Öffentlicher Schlussbericht

ETHAN1

Verbundvorhaben: ETHAN1 - SICHERE UND ZUVERLÄSSIGE ELEKTRISCHE UND THERMISCHE NETZWERKE FÜR HYBRID-ELEKTRISCHE ANTRIEBSSYSTEME

Teilvorhaben: Elektrische Netzwerke für Flugantriebe

Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig:
Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen,
Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit,
Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig	Förderkennzeichen: 20L2103D
Verbundführer: Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG Ausführende Stelle: Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig Fakultät 5 - Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen	
Laufzeit des Vorhabens: von: 01.01.2022 bis: 30.06.2025	
Berichtszeitraum: von: 01.01.2022 bis: 30.06.2025	

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

DLR Projektträger Luftfahrtforschung

1.1. Aufgabenstellung

Um die wirtschaftlichen Ziele einer umweltfreundlichen, sicheren und wettbewerbsfähigen Luftfahrt zu erreichen, ist ein ganzheitliches systematisches Vorgehen bei der Auslegung elektrifizierter Flugantriebe und mobiler elektrischer Netzwerke notwendig. Das übergeordnete förderpolitische Ziel des Projektes ist die gekoppelte Betrachtung von elektrischen und thermischen Systemen für hybrid-elektrisches Fliegen. Hierdurch soll eine Optimierung und Gewichtsreduktion der Systeme unter Berücksichtigung der luftfahrtspezifischen Umgebungs- und Sicherheitsanforderungen gefunden werden. Dies beinhaltet im Speziellen auch die Untersuchung und Auslegung der Systeme hinsichtlich Toleranz gegenüber Störeinflüssen und Fehlerfällen.

1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben konnte auf eine umfangreiche bestehende Forschungsbasis an den Instituten der Technischen Universität Braunschweig aufbauen. Innerhalb des DFG-geförderten Exzellenzclusters Sustainable and Energy-Efficient Aviation (SE²A) werden seit 2019 systemische Entwurfs- und Bewertungsstrategien für elektrische Antriebssysteme in der Luftfahrt entwickelt. Besonderer Fokus liegt hierbei neben effizienten und leistungsdichten Systemen auf der zuverlässigkeitsorientierten Auslegung von Leistungselektronik. Darüber hinaus wird die Verbringung von Komponenten des elektrischen Antriebssystems in ein kryogenes Arbeitsumfeld erforscht. Diese Arbeiten bildeten eine Grundlage für das durchgeführte Vorhaben. Innerhalb der TU Braunschweig waren die folgenden drei Institute mit der Bearbeitung des Vorhabens befasst:

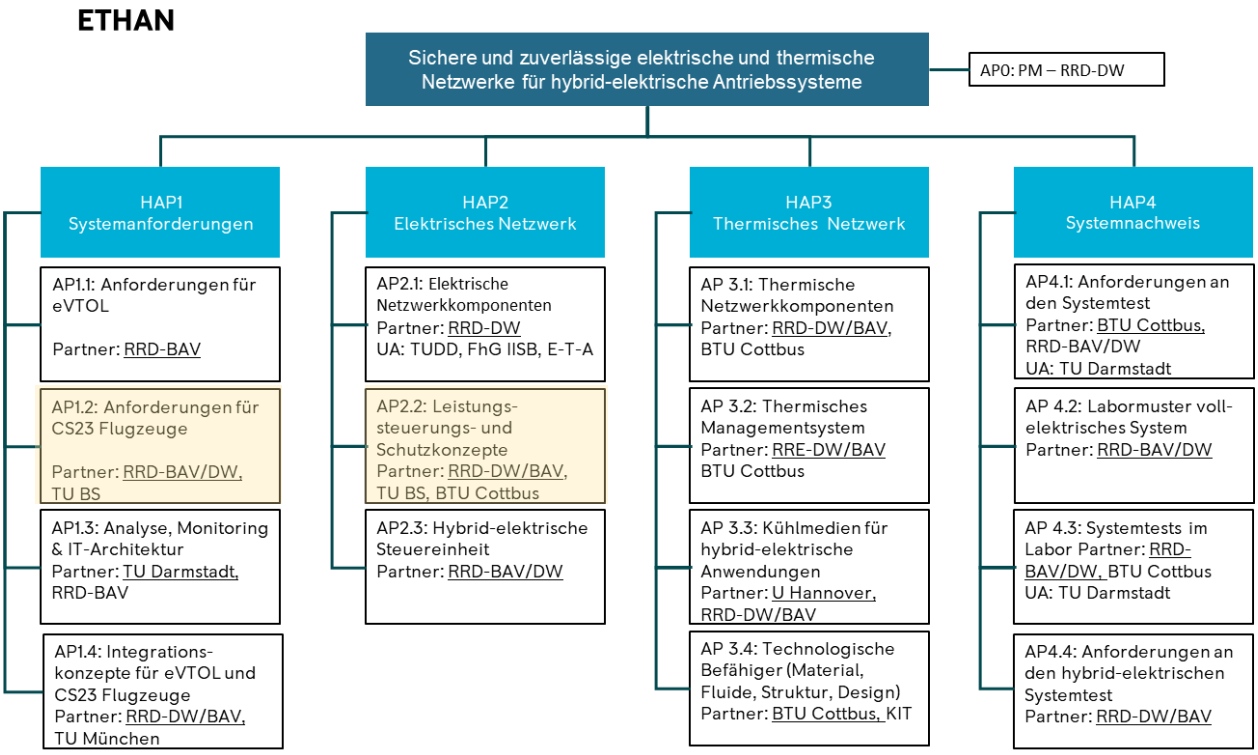
1) elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme
2) Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit (IEMV)
3) Instituts für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen
   - Arbeitsgruppe Leistungselektronik
   - Arbeitsgruppe Elektrische Antriebssysteme

Im Rahmen des Projekts arbeitete das elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme an den Arbeitspaketen AP 1.2 und AP 2.2, sowie dem Meilenstein MS 2.2.1. Die Durchführung erfolgte unter den organisatorischen und technischen Bedingungen des Instituts, das sowohl die notwendige Infrastruktur als auch fachliche Betreuung bereitstellte.
Vorarbeiten im Exzellenzcluster Sustainable and Energy-Efficient Aviation (SE2A) der TU Braunschweig, in den Projekten Smart Modular Switchgear I + II (innovative Schutzkonzepte) und SiNED (Anwendung der Methoden des Systems Engineerings), dienen der Bearbeitung des ETHAN-Projekts. Auf Systemebene waren Kenntnisse über die Topologie des elektrischen Netzwerks bzw. die Architektur von Versorgungssystemen, Verteilungssystemen, Konversionssystemen und Verbrauchern erforderlich. Auf Komponentenebene wurden bevorzugte Topologien sowie Kenntnisse über Batterien, Gasturbinen, DC/DC-Wandler, Kabel, Wechselrichter und elektrische Motoren vorausgesetzt. Zusätzlich wurde ein grundlegendes Verständnis von Regelungssystemen vorausgesetzt, um den Aufbau und die erste Entwicklung des Simulationsmodells zu ermöglichen. Für die Durchführung des Vorhabens kamen hauptsächlich Simulink und Enterprise Architect zum Einsatz. Simulink diente zur modellbasierten Nachbildung des elektrischen Netzes, während Enterprise Architect genutzt wurde, um den Designprozess strukturiert zu dokumentieren und zu verwalten.
Das IEMV besitzt Expertise in der EMV in der Luftfahrt und verfügt über langjährige Erfahrung im Design und in der Anwendung kontaktloser Messverfahren, im EMV-gerechten Design von Schaltungstechnik und bei der Quantifizierung des Einflusses von Störungen auf Messgrößen sowie der entsprechenden Ableitung resultierender Messgenauigkeiten. Im Rahmen mehrerer Dissertationen wurde ein Verfahren zur rückführbaren, breitbandigen Kalibrierung von induktiven HF-Sensoren entwickelt und validiert. Im BMWi-geförderten Projekt Ide3AL (FKZ: 03ET1532D) wird es für exakte EMV-Störstrommessungen an Antriebsumrichtern im Niederspannungsnetz eingesetzt und im ebenfalls laufenden BMBF-Projekt SMS-II (FKZ: 03EK3058A) für entsprechende Messungen in DC-Mittelspannungsnetzen ausgebaut. Das EMV-Institut verfügt aus früheren Projekten zusätzlich

