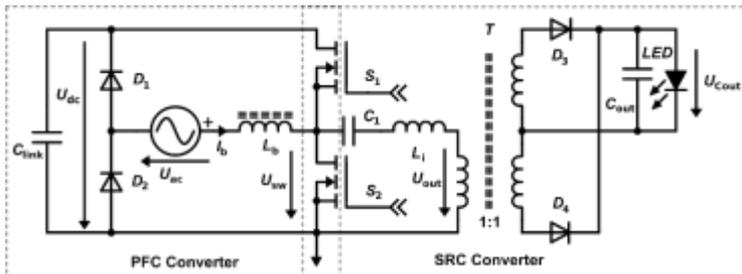


ZVEI – Herbstsitzung Schaltnetzteile / SMPS - 24.9.2019

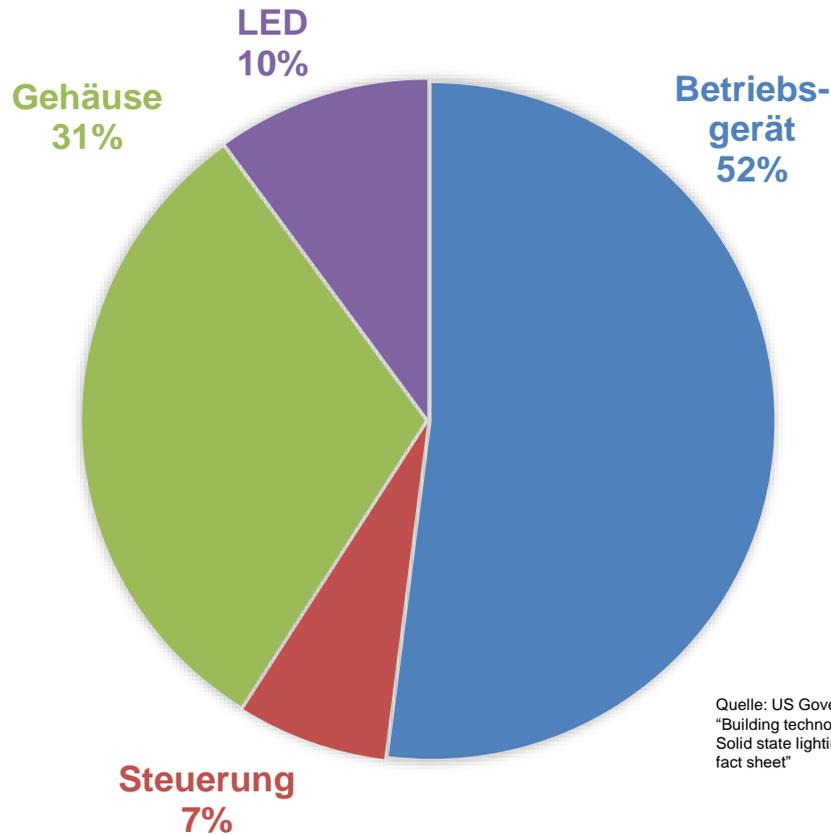
Chancen durch digitale SMPS

mit dem Fokus Lebensdauer und Dynamik

Michael Heindinger – Lichttechnisches Institut (LTI) – Fakultät für Elektro- und Informationstechnik – Karlsruher Institut für Technologie (KIT)



Fehlerursachen von LED Leuchten [1]



Quelle: US Government
"Building technology program:
Solid state lighting technology
fact sheet"

Lebensdauer

- LEDs: 200 000 h
 - 70% Nennlichtstrom 65°C
- LED Treiber: 20 000 – 50 000 h*
- Betriebsdauer Leuchte:
 - 20 Jahre

Idee: Wartungen reduzieren

- Stromversorgung langlebig auslegen

Fehlerursachen von LED Treibern

- Elektrolytkondensator
- Temperaturwechselbeanspruchung
- Überspannung
- Lüfter
- Optokoppler



* https://www.vossloh-schwabe.com/uploads/tx_sbdownloader/Leitfaden_Treiber_EN.pdf

Lebensdauerbetrachtung Zwischenkreiskondensator

Lebensdauerbegrenzung des LED Treibers

- Elektrolytkondensator: Häufige Fehlerursache

Optimierungsmöglichkeiten

- Auswahl hochwertiger Bauteile
- Folienkondensator
 - Exponent von 7 macht Reduzierung der Betriebsspannung attraktiv

Elektrolytkondensator[5]:

$$t = 2^{\frac{T_r - T}{10}} 2^{-\frac{\Delta T}{5}} t_0 \left(\frac{U_o}{U_r} \right)^{4.4}$$

Folienkondensator[4]:

$$t = 2^{\frac{T_r - T}{10}} t_0 \left(\frac{U_o}{U_r} \right)^7$$

	Elektrolytkondensator 105°C	Folienkondensator 105°C
Lebensdauer 85°C	40 000 h	20 000 h
Geringere Betriebsspannung	~62 000 h (7 Jahre) <small>(500 V Kondensator betrieben bei 450 V)</small>	870 000 h (99 Jahre) <small>(1200 V Kondensator betrieben bei 700 V)</small>

