

1. Einleitung

Zukünftige Verkehrsflugzeuge müssen infolge steigender Treibstoffpreise und zunehmender Umweltauflagen deutlich strengere ökonomische sowie ökologische Anforderungen erfüllen als derzeitige Flugzeuge. Diese Ziele erfordern eine Steigerung der Effektivität und Effizienz der zugrundeliegenden Systementwicklungen in der Luftfahrt [1,2]. Der Schwerpunkt liegt dabei in der zunehmenden Elektrifizierung zukünftiger Flugzeuge [3,4]. Die Integration von Brennstoffzellen als umweltschonender Ersatz zur herkömmlichen ineffizienten, lauten und kerosinbetriebenen Gasturbine (engl. Auxiliary Power Unit, APU) für die elektrische Bordenergieversorgung ist ein möglicher Ansatz [5,6]. Die benötigten leistungselektronischen Wandler unterliegen den Rechtsvorschriften und Normen der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV), die den störungsfreien Betrieb elektrischer und elektronischer Komponenten sowie Systeme in Bezug auf elektromagnetische Interferenzen sicherstellen [7–10]. Die EMV - Maßnahmen sind unter dem Aspekt der Effektivitäts- und Effizienzsteigerung nicht mit Standardlösungen zu erreichen, sondern erfordern eine optimierte Lösung, die hinsichtlich eines oder mehrerer Kriterien optimal auf den Anwendungsfall hin ausgelegt wird.

Die hohe Anzahl an Veröffentlichungen [11–24] zeigt das große Forschungsinteresse am gezielten und optimierten Entwurf von EMV - Filtern zur Einhaltung gängiger Normen. Sie beschränken sich einerseits auf die möglichst genaue Vorhersage und Modellierung der filtereigenen parasitären Elemente bzw. optimieren diese Modelle hinsichtlich des benötigten Rechenaufwands [12, 15, 19, 20]. Andererseits werden erweiterte Wandlertopologien und EMV - Messszenarien vorgeschlagen, um die Systemimpedanzen und Verhaltensmodelle der leistungselektronischen Wandler und Halbleiter abzuschätzen [14, 17, 19, 20]. Eine übergeordnete Methodik fehlt, sodass zum zielgerichteten und optimalen Entwurf von EMV - Filtern durch die vorliegende Arbeit ein geeigneter Entwurfsprozess am Beispiel moderner Verkehrsflugzeuge entwickelt und dadurch die Lücke geschlossen werden soll. Dieser hat neben der Konzentration auf neuartige Filtertopologien und Bauelemente zum Ziel, den Zusammenhang zwischen Filterwirkung und Filterumgebung zu untersuchen sowie die oftmals rein messtechnische und empirische Vorgehensweise bei der Filterauslegung durch gezielte Systemmodellierungen und Simulationen zu unterstützen. Hierbei erfolgt die Einschränkung auf leitungsgeführte elektromagnetische Störungen, die für die untersuchte Gleichspannungswandlertopologie die schwerwiegendste Problematik darstellt.

Diese Arbeit konzentriert sich auf die Konzepterarbeitung zwischen theoretischer Beschreibung und funktionaler Modellierung in der Simulation sowie einem experimentellen Vorgehen zur Verifikation der Ansätze. Die aufgezeigten Herangehens- und Beschreibungsweisen sind auf andere Anwendungen und Systeme übertragbar. Die angesprochene Brennstoffzelle in Bild 1.1 mit dem zugehörigen Gleichspannungswandler in Flugzeugen dient als Beispielapplikation für die entwickelte EMV - Methodik mit den drei Abstraktionsebenen **Systembeschreibung**, **Schaltungsanalyse** sowie **Bauelementeauswahl**.