Expertise im Bereich der Modellierung und Analyse der elektrischen Energieverteilung von Verkehrsflugzeugen und bei der Entwicklung von Schutzschaltern (Solid-State Power Controller), die im Kabinenbereich von Luftfahrzeugen eingesetzt werden. Darüber hinaus steht als Wissensgrundlage das Schaltverhalten von Schutzschaltern unter besonderer Berücksichtigung von Schaltstrategien zur Vermeidung von Überströmen und Überspanngen aus früheren Projekten zur Verfügung.
Die Arbeitsgruppe Elektrische Antriebssysteme des Instituts für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen besitzt weitreichende Erfahrungen im Bereich des Entwurfs, der Optimierung und dem Aufbau von elektrischen Maschinen verschiedener Topologien. Außerdem wurden bereits mehrere Studien, thermische Untersuchungen und Modellierungen zur Evaluation des thermischen Verhaltens elektrischer Maschinen bei verschiedenen Kühlmethoden durchgeführt. Diese wurden unter anderem in vergangenen Publikationen und Projekten wie SE^{2}A (Sustainable and Energy-Efficient Aviation), ARIEL (ganzheitliche Entwicklung eines elektrischen Luftverdichters für Brennstoffzellensysteme) und SaReMO (Safety, Resilience and MRO of Future Aviation Systems) erworben und wurden im Rahmen des Projekts eingesetzt und erweitert.
Die Arbeitsgruppe Leistungselektronik des Instituts für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen verfügt über fundierte Kompetenzen im Bereich der elektrischen Antriebssysteme, dem Entwurf und Aufbau von Leistungselektronik verschiedener Topologien und der Applikation und Integration von WBG-Leistungshalbleiterschaltern und der thermisch-elektrischen Systemintegration. Diese wurden unter anderem in den Projekten ARIEL, EPROREF (Entwicklung eines hochintegrierten elektrischen Propeller-Antriebs für Flugzeuge) und Ide^{3}AL (Sinusfilter in Antriebssystemen) erworben. Die Erkenntnisse aus diesen Projekten zu leistungselektronischen Invertertopologien, thermischer Auslegung und EMV-Eigenschaften flossen direkt in die Systembewertung und -auslegung des Vorhabens ein.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Folgenden ist der Projektstrukturplan abgebildet (orange hinterlegt die wesentlichen AP der TU Braunschweig):



Nr.	Balken- und Meilensteinplanung Monat
1	**AP 0: Projektmanagement**
2	**HAP 1: Systemanforderungen**
3	AP1.1 Anforderungen eVTOL
4	MS 1.1.1 Regulatorische Zulassungskritierien und initiale Beschreibung Systemanforderungen (RRD)
5	MS 1.1.2 Festlegung relevanter Systemarchitektur (RRD)
6	AP1.2 Anforderungen für CS23 Flugzeuge
7	MS 1.2.1 Regulatorische Zulassungskritierien und initiale Beschreibung Systemanforderungen (RRD)
8	MS 1.2.2 Festlegung relevanter Systemarchitektur (RRD)
9	AP1.3 Analyse, Monitoring & IT Architektur
10	MS 1.3.1 Finalisiertes Konzept für Algorithmik und IT Architektur (RRD, TuDa)
11	MS 1.3.2 Messhardware und Messkonzept definiert (TuDa)
12	AP1.4 Integrationskonzepte für eVTOL und CS23 Flugzeuge
13	MS 1.4.1 Integrationskonzepte für initiale Architekturen (RRD, TuM)
14	MS 1.4.2 Integrationskonzepte für relevante Systemarchitektur (RRD, TuM)
15	MS 1.4.3 Finale Analysen und Bewertung der Systemarchitektur (RRD, TuM)
16	**HAP 2: Elektrisches Netzwerk**
17	AP2.1 Elektrische Netzwerkkomponenten
18	MS 2.1.1 Konstruktionsentwurf für eine gewichtsoptimierte Energieverteilungseinheit (RRD)
19	MS 2.1.2 Robustheitsnachweis der gewichtsoptimierten Energieverteilungseinheit über Labortests (RRD)
20	MS 2.1.3 Finale Netzwerkkomponenten für Systeme (RRD)
21	AP2.2 Leistungssteuerungs- und Schutzkonzepte
22	MS 2.2.1 Elektrisches Netzwerkmodell (TUBS)
23	MS 2.2.2 Schutzkonzepte fertiggestellt (TUBS)
24	MS 2.2.3 Validierung Netzwerk und Schutzkonzept mit Testdaten (TUBS)
25	MS 2.2.4 Für Leistungssteuerungs(LSS)-Entwurf geeignetes analytisches Modell des elektrischen Netzwerks (BTU)
26	MS 2.2.5 Für Fehlerdetektion und Residualentwurf geeignetes analytisches Antriebsmodell (BTU)
27	MS 2.2.6 Dynamischer Fehlerdetektionsalgorithmus (BTU)
28	MS 2.2.7 Umfassend in HiL-Tests erprobtes LSS (BTU)
29	AP2.3 Hybrid-Elektrische Steuereinheit
30	MS 2.3.1 Initiales Konzept fertiggestellt
31	MS 2.3.2 Nachweis Steuereinheit Laborumfeld

Der ursprüngliche Projektplan sah vor, dass das ETHAN-Projekt im Januar 2022 beginnt. Aufgrund Verzögerungen verschob sich der tatsächliche Projektstart und damit die Bearbeitung der beiden Arbeitspakete AP 1.2 „Anforderungen für CS23 Flugzeuge“ und AP 2.2 „Leistungssteuerungs- und Schutzkonzepte“ jedoch in die zweite Jahreshälfte von 2022. Der Projektfortschritt wurde regelmäßig dokumentiert und überwacht. Alle zwei Wochen fanden Besprechungen mit den Kolleginnen und Kollegen der jeweiligen Arbeitspakete sowie dem Projektmanagement statt, in denen der aktuelle Status präsentiert und die nächsten Arbeitsschritte festgelegt wurden.

Am elenia-Institut gliederte sich der Arbeitsablauf in zwei Hauptphasen. In der ersten Phase stand die Identifikation der Topologien auf System- und Komponentenebene im Mittelpunkt. Auf Systemebene wurde das Gesamtsystem mit seinen Funktionen, Anforderungen und externen Schnittstellen beschrieben. Auf Komponentenebene wurde gezeigt, wie diese Systemfunktionen durch das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten umgesetzt werden. Dabei wurden zunächst die charakteristischen Eigenschaften der Komponenten ermittelt. Zu den wesentlichen Elementen gehörten dabei zum Beispiel der Komponententyp, die Anzahl, die Topologie, sowie die grundlegenden Spannungsniveaus. Anschließend wurden bereits definierte oder bekannte Topologien auf Komponentenebene analysiert. Darauffolgend wurde ein generisches Modell für diejenigen Komponenten erstellt, deren konkrete Topologien noch nicht bekannt waren. In der zweiten Phase wurde ein Simulationsmodell in Simulink entwickelt. Dieses beinhaltete die definierten Topologien der Komponenten, die elektrische Verschaltung, Messsysteme sowie Ausgabemodule zur Analyse und Visualisierung der Simulationsergebnisse. So konnte der Meilenstein 2.2.1 „Elektrisches Netzwerkmodell“ Ende August 2023 erfolgreich abgeschlossen werden.

Am EMV-Institut gab es im Verlauf des Projekts keine wesentlichen Abweichungen von den Planungen der Projektbeschreibung. Alle wesentlichen Projektziele wurden innerhalb des Projekts erreicht. Allerdings kam es bis zum Erreichen des Meilensteins MS 2.2.3 „Validierung Netzwerk und Schutzkonzept mit Testdaten“ zu Verzögerungen bei der Echtzeitsimulation und Validierung des Schutzalgorithmus auf dem FPGA der Echtzeitsimulatorhardware. Grund hierfür war die Komplexität des Modells sowie die hohe Rechenlast, wodurch es nicht möglich war, sowohl das Aircraft Electrical

Power Distribution Model als auch den Schutzalgorithmus mit der für DC-Systeme erforderlichen Genauigkeit im Mikrosekundenbereich auf derselben FPGA der Opal-RT-Hardware zu simulieren. Stattdessen wurde das Aircraft Electrical Power Distribution Model in Echtzeit auf der Opal-RT-Hardware mit der gewünschten Genauigkeit simuliert, während die Validierung des Fehler-Schutzalgorithmus auf einer Speedgoat-FPGA-Echtzeitsimulationshardware sowie einem externen Regler im Hardware-in-the-Loop (HIL)-Verfahren durchgeführt wurde.

Am Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen kam es im Projektverlauf zu keinen Abweichungen von den Planungen der Vorhabenbeschreibung. Alle wesentlichen Ziele konnten innerhalb des Vorhabens erreicht werden. Jedoch kam es auf Seiten der Arbeitsgruppe Leistungselektronik in AP 2.2. in der Prototypenphase aufgrund der generellen Topologiekomplexität, des großen Design-Raums und der komplexen Inverteransteuerung zu Verzögerungen. Die für den Betrieb erforderlichen Softwarearbeiten nahmen einen deutlich größeren Umfang ein, als zunächst geplant. Auch bei den anschließend durchgeführten umfangreichen Messreihen zur Charakterisierung der Schaltung kam es zu einem erhöhten Zeitaufwand. Auch auf Seiten der Arbeitsgruppe Elektrische Antriebssysteme kam es bei den durchgeführten Prüfstandsuntersuchungen anfänglich zu Verzögerungen aufgrund mehrerer Undichtigkeiten des niederviskosen verwendeten Öls und der hohen Stromtragfähigkeit der Spulen (ermöglicht durch die intensive Kühlung). Letzteres führte zu elektromagnetischen Störungen in den angrenzenden Durchflusssensoren, sodass Modifikationen erforderlich wurden.

