

IEEE Student Contest 2018: Entwurf und Befilterung eines DC-DC-Wandlers für die Automobilindustrie

Steven Bernick¹, Kevin Ladentin²
 Otto-von-Guericke Universität
 Magdeburg, Deutschland
 E-Mail: ¹steven.bernick@st.ovgu.de,
²kevin.ladentin@st.ovgu.de

Abstract—In diesem Paper wird ein DC-DC-Wandler so dimensioniert und befiltert, dass er in der Automobilindustrie Anwendung finden kann. Dies geschieht mittels einer Überprüfung der Störaussendung. Des Weiteren wird ein Platinenlayout für eben diese Schaltung entwickelt.

Schlüsselwörter—DC-DC-Wandler, Automobilindustrie, leitungsgebundene Störaussendung, Befilterung, Platinenlayout,

I. EINLEITUNG

DC-DC-Wandler sind in der Automobilindustrie von großer Wichtigkeit. Mit Hilfe dieser wird die Spannung der Batterie an die Abnehmer angepasst. Die Abnehmer im Fahrzeug sind zum Beispiel: Innenbeleuchtung oder Komfortelektronik, wie elektrische Fensterheber und elektrisch einstellbare Sitze. In diesem Fall soll ein Tiefsetzsteller betrachtet werden. Dieser wandelt eine Spannung von 12V auf 5V runter. Durch die typische Spannung der Autobatterie von 12V ist dies ein sehr häufig verwendeter DC-DC-Wandler im Fahrzeug.

Durch den immer weiter steigenden Anspruch an Elektrifizierung von Geräten, wird es immer wichtiger das Fahrzeug EMV-sicher zu machen. Deshalb ist es auch von enormer Wichtigkeit den DC-DC-Wandler auf dessen Störaussendung zu überprüfen und diese gegebenenfalls zu dämpfen.

II. DAS REFERENZMODELL

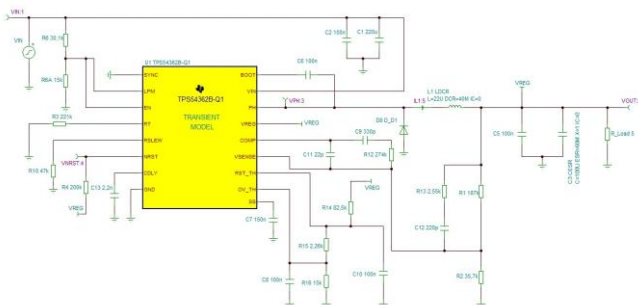


Abbildung 1: Referenzmodell in Tina TI

In Abbildung 1: Referenzmodell in Tina TI sieht man das vorgegebene Referenzmodell mit einem IC von Texas Instruments in der Mitte. Zu diesem IC war aus Datenschutzgründen lediglich ein Datenblatt vorhanden, keine innere Beschaltung.

A. LISN (Line Impedance Stabilization Network)

Um die leitungsgebundene Störaussendung messen zu können, benötigt man eine sogenannte Netznachbildung. Diese ist in Abbildung 2 zu sehen. Mittels dieser Netznachbildung ist es möglich die Störspannung zu messen, welche das zu prüfende Gerät an das Versorgungsnetz abgibt.

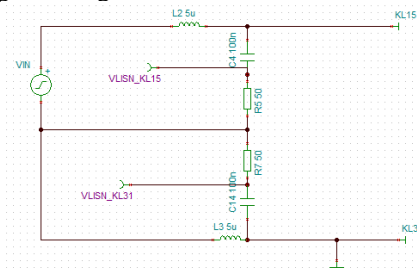


Abbildung 2: Netznachbildung in Tina TI

B. CISPR25-Norm

Die CIRPR25-Norm beinhaltet wichtige Grenzwerte für die Störaussendung in der Automobilindustrie. Ziel dieses Contests ist es, eben diese Grenzwerte einzuhalten. In Tabelle 1: Grenzwerte der CISPR25-Norm in dB μ V sind die Grenzwerte einzusehen.

