# Schlussbericht

zum Vorhaben

## Luftfahrtgerechte Leistungselektronik, Leistungsverteilung und Steuerung für hybrid-elektrische Antriebssysteme

**zugehörig zum Verbundvorhaben**

**TELEV** **T**echnologische Befähigung hybrid-**e**lektrischer Antriebssysteme für bemannte Fluggeräte durch die Erforschung luftfahrtgerechter **Le**istungselektronik, Leistungs**v**erteilung und Steuerung


Zuwendungsgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, BMWK

Zuwendungsempfänger: **Liebherr-Electronics and Drives GmbH**
Peter-Dornier-Straße 11
88131 Lindau

Förderkennzeichen: **20M1917A**

Laufzeit: 01.09.2020 bis 31.05.202

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages


| SIGNATURE-TYPE | ROLE | NAME | DATE | SIGNATURE |
|---|---|---|---|---|
| Prepared | Projektleiter/ Programmmanager | Dr. Nejat Mahdavi | 20.08.2024 | |
| Approved | Abteilungsleiter CE | Dr. Alfred Engler | 20.08.2024 | |

**Diese Seite wurde absichtlich**

**leer gelassen**

# Inhaltsverzeichnis

**1 Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse ..... 4**

**1.1 Übersicht und Aufgabenstellung ..... 4**

**1.2 Bisherige Arbeiten und Voraussetzungen ..... 4**

**1.3 Planung und Ablauf des Projekts ..... 5**

**1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens ..... 6**

**1.5 Zusammenarbeit mit Dritten ..... 6**

**2 Eingehende Darstellung ..... 7**

**2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses ..... 7**

2.1.1 HAP 1 ..... 7

2.1.2 HAP 2 ..... 9

2.1.3 HAP 3 ..... 10

2.1.4 HAP 4 ..... 15

2.1.5 HAP 5 ..... 17

**2.2 Voraussichtliche Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse ..... 18**

# 1 Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Dieses Dokument ist der Schlussbericht der Liebherr-Electronics and Drives GmbH für das LuFoVI-1 Vorhaben „Luftfahrtgerechte Leistungselektronik, Leistungsverteilung und Steuerung für hybrid-elektrische Antriebssysteme (TELEV). TELEV ist ein Verbundvorhaben mit dem Verbundtitel „**T**echnologische Befähigung hybrid-**e**lektrischer Antriebssysteme für bemannte Fluggeräte durch die Erforschung luftfahrtgerechter **Le**istungselektronik, -**v**erteilung und Steuerung“.

## 1.1 Übersicht und Aufgabenstellung

Das Ziel dieses Vorhabens ist die Entwicklung und Befähigung von Technologien der elektrischen Energieversorgung und Antriebstechnik für den Einsatz in hybrid-elektrischen Antriebssystemen für bemannte Fluggeräte. Die technologische Befähigung zielt ab auf die systematische Untersuchung von Technologien, die notwendig sind, um derartige Konfigurationen auf das für die Luftfahrt notwendige Leistungsniveau zu bringen. Dabei wird eine weitere Elektrifizierung von Luftfahrzeugen insbesondere im Bereich des Hauptantriebs wesentlich zur Reduktion von $CO_2$, NOx und Lärmemissionen beitragen und ist somit eine Schlüsseltechnologie für emissionsfreie Luftfahrzeuge der Zukunft. Konkret sollen leistungselektronische Systeme den Weg für disruptive Flugzeugkonfigurationen mit geringstem ökologischem Fußabdruck bereiten, da diese Kernbestandteile innovativer hybridelektrischer Antriebssysteme sind. Hierzu werden gezielt Technologien für luftfahrtgerechte Leistungselektronik und -verteilung sowie Steuerungen erforscht. Leistungselektronik und –verteilungskomponenten sollen insbesondere hinsichtlich der wesentlichen Kennzahlen Leistungsdichte, Effizienz und Sicherheit optimiert und die Erreichbarkeit der für einen Entry-into-Service benötigten Werte validiert werden. Für die Steuerung gilt es im Besonderen eine Plattform zu entwickeln, welche die Sicherheitsanforderungen erfüllt und eine spätere Zertifizierbarkeit ermöglicht.

## 1.2 Bisherige Arbeiten und Voraussetzungen

Die LED befasste sich im Rahmen der Forschungsvorhaben MOET, Systavio und EMA mit der Entwicklung von Leistungselektroniken für elektrische Verbraucher sowie von Leistungsverteilungskomponenten, jedoch mit niedrigen Leistungen. Auch im Bereich Steuerung hat LED in mehreren Forschungsaktivitäten teilgenommen (EMA, AVATAR) und sich mit Steuerungsarchitekturen und Prozessortechnologien befasst.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen und Erfahrungen wird das Know-How im Bereich performante Leistungsverteilung und Leistungselektronik für höhere Spannungs- und Leistungsklassen sowie neuartige Prozessoren in Hinblick auf die Sicherheitsaspekte und Wirtschaftlichkeit eingebracht.

Des Weiteren bringt die LED ihre Expertise im Gebiet des Entwurfs von Signal- und Leistungselektronik aus den vielfältigen Kundenprodukten, für z.B. Airbus A350, Boeing 787 oder Embraer E-Jets, ein.

Im Rahmen dieses Projektes soll daher wie in der nachfolgenden Abbildung gezeigt der Fokus auf die Technologieerforschung in den Feldern Leistungselektronik, Leistungsverteilung, sowie Steuerung gelegt werden.

Wichtige Voraussetzungen für die erfolgreiche Durchführung des Projekts waren der Austausch mit den Partnern, insbesondere bei der Erstellung der applikationsrelevanten Spezifikationen und Anforderungen für Antriebskomponenten, Leistungsverteilung und Steuerung.

## 1.3 Planung und Ablauf des Projekts

Das Vorhaben TELEV wurden im Jahr 2019 geplant. Im selben Jahr wurde der Antrag zur Förderung im Rahmen von LuFoVI-1 eingereicht. Die Bewilligung zur Förderung erfolgte mit Wirkung zum 01.09.2020.

Abbildung 1 zeigt die Arbeitspaketstruktur im Projekt TELEV. Die Arbeitspakete der Liebherr-Electronics and Drives GmbH (LED) sind mit rot hervorgehoben.