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Arbeiten des elenia-Instituts basierten auf bestehenden wissenschaftlichen Arbeiten und technischen Grundlagen im Bereich elektrischer Antriebssysteme und deren Komponenten. Dabei wurden insbesondere frühere Studien berücksichtigt, z.B.:

- H. Schefer, L. Fauth, T. H. Kopp, R. Mallwitz, J. Friebe and M. Kurrat, "Discussion on Electric Power Supply Systems for All Electric Aircraft", in IEEE Access, vol. 8, pp. 84188-84216, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2991804.
- H. Schefer, W. -R. Canders, J. Hoffmann, R. Mallwitz and M. Henke, "Cryogenically-Cooled Power Electronics for Long-Distance Aircraft", in IEEE Access, vol. 10, pp. 133279-133308, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3228161.

Hinsichtlich des Schutzkonzeptes wurde an Arbeiten mit Bezug zu detaillierten Darstellungen von Flugzeug-Bordnetzen angeknüpft, die ebenso Daten über Impedanzen enthielten und Lastdaten bereitstellten, um Lastströme korrekt abzuschätzen. Ebenso wurde an bestehende Schutzkonzepte aus dem stationären Energieversorgungsbereich (Differentialschutz, Impedanzschutz, Staffelschutz) angeknüpft, um neue Konzepte für die Besonderheiten des Luftfahrzeugs abzuleiten. Entsprechende Quellen sind:

- Brombach, J.; Lucken, A.; Nya, B.; Johannsen, M. and Schulz, D.: "Comparison of different electrical HVDC-architectures for aircraft application,'' in Proc. Electr. Syst. Aircr., Railway Ship Propuls., Bologna, Italy,Oct. 2012, pp. 1 6.
- Jones, C. E.; Norman, P. J.; Galloway, S. J.; Armstrong, M. J. and Bollman, A. M.: „Comparison of Candidate Architectures for Future Distributed Propulsion Aircraft,“ IEEE Transactions on Applied Superconductivity, VOL. 26, NO. 6, September 2016
- M. Terörde, T. Do Thanh, D. Schulz: “Different Switchover-strategies for Load Balancing in Future Aircraft”, Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials Vol. 43, No. 4, Seiten: 265 274, 2013

Die Arbeiten des Instituts für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen basierten auf den gewonnenen Erkenntnissen in Vorarbeiten des Instituts an diesem Thema. Darunter insbesondere Kühlungsuntersuchungen für elektrische Maschinen und Luftfahrt- bzw. Antriebsumrichteranalysen.

- J. Hoffmann, W.-R. Canders, and M. Henke, "Impact of Current Density and Cooling on the Weight Balance of Electrical Propulsion Drives for Aviation", Energies, vol. 13, no. 22, p. 6149, Nov. 2020, doi: 10.3390/en13226149.
- L. V. Hanisch, J. Franzki and M. Henke, "Impact of Insulation and Cooling on Performance due to Reliability-Oriented Design of Electrical Machines," 2022 24th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'22 ECCE Europe), 2022, pp. 1-7.
- P. -O. Gronwald, N. Wiese, T. A. Kern and M. Henke, "Electric traction motor spray cooling – Empirical model development and experimental validation," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, doi: 10.1109/TTE.2022.3206031.
- D. Fischer, R. Rohn, R. Mallwitz, "Beneficial Control of Redundant Electric Drives in Aviation," Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V., 2021. doi: 10.25967/550212.
- D. Fischer and R. Mallwitz, "Characterizing SiC-Based Drive Inverter Losses Using the Method of Reduced Continuous Operation," 2022 IEEE 13th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Kiel, Germany, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/PEDG54999.2022.9923110.
- J. Ebersberger, M. Hagedorn, M. Lorenz and A. Mertens, "Potentials and Comparison of Inverter Topologies for Future All-Electric Aircraft Propulsion," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 10, no. 5, pp. 5264-5279, Oct. 2022, doi: 10.1109/JESTPE.2022.3164804.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für die Durchführung des Vorhabens war eine enge Zusammenarbeit mit den Projektpartnern erforderlich.
Als wesentliche Eingabe für die Arbeiten des elenia-Instituts dienten die Systemanforderungen und die Systemtopologie aus Arbeitspaket 1 „Systemanforderungen“ sowie die Komponentencharakteristiken aus Arbeitspaket 2.1. Der direkte Ansprechpartner für diese Inhalte war Rolls-Royce. Zusätzlich stellte das Design des Regelungssystems einen wichtigen Input für die Modellierung und Simulation dar, wobei die BTU Cottbus als direkter Ansprechpartner fungierte. Das im Rahmen des Meilensteins 2.2.1 entwickelte elektrische Netzwerk diente wiederum als Ausgangspunkt und Input für den nachfolgenden Meilenstein 2.2.2, in dem die Auslegung des Schutzkonzeptes erfolgte. Hier bestand die Schnittstelle zum Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit, das als direkter Ansprechpartner für diesen Arbeitsbereich zuständig war.
Aus der vertieften Zusammenarbeit hinsichtlich der Regelung des Bordnetzes zwischen dem Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit der TU Braunschweig und dem Institut für Regelungstechnik der BTU Cottbus entstand das Paper “Distributed Control Algorithm Validation for Voltage Regulation and Load Sharing in Series-Hybrid-Electric Aircraft Propulsion Systems, H. Jiope, W. H. Syed, F. Zeng, F. Witt, E. Hanli, M. Kurrat, M. Terörde; NEIS 2024 - Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems”.
Das Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen arbeitete über die gesamte Projektlaufzeit nicht nur intensiv mit den Partnerinstituten der TU Braunschweig zusammen, sondern auch mit den Instituten der BTU Cottbus. In diesem Rahmen sind mehrere gemeinsame Publikationen entstanden.

2.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Entsprechend der nachfolgend beschriebenen Arbeitsergebnisse wurden die für das Teilvorhaben formulierten Ziele erreicht:

- Erstellung und Dokumentation eines vollständig funktionierenden elektrischen Netzwerkmodells des Antriebssystems eines hybrid-elektrischen Flugzeuges zur Analyse des Systemverhaltens unter verschiedenen Lastbedingungen. Das Modell beinhaltet alle Hauptkomponenten (z. B. Energiequelle, Verbraucher, Verteilungsnetz), ist funktionsfähig vernetzt und für Lastfluss- sowie Fehlersimulationen nutzbar.
- Untersuchung von Leistungselektronik-Invertern für HVDC-Bordnetze unter Nutzung von WBG-Leistungshalbleiterschaltern unter stringenten Entwurfsanforderungen und Umweltbedingungen der (hybrid-)elektrischen Luftfahrt. Demonstration eines netzrückwirkungsarmen Inverters. Erprobung von Einzeltechnologien (Halbleiter, Aufbautechnik, Modulationsverfahren, …) anhand einer modularen Forschungsplattform.
- Untersuchung von Kühlkonzepten und Kühlstrukturen für elektrische Maschinen unter Berücksichtigung luftfahrttechnischer Randbedingungen. Verifikation und Abgleich thermischer Modelle anhand einer funktionsfähigen Prüfplattform.
- Untersuchung und Erstellung eines voll funktionsfähigen Schutzalgorithmus zum Schutz des elektrischen Gleichstrom-Antriebsstrangs gegen verschiedene Arten von Fehlern, wie Kurzschlüsse und Überströme. Prüfung und Validierung des Modells des elektrischen Antriebsstrangs und des entwickelten Schutzalgorithmus in einer Echtzeit-Simulationsumgebung auf FPGA.

