



Doctoral Thesis

## Ultra-flat isolated single-phase ac-dc converter systems

**Author(s):**

Marxgut, Christoph Berndt

**Publication Date:**

2013

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-009944051> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 20946

**ULTRA-FLAT ISOLATED  
SINGLE-PHASE AC-DC  
CONVERTER SYSTEMS**

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES

presented by  
CHRISTOPH BERNDT MARXGUT  
Dipl.-Ing., TU Wien  
born 20<sup>th</sup> December, 1981  
citizen of Dornbirn, Austria

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. J. W. Kolar, examiner  
Prof. Dr. P. Mattavelli, co-examiner

2013

# Abstract

Ultra-flat power converter systems are highly demanded in modern applications, such as flat-screens, (O)LED lighting systems, smart surfaces, or automotive applications. The research in power electronics, however, has generally focused on cuboid-shaped converter systems as these shapes enable to use optimal components concerning efficiency and/or power density which are important figures of merit to quantify and compare the performance of power converters. For ultra-flat converters, however, high performance standard components are not applicable or available and thus the high efficiency of conventionally shaped systems might not be achieved. Nevertheless, the large surface area of an ultra-flat power converter comprises a superior cooling capability compared to cuboid-shaped systems and the lower efficiency might not compromise the power density. Obviously, the translation of figures of merit from conventionally shaped to ultra-flat systems is not directly feasible anymore and ultra-flat systems call for a distinct analysis related to the achievable performance.

This thesis analyzes the implications of an extreme height limitation of 1 mm on the converters efficiency and its power density presented for the example of a typical single-phase PFC rectifier with an output power of 200 W. In order to achieve the low thickness each component has to be integrated into the printed circuit board (PCB). **Chapter 1** presents a review of integration principles for power components which shows that sophisticated integration methods for capacitors and semiconductors already exist. The integration of magnetic components, however, remains to be solved in order to manufacture a 1 mm thin rectifier.

Besides the PCB-integration of power components also a thorough topology selection is crucial to build an ultra-flat rectifier. **Chapter 2** details the requirements on the topology based on the implications imposed by the PCB-integration. Based on this discussion, two topologies are identified to be suitable for the realization of a 1 mm thin PFC rectifier: a totem-pole-based boost-type rectifier discussed in **Chapter 3** and a flyback-type PFC rectifier presented in **Chapter 4**. Both topologies enable soft-switching which allows for a high switching frequency and therefore small passive components. Low switching losses are of particular interest as the generated power loss of each component has to be transferred through the PCB to the ambient. Furthermore, the proposed topologies allow to employ several paralleled and interleaved converter cells which utilize the superior cooling capability imposed by

---

the large surface as the power losses are distributed over the area. For both topologies, the analysis, the design, and the control are described and validated by measurement results. For the boost-type rectifier a new modulation scheme is proposed which allows for ZVS over the entire mains period. For it, the nonlinearity of the MOSFETs' output capacitances has to be considered and a novel modeling approach is derived which includes this nonlinearity. The flyback converter is designed with respect to the implications imposed by the PCB-integration of the flyback transformer which is realized based on the design procedure presented in the next chapter.

The integration of the magnetic core into the PCB and windings composed of tracks and vias enable the implementation of extremely thin inductors and transformers. For it, specific implications concerning the anisotropy of the material, the allowable core losses per area, the isolation between the magnetic sheets, or the reluctance of the component have to be considered. **Chapter 5** presents a holistic design procedure for PCB-integrated inductors and transformers which takes all these specific properties into account. Measurements on a prototype of a PCB-integrated flyback transformer are used to validate the procedure.

In order to comply with international standards, a PFC rectifier requires an EMI filter. Conventionally employed EMI filters typically consist of small filter capacitances in order to keep the reactive power consumption low. To achieve the required attenuation large filter inductors are applied.

The PCB-integration of the cores limits the choice of applicable materials and a sophisticated core manufacturing process is needed as short-circuits between the magnetic foils result in an eddy-current caused impedance drop at higher frequencies which degrades the filter performance. The specific implications on the design of an ultra-flat EMI filter are presented in **Chapter 6**.

**Chapter 7** of the thesis presents a conclusion of the achieved results and an outlook on topics for the continuation of research on ultra-flat PCB-integrated converter systems.