- Folienkondensatoren ermöglichen eine >10x längere Lebensdauer

Folien- vs. Elektrolytkondensatoren [1]

Vergleich des Bauraums

- Folienkondensator: 10% der Energiedichte von Elektrolytkondensatoren
- Folienkondensator: Bauvolumen des Netzteils +50% bis +100%

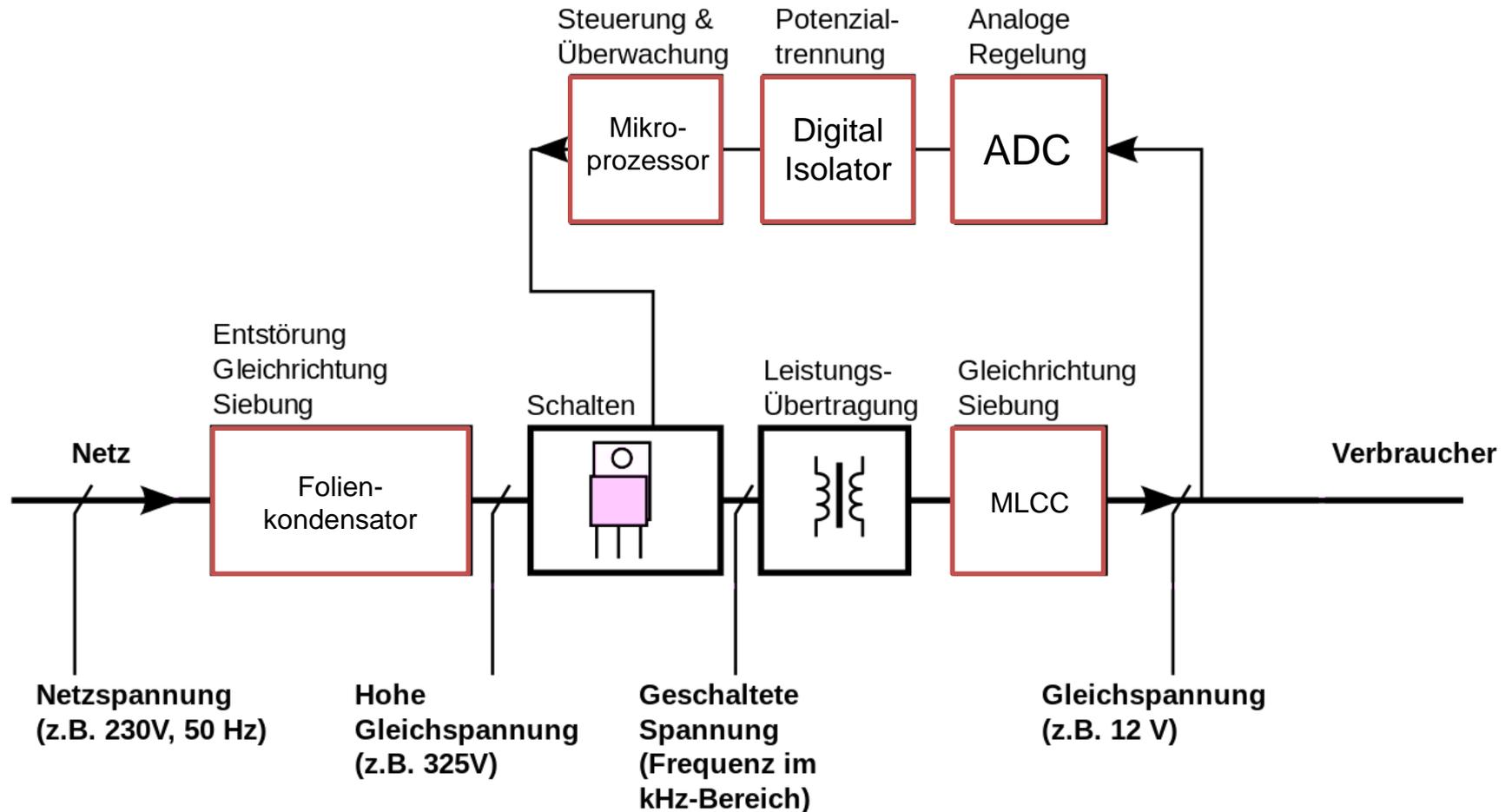
Lösungsvorschlag

- Verwendung kleinere Kapazitäten => Höherer Spannungsrippel
- Entwickeltes Steuerverfahren ermöglicht hohen Spannungsrippel

Herausforderung Hold-Up Time: 20ms

- Beispiel 500 W Netzteil:
 - Zwischenkreisspannungsschwankungen: 600 V – 300V
 - Benötigte Kapazität: ~ 60 μ F