<u>AP 1.2 „Anforderungen für CS23 Flugzeuge“</u>

Das elenia-Institut untersuchte in Arbeitspaket 1.2 mithilfe von Model-Based Systems Engineering insbesondere die Konzept- und Systemebene von elektrischen Antriebssystemen. Die grundlegenden Anforderungen und Funktionen des Antriebssystems wurden anhand eines Referenzflugzeugs und CS23 (Certification Specifications 23) definiert. Darin enthalten sind die Anforderungen an das Missionsprofil, die Architektur der elektrischen Energieverteilung, die Spannungsniveaus mit Mindest- und Höchstwerten, die Leistungsdaten von Gleich- und Wechselrichtern sowie die DC-Schutzanforderungen und Schutzkonzepte des elektrischen Energieverteilungsnetzes des Flugzeugs.
Darauf aufbauend entstand die Architektur auf Konzeptebene, wobei aktuelle Komponententechnologien, wie beispielsweise die Batterietechnik, zur weiteren Definition von Schnittstellen sowie der System- und Komponentenarchitektur herangezogen wurden. Abschließend wurde ein erster Vergleich unterschiedlicher Systemtopologien insbesondere in Bezug auf Gewicht und Volumen durchgeführt, um die Auslegung zu optimieren und eine Bewertungsbasis für weiterführende Entwicklungen zu schaffen.
Durch die Arbeitsgruppe Elektrische Antriebssysteme am Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen wurden Verlustmodelle parametriert und in ein thermisches Netzwerkmodell integriert. Eine modulare Plattform für die Untersuchung der Nutkühlung wurde aufgebaut, d.h. Bauteile, Sensoren, zentrale Messdatenverwaltung und Ansteuerung beschafft, aufgebaut, Schnittstellen programmiert und erprobt. Mehrere Versuchsreihen über Volumenströme und Verlustleistungen wurden durchgeführt und der thermische Widerstand zwischen Leiter und Kühlmedium in Abhängigkeit der Durchflussrate und Verlustleistung ermittelt. Diese Prüfstandsuntersuchungen lieferten so belastbare Werte für thermische Übergänge, die in das AP 2.2 übertragen wurden.
Durch die Arbeitsgruppe Leistungselektronik am Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen der TU Braunschweig wurde in AP 1.2 eine leistungselektronische Konzeptstudie durchgeführt. Diese umfasst eine Beschreibung und Diskussion verschiedener Wechselrichter-Topologien, bspw. in

Bezug auf Effizienz, Leistungsdichte, Komponenten- und erwartbaren Filteraufwand, sowie einen qualitativen und quantitativen Vergleich von zwei- und dreistufigen Antriebswechselrichtertopologien. Hierzu wurden Anforderungen unter Berücksichtigung der Bauelementeverfügbarkeit definiert. Für die Leistungshalbleiter wurde ein umfassender Überblick und eine qualitative Analyse der Entwicklung mit besonderem Fokus auf WBG-Halbleitern geschaffen. Limitationen der verschiedenen Halbleitertechnologien und -materialien wurden herausgearbeitet und die Möglichkeiten, welche diese Technologien im Kontext des (hybrid-)elektrischen Fliegens bieten, erläutert. Es wurden Methodiken zur Vorauslegung diverser Invertertopologien, sowie Simulationsmodelle zur detaillierten theoretischen Evaluierung implementiert. Diese Modelle dienen insbesondere der Untersuchung von hybriden Halbleiterbestückungsoptionen, verschiedenen Modulationsstrategien, sowie der limitierenden inhomogenen Verlust- und Temperaturverteilung über die topologischen Schalter in der vertiefend betrachteten 3-Level ANPC-Topologie. Für die praktische Evaluierung und die Erprobung von Einzeltechnologien wurde in folgendem Arbeitspaket 2.2 eine modulare und flexible, skalierte Forschungsumrichterplattform für HVDC-Bordnetze aufgebaut, anhand derer Aufbaumöglichkeiten und Schaltverhalten untersucht und EMV und Filteraufwand abgeschätzt werden konnten. Die Modellierungsergebnisse wurden mit Hilfe der praktischen Untersuchungen verifiziert.

AP2.2 „Leistungssteuerungs- und Schutzkonzepte“

Im Rahmen des Projekts wurde am elenia-Institut die Zuwendung im Wesentlichen für die Entwicklung, Simulation und Dokumentation eines funktionsfähigen elektrischen Netzwerkmodells des Antriebssystem-Bordnetzes im Simulationsprogramm MATLAB/Simulink eingesetzt. Das entstandene Netzmodell wurde dem gesamten Konsortium vorgestellt und im Meilensteinbericht 2.2.1 detailliert dokumentiert. Im Bericht werden sowohl stationäre als auch dynamische Simulationen durchgeführt, um das Verhalten des Systems unter verschiedenen Lastbedingungen zu analysieren. Die zuvor entwickelte Systemarchitektur aus dem Dokument „ETHAN - HAP1 MS1.2.2 Definition of CS-23 System Architectures“ (Doc. reference: R-DE-HYBELF2G-1020-ENG) wurde gebildet. Die Simulation umfasst vier Subsysteme, die jeweils aus einem Energiespeicher (ESS), einem Generator, einem zugehörigen Gleichrichter (GTU), Bus, zwei Invertern sowie zwei Elektromotoren (SEPU) bestehen. Eine Übersicht des Simulationsmodells ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

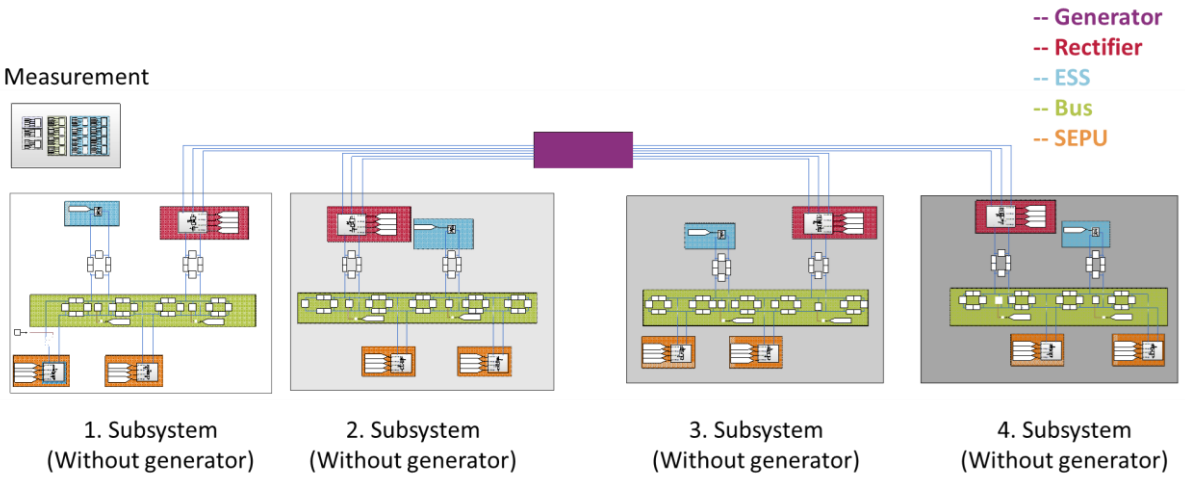


Abbildung: Simulationsmodell

Als Dokumentationsmaterial steht der Meilensteinbericht 2.2.1 zur Verfügung. Dieser beinhalten sowohl Systemübersichten als auch Simulationsergebnisse und Ergebnisplots.
Im Laufe des Jahres 2023 erstellte das IEMV-Institut in Zusammenarbeit mit dem elenia-Institut den ersten Teil des Arbeitspakets 2.2, der aus der Modellierung des elektrischen Energieverteilungssystems des in (siehe Abbildung) gezeigten Hybrid-Pax 9 -Flugzeugs bestand und als wichtiger Beitrag zum

Erreichen von Meilenstein 2.2.1 „Elektrisches Netzwerkmodell“ benötigt wurde. Das IEMV entwickelte das Modell in Simulink für ein spezielles Stromversorgungssystem, das auf den in der folgenden Abbildung dargestellten Anforderungen an die Leistungsbereitstellung von RRE basiert.