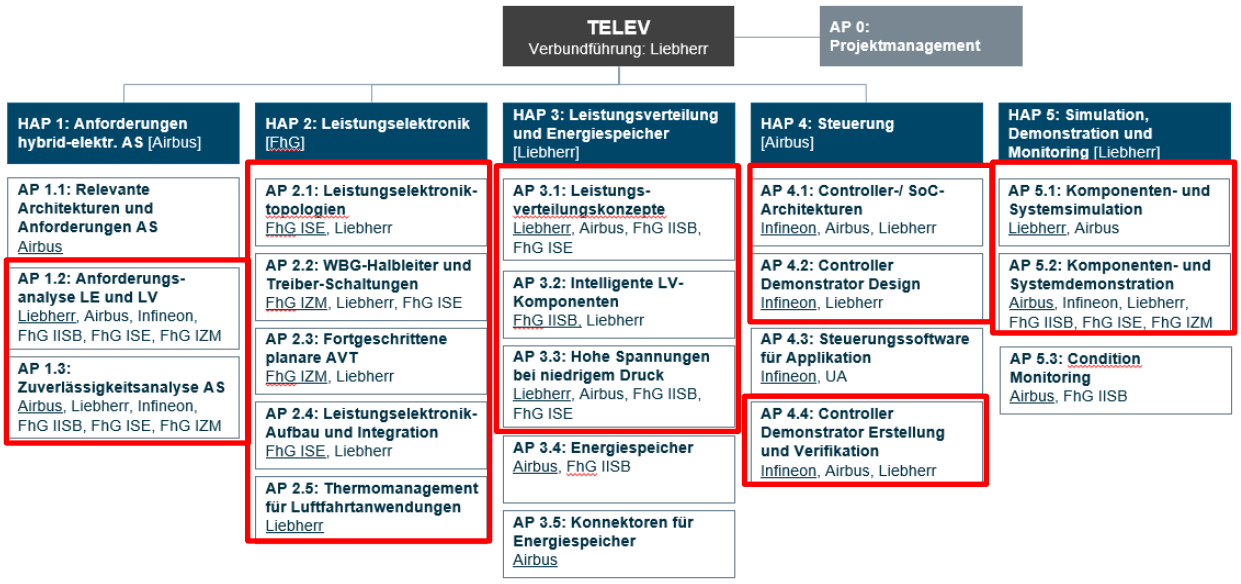


**Abbildung 1:** Projektstrukturplan

Im ersten Hauptarbeitspaket HAP1 wurden die Anforderungen an Leistungselektronik, -verteilung und Steuerung für hybrid-elektrische Antriebssysteme analysiert. Leistungselektronik und -verteilung sind insbesondere von der gewählten Systemspannungsebene beeinflusst. In HAP 1 wurden die Spezifikationen für anschließende Untersuchungen und Umsetzungen von Technologieträgern festgelegt.

Das HAP2 widmete sich der Erforschung technologischen Befähigung für luftfahrtgerechte Leistungselektronik und nimmt einen wesentlichen Schwerpunkt in dem Vorhaben ein. Ausgehend von Topologien für Leistungselektronik wurden Einzeltechnologien wie Wide Bandgap (WBG)-

Halbleiter und Treiber-Schaltungen sowie fortgeschrittene Aufbau und Verbindungstechniken untersucht und in Technologieträgern umgesetzt. Eine wichtige Rolle spielen zudem die Hochintegration und das Thermomanagement der Leistungselektronik.

Die technologischen Befähiger für luftfahrtgerechte Leistungsverteilung wurden in HAP 3 bearbeitet. Hierbei liegt ein Schwerpunkt auf der Untersuchung intelligenter Leistungsverteilungskonzepte sowie der Umsetzung intelligenter Leistungsverteilungskomponenten. Ein weiterer Arbeitsinhalt war die Untersuchung der Auswirkung hoher Spannungen bei niedrigem Druck. Schwerpunkt der Liebherr-Electronics and Drives GmbH waren hier insbesondere die sogenannten Solid State Power Controller und die Weiterentwicklung von Schutzkonzepten.

Im vierten HAP wurden Steuerungen für Luftfahrtanwendungen untersucht. Neben der Untersuchung neuartiger Steuerungsarchitekturen unter Berücksichtigung der hohen Sicherheitsanforderungen wurde ein Hardware- und Software-Demonstrator entwickelt sowie Steuerungssoftware für die Anwendung für exemplarische Applikationen erstellt.

Das fünfte HAP beinhaltet die Entwicklung und Anwendung von Verfahren für Simulationen zur Befähigung einer agilen, modellbasierten Technologieentwicklung und –validierung sowie für Condition Monitoring in Luftfahrtanwendungen. Auch die Demonstration der Projektergebnisse erfolgte in diesem Arbeitspaket.

### 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Es wurden bereits Es wurden schon einige rein elektrisch angetriebene Flugzeuge demonstriert, wobei es sich hierbei um Kleinflugzeuge mit geringer Spannungs- bzw. Leistungsklasse der elektrischen Komponenten handelt. Für zukünftige Luftfahrzeuge werden aber höhere Spannungs- und Leistungsklasse sowohl bei den elektrischen Verbrauchern aber auch bei der Leistungsverteilung benötigt.

Im Bereich Steuerelektronik hat Liebherr bisher bei der Produktentwicklung die bekannten Architekturen und die Luftfahrttauglichen Prozessoren eingesetzt, die aus wirtschaftlichem Gesichtspunkt optimierungsbedürftig waren.

### 1.5 Zusammenarbeit mit Dritten

Außer den Projektpartnern im TELEV-Konsortium hat LED mit Liebherr-Aerospace Toulouse und Airbus Toulouse Erfahrungsaustausch hinsichtlich der Sicherheitsrelevante Applikation von Multicore-Prozessoren (HAP4) durchgeführt. Ziel der Erfahrungsaustausch war die Analyse der Luftfahrtanforderungen an Development Assurance Level (DAL) und Konformität mit DO-254.

# 2 Eingehende Darstellung

## 2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses

### 2.1.1 HAP 1

Das erste Projektjahr 2020 wurde in erster Linie zur Analyse der Spezifikation und Herleitung der Anforderungen genutzt. Ausgehend von der Systemarchitektur, die von Airbus bereitgestellt wurde, wurden im zweiten Projektjahr 2021 schrittweise die Anforderungen für

- das Antriebssystem, und dessen Komponenten (Wechselrichter, elektrische Maschine)
- die elektrischen Subsysteme (vor allem Inverter für elektrische Verbraucher),
- die Leistungsverteilung, und
- die Steuerung

analysiert. Insbesondere wurden die Anforderungen an die Spannungspegel und die entsprechenden Antriebskomponenten, Verteilungssystem und Steuerung identifiziert und abgeleitet. Der Anforderungskatalog wurde entlang der Projektlaufzeit kontinuierlich weiter aktualisiert.

Im Rahmen diese Arbeitspaket hat sich LED zusätzlich mit dem Thema Stabilisierung der HVDC-Netze in zukünftigen elektrischen und Hybrid-elektrischen Luftfahrzeugen beschäftigt.

Abbildung 2 stellt ein vereinfachtes HVDC-Netz dar. Es ist durch Verbraucher (Utilization Equipment) und durch Energiequellen (Electrical Power Sources) gekennzeichnet. Die Komponenten können weitere Verbraucher oder Quellen sein. Da es sich in der Regel um elektronische Quellen und Senken handelt, die in der Regel nichtlinear und teilweise sogar mit negativen Innenwiderständen behaftet (Constant Power Load: CPL) sind, muss die HVDC-Netz-Stabilität sichergestellt werden. Diese Stabilität soll „universell“ sichergestellt werden, so dass nicht bei jeder Systemänderung eine Neuauslegung für das Gesamtsystem erforderlich wird.