Funktionsweise von Netzgeräten



Quelle: Wikimedia Commons

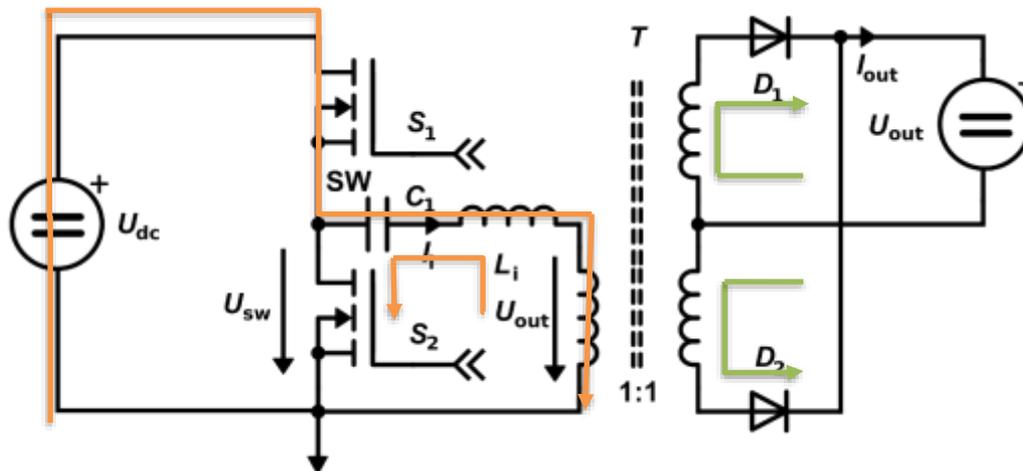
Möglichkeiten mit digitaler Regelung

1. Nichtlineare Vorsteuerung

Analyse des Series LC Wandlers [1]

Serienresonanzwandler

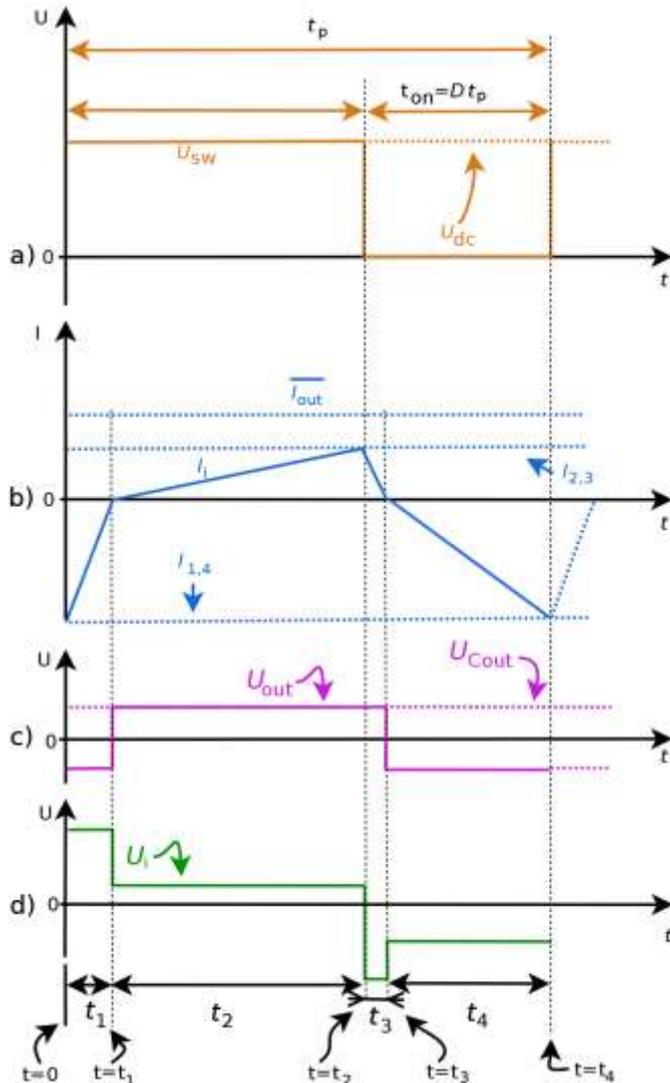
- Frequenzbereich: Erste harmonischen Schwingung
- Zeitbereich: Betrachtung individueller Ströme



Linearisierung durch Komponentenwahl

- Kondensator C_1 wird als DC-Block-Kondensator gewählt
- Topologie wird zu Serien LC Wandler umbenannt
 - Vermeidung von Missverständnissen

Serien LC Wandler Analyse [1]



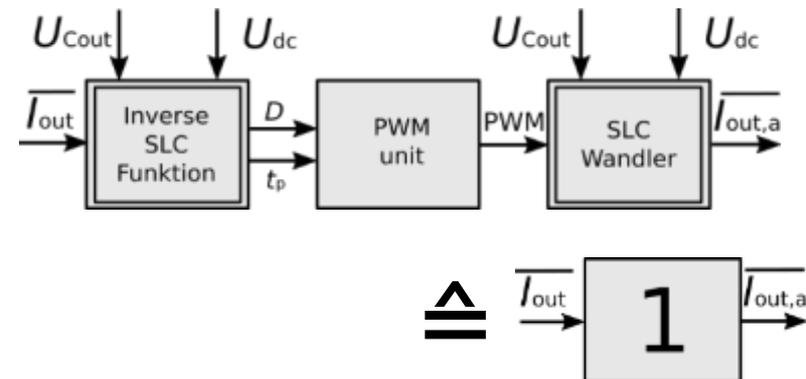
SLC Wandler wird über eine Schaltperiode gemittelt betrachtet