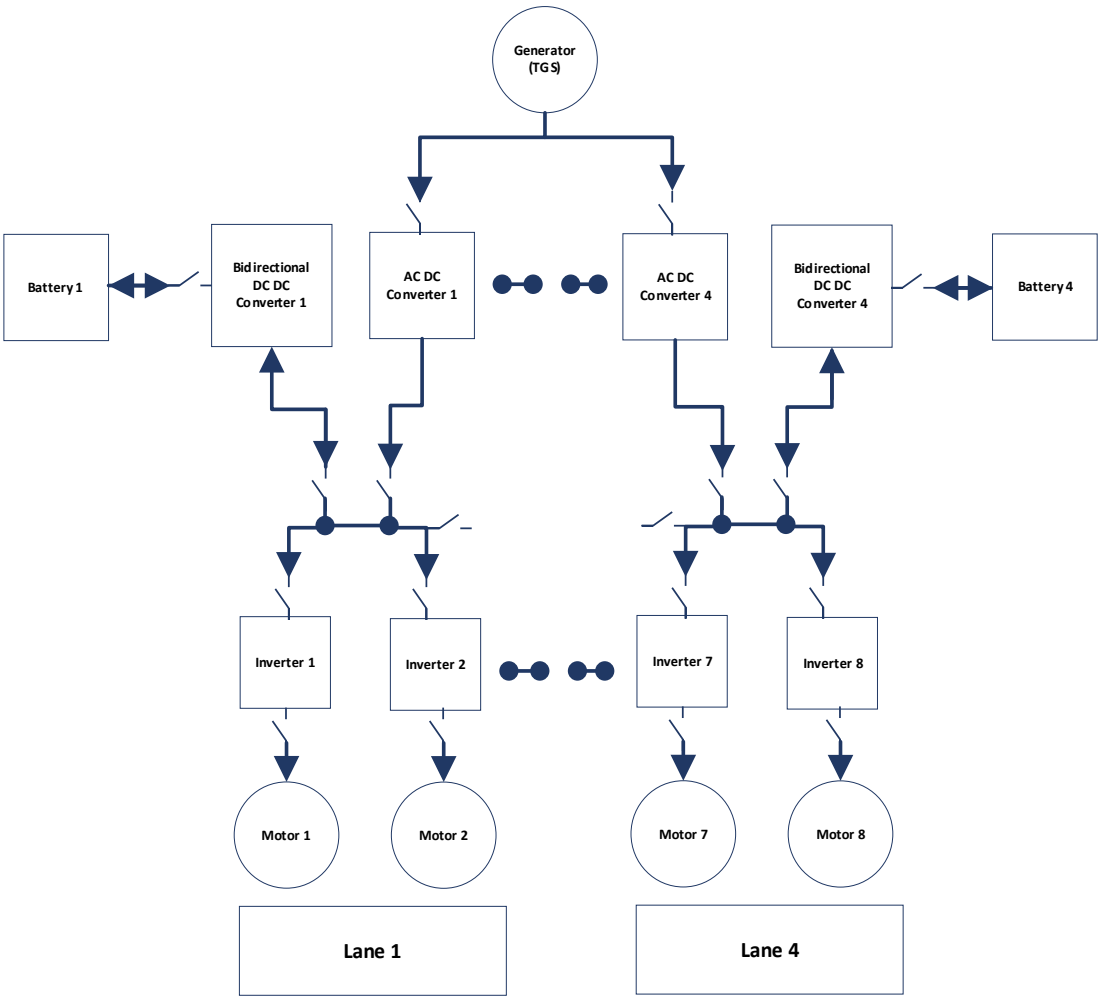


Abbildung: Diagramm des bordseitigen Energieverteilungssystems (EPDS) des Hybridflugzeugs PAX 9

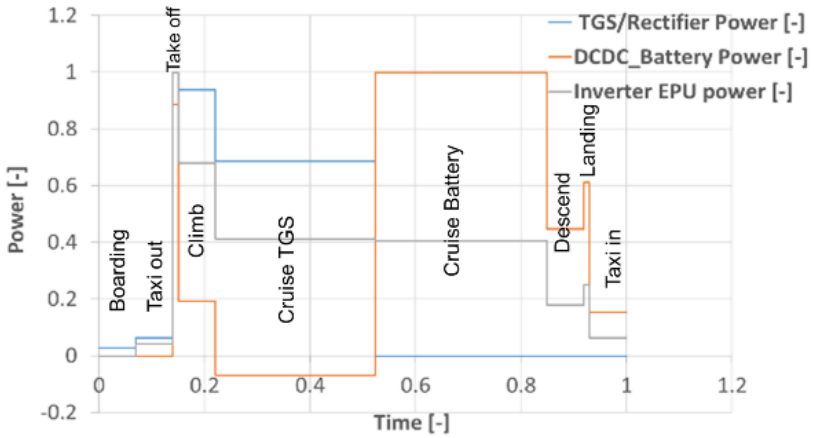


Abbildung: Normalisierte Leistungsaufteilungs-Eingaberequirements des elektrischen Energieverteilungssystems (EPDS) des hybriden PAX-9-Flugzeugs

Das EPDS wird als seriell-hybridelektrisches Antriebssystem modelliert, das aus einem Turbo-Generator-System (TGS), einem geregelten Gleichrichter, einem geregelten bidirektionalen DC/DC-Wandler, einer Batterie, einem ungeregelten Wechselrichter und einer RL-Last besteht. Es wird das IT-

Erdungssystem verwendet. Die Kabelparameter im Modell sind nach den SAE-Normen ausgelegt. Folgende Abbildung zeigt das Modell, das in Simulink entwickelt wurde.

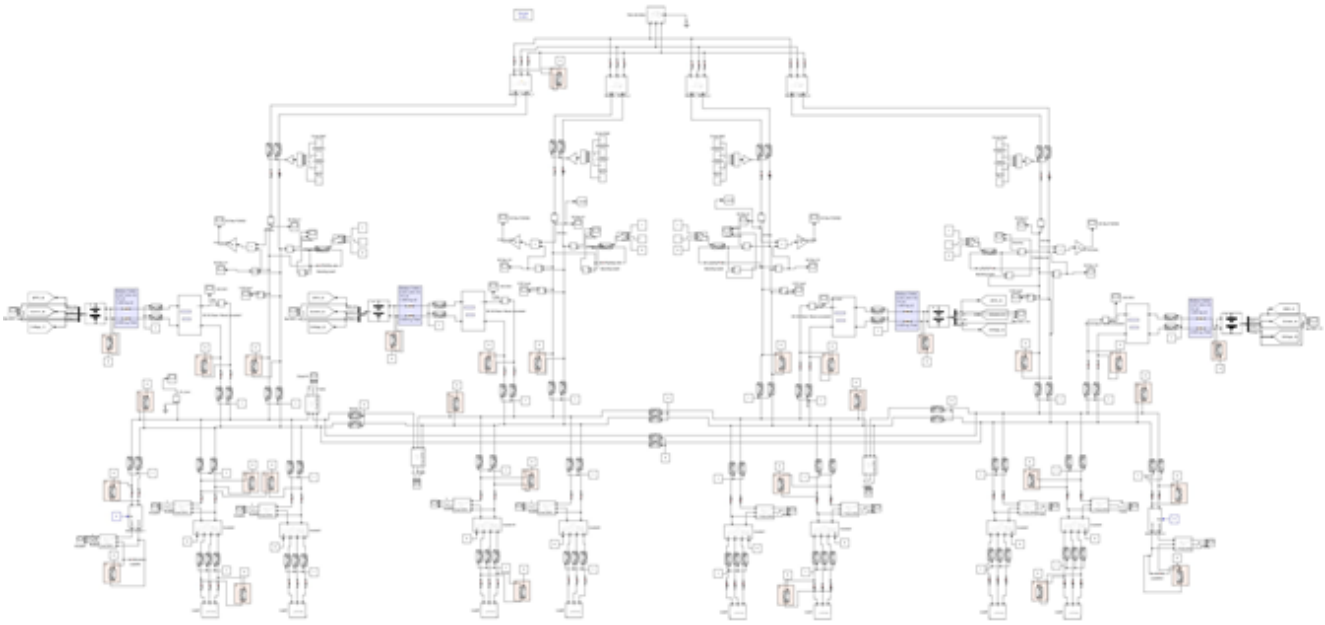


Abbildung: Simulink-Modell des elektrischen Energieverteilungssystems (EPDS) des Hybridflugzeugs PAX 9

Die Ergebnisse der Simulation der Leistungsaufteilung zwischen dem TGS und dem DC/DC-Wandler während der verschiedenen Flugphasen sind in folgender Abbildung dargestellt.

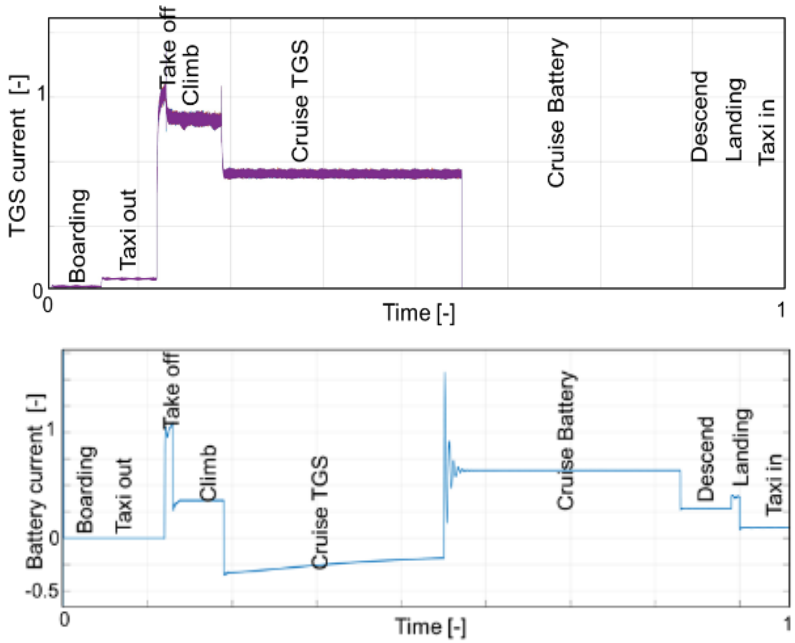


Abbildung: Ein Teil der Simulationsergebnisse mit Droop-Regelung zur Lastverteilung. TGS-Gleichrichterstrom oben und DC/DC-Wandler-Batteriestrom unten

Im Laufe des Jahres 2024 erarbeitete das IEMV-Institut den zweiten Teil des Arbeitspakets 2.2 für den Meilenstein 2.2.2 „Schutzkonzept fertiggestellt“, der aus der Entwicklung des Schutzalgorithmus zum Schutz des Gleichstromteils des Stromverteilungssystems des Hybridflugzeugs Pax 9 vor Fehlern wie Kurzschluss, Überlast, Unterspannung und Überspannung bestand. Ein differenzialbasierter

Schutzalgorithmus und ein nicht-kommunikationsbasierter Backup-Schutzalgorithmus wurden entwickelt, wie in folgender Abbildung gezeigt, basierend auf Impedanz, Überspannung, Unterspannung und Überlast. Der Algorithmus wurde mit dem zuvor im Rahmen des elektrischen Netzwerkmodells entwickelten EPDS-Modell in CPU-basierten Desktop-Simulationen getestet.

