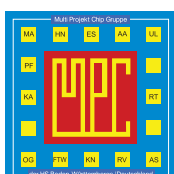


MPC

MULTI PROJEKT CHIP GRUPPE
BADEN - WÜRTTEMBERG

Herausgeber: Hochschule Ulm Ausgabe: 50 ISSN 1868-9221 Workshop: Konstanz Juli 2013

- 1 Five Decades of SPICE – A Brief History**
A. Vladimirescu, University of California at Berkeley, USA
- 5 Electromagnetic Compatibility Of Integrated Circuits Measurement, Modeling And Design Techniques**
E. Sicard, Institute Nationale des Sciences Appliquées de Toulouse, FR
- 11 Europractice: Supporting the European Academia in Microelectronics Design**
C. Das, Interuniversity Microelectronics Center (IMEC), Leuven, BE
- 17 Entwicklung eines SPICE-Modells für gedruckte organische Transistoren**
S. Hengen, K. Heit, L. Lewandowski, B. Vettermann, J. Giehl, HS Mannheim
- 23 Time-of-Flight-Messung mittels Compressive Sensing**
Z. Slavik, M. Ihle, HS Karlsruhe
- 31 Analyse des SEPIC-Spannungswandlers für Automotive-Anwendungen**
P. Gottschling, T. Rosahl, B. Wicht, HS Reutlingen
- 37 Analog-zu-Digital-Konverter auf Basis eines Pulse-Shrinking TDCs**
F. Sänger, U. Brunsmann, HS Aschaffenburg
- 43 System-Level Exploration of Design Decisions Based on Indicators**
M. Freier, A. Wenzler, T. Mayer, J. Gerlach, W. Rosenstiel, HS Albstadt-Sigmaringen
- 49 Implementierung eines generischen LDPC-Decoders für unstrukturierte Codes mittels SystemC**
A. Torno, F. Kesel, T. Greiner, HS Pforzheim
- 59 Specification and Implementation of an AXI4-Burst-Master**
C. Ngamy, S. Jaeckel, A. Sikora, HS Offenburg



Cooperating Organisation
Solid-State Circuit Society Chapter
IEEE German Section

Tagungsband zum Workshop der Multiprojekt-Chip-Gruppe Baden-Württemberg
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie.

Die Inhalte der einzelnen Beiträge dieses Tagungsbandes liegen in der Verantwortung der jeweiligen Autoren.

Herausgeber: Gerhard Forster, Hochschule Ulm, Prittwitzstraße 10, D-89075 Ulm

Alle Rechte vorbehalten

Diesen Workshopband und alle bisherigen Bände finden Sie im Internet unter:

<http://www.mpc.belwue.de>

Analyse des SEPIC-Spannungswandlers für Automotive-Anwendungen

Philipp Gottschling, Thoralf Rosahl, Bernhard Wicht

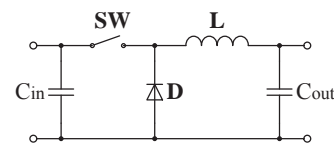
Zusammenfassung—Die Spannungsversorgung elektronischer Steuergeräte im Automotive-Bereich wird zunehmend durch Schaltregler sichergestellt. Der SEPIC (Single Ended Primary Inductance Converter) besitzt die Eigenschaft, eine Spannung aufwärts wie auch abwärts wandeln zu können und könnte somit klassische Buck- und Boost-Wandler ablösen. Dieser Beitrag untersucht den SEPIC hinsichtlich Eignung für Automotive-Anwendungen. Dazu wurde eine Groß- sowie Kleinsignalanalyse am Wandler durchgeführt, mit geeigneten Simulationsmodellen nachgebildet und Messungen gegenüber gestellt. Der SEPIC zeigt als Hauptvorteile (1) einen verzugsfreien Übergang zwischen Buck-/Boost-Betrieb, (2) geringe Eingangswelligkeit, (3) DC-Kurzschlussfestigkeit. Auch hinsichtlich Wirkungsgrad und EMV-Verhalten stellt der SEPIC eine interessante Alternative dar. Der zwischen Ein- und Ausgang liegende Kondensator wird dauerhaft von einem Strom durchflossen, auf Basis der Effektivströme wird das damit verbundene Ausfallrisiko diskutiert.

Schlüsselwörter—Schaltwandler, SEPIC, PWM-Switch-Modell, Buck, Boost.