PATENT

- Mittlerer Ausgangsstrom wird berechnet

$$\overline{I_{out}} = \frac{D(1-D)U_{dc}^2 - U_{Cout}^2}{4L_i U_{dc}} t_p$$

- Neuheit: Tastgrad und Frequenz werden verwendet
- Nichtlineare Übertragungsfunktion kann gelöst werden



Möglichkeiten mit digitaler Regelung

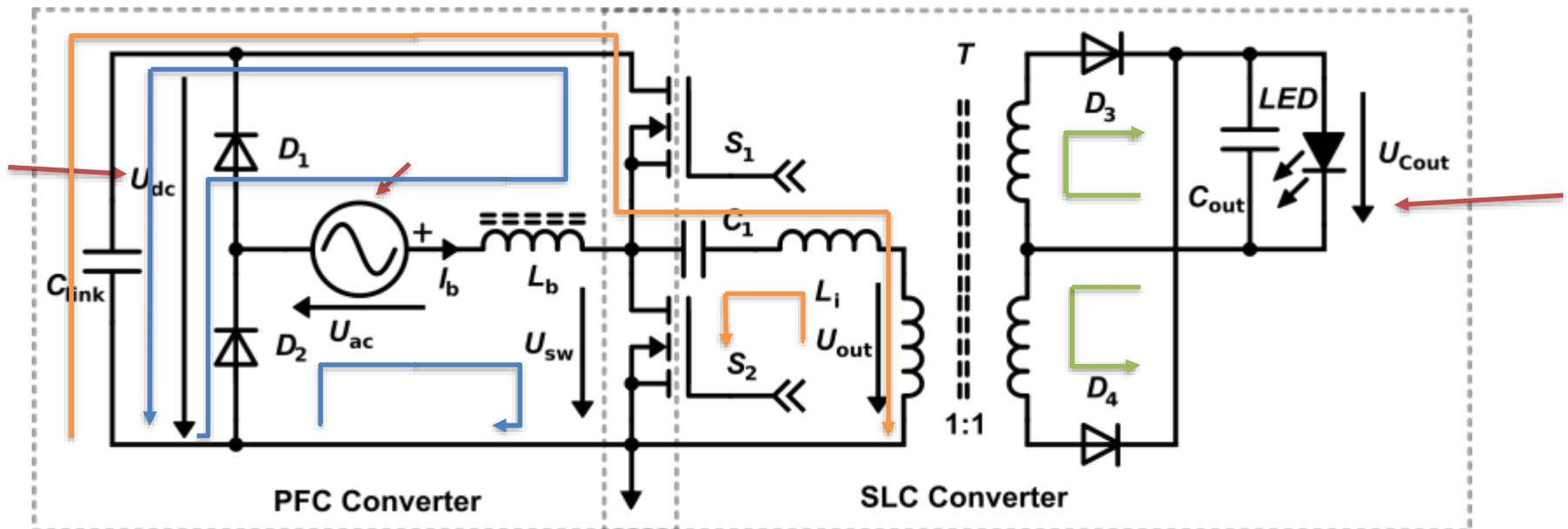
1. Nichtlineare Vorsteuerung
2. Kombination von nichtlinearen Vorsteuerungen

Topologie der analysierten Stromversorgung [1]

SLC hat 3 Freiheitsgrade

- Frequenz, Duty Cycle, und Pulse-Skipping-Duty-Cycle
- Ein Freiheitsgrad kann für PFC genutzt werden
- Topologie kann um Totem-Pole PFC erweitert werden

Topologieanalyse



PFC:

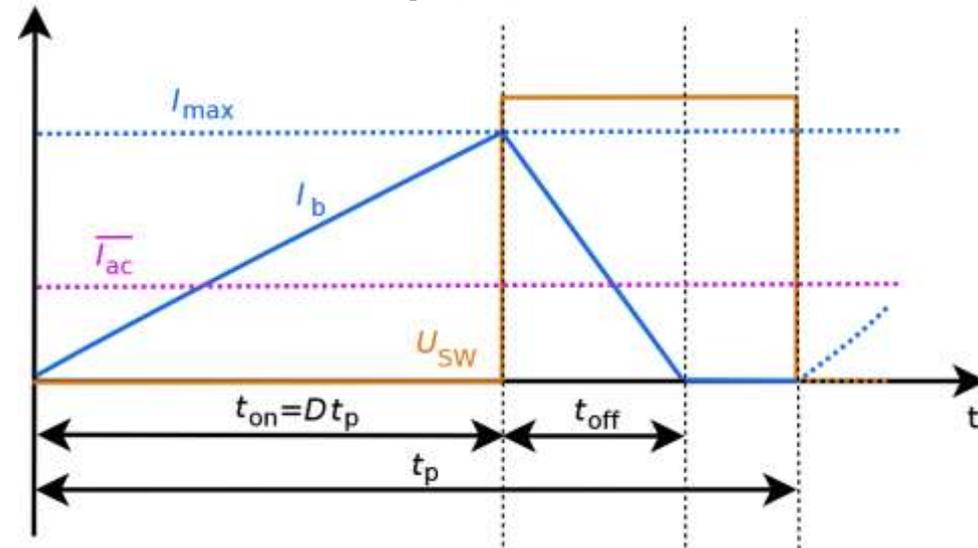
- PFC wird im lückend betrieben: Netzaufnahmestrom kann gesteuert werden