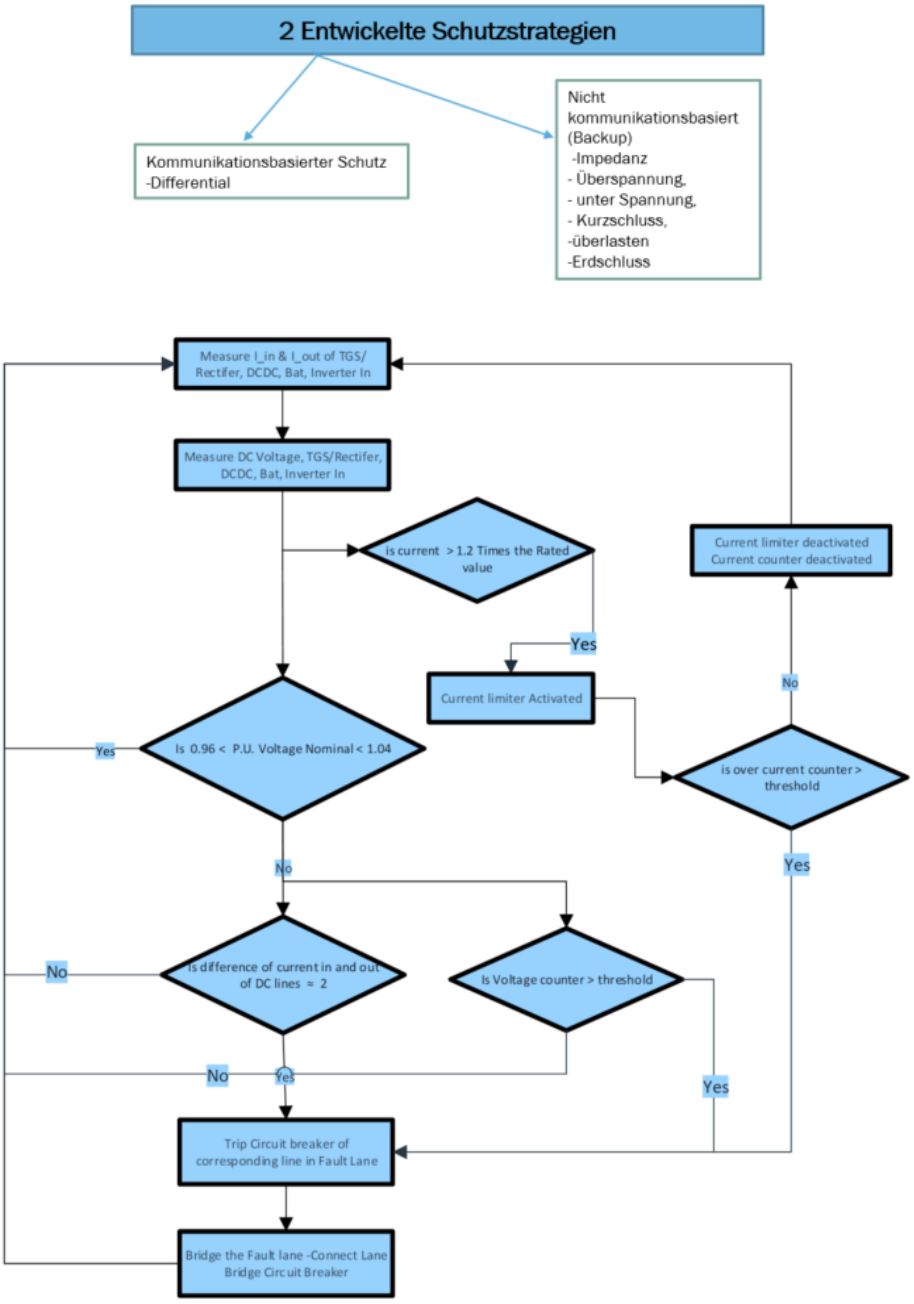


Abbildung: Kommunikationsbasierter Differentialschutz-Algorithmus

Da noch keine konkreten Normen existieren, wurden die Spannungsschwellen aufgrund von Annahmen festgelegt (siehe folgende Abbildung).

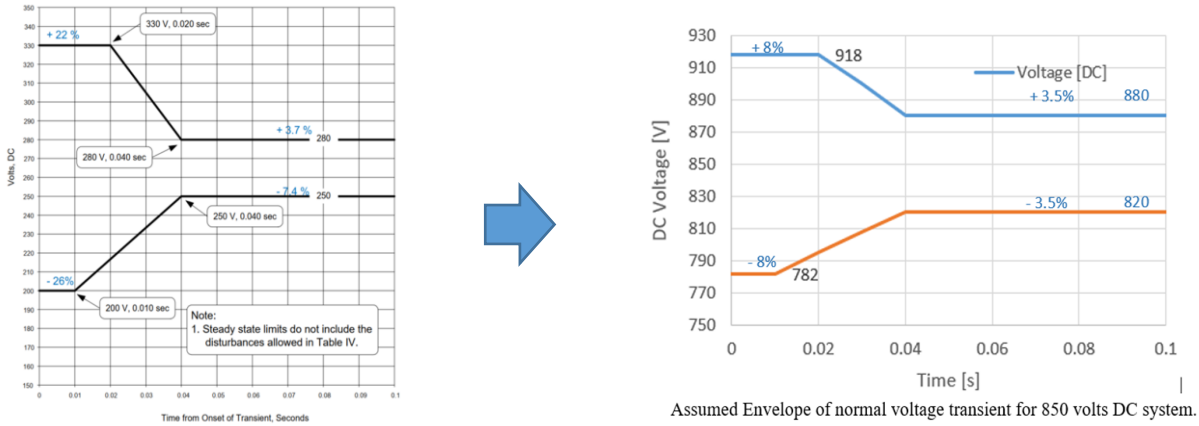


Abbildung: Angenommene Hüllkurve der normalen Spannungstransienten für ein 850-V-Gleichstromsystem

Einige der Ergebnisse der Simulationen sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.

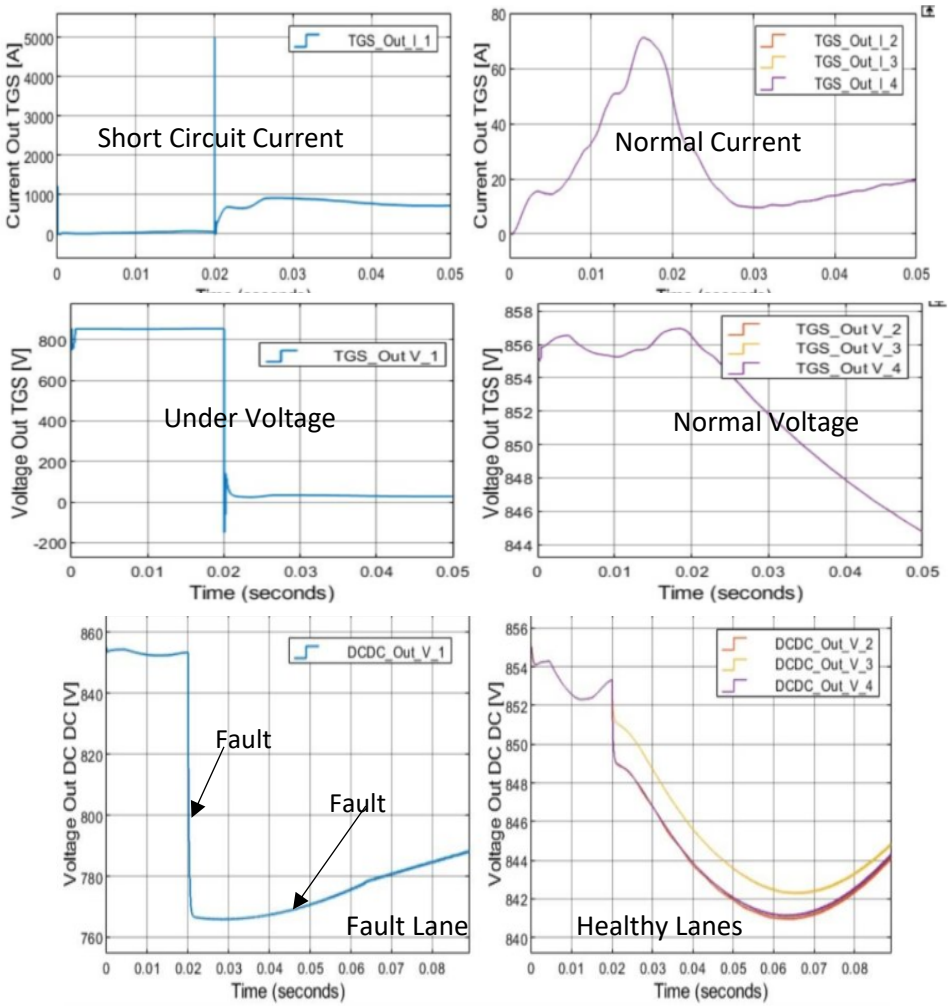


Abbildung: CPU-basierte Desktop-Fehlersimulationen mit Schutzalgorithmus

Der Schutzalgorithmus wurde entwickelt, um verschiedene Arten von Fehlern zu behandeln, wie Kurzschlussfehler zwischen Phase und Neutralleiter, Erdfehler sowie Kurzschlussfehler zwischen unterschiedlichen Leitungen. Wie in vorheriger Abbildung dargestellt, wird ein Kurzschluss in der Gleichstromleitung des Turbogenerators 1 erzeugt, was zu einem Anstieg des Fehlerstroms führt, der