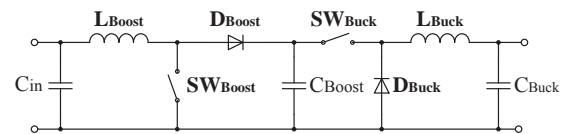
I. EINLEITUNG

Durch die Zunahme elektrischer Komponenten im Automotive-Bereich kommt neben dem Abwärts-wandler (Buck-Converter, Abbildung 1a) immer häufiger ein Aufwärts-wandler (Boost-Converter) zum Einsatz. Oft werden diese Wandler in Kombination eingesetzt, als Buck-Boost oder Boost-Buck (Abbildung 1b). Eine Alternative stellt der Single Ended Primary Inductance Converter dar, kurz SEPIC genannt (Abbildung 1c). Dieser besitzt die Eigenschaft, sowohl als Aufwärts- wie auch Abwärts-wandler zu funktionieren. Im Vergleich zum Auf- bzw. Abwärts-wandler, besitzt der SEPIC eine zweite Spule und einen zusätzlichen Kondensator, welche als Ener-

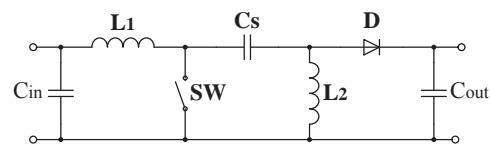
Philipp Gottschling, philipp.gottschling@gmx.de und Bernhard Wicht, bernhard.wicht@reutlingen-university.de, Hochschule Reutlingen, Robert Bosch Zentrum für Leistungselektronik, Alteburgstraße 150, 72762 Reutlingen. Thoralf Rosahl, thoralf.rosahl@de.bosch.com, Robert Bosch GmbH, Postfach 1342, 72703 Reutlingen.



(a) Buck



(b) Boost-Buck



(c) SEPIC

Abbildung 1: Schaltregler-Topologien: (a) Buck-Wandler, (b) Boost-Buck-Wandler und (c) SEPIC.

giespeicher dienen. Diese haben jedoch auch einen Einfluss auf das Übertragungsverhalten, weshalb die Kompensation des Reglers aufwändiger ist als bei anderen Wandlern. In den nachfolgenden Kapiteln soll der SEPIC hinsichtlich dessen Einsatz in der Kfz-Umgebung untersucht werden.

II. ÜBERTRAGungsverhalten

Zur Untersuchung des SEPIC wird die Schaltung in den beiden Schalterstellungen on/off (t_{on} und t_{off}) betrachtet. Während des Zeitintervalls t_{on} (Abbildung 2a), ist der Schalter sw geschlossen und die Spule L_1 wird über die Eingangsspannung V_{in} geladen. Die Spule L_2 wird über den Kondensator C_s geladen, welcher zuvor (während t_{off}) auf V_{in} aufgeladen wurde. Der gesamte Ausgangsstrom I_{load} wird in diesem Zeitraum von C_{out} zur Verfügung gestellt. Wenn der Schalter sw geöffnet ist, setzt sich der Ausgangsstrom I_{load} aus dem mittleren Strom der Spule L_2 und L_1 bzw. C_s zusammen (Abbildung 2b).

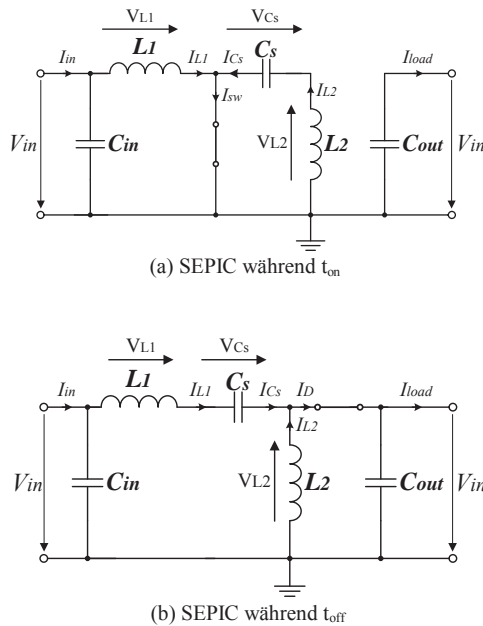


Abbildung 2: SEPIC während der unterschiedlichen Schaltperioden (a) t_{on} und (b) t_{off} .

Das Übersetzungsverhältnis V_{out}/V_{in} ist für den SEPIC wie folgt definiert:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{1-D} = \frac{D}{D'}$$

Die Gleichung gibt das Verhältnis V_{out}/V_{in} an in Abhängigkeit des Duty-Cycle $D = t_{on}/T_{sw}$ (mit der Periodendauer T_{sw} der Schaltfrequenz des Schalters sw). Dies ist in Abbildung 3 logarithmisch dargestellt. Bei einem Duty-Cycle von $D = 0,5$ beträgt $V_{out} = V_{in}$. Für $D < 0,5$ ist die Ausgangsspannung stets kleiner als die Eingangsspannung und der SEPIC arbeitet als Abwärtswandler (Buck-Betrieb). Bei $D > 0,5$ ist die Ausgangsspannung stets größer als die Eingangsspannung und der SEPIC funktioniert als Aufwärtswandler (Boost-Betrieb).