Diskontinuierliche PFC (lückender Strom) [1]

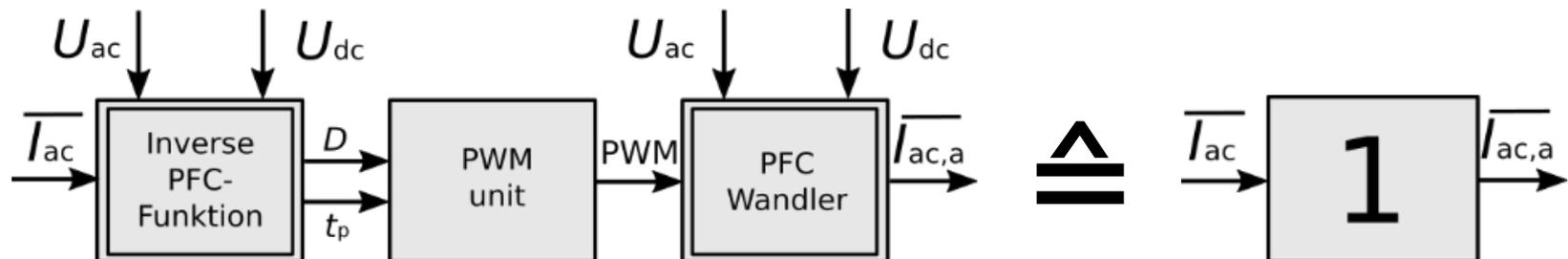
PFC wird über eine Schaltperiode betrachtet

- Analyse des Drosselstroms
- Bestimmung des mittleren Netzaufnahmestroms:

$$\overline{I_{ac}} = \frac{D^2 t_p U_{ac} U_{dc}}{2L_b (U_{dc} - U_{ac})}$$



- Auflösen der nichtlinearen Übertragungsfunktion



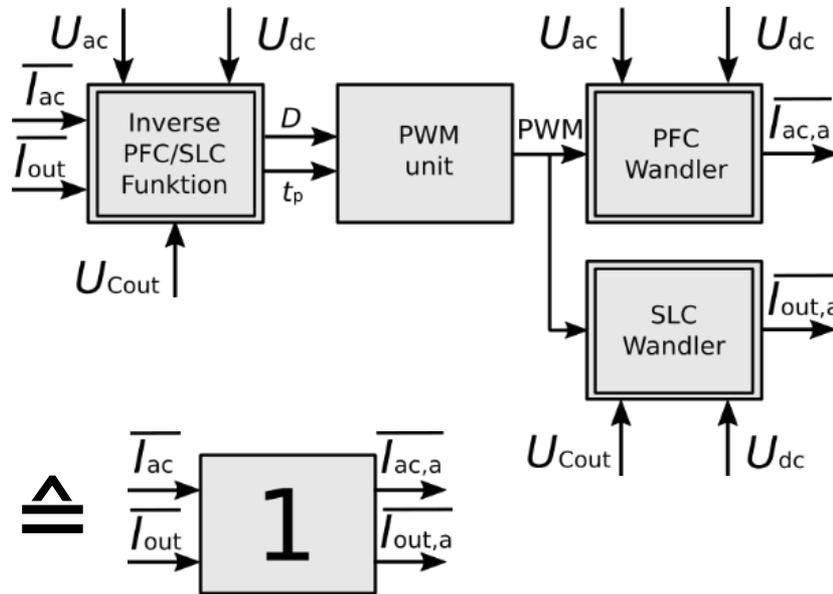
PFC/SLC System Design PATENT

Entwicklung der Lösungsfunktion

- SLC/PFC werden über Tastgrad und Frequenz gesteuert
- Zwei Parameter (I_{ac} , I_{out}) –
Zwei Lösungsvariablen (t_p , D)

$$\overline{I_{ac}} = \frac{D^2 t_p U_{ac} U_{dc}}{2L_b (U_{dc} - U_{ac})}$$

$$\overline{I_{out}} = \frac{D(1-D)U_{dc}^2 - U_{Cout}^2}{4L_i U_{dc}} t_p$$



Linearisierung durch Inverse

- PFC/SLC verhält sich durch Inverse als Einheitsmatrix für I_{out} und I_{ac}
- Erfassung von U_{ac} , U_{dc} und U_{Cout} für Steuerung benötigt
- Hohe Störgrößenunterdrückung