# Kurzfassung

Die Nachfrage nach ultra-flachen leistungselektronischen Schaltungen für moderne Anwendungen, wie beispielsweise Flachbildschirme, (O)LED Beleuchtungen oder in der Automobilindustrie, ist hoch und ständig steigend. Der Fokus im Bereich leistungselektronischer Forschung lag bislang jedoch auf würfel- oder quaderförmigen Konvertern, die sich aus der Verwendung der jeweils optimalen Bauteile bezüglich Effizienz und/oder Leistungsdichte, die oft als wichtige Vergleichsparameter der Funktionalität eines Konverters angegeben werden, ergeben. Die spezifischen Bauelemente sind jedoch auf Grund ihrer Grösse für ultra-flache Systeme nicht mehr anwendbar, was dazu führt, dass das Effizienzniveau konventionell geformter Konverter nicht gehalten werden kann. Die flache Struktur bietet jedoch eine verhältnismässig grosse Oberfläche, die vorteilhaft für die Abführung der verursachten Verluste verwendet werden kann. Die Leistungsdichte des Konverters bleibt dadurch trotz der geringeren Effizienz unbeeinflusst. Allerdings können die bisherigen Betrachtungen bezüglich verschiedener Schlüsselkriterien von Leistungskonvertern nicht unmittelbar auf ultra-flache Systeme übertragen werden und eine separate Analyse der erreichbaren Funktionalität in Hinblick auf die Dicke des Systems ist notwendig.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluss einer Höhenlimitierung des Gesamtsystems von 1 mm auf die Effizienz und die Leistungsdichte beispielhaft an einem einphasigen Gleichrichtersystems mit sinusförmigem Eingangsstrom und einer Ausgangsleistung von 200 W analysiert. Die extrem geringe Dicke des Konverters kann nur erreicht werden, wenn alle Komponenten in die Leiterplatte integriert werden. In diesem Kontext beschreibt **Kapitel 1** moderne Integrationsmethoden für die erforderlichen Bauelemente eines Leistungskonverters und es zeigt sich, dass Kondensatoren und Leistungshalbleiter durch ausgeklügelte Techniken in die Leiterplatte integriert werden können. Die Integration magnetischer Komponenten hingegen ist bislang nicht gelöst und erfordert die Erarbeitung geeigneter Lösungen, um einen Gleichrichter mit einer Dicke von nur 1 mm realisieren zu können.

Neben der Integration aller Komponenten in die Leiterplatte, stellt die Topologieauswahl einen weiteren wichtigen Punkt für die Realisierung des 1 mm dünnen Konverters dar. **Kapitel 2** stellt wichtige Aspekte mit Hinblick auf die extreme Höhe vor und identifiziert zwei Topologien, die sich als besonders vorteilhaft erweisen: Ein, von einer Hochsetzstellertopologie abgeleiteter Gleichrichter wird in **Kapitel 3**

---

diskutiert während ein, auf einem Flyback-Konverter basierender Gleichrichter in **Kapitel 4** präsentiert wird. Beide Topologien ermöglichen weiches Schalten, was eine hohe Schaltfrequenz und demzufolge kleine passive Bauteile erlaubt. Des Weiteren können die Topologien in mehrere parallel und zeitversetzt betriebene Teilsysteme unterteilt werden, was zur vorteilhaften Ausnutzung der guten thermischen Eigenschaften des ultra-flachen Volumens führt.

Entwurf und Reglerdesign beider Systeme werden beschrieben und durch Messungen an Prototypen verifiziert. Für den hochsetzstellerbasierenden Gleichrichter wird eine neues Modulationsverfahren vorgestellt, das weiches Schalten über die gesamte Netzperiode erlaubt. Die Modulation basiert auf einer detaillierten Beschreibung der nichtlinearen Ausgangskapazitäten der verwendeten MOSFETs und diesbezüglich wird ein neues Model für diese Nichtlinearität erarbeitet und erläutert. Bei der Auslegung des Flyback-Konverters werden besonders die Einflüsse eines leiterplatten-integrierten Transformators berücksichtigt. Der Flyback-Transformator ist dabei basierend auf der in **Kapitel 5** vorgestellten Entwurfsmethode in die Leiterplatte integriert.

Die Integration des magnetischen Kerns in die Leiterplatte und die Realisierung der Wicklungen durch Leiterbahnen und Durchkontaktierungen erlauben den Aufbau magnetischer Komponenten extremer geringer Dicke. Das Design allerdings erfordert die Berücksichtigung verschiedener Effekte, die in Zusammenhang mit der Integration auftreten. Beispielsweise müssen die Anisotropie des Kernmaterials, die maximal zulässige flächenbezogene Verlustleistungsdichte, die Isolation zwischen den Kernschichten oder ein durchdachtes Reluktanzmodel des Kerns im Entwurf des magnetischen Bauteils berücksichtigt und eingearbeitet sein. **Kapitel 5** stellt daher einen gesamtheitlichen Designablauf für den Entwurf einer leiterplatten-integrierten Spule oder eines integrierten Transformators vor, der die erwähnten Besonderheiten mit einbezieht. Die theoretischen Überlegungen werden durch Messungen an einem Prototypen bestätigt.

Internationale Standards bezüglich der Netzqualität erfordern ein EMV Eingangsfilter eines aktiven Gleichrichters. Um die Blindleistungsaufnahme zu minimieren, verwenden herkömmlich entworfene EMV Filter möglichst kleine Kapazitäten, während grosse Filterspulen eingesetzt werden, um die erforderliche Dämpfung zu erreichen. Die Integration der magnetischen Kerne beschränkt jedoch die Auswahl der verfügbaren Materialien und die fertigungstechnischen Anforderun-

---

gen an die Kernherstellung sind für EMV Spulen besonders hoch, da Kurzschlüsse zwischen magnetischen Folien Wirbelströmen hervorrufen, die zu einer Verringerung der Impedanzen und demzufolge der Filterdämpfung insbesondere bei hohen Frequenzen führen. Die spezifischen Einflüsse der Leiterplatten-Integration auf den EMV Filterentwurf werden in **Kapitel 6** beschrieben.

Abschliessend werden die erzielten Resultate dieser Arbeit in **Kapitel 7** zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftige Forschungsthemen und Anwendungen ist gegeben.