Das Übersetzungsverhältnis des SEPIC im Boost-Betrieb ist, wie auch beim Boost-Wandler, durch die verlustbehafteten Bauelemente begrenzt. Den größten Einfluss auf die Übersetzung haben die parasitären Widerstände der primärseitigen Spule R_{L1} sowie der Einschaltwiderstand des Schalttransistors (R_{sw} bzw. $R_{DS,on}$). Eine nähere Betrachtung der nachfolgenden Gleichung zeigt, dass sich der Faktor hinter den einzelnen parasitären Widerständen, welcher sich aus dem Duty-Cycle D zusammensetzt, bei R_{L1} und R_{sw} wesentlich größer ist, als bei den restlichen Widerständen. In Abbildung 4 ist der Einfluss der parasitären Widerstände von L_1 und R_{sw} auf das Übersetzungsverhältnis im Boost-Betrieb dargestellt.

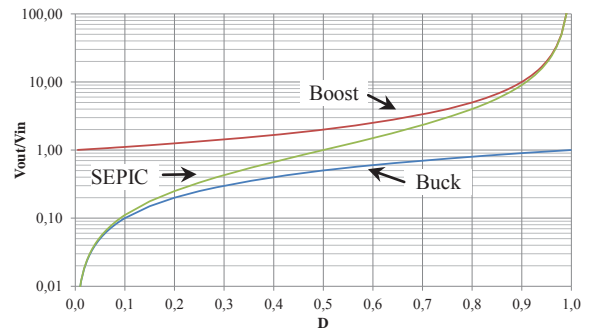
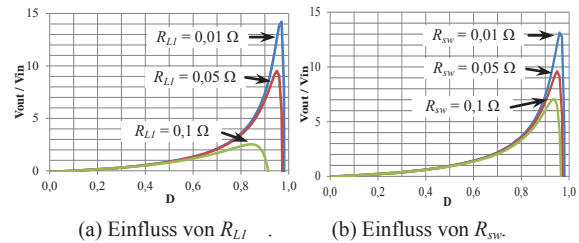


Abbildung 3: Übersetzungsverhältnis V_{out}/V_{in} des SEPIC im Vergleich zu Buck- und Boost-Wandler in Abhängigkeit vom Duty-Cycle D .



(a) Einfluss von R_{L1} . (b) Einfluss von R_{sw} .

Abbildung 4: Einfluss der parasitären Widerstände (a) der Spule L_1 und (b) des Transistors sw auf das Übersetzungsverhältnis.

$$V_{out} = V_{in} \frac{D}{D'} - V_D - I_{load} D \cdot \left[R_{L1} \frac{D}{D'^2} + R_{L2} \frac{1}{D} + R_{Cs} \frac{1}{D'} + R_D \frac{1}{DD'} + R_{sw} \frac{1}{D'^2} \right]$$

Die ausgangsseitige Diode des SEPIC verursacht größere Wechselanteile im Strom, wodurch ein größerer Ausgangskondensator zur Glättung benötigt wird. Ein Vergleich mit dem Buck-Wandler bzw. dem Boost-Buck-Wandler (Abbildung 1a bzw. 1b) macht den Vorteil deren ausgangsseitiger Spulen deutlich, welche einen „stetigen“ Stromfluss erzeugt und dadurch einen kleineren Ausgangskondensator ermöglichen. Ein größerer ΔI wirkt sich ebenfalls auf den Wechselanteil der jeweiligen Kondensatorspannung (ΔV) aus, wodurch der SEPIC gegenüber Wandlern mit ausgangsseitigen Spulen im Nachteil steht. Anstelle des in Abbildung 1b dargestellten Boost-Buck-Wandlers kann auch die Kombination Buck-Boost verwendet werden. Der Vorteil dieser Variante liegt in der Verwendung von nur einer Spule. Jedoch befinden sich ein- und ausgangsseitig Schaltelemente (Transistor, Diode) und erzeugen einen höheren Wechselanteil, die ein schlechteres EMV-Verhalten mit sich bringen. In Abbildung 5 sind die Stromverläufe durch die einzelnen Bauelemente des SEPIC dargestellt. Bleibt der Strom I_D durch die Diode D größer als Null, handelt es sich um nicht