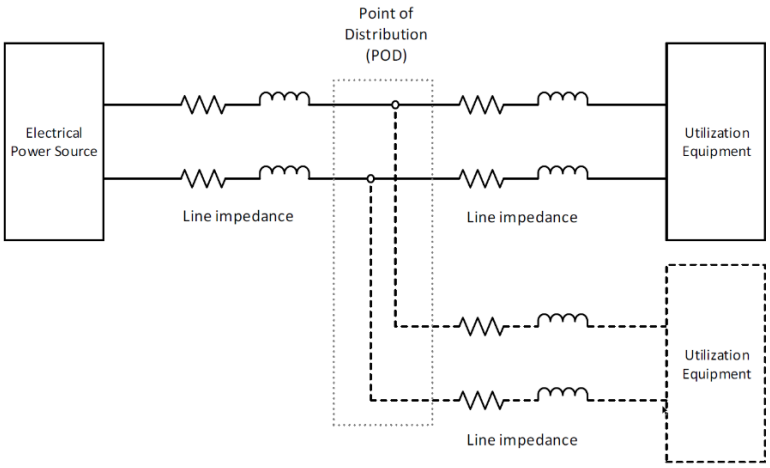


**Abbildung 2:** Generisches HVDC-Netz (Balance of Plant)

Typischerweise wurde in Zusammenarbeit mit Projektpartner in der Luftfahrt (europäische Cleansky Programme) als Lösung das Middlebrook-Kriterium (Vergleich von Koppel-impedanzen) herangezogen, das bekannterweise zu sehr aufwändigen (schwer und groß) Lösungen führt. Bei Wechselrichtern in der 50 kW-Klasse machte dieses Filter (Abbildung 3) ca. 30 % des Gesamtgewichtes des Wechselrichters aus und war über alle Lastfälle (insbesondere bei Motorantrieben mit negativem Eingangswiderstand) sehr schwer auszulegen und wies hohe elektrische Verluste auf.

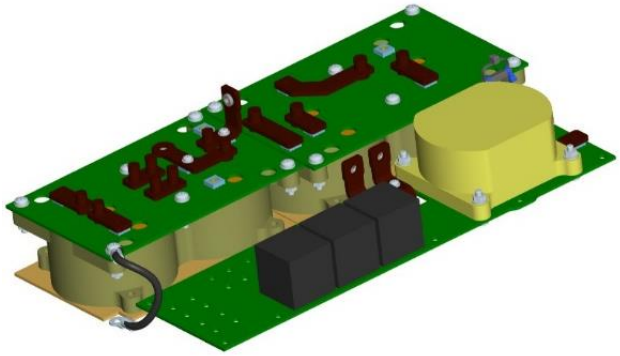

**Abbildung 3:** HVDC-Filter 45 kW / 540 V (LED: Cleansky II)

Vielversprechender ist das bei den DC-Microgrids favorisierte Passivitäts-Kriterium, das keine Pole in der rechten Hälfte (positiver Realanteil in Übertragungsfunktion) und einen Phasenbereich von 90° bis -90° fordert. Alle Komponenten, die dieses Kriterium erfüllen, können verschaltet werden und das System bleibt stabil.

Herausfordern wird auch hier das Betreiben von z. B. Antrieben, die als Konstantleistungslast (CPL) einen negativen Widerstand haben. Diesem Sachverhalt kann in den Quellen durch Einfügen von sogenannten Droop-Regelungen (virtuelle Erhöhung der Impedanz) in Verbindung mit ausreichenden Pufferkapazitäten zur Verringerung der Verstärkung von Signalen mit einer Frequenz > 0 an den Lasten entgegengewirkt werden. Dies ist auch ein Ergebnis, das in implementierten DC-Microgrids (Fraunhofer IISB, Erlangen) bestätigt werden konnte.

Aus diesem Zusammenhang kann eine weitere Maßnahme abgeleitet werden. Das DC-Verteilsystem kann mit verteilten Kondensatoreinheiten versehen werden, die als „HVDC-Stabiliser“ auch Monitoring-Funktionen insbesondere für die Sicherheitsüberwachung von HVDC-Netzen ermöglichen würden.

Weiteres Stabilisierungspotential für HVDC-Verteilsysteme liegen in der Ausgestaltung der Verteilsysteme (Kabel, Busbars) selbst. Das Ausprägen der elektrischen DC-Leitungen, um den sogenannten Skin-Effekt zu stärken, kann Schwingungen im System dämpfen.

<u>Zusammenfassung</u>

Die Ergebnisse der Analyse lassen sich in den drei folgenden Maßnahmen zusammenfassen:

1. Für die in einem HVDC-System verwendeten Komponenten das Passivitätskriterium zur Komponentenregelung bzw. -stabilisierung verwenden. Die Quellenimpedanzen für Gleichstrom durch Droops erhöhen und ausreichend Kapazität im HVDC-Verteil-System vorsehen.
2. „HVDC-Stabiliser“ einführen. Sie können die stabilisierenden Kapazitäten verteilen und gleichzeitig zur Systemüberwachung eingesetzt werden.
3. Nutzung des Skin-Effektes zur Schwingungsdämpfung im HVDC-Verteilsystem.

Die abgeleiteten Maßnahmen sind im Berichtszeitraum nur qualitativ bewertet worden und müssen in weiteren Arbeiten quantifiziert werden. Das trifft auf die Auslegung von 2.) und 3.) für die Anwendung in räumlich begrenzten Verteilsystemen zu. Außerdem müssen für Standardkomponenten entsprechend 1.) konkrete Regelungsansätze entworfen werden. Dies kann Inhalt von Folgearbeiten sein.

### 2.1.2 HAP 2

AP2.1 – 2.4: Basierend auf die Anforderungsanalyse wurde gemeinsam mit den Partnern Airbus und Fraunhofer Gesellschaften (ISE/IZM) über die generische Spezifikation für eine Leistungselektronik (Motor Control Unit) 100 KVA abgestimmt. Auf Basis dieser generischen Spezifikation entwickeln die Fraunhofer-Gesellschaften ISE und IZM einen Wechselrichter bzw. die entsprechende Halbleiterbaugruppen mit einem planaren Aufbau. Weitere Zusammenarbeit mit den Partnern im Rahmen der Topologieauswahl, Halbleiterbauelemente, Strommessung (Sensorik) sowie Aufbau- und Verbindungstechnik wurde erfolgt.

AP2.5: Thermal Management: Es wurde die ersten Berechnungen für die forcierte Luftkühlung eines 100 kW-Wechselrichters durchgeführt. Bei den Berechnungen wurden verschiedene Betriebsmodi in Betracht gezogen und entsprechende Verlustleistungen berechnet.

Es wurde ein Heat-Sink bestehend aus viele feinen Luftkanälen angeschlossen an einem Lüfter angenommen und wurde mit unterschiedliche Luftmengen sowie Umgebungstemperaturen bewertet.

Die ersten Berechnungen der LED wiesen darauf hin, dass Kühlung eines Wechselrichters mit der Verlustleistung 3 kW (einschl. eingangs- und Ausgangsfilter) mit forcierter Kühlung unter Nutzung der geschlossenen Luftkanäle möglich ist. Die Simulationen mit maximaler Verlustleistung und Umgebungstemperatur zeigten, dass die Außentemperatur des Gehäuses über der maximal zulässigen Grenze liegt. Daher wurde die Wechselrichterschaltung optimiert und die Verlustleistung unter 2 kW gesenkt.

Basierend auf der Schaltungsoptimierung wurden weitere Simulationen durchgeführt. Die Simulationsergebnisse dienten dazu, die notwendige Luftmenge und die Struktur der internen Rippen (Abstände, und Höhe) zu optimieren. Mit Hilfe diese Ergebnisse wurde die Auslegung des Kühlsystems abgeschlossen.

Die Abbildung 4 stellt exemplarisch die Temperaturverteilung auf beiden Seiten des Kühlkörpers bei der maximalen Belastung des Wechselrichters dar.