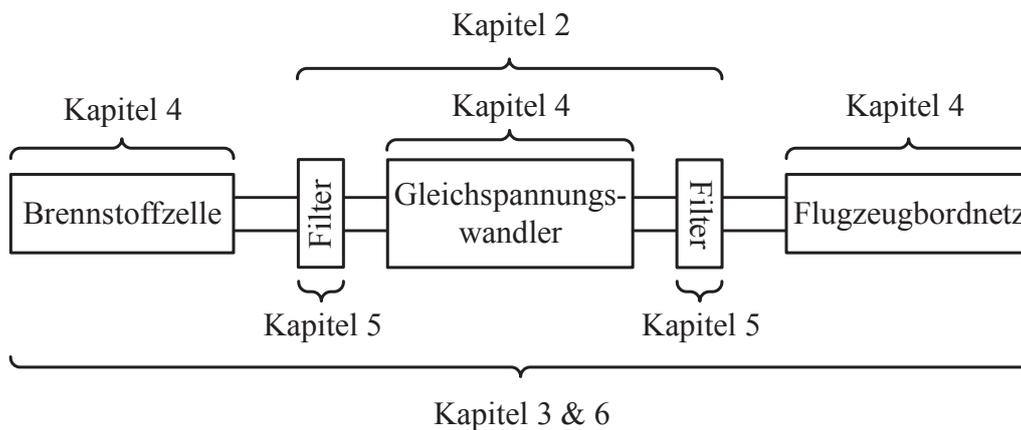


Bild 1.1.: Vorgehensweise innerhalb der Arbeit

Dabei werden in **Kapitel 2** die Ziele und Anforderungen der Luftfahrtforschung in Hinblick auf Flugzeugneuentwicklungen kurz umrissen und eine mögliche Umsetzung auf Basis eines Brennstoffzellensystems vorgestellt. Anschließend sind die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten, Definitionen und Messmethoden bei der Untersuchung elektromagnetischer Störungen im Bereich der Leistungselektronik zusammengefasst.

Ausgehend vom Stand der Technik in **Kapitel 3** wird die Notwendigkeit einer optimalen und anwendungsbezogenen EMV - Filterentwurfsmethodik mit drei Abstraktionsebenen abgeleitet. Von den analysierten Einflussparametern der Teilsysteme fließen die Erkenntnisse in ein hierarchisches Modell der elektromagnetischen Störbeeinflussung auf der Grundlage der erörterten Luftfahrtanwendung ein. Ziel ist es, auf jeder einzelnen Ebene die Ansätze der funktionalen Modellierung zu bewerten.

In **Kapitel 4** liegt zunächst der Fokus auf der Parametrisierung und funktionalen Beschreibung der Teilsysteme. Dazu werden auf der oberen Abstraktionsebene die Brennstoffzelle als Quelle, der Gleichspannungswandler als Übersetzungskomponente sowie das Flugzeugbordnetz als Last modelliert. Aus dem Gesamtsystemmodell werden Vorhersagen der EMV - Störungen abgeleitet und mit den analytischen Lösungen verglichen. Ziel ist hierbei, ein Simulationsmodell mit hinreichend genauen Ergebnissen bezüglich emittierter leitungsgebundener EMV - Störungen zu entwickeln.

Die erforderlichen Entstörmaßnahmen als mittlere Ebene sind Schwerpunkt in **Kapitel 5**. Es erfolgt zunächst eine Beschreibung der Einflussmöglichkeiten der Systemimpedanzen auf die Filterwirkung passiver Strukturen. Anschließend wird die Zusammenschaltung aktiver und passiver Topologien hin zu einer hybriden Filterstruktur herausgearbeitet. Die generierten Vorteile werden dazu genutzt, dieses Konzept im Rahmen der Arbeit für Gleichspannungswandler weiterzuentwickeln und entsprechend analytisch, simulativ am entwickelten Gesamtsystemmodell und messtechnisch zu diskutieren.

Ergänzend zu den theoretischen Überlegungen und den dadurch gewonnenen Erkenntnissen auf der Ebene der Systembeschreibung und der Schaltungsanalyse werden diese in **Kapitel 6** auf den Anwendungsfall erweitert und vervollständigen durch experimentelle Messungen an einer Validationsplattform diese Arbeit. Dazu wird ein Echtzeitsimulationssystem mit dem Ziel einer möglichst getreuen Nachbildung der wechselnden elektrischen Zustände während eines Flugs aufgebaut. Zusammen mit dem dafür ausgelegten und entworfenen Gleichspannungswandler werden passive Filtertopologien aus der Simulation getestet und der Nachweis der Wirksamkeit des entwickelten hybriden Filterkonzepts überprüft. Hierzu wird eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Bauelemente auf der unteren Abstraktionsebene gewählt, um den zielgerichteten und optimalen Entwurf von EMV - Filtern auf Komponentenebene abzuschließen.

Die Arbeit schließt in **Kapitel 7** mit einer Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse und gibt einen Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungen auf diesem Gebiet.