Tabelle 1: Grenzwerte der CISPR25-Norm in dB μ V

Entstör- grade	Frequenzen in MHz				
	0.15-0.3	0.53-2	5.9-6.2	30-54	70-108
1	90	66	57	52	42
2	80	58	51	46	36
3	70	50	45	40	30
4	60	42	39	34	24
5	50	34	33	28	18

C. Wichtige Klemmenbezeichnungen

In der Automobilindustrie gibt es eine Vielzahl an Klemmenbezeichnungen. Die 2 wichtigsten in diesem Contest sind folgende:

Klemme 15: Die Klemme 15 ist das sogenannte geschaltete Plus. Die Klemme ist also mit dem Pluspol der Batterie verbunden, sobald die Zündung des Fahrzeugs eingeschaltet ist.

Klemme 31: Klemme 31 ist die Fahrzeugmasse.

D. Frequenzspektrum

Um die Störaussendung beurteilen zu können, wurde an den Klemmen 15 und 31 das Frequenzspektrum aufgenommen. In das Spektrum wurden die Grenzwerte für die CISPR25-Norm eingetragen. In Abbildung 3 sieht man das Spektrum nach Einfügen der Netznachbildung und der parasitären Eigenschaften der Glättungskondensatoren am Eingang.

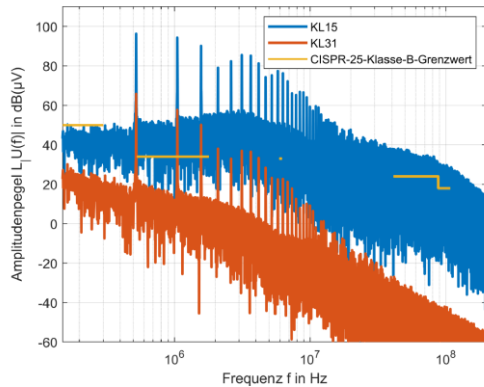


Abbildung 3: Spektrum nach Einfügen der Netznachbildung und der parasitären Eigenschaften

Man kann erkennen, dass fast alle Grenzwerte überschritten wurden. Nur im Frequenzbereich von 150kHz-300kHz erzielt das Spektrum annehmbare Ergebnisse. Um die Grenzwerte für die Störaussendung nun einzuhalten, wird die Schaltung entsprechend dimensioniert und befiltert.

III. DIMENSIONIERUNG

Eine mögliche Herangehensweise war es, einzelne Bauelemente umzudimensionieren. Damit war es möglich zum einen die Schaltfrequenz zu ändern. Des Weiteren war es möglich die Flankensteilheit des internen MOSFET zu ändern.

Im Zuge dessen wurde der Widerstand R3 von 221k Ω auf 500k Ω erhöht. Dies hat die Schaltfrequenz von 500kHz auf 280kHz verringert. Dies hatte den folgenden Hintergrund. Je höher die Frequenz ist, desto größer ist auch die Störung. Außerdem sind Strom- und Spannungsripple bei geringerer Frequenz kleiner, was ein positiver Aspekt ist.

Der Widerstand R10 wurde von 47k Ω auf 65k Ω erhöht. Dies verringert die Steilheit der Flanken des internen MOSFET, welche im Nano-Sekunden Bereich liegt. Verringert man die Flankensteilheit, so sinkt auch die Störung, welche durch die Flanken erzeugt wird. Allerdings vergrößert eine verringerte Flankensteilheit die Schaltverluste des internen MOSFET.

Des Weiteren wird die Hauptinduktivität von 22 μ H auf 210 μ H erhöht. Dies hat zur Folge, dass der Ripple des Hauptstromes um ein Vielfaches verringert wird. Der Zeitverlauf dieses Stromripples ist in Abbildung 4 zu sehen. Dies hat den weiteren Vorteil, dass das Ripple der Ausgangsspannung geringer wird.