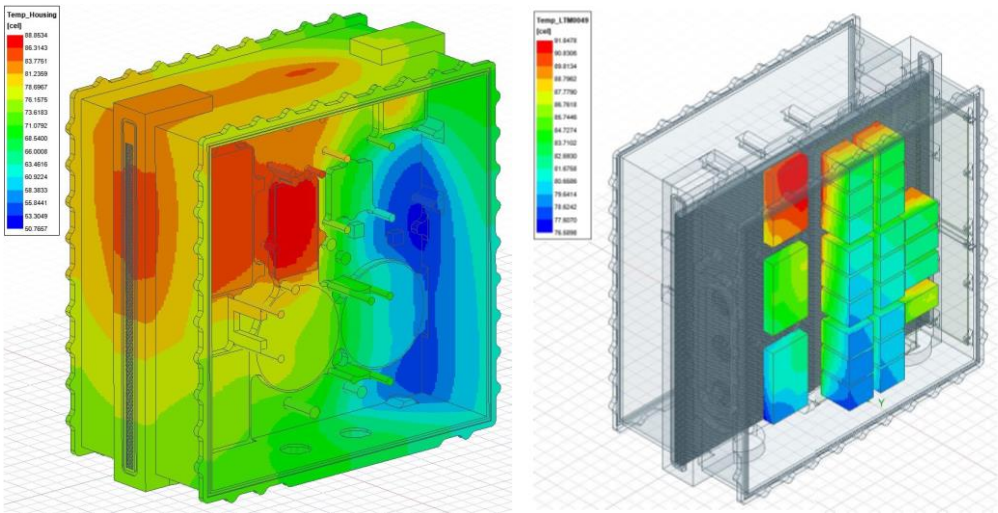

**Abbildung 4:** Temperaturverteilung auf beiden Seiten des Kühlkörpers bei der maximalen Wechselrichterbelastung

### 2.1.3 HAP 3

Nach der Analyse der Anforderungen an zukünftige Schaltelemente in elektrischen Verteilungssystemen wurde der Anforderungskatalog für Leistungsverteilung erstellt und das Konzept für ein Verteilungssystem wurde bearbeitet. Folglich wurde das Konzept-Design für die Schaltelemente eines skalierbaren Leistungsschalters (SSPC) abgeschlossen. Abbildung 5 stellt das Gesamtblockschaltbild des entwickelten SSPCs dar.

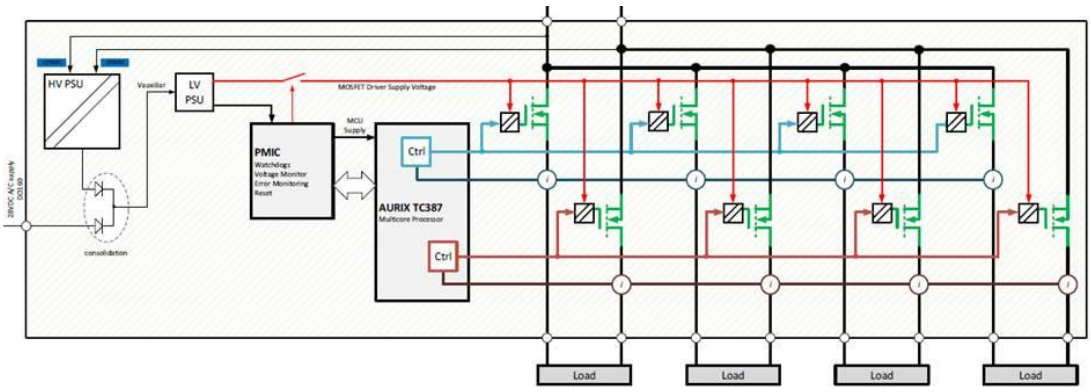


**Abbildung 5:** Das Blockschaltbild des entwickelten SSPCs.

Die laufenden Untersuchungen, die auch Modularität berücksichtigt haben, legen es nahe, bei der SSPC-Entwicklung ein offenes Konzept zu verfolgen. Dieses soll sowohl 115 V AC, 230 V

AC sowie 540 V DC und 800 V DC bei leichter Schaltungsvariation berücksichtigen können. Wir gehen dabei von einer breiteren Verwertungsperspektive der Forschungsergebnisse aus.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurden die geeigneten Komponenten (Halbleiterschalter, Strommessung, Controller) in einen detaillierten Schaltungsentwurf (niedrige Leistungsklasse) identifiziert und festgelegt. Die folgenden Schritte wurden bearbeitet:

- Auslegung der Stromversorgung
- Festlegung der sicherheitskritischen Steuerungsarchitektur in Verbindung zum AP 4.1 auf Aurix-µController-Basis
- Auswahl der leistungselektronischen Komponenten
- Strommesskonzepte und deren Bewertung einschl. Fehlerstrommessung
- Erste Mechanische Integration
- Kühlkonzept und thermische Simulationen

Weiterhin wurde mit Infineon bezüglich des Einsatzes der Aurix-Kerne für die Steuerung in den Leistungsverteilungsanwendungen in Hinsicht auf die Sicherheitskritikalität diskutiert. Es wurden hier die Vorteile der verbesserten Sicherheitsfunktionen der neuen Aurix-Generation in Zusammenarbeit mit Infineon (s. Schlussbericht Infineon) und Airbus bewertet.

Nach der Ausarbeitung des Konzepts für ein Verteilungssystem wurde die Detail-Design-Phase gestartet. Zunächst handelt es sich dabei um die Entwicklung eines 540 V DC Verteilungssystems. Die Detail-Design-Phase hat sich mit den folgenden Schritten befasst:

- Schaltungsentwicklung
- Analyse und Festlegung der $I^2t$ Kurven für verschieden Nennströme
- Mechanik und Aufbau
- Layout
- Fertigung des ersten Demonstrators
- Erste Inbetriebnahme

Parallel dazu wurde einen passenden Steuerelektronik entwickelt, der über einen von Infineon hergestellten Aurix-Mikroconroller verfügt. Bei der Architektur der Steuerelektronik wurden in Zusammenarbeit mit dem Partner Infineon die sicherheitskritischen Aspekte berücksichtigt, die für Luftfahrtanwendungen essenziell sind.

Die Abbildung 6 stellt den entwickelten Leistungsverteilungssystem und der Testumgebung dar.

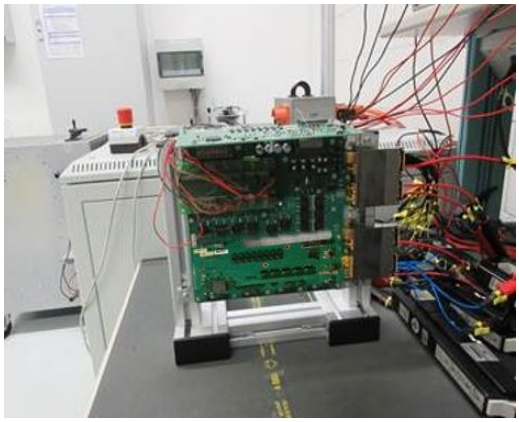

**Abbildung 6:** Das entwickelte skalierbare Leistungsverteilung mit Steuerelektronik.

Nach der ersten Inbetriebnahme befasste sich Liebherr mit den ausführlichen Tests und Untersuchungen bei der entwickelten Leistungsverteilung (SSPC) und Steuerelektronik. Die folgenden Tests wurden durchgeführt um die Eignung des entwickelten SSPC für die Luftfahrtapplikationen zu beurteilen:

- Power Input: DM Spannungstransiente und Spannungsripple
- Power input Steady state (DM Strom-Asymmetrie und DM Stromripple)
- Lightning tests
- Elektromagnetische Verträglichkeit (RF-Susceptibility und RF-Emission)
- Dielectric strength Test
- $I^2t$-Tests
- Kurzschluss- und Überstromtests
- Temperaturtests

Die Abbildung 8 stellt den Versuchsaufbau für die Untersuchung des entwickelten SSPC-Demonstrators dar.