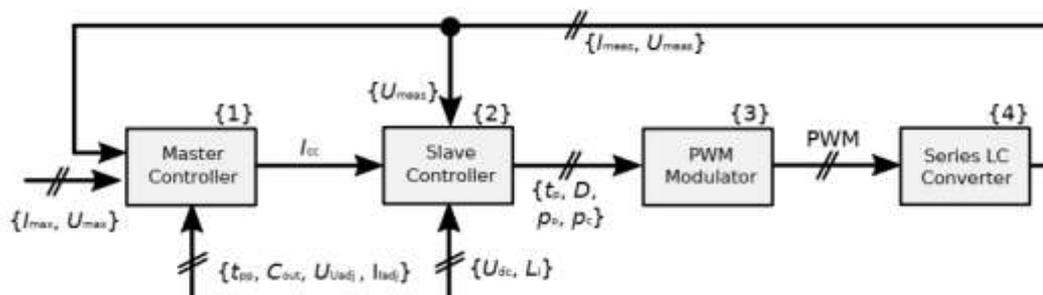
Möglichkeiten mit digitaler Regelung

1. Nichtlineare Vorsteuerung
2. Kombination von nichtlinearen Vorsteuerungen
3. Kaskadierte Steuer- und Regelungen

Kaskadierte Steuerungen/Regelungen

Regelung mit Vorsteuerung

- Übertragungsfunktion modelliert SLC als Stromquelle
 - Current Mode Control
- Open-Loop Modulationsverfahren („Slave Controller“) wird durch überlagerten Regler („Master Controller“) an Funktionalität erweitert.
 - Constant Current Constant Voltage Control
 - Slave Controller erlaubt einfachen Master PI Regler
- Slave Controller begrenzt Einfluss von Störgrößen (Eingangsspannung, Ausgangsspannung)

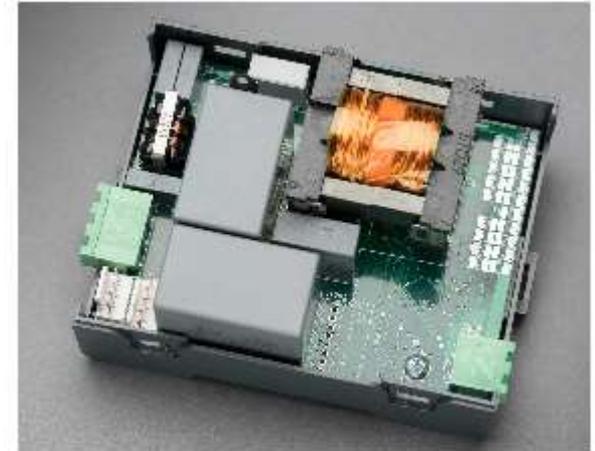


Technologiedemonstrator

Technologiedemonstrator Hutschinennetzteil [2]

- 60W 4BE Hutschinennetzteil
- Keine Verwendung von Elektrolytkondensatoren
- Digitale Regelung
- Ausgangsspannungsbereich: 5 V ... 30 V
- Ausgangsstrom: 0 A ... 4 A

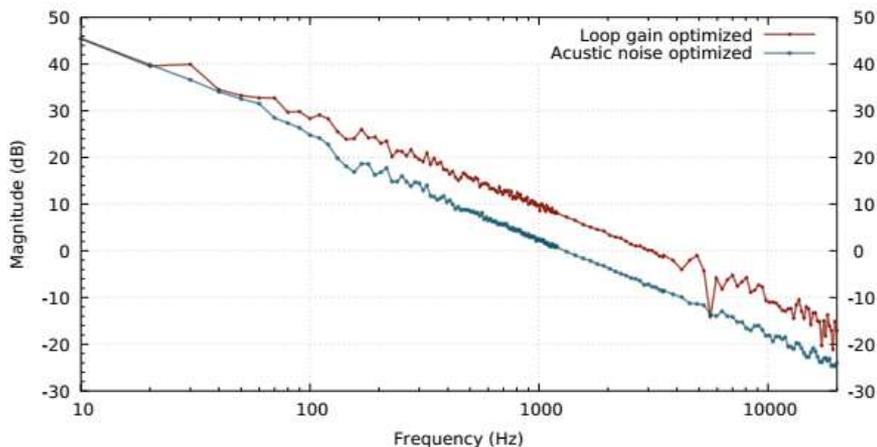
- Verhalten ähnlich Labornetzteil:
 - Konstantspannung
 - Konstantstrom
 - CCCV Kombination
 - Schnelles Regelverhalten < 1 ms