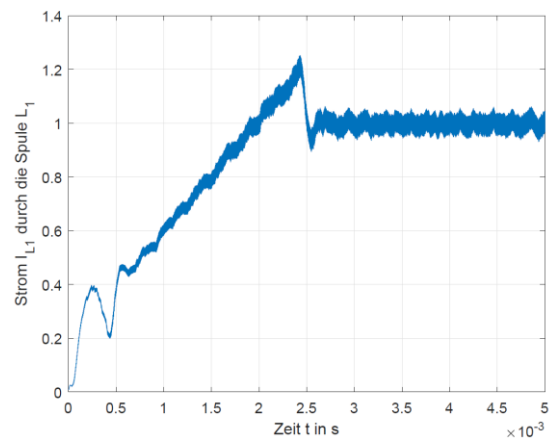


Abbildung 4: Zeitverlauf des Stromes durch die Hauptinduktivität

Ebenfalls einer Umdimensionierung unterzogen wurden die Glättungskondensatoren am Eingang des ICs. Hierbei ist es wichtig bei niedrigen und hohen Frequenzen eine geringe Impedanz zu haben. Dies ermöglicht eine hohe Glättung. Dies wird durch eine Parallelschaltung von einem hoch- und einem tief- dimensionierten Kondensator geschaffen. Hierfür wurde ein Glättungskondensator auf eine Kapazität von 1mF angehoben. Der andere Kondensator weist eine Kapazität von 100nF auf.

Das Spektrum, welches nach der Umdimensionierung berechnet wurde, ist in Abbildung 5 zu sehen.

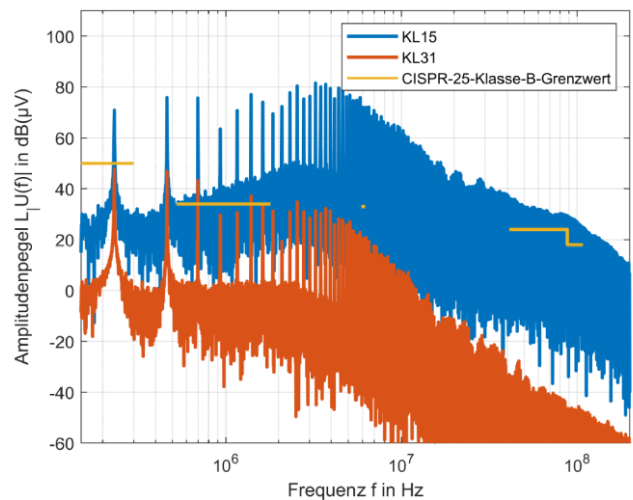


Abbildung 5: Spektrum nach der Umdimensionierung

Das Spektrum hat sich relative wenig verändert. Im niedrigen und mittleren Frequenzbereich weist es leicht bessere Ergebnisse auf. Im hohen Frequenzbereich sind die Ergebnisse nahezu unverändert.

Eine weitere Anforderung war ein Ausgangsrippel von höchstens 25mV. In Abbildung 6 sieht man, dass das Ripple bei 5mV liegt, sodass die Anforderung erfüllt ist.

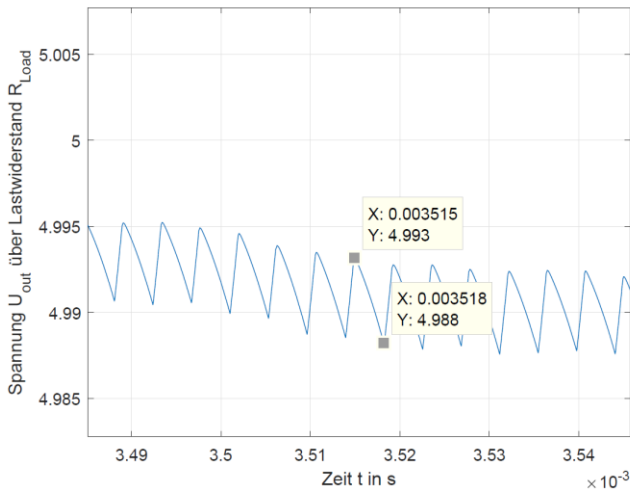


Abbildung 6: Zeitverlauf des Ausgangsspannungsripples

Im nächsten Abschnitt wird die Schaltung nun befiltert, um das Spektrum weiter zu dämpfen.