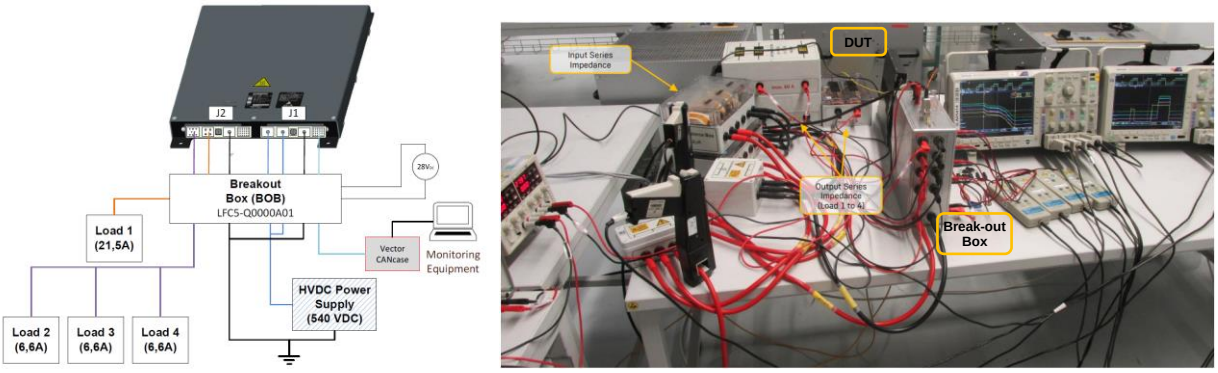


**Abbildung 7**: Der Versuchsaufbau des entwickelten SSPCs.

Die nachstehenden Abbildungen stellen exemplarisch die Testergebnisse von oben aufgeführten Untersuchungen dar.