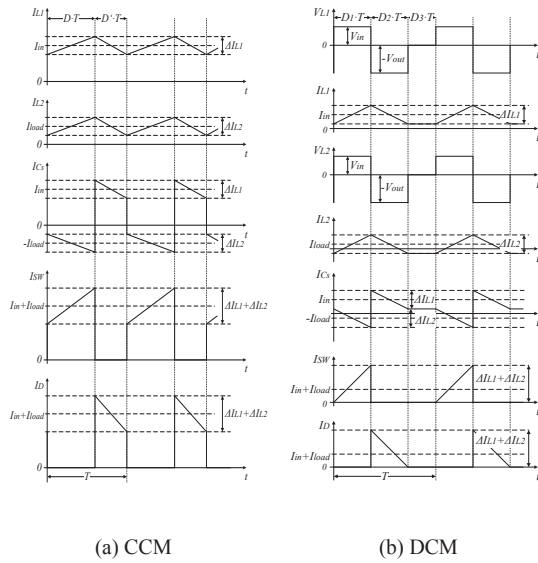
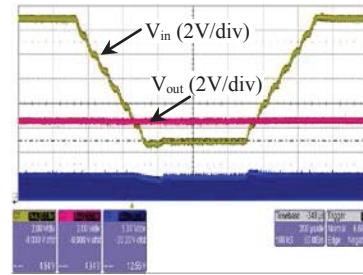


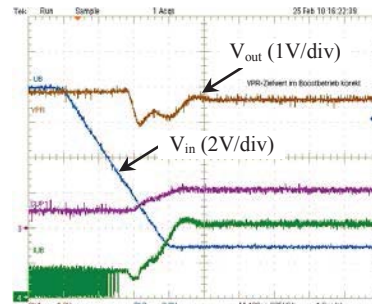
Abbildung 5: SEPIC mit den unterschiedlichen Betriebsarten nicht lückender und lückender Betrieb.

lückenden Betrieb (Continuous Conduction Mode, CCM), Abbildung 5a. Sobald der Strom durch die Diode zu Null wird, befindet sich der SEPIC im lückenden Betrieb (Discontinuous Conduction Mode, DCM), Abbildung 5b. Befindet sich der Wandler im lückenden Betrieb, tritt zudem ein drittes Zeitintervall D_3T auf. Die Spulenströme sind in diesem Zeitintervall konstant, da der Kondensator C_s auf die Eingangsspannung V_{in} aufgeladen ist und seine Energie an keinen Verbraucher weitergeben kann. Der Strom an beiden Anschlüssen von C_s ist betragsmäßig gleich, jedoch mit entgegengesetzten Werten ($I_{L1} = -I_{L2}$ im Buck-Betrieb und $-I_{L1} = I_{L2}$ im Boost-Betrieb). Anders als beim Buck- bzw. Boost-Wandler werden die Spulenströme des SEPIC im lückenden Betrieb nicht zu Null, sondern nehmen entgegengesetzte Werte an. Eine weitere Besonderheit des SEPIC ist, dass der Wechselanteil ΔI des Diodenstromes I_D bzw. der Strom durch den Schalttransistor sw , die Summe beider Wechselanteile beider Spulen beträgt ($\Delta I_D = \Delta I_{sw} = \Delta I_{L1} + \Delta I_{L2}$). Dies wirkt sich nachteilig auf das ausgangsseitige EMV-Verhalten aus, weshalb der Ausgangskondensator größer dimensioniert werden muss.

Ein Vergleich der Ausgangsspannung V_{out} zwischen SEPIC und Buck-Boost-Wandler zeigt, dass diese beim Einbruch von V_{in} (z.B. Starteinbruch beim Betätigen des Anlassers) beim SEPIC konstant bleibt, während beim Buck-Boost-Wandler ein Einbruch zu sehen ist (Abbildung 6). Beim SEPIC ist dies möglich, da dieser die Betriebsart über den Duty-Cycle regelt. Beim Buck-Boost bzw. auch beim Boost-Buck-Wandler ist jeweils nur ein Wandler aktiv (Buck oder Boost). Unterschreitet die Eingangsspannung V_{in} die geforderte Ausgangsspannung findet ein Umschalten



(a) SEPIC (200µs/div).



(b) Buck-Boost (400µs/div).

Abbildung 6: Gemessenes Verhalten von V_{out} bei Einbruch der Eingangsspannung von (a) SEPIC und (b) Buck-Boost.

vom Buck- zum Boost-Betrieb statt. Dadurch entsteht eine gewisse Totzeit, in der die Ausgangsspannung kurzzeitig einbricht (siehe Abbildung 6b).