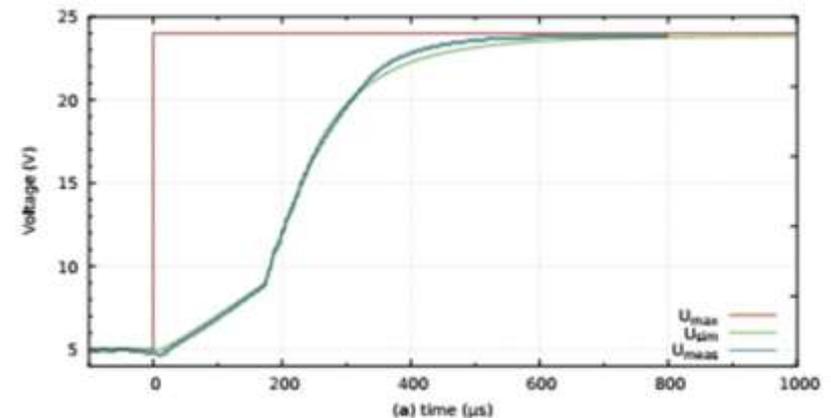
Dynamische Regelungen

Hochdynamische Regler können aufgebaut werden

- Hohes Open Loop Gain => Hochdynamisch
- Loop Gain zeigt Integrator-Charakteristik
 - Gute Rauschunterdrückung
 - Keine bleibende Regelabweichung
- Sekundärseite: Kleine Ausgangskapazität
 - Auch Sekundärseite keine Elkos benötigt
 - Sprungantwort 5 V - 24 V: Rise time <math>< 500 \mu\text{s}</math>.



Open Loop Gain Messung [2]

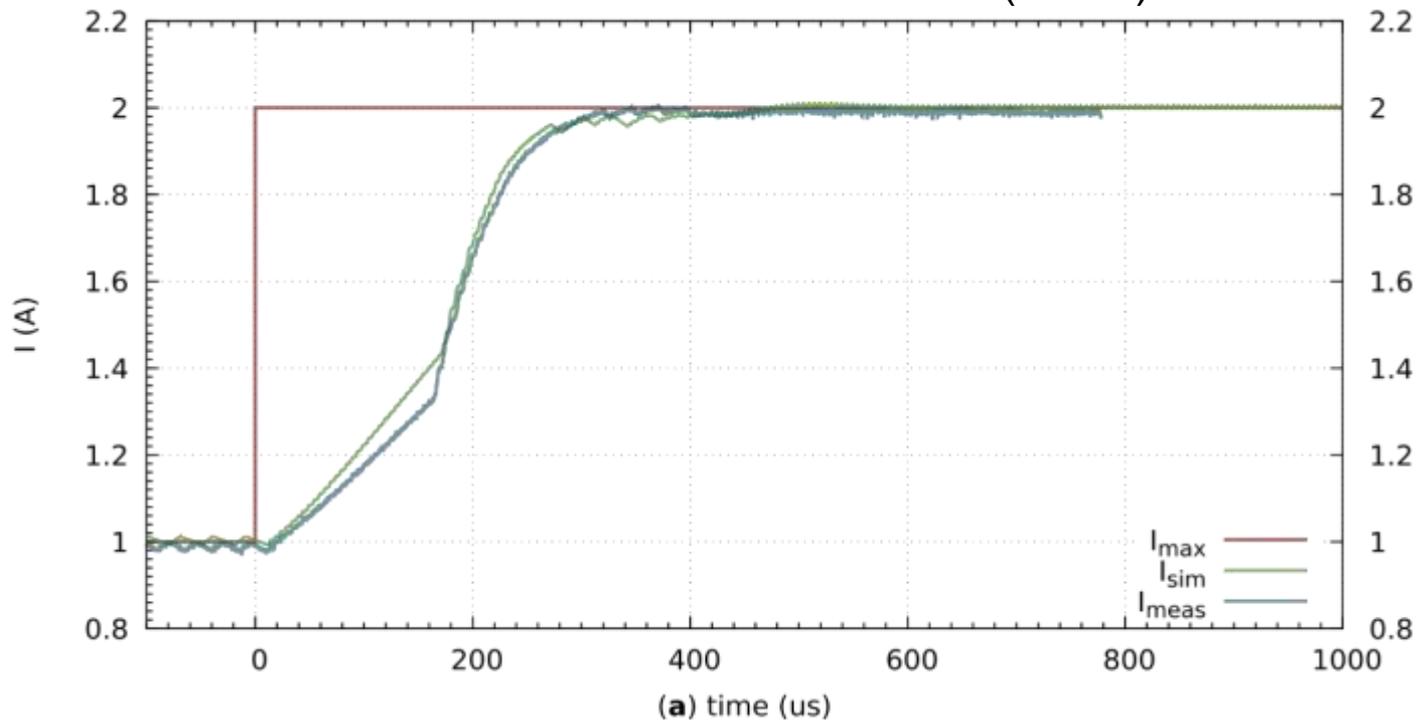


Ausgangsspannung über Zeit[2]

Stromregelung

Stromregelung

- Experiment: Last $10\ \Omega$
 - Strom wird von 1 A auf 2 A erhöht
 - Schnelles Erreichen des Sollwertes ($<1\text{ms}$)