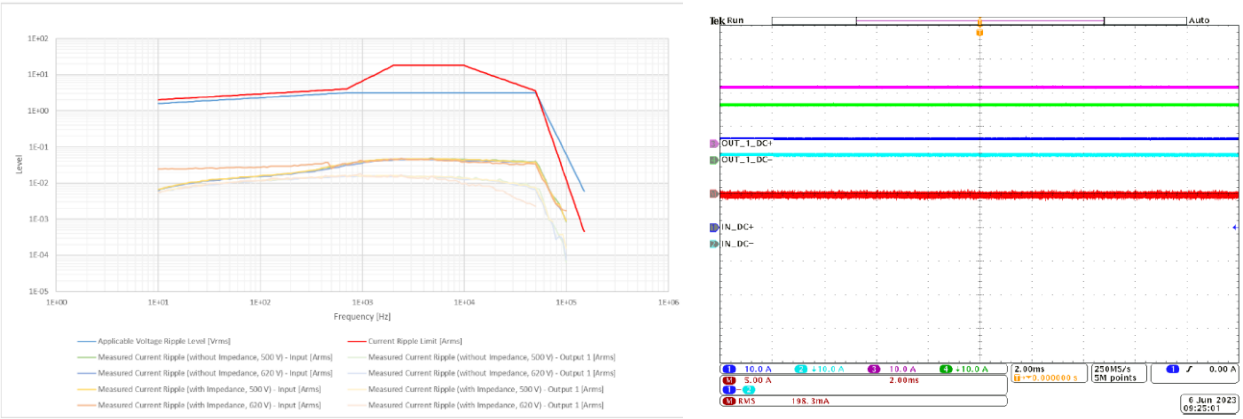


**Abbildung 8**: Untersuchung der Differential-Mode Stromripple (links) und Stromunsymmetrie (rechts)

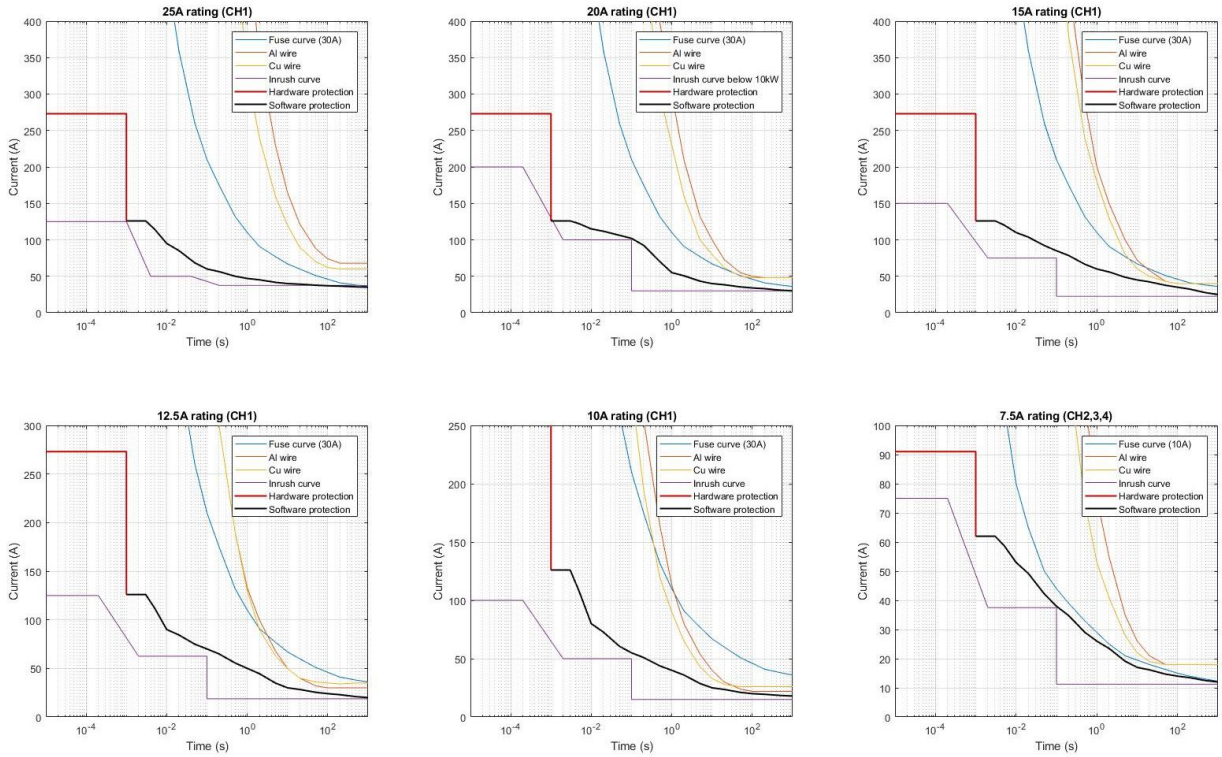


**Abbildung 9:** Untersuchung der I²t-Funktion mit unterschiedlichen Nennströmen

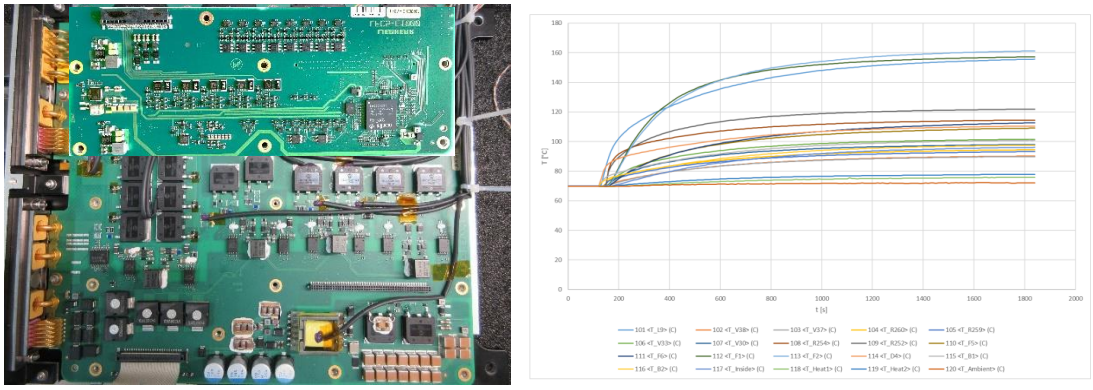

**Abbildung 10:** Temperaturtest bei der Umgebungstemperatur Ta=70; Sensoranordnungen (links), Test-ergebnisse (rechts)

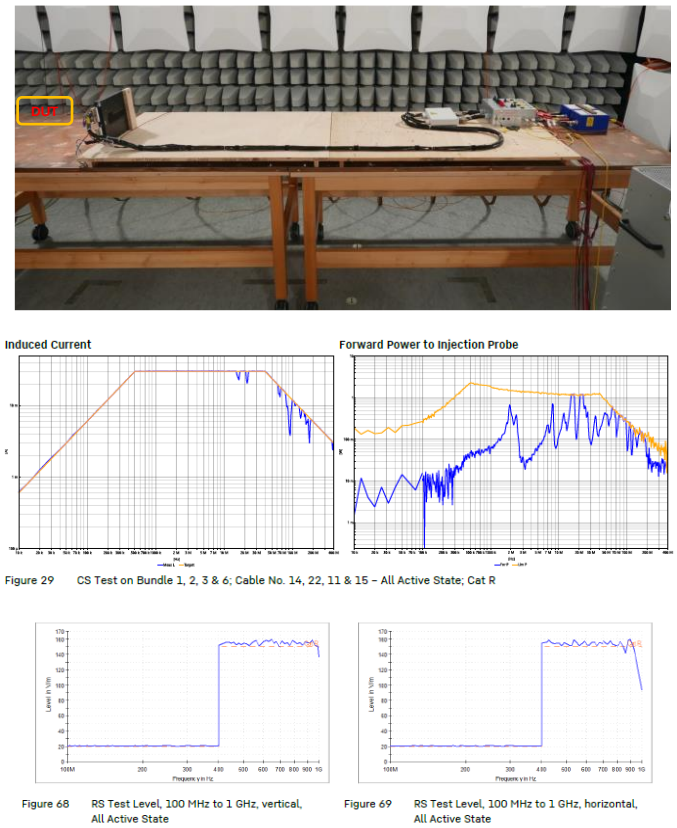


**Abbildung 11:** Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), RF Susceptibility Test; Test setup (oben), Conducted Susceptibility (mitte), Radiated Susceptibilty (unten)

AP 3.3. Hohe Spannungen bei niedrigem Druck: Lichtbögen und Teilentladungen sind wichtige Themen in der Luftfahrtelektronik, da sie die Zuverlässigkeit und Sicherheit von elektrischen Systemen insbesondere bei Hochvolt-Gleichspannungssystemen beeinflussen können. Teilentladungen und Lichtbögen können durch die extremen Bedingungen in der Luftfahrt, wie hohe Spannungen und niedriger Druck, verstärkt werden. Deshalb muss bei dem Einsatz von Hochvoltsystemen besonderes Augenmerk auf Methoden zur Vermeidung und Erkennung von Funkenbildung gelegt werden.

Nach intensivem Informationsaustausch mit dem Partner Fraunhofer ISE zum Thema elektrische Sicherheit und insbesondere zur Erkennung der Funkenbildung, wurden insgesamt acht Methoden in Betracht gezogen und die Anwendbarkeit dieser Methoden in den Luftfahrtanwendungen analysiert. Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden die folgenden Methoden gemeinsam mit ISE in Details analysiert:

- Spannungsdetektion
- Optische Detektion
- RF- Detektion

ISE hat die o. a. Methode in Details untersucht und die Ergebnisse zur Verfügung gestellt. Basierend auf die vorgelegten Ergebnisse hat LED die Eignung der Methode für die Luftfahrtanwendungen analysiert. Es wurde festgestellt, dass die Spannungsdetektion in Verbindung mit dem SSPC eine sinnvolle Methode sein kann. Sensor-Fusion ist sicher eine Möglichkeit, die in zukünftigen Forschungsprojekten betrachtet werden sollte, um im Bereich der Sicherheit des Stromversorgungssystems in zukünftigen Flugzeugen Lichtbögen mit ausreichender Zuverlässigkeit detektieren zu können.

### 2.1.4 HAP 4

Im Rahmen des HAP4 wurden mit dem Partner Infineon Sicherheitsaspekte der neuen Prozessorgeneration und Möglichkeiten, diese im Projekt zur Anwendung zu bringen, analysiert. Die Anwendbarkeit dieser Komponenten, die für sicherheitskritische Automobileapplikationen entwickelt worden sind, wurden für die Luftfahrt geprüft und bewertet.

Nachdem die Sicherheitsaspekte von Leistungsschaltern mit IFAG und Airbus abgestimmt wurde, wurde gemeinsam mit Infineon verschieden Rechenkernarchitektur analysiert und in Hinsicht auf eine mögliche Nutzung der zusätzlichen „Functional Safety“ -Funktionen in der Luftfahrtanwendung bewertet. Das Ziel besteht darin, von einer redundanten Single-Core-Architektur (CON/MON-Architektur) zu einem einzelnen Multicore-Mikrocontroller mit einem Netzteil zu wechseln. Dies führte zu einer Kombination aus dem Aurix Multicore-µController TC387 mit einem PMIC (Power Management IC).

Basierend auf dieser Rechenkernarchitektur hat die LED eine Steuerelektronik entwickelt. Diese wurde als ein Hardwareplattform sowohl bei Liebherr als auch bei Infineon zwecks weitere Aktivitäten (Leistungsverteilung, SW-Entwicklung, …) in diesem Projekt eingesetzt.