IV. BEFILTERUNG

Um die Grenzwerte der der CISPR25-Norm einzuhalten, wird ein zusätzlicher Vorfilter benötigt. Aufgrund des Frequenzbereiches der Störaussendung im MHz-Bereich wird ein Tiefpass gewählt. Nach anfänglichen Simulationen mit einem Filter erster Ordnung, war aus den Ergebnissen ersichtlich, dass eine stärkere Dämpfung benötigt wird, um die geforderten Grenzwerte einzuhalten. Daher wird dieser Filter durch einen Tiefpass zweiter Ordnung ersetzt, welcher sich durch eine Dämpfung von $40\text{dB}(\mu\text{V})/\text{dec}$ charakterisiert. Das Simulationsmodell, welches in Abbildung 7 dargestellt ist, berücksichtigt die parasitären Elemente der realen Bauteile. Durch das Hinzufügen des Filters konnte das Spektrum der Störaussendung der Schaltung, siehe Abbildung 8, deutlich verbessert und die geforderten Grenzwerte eingehalten werden. In Abbildung 9 ist die finale Schaltung ersichtlich.

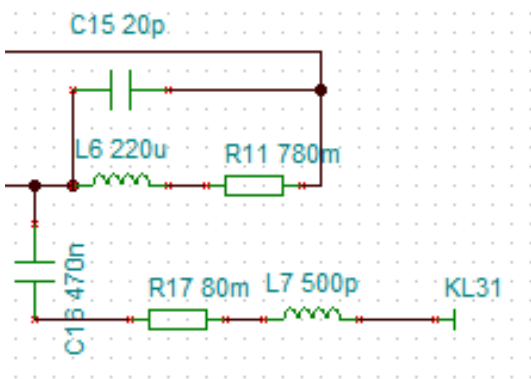


Abbildung 7: Tiefpassschaltung mit parasitären Bauelementen

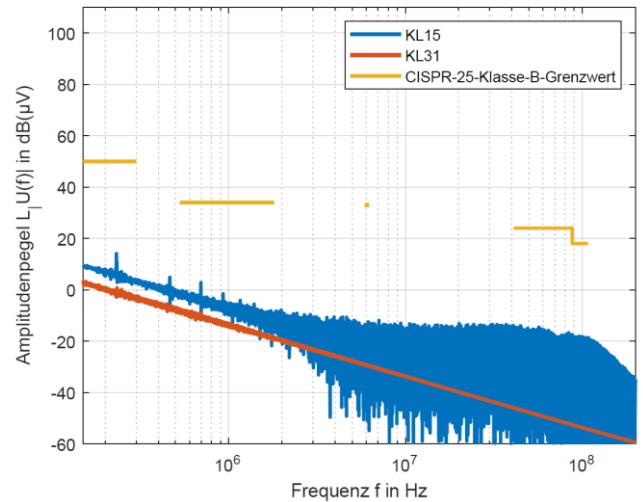


Abbildung 8: Spektrum mit Tiefpass zweiter Ordnung

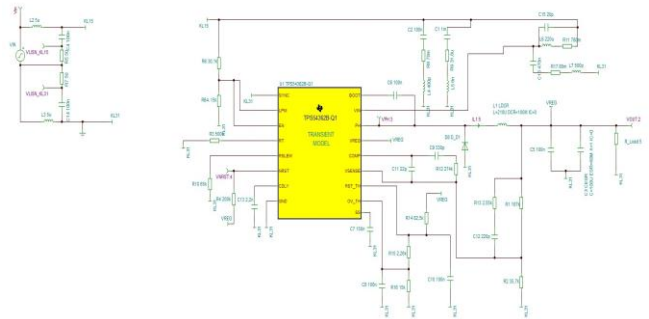


Abbildung 9: Finale Schaltung

V. PLATINENLAYOUT

Die Schaltung wurde nun im Leiterplattenprogramm EAGLE nachgebaut. Somit war es möglich die Bauelemente auf einer Platine frei anzuordnen. Dabei ist es wichtig, die Leiterbahnen möglichst kurz zu halten, um die parasitären Induktivitäten nicht zu groß werden zu lassen. Des Weiteren ist es wichtig keine 90° -Knicke in den Leiterbahnen zu haben. Um Kurzschlüsse zwischen Leiterbahnen zu vermeiden wurden Via's verwendet. Das sind Durchkontaktierungen auf der Platine, welche den Leiterbahnen ermöglicht, die Ebene der Platine zu wechseln. Es sollten allerdings nicht allzu viele Via's verwendet werden, da diese wieder einen negativen Effekt auf die EMV-Auslegung der Platine haben. Ebenfalls wichtig ist es, einen gewissen Abstand zwischen verschiedenen Leiterbahnen einzuhalten. Dies dient ebenfalls dem Kurzschlusschutz.