III. AC-VERHALTEN

Die zusätzlichen Komponenten Spule und Kondensator haben einen Einfluss auf das Übertragungsverhalten. Während Buck- und Boost-Wandler jeweils eine Übertragungsfunktion 2. Ordnung aufweisen, besitzt der SEPIC aufgrund der zusätzlichen Komponenten eine Übertragungsfunktion 4. Ordnung. Dies ist zugleich die größte Herausforderung bei dessen Dimensionierung. Abhängig von der Regelungsart (spannungs- oder stromgesteuerte Regelung (Voltage Mode Control, VMC) (Current Mode Control, CMC)) vereinfacht sich die Gesamtübertragungsfunktion, so dass sich durch die Wahl des richtigen Kompensationsnetzwerkes (Typ I, II, III) ein stabiler Betrieb einstellt. Entsprechend wichtig ist es, den Einfluss der einzelnen Komponenten auf das Übertragungsverhalten des SEPIC bei dessen Dimensionierung zu untersuchen. Hierfür wurden entsprechende Simulationsmodelle erstellt (Abbildung 7), mit denen AC-Analysen mit den unterschiedlichen Regelungsarten (VMC, CMC) durchgeführt werden können.

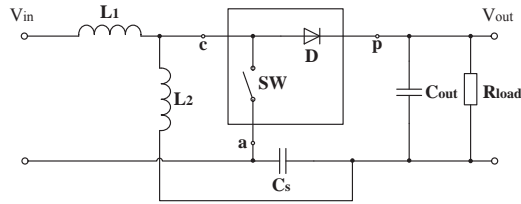
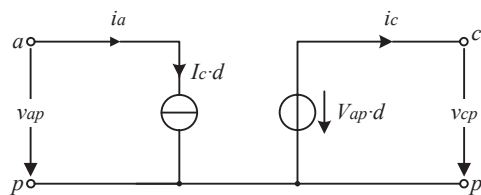
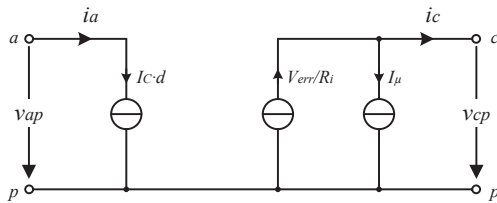


Abbildung 7: SEPIC mit PWM-Switch-Modell.

$$I_{\mu} = -\frac{S_e}{R_i} \cdot DT - \frac{V_{cp}}{2} \cdot \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \right) (1-D)T$$



(a) Voltage Mode Control

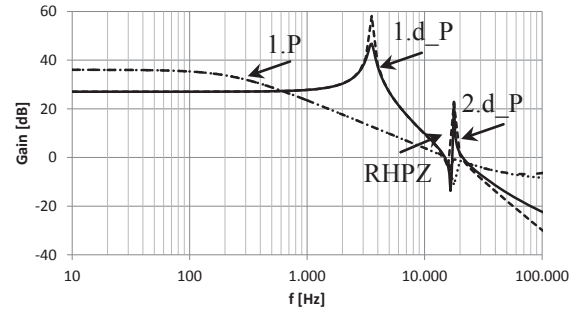


(b) Current Mode Control

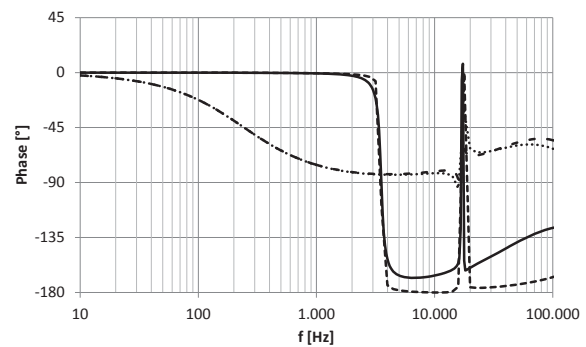
Abbildung 8: PWM-Switch-Modell für Voltage Mode Control (a) und Current Mode Control (b).

Bei den Simulationsmodellen wurde das sogenannte PWM-Switch-Modell verwendet [1], [2], mit dessen Hilfe die nichtlinearen Komponenten (Transistor und Diode) linearisiert werden (Abbildung 8). Dies ist notwendig, da Simulatoren wie SPICE nur lineare Gleichungssysteme lösen können.