erkannt wird. Die Spannung der fehlerhaften Leitung fällt ab. Im ersten Teil der vorangestellten Abbildung wird der Fehler nicht beseitigt. Im letzten Teil der vorherigen Abbildung wird derselbe Fehler erneut erzeugt, vom Algorithmus erkannt und abgeschaltet. Es ist zu sehen, dass sich die Spannung wieder erholt. Außerdem wird die fehlerhafte Leitung über die intakten Leitungen weiterhin mit Energie versorgt, was zu einem kurzen, akzeptablen Spannungsabfall führt, bevor sich die Spannung allmählich wieder stabilisiert.

Im Jahr 2025 bearbeitete das IEMV-Institut in Zusammenarbeit mit dem elenia-Institut den letzten Teil des Arbeitspakets 2.2, welcher die Validierung der entwickelten Schutzalgorithmen in einer Echtzeitumgebung auf FPGA-Hardware sowie die Validierung des EPDS-Modells auf FPGA-Hardware umfasste und mit Erreichen des Meilensteins 2.2.3 abgeschlossen werden konnte.

Aufgrund der Komplexität des Modells sowie der hohen Rechenlast war es nicht möglich, sowohl das Modell der elektrischen Stromverteilung von Flugzeugen als auch den Schutzalgorithmus mit der für Gleichstromsysteme erforderlichen Mikrosekunden-Genauigkeit auf derselben FPGA des Opal-RT-Hardware-Systems zu simulieren. Stattdessen wurde wie in nachfolgender Abbildung dargestellt das Modell der elektrischen Stromverteilung von Flugzeugen in Echtzeit auf der Opal-RT-Hardware mit der gewünschten Genauigkeit simuliert, während die Validierung des Fehler-Schutzalgorithmus auf einer Speedgoat-FPGA-Echtzeitsimulationshardware sowie auf einem externen Steuergerät mit der Hardware-in-the-Loop (HIL)-Methode durchgeführt wurde. Die Validierung des Schutzalgorithmus erfolgte in Echtzeit auf dem FPGA der Speedgoat-Hardware mit einer Zeitschrittgröße von 1 µs, während das EPDS-Modell auf dem Opal-RT-FPGA mit einer Zeitschrittgröße von 1,5 µs validiert wurde. Die hier getroffenen Annahmen und Vereinfachungen bestehen darin, dass simulierte Fehlerströme des EPDS mit einer programmierbaren Stromquelle in der Speedgoat-Hardware mit 1-µs-Genauigkeit erzeugt wurden.

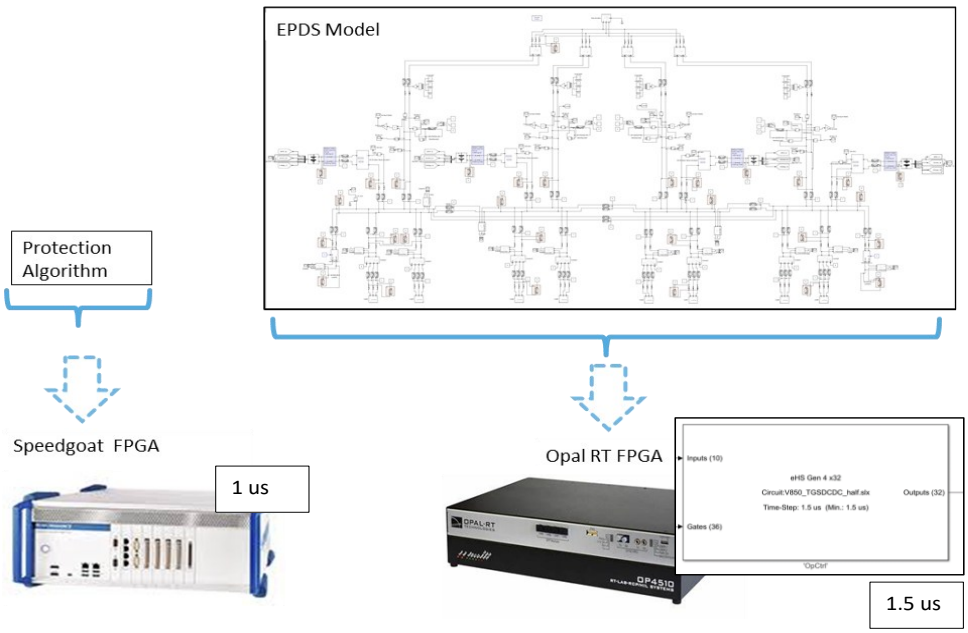


Abbildung: Validierung des Schutzalgorithmus in Echtzeit mit einem Zeitschritt von 1 µs auf der Speedgoat-FPGA-Hardware und Validierung des EPDS-Modells in Echtzeit mit einem Zeitschritt von 1,5 µs auf der Opal-RT-FPGA-Hardware.

Der Schutzalgorithmus wurde anschließend in Echtzeit auf der FPGA der Speedgoat-Hardware validiert. Das Blockdiagramm der Implementierung des Schutzalgorithmus auf der Speedgoat-FPGA ist in nachfolgender Abbildung dargestellt.

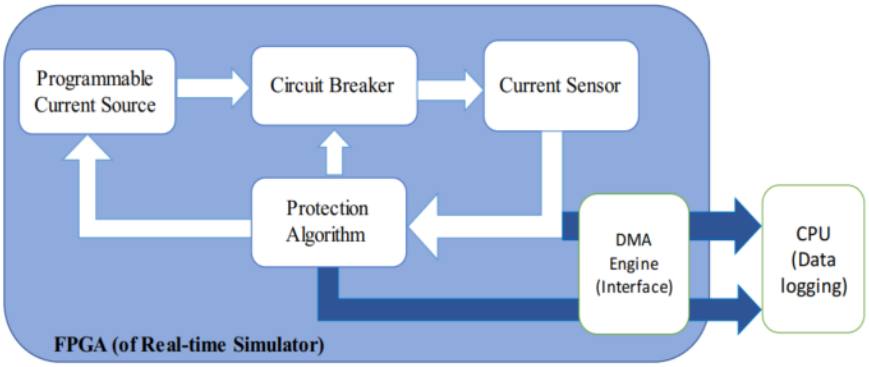


Abbildung: Blockdiagramm der Implementierung des Schutzalgorithmus auf der Speedgoat-FPGA

Weitere HIL-Simulationen wurden durchgeführt und die Ergebnisse hinsichtlich Latenz und Genauigkeit verglichen. Der Aufbau ist in folgender Abbildung dargestellt.