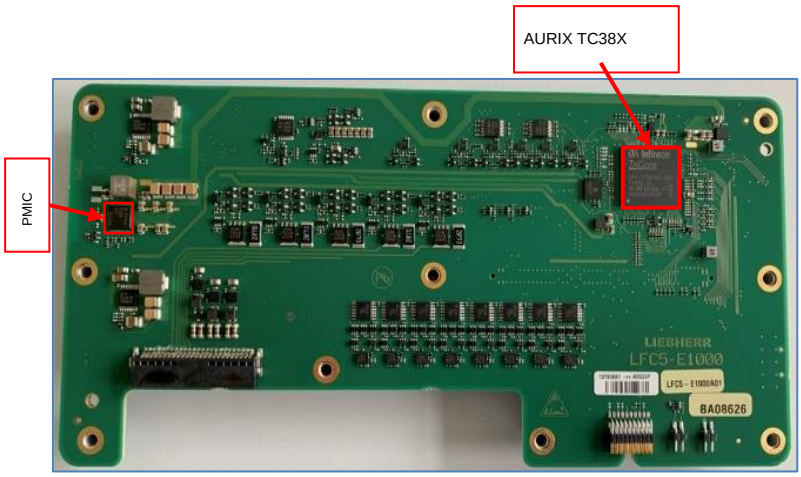


**Abbildung 12**: Entwickelte Steuerlektronik

Weiterhin wurde das SW-Architekturkonzept für einen Multicore-Controller erstellt und vervollständigt. Liebherr hat die folgenden notwendigen SW-Funktionen (Haupt- und Sekundärfunktionen) erstellt und in Controller implementiert:

<u>Hauptfunktionen:</u>

- Strom-Schutzmaßnahmen:
  - $I^2t$-function
  - Schutz gegen Überstrom und Kurzschluss
  - Thermisches Gedächtnis (intermittierende Fehler)
- Fehlerstrom-Schutz
- CAN Kommunikation

<u>Sekundärfunktionen:</u>

- Spannungswarnung
- Temperaturüberwachung
- Integritätsüberwachung der Schalter
- PBIT-Tests
- Rückstromerkennung

Des Weiteren wurden State Machines sowohl für das Gesamtsystem als auch für die einzelnen Kanäle erstellt (Abbildung 13).

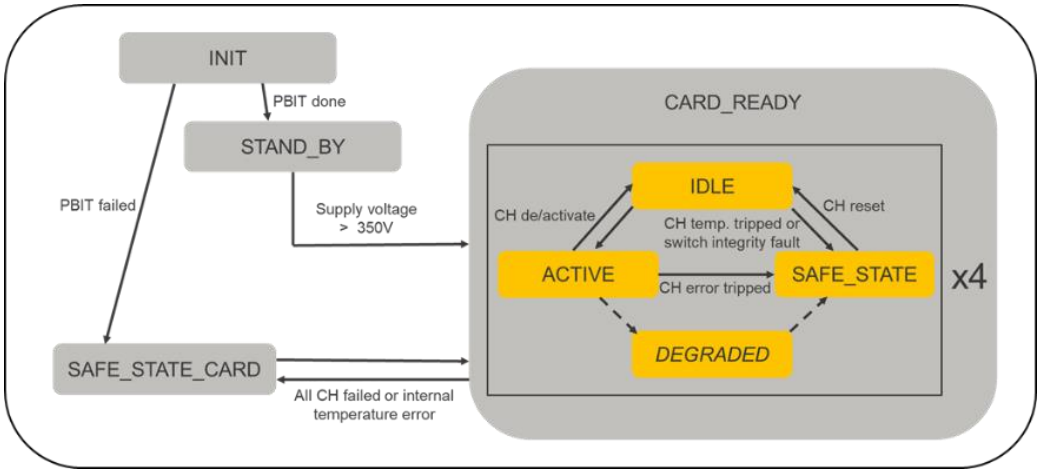


**Abbildung 13:** State Machine vom SSPC

Condition Monitoring: Alle sicherheitskritischen Hardwaregeräte und Schnittstellen wurden kontinuierlich auf Integrität und Datenaktualisierungsraten überwacht. Alle sicherheitskritischen Ausgänge werden kontinuierlich durch entsprechende, mit den jeweiligen Erwartungswerten korrelierte Rückmeldungssignale überwacht. Der Programm-Flash wird durch eine kontinuierliche CRC32-Calculator überwacht. Der resultierende CRC32 wird mit dem im FLASH des gespeicherten Softwarepakets enthaltenen Wert verglichen. Wenn ein Unterschied festgestellt wird, wird die Ausführung der Software angehalten. Um einen Stapelüberlauf zu verhindern, ist ein Stapelmonitor implementiert. Die ausgeführten Aufgaben des Schedulers werden zeitlich überwacht, um einen Aufgabenüberlauf zu verhindern.

Weitere Funktionen sind die Fehlerspeicherung und das erneute Laden der Kanalkonfiguration in den nichtflüchtigen Speicher. Im Falle eines Fehlers wird eine entsprechende Fehlernummer zusammen mit unterstützenden Daten im nichtflüchtigen Speicher gespeichert. Diese Datensätze wurden während der Systementwicklungsphase definiert.

Auch im Rahmen der Funktionalen Sicherheit wurde eng mit dem Partner IFAG zusammengearbeitet und die gewonnenen Erkenntnisse wurden in SW-Blocke implementiert.

### 2.1.5 HAP 5

AP 5.1: Relevante Komponentensimulationen wurden im Rahmen der folgenden Hauptarbeitspakete durchgeführt und abgeschlossen:

- HAP2:
  - Topologie der Leistungselektronikbaugruppen
  - Verlustleistungen unter Berücksichtigung der Eigenschaften der WBG-Halbleiter,
  - Thermalmanagement und Optimierung der Verlustleitungen

- HAP3:
  - Schutzfunktionen: I²t, Überstrom, Fehlerstrom
  - Transienten (Inrush-Current, Überspannungen, …)
  - EMV-relevante Simulationen
  - Simulation der Verlustleistungen und thermische Simulationen

AP5.2: Ein SSPC als Hauptkomponente eines sekundären Verteilungssystems wurde als Demonstrator aufgebaut und ausführlich getestet (sieh bitte Abschnitt 2.1.3).

## 2.2 Voraussichtliche Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Rahmen des Projekts wurden unter anderem Halbleiterleistungssteuerungen für die Leistungsverteilung in den vollelektrischen und hybrid-elektrischen Flugzeugen erfolgreich entwickelt und als Demonstrator aufgebaut. Die Testergebnisse sind zufriedenstellend und zeigen, dass die technischen Ziele zum großen Teil erreicht wurden. Der Aufbau des Demonstrators unter Berücksichtigung neuer Komponenten, Technologien und Methoden reduziert die Entwicklungsaufwände und erhöht die Qualität zukünftiger Produkte durch die im Projekt erzielten Ergebnisse. Der entwickelte Halbleiterleistungssteuerung kann zukünftig in die sekundäre Leistungsverteilungsebene elektrischer und hybridelektrischer Flugzeuge eingesetzt werden und kann die Wettbewerbsfähigkeit der Liebherr-Electronics and Drives GmbH stärken.

**Tabellen- und Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Projektstrukturplan ..... 5
Abbildung 2: Generisches HVDC-Netz (Balance of Plant) ..... 7
Abbildung 3: HVDC-Filter 45 kW / 540 V (LED: Cleansky II) ..... 8
Abbildung 4: Temperaturverteilung auf beiden Seiten des Kühlkörpers bei der maximalen Wechselrichterbelastung ..... 10
**Abbildung 5:** Das Blockschaltbild des entwickelten SSPCs. ..... 10
**Abbildung 6:** Das entwickelte skalierbare Leistungsverteilung mit Steuerelektronik. ..... 12
**Abbildung 7**: Der Versuchsaufbau des entwickelten SSPCs. ..... 12
**Abbildung 8**: Untersuchung der Differential-Mode Stromripple (links) und Stromunsymmetrie (rechts) ..... 13
Abbildung 9: Untersuchung der I²t-Funktion mit unterschiedlichen Nennströmen ..... 13
Abbildung 10: Temperaturtest bei der Umgebungstemperatur Ta=70; Sensoranordnungen (links), Testergebnisse (rechts) ..... 14
Abbildung 11: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), RF Susceptibility Test; Test setup (oben), Conducted Susceptibility (mitte), Radiated Susceptibilty (unten) ..... 14
**Abbildung 12**: Entwickelte Steuerlektronik ..... 16
Abbildung 13: State Machine vom SSPC ..... 17