Die Simulationsergebnisse für die Voltage Mode Regelung wie auch die der Current Mode Regelung wurden mit Berechnungen (VMC [1], CMC [4]) gegenübergestellt und zeigen eine sehr gute Übereinstimmung (Abbildung 9). Bei der Voltage Mode Regelung besitzt die Übertragungsfunktion eine doppelte Polstelle 1.d_P (bei etwa 3,5 kHz), welche eine Phasendrehung von 180° verursacht. Dies erfordert ein aufwändigeres Kompensationsnetzwerk, weshalb beim SEPIC fast ausschließlich eine Current Mode Regelung zum Einsatz kommt. Durch den Wegfall einer Polstelle bei der Current Mode Regelung beträgt die anfängliche Phasendrehung nur 90° (1. P.) und erfordert somit ein weniger komplexes Kompensationsnetzwerk.



(a) Amplituden-Frequenzgang (Buck-Betrieb).



(b) Phasen-Frequenzgang (Buck-Betrieb).

Abbildung 9: Amplituden-(a) und Phasen-Frequenzgang (b) des SEPIC (VMC & CMC). Parameter: $V_{in} = 10V$, $V_{out} = 5V$, $I_{load} = 1A$, $L_{1,2} = 4,7 \mu H$, $C_s = 9,6 \mu F$, $C_{out} = 344 \mu F$, $f_{sw} = 500 kHz$, $R_{ESR} = 0,01 \Omega$

Wie der Boost-Wandler besitzt auch der SEPIC durch die ausgangsseitige Diode eine komplexe Nullstelle in der rechten Halbebene (RHPZ), welche zur Instabilität des Reglers führen kann. Um dem entgegenzuwirken, muss die Reglerbandbreite begrenzt werden ($f_T \leq 1/3 \cdot f_{RHPZ}$). Eine kleine Induktivität L kann der RHPZ ebenfalls entgegenwirken, wodurch eine höhere Bandbreite erzielt wird. Dadurch erhöht sich jedoch auch die Stromwelligkeit ΔI , wofür ein größerer Ausgangskondensator benötigt wird. Bei der Dimensionierung gilt es, dies zu berücksichtigen und die Bandbreite nicht größer zu wählen als nötig, da dies eine Überdimensionierung von Spule und Kondensator zur Folge hat.

IV. ZUVERLÄSSIGKEIT

Ein wesentliches Merkmal, welches den SEPIC von anderen Wandlern unterscheidet, ist der zusätzliche Koppelkondensator C_s , durch dessen Lage im ausgeschalteten Zustand kein DC-Strom zwischen Ein- und Ausgang fließen kann (Kurzschlussfestigkeit). Zugleich führt dies aber auch dazu, dass der Kondensator

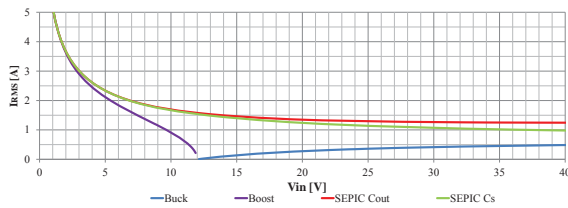


Abbildung 10: Vergleich der Kondensatorströme von Buck (in C_{out}), Boost (in C_{out}) und SEPIC (in C_{out} und C_s); ($V_{out} = 12\text{ V}$, $I_{load} = 1,5\text{ A}$, $f_{sw} = 500\text{ kHz}$, $L_1 = L_2 = 10\text{ mH}$ (separate Spulen)).

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Effektivströme durch C_{out} und C_s zwischen Buck, Boost und SEPIC.

	Buck	SEPIC	Boost	SEPIC
C_{out}	↓	↑↑	↑	↑
C_s	-	↑	-	↑

C_s während jeder Periode geladen und entladen wird und somit dauerhaft von einem Strom durchflossen wird. Der Vergleich mit den anderen Komponenten im Leistungsteil (Spule, Transistor, Diode) führt zu der Tatsache, dass der Kondensator das größte Ausfallrisiko birgt und dessen Versagen zum Totalausfall des SEPIC führen würde. Hierzu wurde eine Untersuchung der Ströme durch die Kondensatoren C_s sowie C_{out} durchgeführt und mit den Strömen der Ausgangskondensatoren von Buck- und Boost-Topologie gegenübergestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Effektivströme von C_s und C_{out} im Boost-Betrieb denen des Boost-Wandlers sehr ähnlich sind. Im Buck-Betrieb erfährt vor allem der Ausgangskondensator des SEPIC einen zwei- bis dreifach höheren Stromeffektivwert (RMS-Strom) als der des Buck-Wandlers. Der Koppelkondensator besitzt bei kleinerer Differenz zwischen Ein- und Ausgangsspannung ähnlich hohe I_{RMS} Werte wie der Ausgangskondensator (Abbildung 10). Diese nehmen jedoch mit steigender Differenz von V_{in} und V_{out} ab und nähern sich den Werten im Buck-Ausgangskondensator.

