 'load'
25         toleranz_data.load.values = normrnd(Rload,Rload*toleranz/3,1,laps);
26         toleranz_data.load.percent = toleranz_data.load.values / Rload;
27
28     case 'inductor'
29         toleranz_data.inductor.values = normrnd(L,L*toleranz/3,1,laps);
30         toleranz_data.inductor.percent = toleranz_data.inductor.values / L;
31
32     case 'frequency'
33         toleranz_data.frequency.values = normrnd(f,f*toleranz/3,1,laps);
34         toleranz_data.frequency.percent = toleranz_data.frequency.values / f;
```

1 Abwärtswandler (Buck Converter)

```
35     otherwise
36         error(message('stats:ToleranzAnalyse:Switch'));
38 end
```

1.5.4 Toleranz Simulation Skript

```
1 for i = 1:laps
2     Rload = toleranz.data.load.values(i);
3     L = toleranz.data.inductor.values(i);
4     T = 1/toleranz.data.frequency.values(i);
5     fprintf('Start simulation run %i of %i laps ',i,laps);
6     sim('Buck_Converter');
7     I = simlog.real.Buck.Load.i.series.values;
8     U = simlog.real.Buck.Load.v.series.values;
9     toleranz_data.I_out(i) = mean(I(uint64(end*0.5):end) );
10    toleranz_data.U_out(i) = mean(U(uint64(end*0.5):end) );
11
12 end
13 Rload = R_saved;
14 L = L_saved;
15 T = T_saved;
```

Literaturverzeichnis

- [1] Wikipedia: Buck converter circuit diagram., 23.05.2016
- [2] Halbleiter- Schaltungstechnik, 14. Auflage;
Ulrich Tietze, Christoph Schenk, Eberhard Gamm
ISBN:978-3-642-31025-6
- [3] Fundamentals of Power Electronics, Second Edition ;
Robert W. Erickson, Dragan Maksimovic
ISBN:0-7923-7270-0