**Abkürzungsverzeichnis**

| | |
|---|---|
| AP | Arbeitspaket |
| AS | Antriebssystem |
| AVT | Aufbau- und Verbindungstechnik |
| CON/MON | Control/Monitor |
| DAL | Development Assurance Level |
| DLR | Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt |
| DM | Differential Mode |
| EMV | Elektromagnetische Verträglichkeit |
| HAP | Hauptarbeitspaket |
| HVDC | High Voltage Direct Current |
| LED | Liebherr-Electronics and Drives GmbH |
| LV | Leistungsverteilung |
| LE | Leistungselektronik |
| PMIC | Power Management Integrated Circuit |
| RF | Radio Frequency |
| SSPC | Solid State Power Controller |
| SiC | Silizium Carbide |
| WBG | Wide Band Gap (Halbleiter) |

# Berichtsblatt

| | |
|---|---|
| 1. ISBN oder ISSN | 2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)<br>Schlussbericht |
| 3. Titel<br>Luftfahrtgerechte Leistungselektronik, Leistungsverteilung und Steuerung für hybrid-elektrische Antriebssysteme | |
| 4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]<br>Dr.-Ing. Nejat Mahdavi | 5. Abschlussdatum des Vorhabens<br>31.05.2024 |
| | 6. Veröffentlichungsdatum<br>2024 |
| | 7. Form der Publikation<br>TIB Hannover |
| 8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)<br>Liebherr-Electronics and Drives GmbH<br>Peter-Dornier-Straße 11<br>88131 Lindau<br>Deutschland | 9. Ber. Nr. Durchführende Institution |
| | 10. Förderkennzeichen<br>20M1917A |
| | 11. Seitenzahl<br>20 |
| 12. Fördernde Institution (Name, Adresse)<br>Bundesministerium für<br>Wirtschaft und Klimaschutz (BMBK)<br>11019 Berlin | 13. Literaturangaben |
| | 14. Tabellen |
| | 15. Abbildungen<br>13 |
| 16. Zusätzliche Angaben | |
| 17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)<br>TIB-Hannover, Schlussbericht zu „Luftfahrtgerechte Leistungselektronik, Leistungsverteilung und Steuerung für hybrid-elektrische Antriebssysteme“ - TELEV | |

18. Kurzfassung


Ausgehend von der Systemarchitektur eines bemannten hybrid-elektrischen Fluggeräts, wurden die Spezifikationen für die elektrischen Energieversorgung und Antriebstechnik erstellt, die Anforderungen für die Antriebskomponenten, Leistungsverteilung, und Steuerung hergeleitet. Zusätzlich wurde die Stabilisierung der HVDC-Netze analysiert und ihre Eignung für zukünftige elektrische Luftfahrzeuge bewertet.

Im Rahmen des Projekts wurde luftfahrtgerechte Leistungselektronik (Topologie, Halbleitertechnologie, Treiberschaltung, Aufbau- und Verbindungstechnik sowie Kühlung) erforscht und in Technologieträgern umgesetzt.

Die technologischen Befähiger für luftfahrtgerechte Leistungsverteilung wurden bearbeitet. Hierbei lag ein Schwerpunkt auf der Untersuchung intelligenter Leistungsverteilungskonzepte sowie der Umsetzung Leistungsverteilungskomponenten. Schwerpunkt der Liebherr-Electronics and Drives GmbH waren hier insbesondere die sogenannten Solid State Power Controller und die Weiterentwicklung von Schutzkonzepten. Ein weiterer Arbeitsinhalt war die Untersuchung der Auswirkung hoher Spannungen bei niedrigem Druck.

Des Weiteren wurden die Steuerungen für die entwickelten Luftfahrtanwendungen untersucht. Neben der Untersuchung neuartiger Steuerungsarchitekturen unter Berücksichtigung der hohen Sicherheitsanforderungen wurde ein Hardware-Demonstrator mit den notwendigen Betriebs- und Testsoftwares entwickelt und schließlich die Steuerungssoftware für die Anwendung für eine Luftfahrtapplikationen erstellt.

Darüber hinaus wurde das Projekt mit Simulationen im Kontext einer agilen, modellbasierten Technologieentwicklung und –validierung in Luftfahrtanwendungen begleitet. Anschließend wurden diversen Demonstratoren aufgebaut, getestet und die Testergebnisse evaluiert.


| | |
|---|---|
| 19. Schlagwörter<br>Hybrid-elektrische Luftfahrzeuge, Antriebssystem, Leistungselektronik, Leistungsverteilung, Steuerelektronik | |
| 20. Verlag | 21. Preis |

# Document Control Sheet

| | |
|---|---|
| 1. ISBN or ISSN | 2. type of document (e.g. report, publication)<br>Final report |
| 3. Title<br>Aviation-grade power electronics, power distribution and control for hybrid-electric drive systems | |
| 4. Author(s) (family name, first name(s))<br><br>Dr.-Ing. Nejat Mahdavi | 5. end of project<br>31.05.2024 |
| | 6. publication date<br>2024 |
| | 7. form of publication<br>TIB Hannover |
| 8. Performing organization(s) (name, address)<br><br>Liebherr-Electronics and Drives GmbH<br>Peter-Dornier-Straße 11<br>88131 Lindau<br>Deutschland | 9. originator's report no. |
| | 10. reference no.<br>20M1917A |
| | 11. no. of pages<br>20 |
| 12. Sponsoring agency (name, address)<br><br>Federal Ministry for<br>Economic Affairs and Climate Protection (BMBK)<br>11019 Berlin | 13. no. of references |
| | 14. no. of tables |
| | 15. no. of figures<br>13 |
| 16. supplementary notes | |
| 17. presented at (title, place, date)<br><br>TIB-Hannover, Final report of „Luftfahrtgerechte Leistungselektronik, Leistungsverteilung und Steuerung für hybrid-elektrische Antriebssysteme“ - TELEV | |

18. abstract


Based on the system architecture of a manned hybrid-electric aircraft, the specifications for the electrical power supply and drive technology were created, and the requirements for the drive components, power distribution and control were derived. In addition, the stabilization of the HVDC networks was analyzed and their suitability for future electric aircraft was assessed.

As part of the project, aviation-compatible power electronics (topology, semiconductor technology, driver circuit, assembly and packaging technology, as well as cooling) were researched and implemented in technology demonstrators.

The technological enablers for aviation-compatible power distribution were worked on. One focus here was on the investigation of intelligent power distribution concepts and the implementation of power distribution components. The focus of Liebherr-Electronics and Drives GmbH was particularly on the so-called solid state power controllers and the further development of protection concepts. Another work content was the investigation of the effect of high voltages at low pressure environments.

The controls for the developed aviation applications were also examined. In addition to investigating new types of control architectures while taking the high safety requirements into account, a hardware demonstrator with the necessary operating and test software was developed and finally the control software was created for use in aviation applications.

In addition, the project was accompanied by simulations in the context of agile, model-based technology development and validation in aviation applications. Various demonstrators were then built, tested and the test results evaluated.



19. keywords

Hybrid electric aircraft, power train, power electronics, power distribution, controller


| | |
|---|---|
| 20. publisher | 21. price |