Für verwendete Bauelemente mussten einige Anforderungen eingehalten werden. So dürfen Kondensatoren am Eingangsnetz nur MLCC-Kondensatoren, also Keramikkondensatoren sein mit einem bestimmten Dielektrikum. In diesem Fall wurde das Dielektrikum X7R benutzt. Keramikkondensatoren haben gute Sieb- und Entkopplungseigenschaften. Ebenfalls benutzt werden durften Aluminium-Elektrolytkondensatoren mit einer Spannungsfestigkeit von mindestens 50V. Die Anforderung an die Spannungsfestigkeit ist im Fahrzeug

sehr hoch, da Überspannungen in Form von Ein- und Ausschaltimpulsen anliegen können. Diese müssen von den Kondensatoren im Eingangsnetz vollkommen aufgenommen und abgebaut werden. Als Freilaufdiode wird eine Schottky Diode verwendet. Diese hat den Vorteil gegenüber einer normalen Diode eine geringere Durchlassspannung zu besitzen, sodass die Verlustleistung verringert wird. Für die Filterinduktivität wird eine stromkompensierte Drossel verwendet. Diese besitzt kein magnetisches Feld im Kern. Dies hat den Vorteil, dass Gleichtaktstörungen gut gedämpft werden können. Als Hauptinduktivität des DC-DC-Wandlers wird eine Leistungsinduktivität verwendet.

Die erstellte Platine ist in Abbildung 10: Platinenlayout zu sehen. Hierbei wurde eine Leiterbahndicke von 0,5mm verwendet. Den in Tina verwendeten IC ist in keiner EAGLE Bibliothek gefunden worden, sodass ein sehr ähnlicher IC von Texas Instruments anstelle dessen benutzt wird. Dieser hat lediglich 3 Anschlusspins mehr, welche in diesem Fall nicht angeschlossen sind.

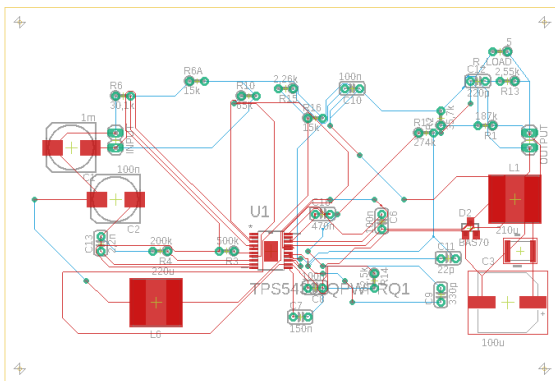


Abbildung 10: Platinenlayout

VI. KOSTENAUFSTELLUNG

Um die Wirtschaftlichkeit des finalen DC-DC-Wandlers überprüfen zu können, ist es wichtig eine Kostenaufstellung zu tätigen. Diese ist in folgender Tabelle ersichtlich:

Tabelle 2: Kostenaufstellung

Art des Bauelements	Einsatzbereich	Wert	Kosten	Artikel-Nr. Farnell
MLCC, SMD Kondensator mit X7R Dielektrikum	Glättungskondensator am Eingang	100nF	0,178€	2070445
AL-ELKO, SMD	Glättungskondensator am Eingang	1mF	2,27€	1850136
MLCC, SMD Kondensator mit X7R Dielektrikum	Filterkondensator	470nF	0,373€	2470439
Stromkompensierte Drossel	Filterinduktivität	220µH	3,14€	2493126

Art des Bauelements	Einsatzbereich	Wert	Kosten	Artikel-Nr. Farnell
Schottky Diode	Freilaufdiode		0,456€	2498546
Leistungsinduktivität	Hauptinduktivität	220µH	2,99€	1635950
Bedrahteter Widerstand R10 (Differenz)	Flankensteilheit	47kΩ-65kΩ	0,2€	1083449
Bedrahteter Widerstand R3 (Differenz)	Schaltfrequenz	221kΩ - 500kΩ	0,5€	2419021

Die angegebenen Kosten sind allesamt die Kosten für ein Bauelement. Der Preis würde sich wesentlich senken, wenn man mehrere Bauelemente auf einmal bestellt. Der Gesamtpreis für die Befilterung liegt nun also bei 10,107€.

VII. ZUSAMMENFASSUNG

Innerhalb dieses Papers wurde ein DC-DC-Wandler so dimensioniert und befiltert, dass er zum einen die CISPR25-Grenzwerte und zum anderen das geforderte Ausgangsspannungsripple von 25mV einhält. Es wurde ein Platinenlayout mit der entsprechenden Befilterung und eine Kostenaufstellung erstellt. Somit ist der simulatorische Anteil des Projektes erfolgreich. Weitere Schritte wären nun, die entworfene Platine bauen zu lassen und die Messungen an eben dieser realen Platine durchzuführen. Die Validierung der Messergebnisse ist von essentieller Wichtigkeit, da es sein kann, dass in der Simulation bestimmte parasitäre Elemente nicht mit betrachtet wurden. Des Weiteren muss die Funktion des DC-DC-Wandlers natürlich, am besten innerhalb eines HiL-Prüfstandes, geprüft werden.

LITERATUR

- [1] Felderhoff, Rainer: Leistungselektronik. 1984
- [2] Lindemann, Andreas: Vorlesungsskript Grundlagen der Leistungselektronik. WS 17/18
- [3] Magdowski, Mathias; Vick, Ralf: Skript Elektromagnetische Verträglichkeit
- [4] Schwab, Adolf J. ; Kürner, Wolfgang: Elektromagnetische Verträglichkeit. 2011
- [5] Reif, Konrad: Batterien, Bordnetze und Vernetzung. 2010
- [6] Hoberg, Fabian: Welche Vorteile das 48-Volt-Bordnetz hat. https://www.t-online.de/auto/technik/id_79945980/48-volt-bordnetz-diese-vorteile-hat-die-neue-technik.html. Version:2016
- [7] Texas Instruments: Datenblatt TPS54362-Q1 3-A, 60V Step-Down DC-DC-Converter With Low I(q). 2009
- [8] Nadler, Andreas: Auswirkung von Layout, Bauelementen und Filter auf die EMV von modernen DC/DC-Schaltreglern/Würth Elektronik. 2017.- Forschungsbericht
- [9] Wikipedia: Keramikkondensator. <https://de.wikipedia.org/wiki/Keramikkondensator>. Version: 14.11.2018