

DISS. ETH NO. 20354

**ULTRA–HIGH PERFORMANCE  
TELECOM DC–DC CONVERTER**

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by  
UWE BADSTÜBNER  
Dipl.–Ing., TU Berlin  
born 20. July 1979  
citizen of Stuttgart, Germany

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. J. W. Kolar, examiner  
Prof. Dr. W. G. Hurley, co-examiner

2012

# Abstract

Telecommunication and data provision are cornerstones of our modern society. The evolution of the multimedia network around the world started more than one century ago and, as a consequence, the power supplies for the telecom facilities and the parallel-emerging data centres passed through the entire evolution of power electronic systems. Telecom facilities and data centres have started to merge with the digitalisation of the telecom networks. Ever since the following internet boom in the nineties of the last century, the demand on a high-performance data storage, transmission, and computation is rapidly increased. Concurrently, the demanded performance of the modules in the power supply chain and the Information and Communication Technology (ICT) equipment has severely increased. The development of highly compact converter systems counteract the increased demand on space for the ICT-equipment and additionally enables a more-efficient cooling in the data centres. The continuous expansion of digital networks and data centres, as well as the increasing energy prices and the advanced environmental awareness result in shifting drivers for the power-supply development towards an efficient energy transmission and distribution, whereas the power density of the system should remain on a high level.

In this thesis, the limits for the power density and efficiency for DC-DC converters as part of the power supply chain in data centres or telecommunication facilities is investigated. Based on comprehensive analytical thermal, electrical, and magnetic models, the system performance is calculated with the selected free design parameters. Furthermore, these analytical models provide the basis for an automated determination of the optimal design parameters with respect to the maximum power density and/or the maximum efficiency.

Based on the examples of a series-parallel-resonant converter and a phase-shift pulse-width-modulated DC-DC converter with current doubler rectifier, the analytical determination of the maximum power density based on an optimisation algorithm is explained in detail in chapter 2. With the resulting optimised design parameters, the corresponding prototype systems are realised with which the applied analytical models are validated. Moreover, an almost loss-less snubber circuit for the hard-switched rectifier elements of general phase-shift converters is presented, which detracts the ringing energy from the core of the magnetic components and provides this energy for further utilisation.

In addition, a phase-shift pulse-width-modulated DC-DC converter

---

with centre-tapped transformer and second-order output filter is optimised with respect to energy efficiency. The optimisation objective is a load-dependent efficiency profile with a maximum efficiency of 99%. The analytical models, the realised prototype, and the model-validation measurements are detailed in chapter 3. Moreover, the sensitivities of the component parameters on the resulting system performance are investigated. Finally, the influence of the model accuracy on the optimal design parameters is evaluated in chapter 4, and an outlook on further steps in research is given.

# Kurzfassung

Telekommunikation und die Bereitstellung von Daten jeglicher Art sind Grundsteine unserer modernen Gesellschaft. Die Evolution der multi-medialen Vernetzung der Erde begann vor mehr als einem Jahrhundert und somit durchliefen die Spannungsversorgungen für die Telekommunikationseinrichtungen und die zunächst parallel aufkommenden Rechenzentren die vollständige Evolution leistungselektronischer Systeme. Mit der Digitalisierung der Telekommunikationsnetze begannen die Telekommunikationseinrichtungen und Rechenzentren zu verschmelzen. Seit dem darauffolgenden Internet-Boom in den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts stieg der Bedarf an einer hoch-leistungsfähigen Datenübertragung, Datenspeicherung und Datenverarbeitung rasant an. Gleichzeitig stieg die Performanceanforderung an die Module der Spannungsversorgungskette und des Datenverarbeitungsequipments massiv an. Die Entwicklung hoch-kompakter und hoch-effizienter Umrücker wirkt dem gestiegenen Platzbedarf des Datenverarbeitungsequipments entgegen und ermöglicht darüber hinaus eine effizientere Kühlung der Rechenzentren. Der anhaltende Ausbau der digitalen Netze und Rechenzentren sowie die steigenden Energiepreise und das erhöhte Umweltbewusstsein verlagern die Zielsetzung bei der Entwicklung moderner Spannungsversorgungen hin zu einer effizienten Energieübertragung und -verteilung, während die Leistungsdichte auf einem hohen Niveau gehalten werden soll.

In der vorliegenden Arbeit sind die Grenzen der Leistungsdichte und Energieeffizienz für Gleichspannungswandler als Teil der Energieübertragungskette in einem Rechenzentrum oder in einer Telekommunikationseinrichtung untersucht. Basierend auf umfangreichen analytischen thermischen, elektrischen und magnetischen Modellen wird die Systemperformance mit der Vorgabe der freien Designparameter berechnet. Diese Modelle bilden des Weiteren die Grundlage für eine automatisierte Berechnung der optimalen Designparameter in Hinblick auf die maximale Leistungsdichte und maximale Effizienz.

Am Beispiel eines Serien-Parallel-Resonanzwandlers und eines pulsweitenmodulierten Gleichspannungswandlers mit Stromverdoppler-Gleichrichterschaltung ist die analytische Berechnung der maximalen Leistungsdichte in Kapitel 2 mithilfe eines Optimierungsalgorithmus im Detail erklärt. Auf Basis der berechneten optimalen Designparameter werden entsprechende Prototypen realisiert und die angewendeten analytischen Modelle experimentell validiert. Darüber hin-

---

aus wird eine quasi-verlustfreie Entlastungsschaltung für die hart-geschalteten Gleichrichterelemente von pulsweitenmodulierten Gleichspannungswandlern präsentiert, welche die Schwingungsenergie aus dem Kern der magnetischen Komponente entzieht und zur weiteren Verwendung zur Verfügung stellt.

Des Weiteren ist ein pulsweitenmodulierter Gleichspannungswandler mit Zwei-Wicklungstransformator und einem Ausgangsfilter zweiter Ordnung in Hinsicht auf Energieeffizienz optimiert. Das Optimierungsziel ist eine maximale Effizienz von 99% unter weiterer Berücksichtigung der Teillast-Effizienz. Die analytischen Modelle, der realisierte Prototyp sowie die Validierungsmessungen sind im Detail in Kapitel 3 präsentiert. Darüber hinaus werden die Sensitivitäten der resultierenden Performance bezüglich der Komponentenparameter untersucht. Der Einfluss der Modellgenauigkeit auf die optimalen Designparameter wird in Kapitel 4 evaluiert und ein Ausblick auf weitere Forschungen gegeben.