In Tabelle 1 sind die einzelnen Kondensatorströme von Buck, Boost und SEPIC gegenübergestellt. Demnach ist der Effektivstrom durch den Buck Ausgangskondensator deutlich geringer als der des SEPIC, da die ausgangsseitige Spule des Buck-Wandlers einen „stetigen“ Stromfluss erzeugt. Im Buck-Betrieb sind die Ströme durch den Ausgangs- und Koppelkondensator des SEPICs bei $D = 0,5$ identisch, jedoch nähert sich mit kleiner werdenden Duty-Cycle der Strom durch C_s den Werten des Buck-Ausgangskondensators an. Durch die Abnahme von D des SEPICs, wird zugleich weniger Energie und somit weniger Strom vom Eingang benötigt, wodurch sich der Effektivstrom durch C_s ebenfalls verringert. Im Boost-Betrieb sind die Ströme durch alle Kondensatoren (Boost und

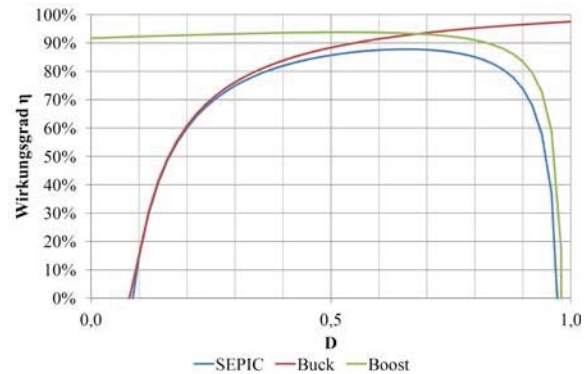


Abbildung 11: Wirkungsgrad des SEPIC; $V_{in} = 6\text{ V}$, $L_1 = L_2 = 20\text{ μH}$ (separate Spulen), $C_s = 10\text{ μF}$, $R_{L1}, R_{L2} = 50\text{ mΩ}$, $R_{sw} = 100\text{ mΩ}$, $R_{Cs} = 10\text{ mΩ}$, $V_D = 0$, 45 V , $R_D = 50\text{ mΩ}$.

SEPIC) nahezu gleich, jedoch nähert sich der Strom des Boost-Ausgangskondensators bei $D \rightarrow 0$ gegen Null, da der Transistor somit dauerhaft ausgeschaltet ist und der Kondensator DC-Ströme sperrt.

V. EFFIZIENZBETRACHTUNG

Durch die zusätzlichen Bauelemente bedingt, ist der Wirkungsgrad des SEPIC dem eines Buck- oder Boost-Wandlers unterlegen. Dazu tragen vor allem der Kondensator C_s und die zweite Spule bei, welche zwangsläufig ebenfalls verlustbehaftet sind. Dennoch kann der SEPIC einen ähnlich hohen Wirkungsgrad wie der Buck/Boost erreichen, wie Abbildung 11 zeigt.

$$\eta = 1 - \frac{V_D D'}{V_{in} D} - \frac{I_{load}}{V_{in}} \left[R_{L1} \frac{D}{D'} + R_{L2} \frac{D'}{D} + R_{Cs} + R_D \frac{1}{D} + R_{sw} \frac{1}{D'} \right]$$

VI. ZUSAMMENFASSUNG

Der Single Ended Primary Inductance Converter, kurz SEPIC genannt, ist eine sehr gute Alternative zu der derzeit verwendeten Buck-Boost-Topologie bzw. Boost-Buck-Topologie. Durch den Einsatz eines SEPIC wird nur ein Wandler benötigt. Dadurch entfällt die Dimensionierung des zweiten Wandlers, wodurch Entwicklungszeit und Fläche (bei integrierten Schaltungen ist die Chipfläche ein wichtiger Kostenfaktor) eingespart werden. In Tabelle 2 sind die wichtigsten Eigenschaften des SEPIC denen der Buck und Boost-Topologie gegenübergestellt.

Ein wesentlicher Vorteil des SEPIC liegt im verzugsfreien Übergang zwischen Buck und Boost-Betrieb, da der SEPIC diesen Übergang allein durch den Duty-Cycle regelt. Beim Boost-Buck-Wandler

Tabelle 2: Vor-/Nachteile des SEPIC gegenüber des Buck-/Boost-Wandler.