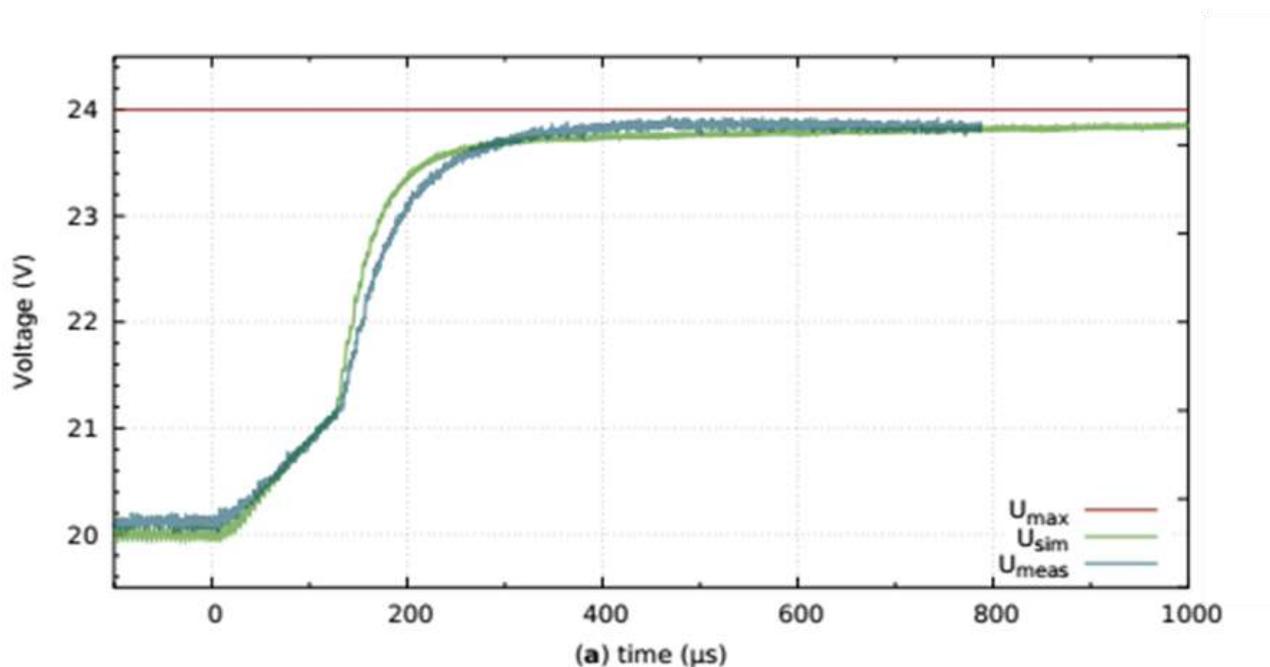


Anwendung: Lasertreiber

CCCV Betrieb

CCCV Regelung

- Experiment: Last $10\ \Omega$
 - Maximalstrom wird von 2 A auf 3 A erhöht
 - Maximaler Ausgangsspannung: 24 V



Anwendung: LiPo Ladegerät

Möglichkeiten mit digitaler Regelung

1. Nichtlineare Vorsteuerung
2. Kombination von nichtlinearen Vorsteuerungen
3. Kaskadierte Steuer- und Regelungen
4. Industrie 4.0 Integration

Industrie 4.0 Integration

Überwachen, Steuern Regeln

- Steuerungsparameter können programmiert werden
- Leichte Implementierung von Protokollen (z.B. SMBus, CAN, IO Link, ...).
- Daten wie Eingangsspannung, Ausgangsspannung, Stromverbrauch können geloggt werden

Mikrocontroller

- Bereits vorhandener Mikrocontroller kann mitbenutzt werden

Zusammenfassung

1. Nichtlineare Vorsteuerung

1. Modelliert SLC Wandler als Stromquelle
2. Breiter Eingangsspannungsbereich (Design out von Elkos)
3. Breiter Ausgangsspannungsbereich (0 V – 30 V)

2. Kombination von nichtlinearen Vorsteuerungen

1. Ermöglicht Integration von PFC/SLC mit einer Halbbrücke
2. Nutzt minimale Anzahl an Leistungshalbleitern

3. Kaskadierte Steuer- und Regelungen

1. Hochdynamische Regelung
2. Constant Voltage Constant Current Regelungen

4. Industrie 4.0.

1. Anpassung von Parametern (Ausgangsspannung, Strom)
2. Mikroprozessor kann mitbenutzt werden
z.B. Datenlogger, Bus, Lastmonitor

Literatur & weiterführende Informationen

- [1] Heidinger: Long Life Single Stage PFC/SLC Converter driving LEDs
 - [doi:10.5445/IR/1000097755](https://doi.org/10.5445/IR/1000097755)

- [2] Heidinger et al: Current Mode Control of a Series LC Converter Supporting Constant Current, Constant Voltage (CCCV)
 - DOI: 10.5445/IR/1000097759

- [3] Biricha Digital Power:
 - <https://www.biricha.com/technical-videos.html>

- [4] Illinoise Capaitors, Life Expectancy of Film Capacitors

- [5] Illinoise Capaitors, Life Expectancy of Electrolytic Capacitors