	Buck	Buck-Boost	Boost-Buck	SEPIC
Buck-/Boost-Betrieb	-	+	+	+
Ansteuerung Transistor	-	-/+	+/-	+
Größe C_{out}	-	-	+	+
Größe C_{in}	+	-	+	-
Anzahl an Regelschleifen	+	-	-	+
DC-Kurzschlussfestigkeit	-	-	-	+
Anzahl Komponenten	+	+	-	0

existiert eine Verzögerung beim Hin- und Herschalten zwischen Buck und Boost-Betrieb (es ist stets nur ein Wandler aktiv). Dies hat ein Absinken der Ausgangsspannung zur Folge.

Durch die Lage des Koppelkondensators C_s besitzt der SEPIC eine DC-Kurzschlussfestigkeit zwischen Ein- und Ausgang. Jedoch stellt der Koppelkondensator C_s gleichzeitig das größte Ausfallrisiko dar. Vor allem bei hohen Leistungen sollte dieser sorgfältig dimensioniert werden (kleiner Serienwiderstand R_{ESR} um Verluste zu reduzieren, parallele Anordnung mehrerer Kondensatoren), da dessen Ausfall auch zum Totalausfall des SEPIC führt.

Ein Vorteil, den der SEPIC gegenüber dem Buck-Wandler besitzt, ist der massebezogene Schalter (Low-Side). Dies ermöglicht eine einfachere Ansteuerung des Schalttransistors, wohingegen beim Buck oft der Einsatz einer Ladungspumpe (zum Anheben der Gatespannung) benötigt wird. Des Weiteren verlangen bestimmte Anwendungen, dass die Ausgangsspannung V_{out} im ausgeschalteten Zustand 0 V beträgt (Shut-Down-Fähigkeit). Während beim Boost-Wandler im ausgeschalteten Zustand die Ausgangsspannung auf minimal $V_{in} - V_D$ absinkt, beträgt diese beim SEPIC im ausgeschalteten Zustand 0 V.

Der größte Nachteil des SEPIC liegt in der aufwändigen Kompensation. Durch sein Übertragungsverhalten 4. Ordnung kommt nahezu ausschließlich eine stromgesteuerte Regelung (CMC) in Frage, wodurch eine Polstelle des ersten Doppelpols wegfällt und somit nur eine 90° Phasendrehung entsteht. Dadurch kann aber wiederum ein einfacheres Kompensationsnetzwerk verwendet werden, wodurch Kosten gespart werden.

VII. LITERATUR

- [1] Vorperian, V.: Simplified analysis of PWM converters using model of PWM switch. Continuous conduction mode. In: *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on* 26 (1990), May, No. 3, pp. 490-496.
- [2] Vorperian, V.: Simplified analysis of PWM converters using model of PWM switch. II. Discontinuous conduction mode.

In: *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on* 26 (1990), May, No. 3, pp. 497-505.

- [3] Hren, A. ; Slibar, P.: Full order dynamic model of SEPIC converter. In: *Industrial Electronics, 2005. ISIE 2005. Proceedings of the IEEE International Symposium on* Bd. 2, 2005, S. 553-558 vol.2.
- [4] L. K. Wong ; T. K. MAN: Compensation for Current Mode Control SEPIC Converters (2010).
- [5] Gottschling Philipp: Analyse und Bewertung des getakteten Spannungswandlers nach dem SEPIC-Prinzip bzgl. Automotive-Anwendungen. *Master-Thesis, Hochschule Reutlingen* (2013).



Philipp Gottschling erhielt den akademischen Grad Bachelor of Engineering in Mechatronik im Jahr 2010 von der Hochschule Karlsruhe und den Grad Master of Science in Leistungs- und Mikroelektronik von der Hochschule Reutlingen im Jahr 2013.



Bernhard Wicht erhielt den akademischen Grad Dipl.-Ing. im Jahr 1996 von der Technischen Universität Dresden und den Grad Dr.-Ing. im Jahr 2002 von der Technischen Universität München. 2003-2010 war er im Geschäftsbereich Mixed Signal Automotive bei Texas Instruments, Freising, verantwortlich für die Entwicklung von Smart Power ICs. Seit September 2010 ist er Professor für integrierte Schaltungen am Robert Bosch Zentrum für Leistungselektronik an der Hochschule Reutlingen.



Thoralf Rosahl erhielt den akademischen Grad Dipl.-Ing. im Jahr 1990 von der Technischen Universität Dresden. Seit 1991 ist er in der ASIC-Entwicklung der Robert Bosch GmbH im Geschäftsbereich Automotive Electronics beschäftigt. Schwerpunkt seiner Designaktivitäten sind Spannungsregler und Endstufenbausteine. Seit 2007 bekleidet er die Funktion des ‚Chief Expert Analog Design‘.