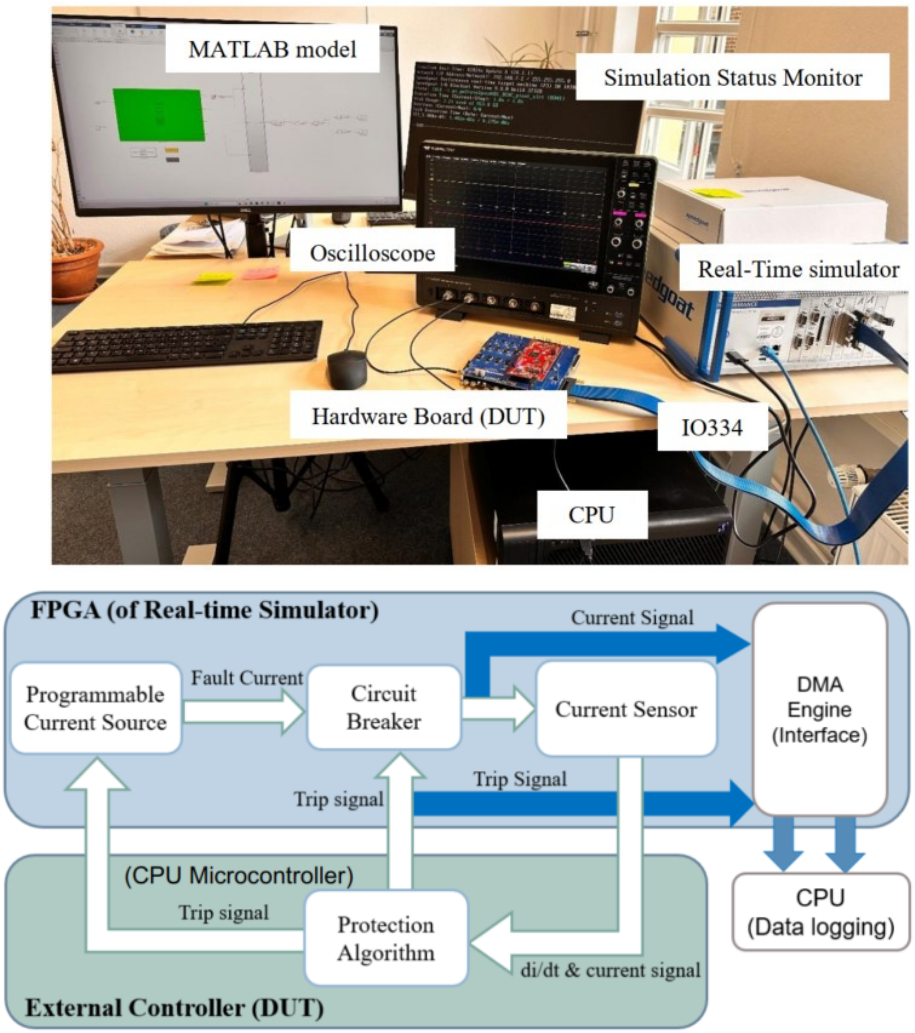


Abbildung: HIL-Aufbau realisiert mit dem Algorithmus, der auf einem CPU-Mikrocontroller als externem Device-under-Test (DUT) läuft – mit zugehörigem Blockdiagramm.

Das Ergebnis eines Kurzschlusses, der auf dem TGS simuliert wurde und auf der FPGA des SpeedGoat-Hardware-in-the-Loop-Systems läuft, wobei der Schutzalgorithmus ebenfalls auf der FPGA simuliert wird, ist in folgender Abbildung dargestellt. Man erkennt, dass der Algorithmus aufgrund der extrem schnellen Rechengeschwindigkeit der FPGA, die Zeitschritte von nur 1 µs ermöglicht, den Fehler sehr rasch detektieren kann. Der Fehlerstrom wird bereits nach 4 µs erkannt und – unter der Annahme

keinerlei Verzögerungszeit des Leistungsschalters – bereits 4 µs nach der Detektion gelöscht. Dennoch wird deutlich, dass der Fehlerstrom aufgrund der typischen Eigenschaften von Kurzschlüssen in Gleichstromsystemen in kürzester Zeit gefährliche Werte von 2000 A erreicht. Dies zeigt, dass neben schnellen, FPGA-basierten Fehlererkennungsalgorithmen weiterhin Fehlerstrombegrenzer (Fault Current Limiters) erforderlich sind, um den Anstieg des Fehlerstroms zu begrenzen.

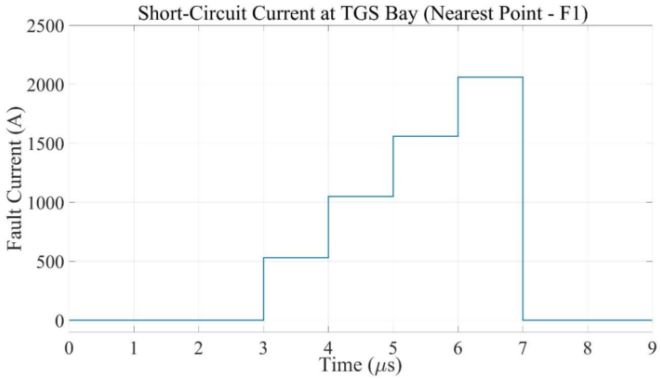


Abbildung: TGS-Kurzschlussstrom (kurz erzeugt), in Echtzeit durch den Algorithmus auf Speedgoat-FPGA in 4 µs gelöscht

Das Ergebnis eines Kurzschlusses, der auf dem TGS simuliert wurde und auf der FPGA der SpeedGoat-Hardware läuft, wobei der Schutzalgorithmus im Hardware-in-the-Loop-Verfahren (HIL) mit einem externen CPU-Controller als Device Under Test (DUT) ausgeführt wird, ist in folgender Abbildung dargestellt. Man erkennt, dass der Algorithmus aufgrund der vergleichsweise langsamen Rechenleistung des CPU-Controllers – der nur relativ große Abtastzeitschritte von 10 µs erreicht – den Fehler erst nach 44 µs detektiert. Unter der Annahme keiner Verzögerungszeit des Leistungsschalters wird der Fehlerstrom 44 µs nach der Detektion gelöscht. Wie erwartet erreicht der Fehlerstrom in dieser Zeitspanne gefährliche Werte von mehr als 9000 A. Dies zeigt, dass der Schutzalgorithmus zwar auf realer Hardware implementierbar ist, jedoch eine deutlich bessere Performance auf FPGA-Hardware erzielt wird.

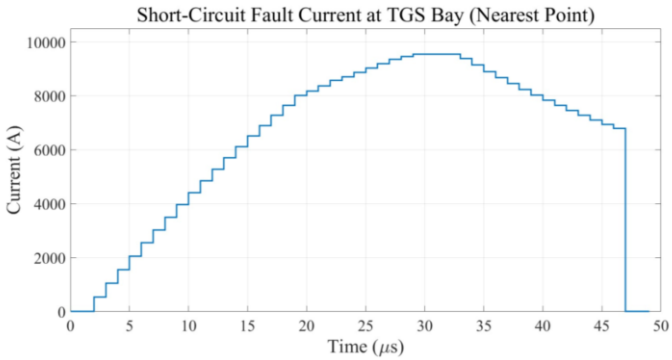


Abbildung: TGS-erzeugter Kurzschlussstrom, in Echtzeit durch Algorithmus auf externem CPU-Controller im HIL in 44 µs gelöscht

Ein Vergleich der durch die verschiedenen Echtzeitsimulationen verursachten Latenzzeiten – mit dem Algorithmus auf CPU (Software-in-the-Loop, SIL), auf FPGA sowie auf einem externen CPU-Controller im Hardware-in-the-Loop-Verfahren (HIL) als Device Under Test – ist in folgender Tabelle dargestellt. Dies zeigt, dass der Algorithmus zur Erzielung der besten Performance auf der FPGA implementiert werden sollte.

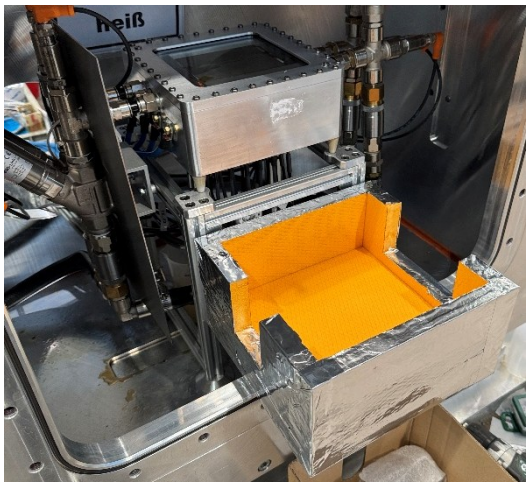
Tabelle: Vergleich der Verzögerungen bei SiL, FPGA und HiL

(Leistungsschalter-Verzögerung ignoriert)	SIL	FPGA	HIL
Dauer des Kurzschlussstroms vor der Fehlerfreistellung (µs)	3	4	44
Schnittstellenverzögerung (µs)	Keine Verzögerung	1	4
Schnittstelle	Intern	Interne Register	Analog IO334
Zeitschrittweite (µs)	1	1	10

Als Empfehlung lässt sich festhalten: Der Gleichstromschutz in Luftfahrzeugen erfordert den Einsatz neuartiger, im Mikrosekundenbereich arbeitender schneller Fehlerstrombegrenzer (fast fault current limiters) in Kombination mit auf FPGA-basierter Hardware implementierten Schutzalgorithmen sowie schnellen Gleichstrom-Leistungsschaltern.

In Arbeitspaket 2.2 wurde durch die Arbeitsgruppe Elektrische Antriebssysteme am Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen das thermische Modell der elektrischen Maschine dem HAP 3 zur Integration in das thermische Gesamtnetzwerk zur Verfügung gestellt. Die Inbetriebnahme der Forschungsplattform für Nutkühlungen beinhaltete mehrere Herausforderungen; aufgrund der geringen Viskosität des verwendeten Öls kam es zu mehreren Undichtigkeiten im Prüfstandsaufbau und die hohe Stromtragfähigkeit der Spulen (ermöglicht durch die intensive Kühlung) führte zu elektromagnetischen Störungen in den angrenzenden Durchflusssensoren, sodass Modifikationen erforderlich wurden.

Es wurden Untersuchungsreihen an der fertiggestellten Forschungsplattform für Nutkühlungen durchgeführt um das Wärmeübergangsverhalten insbesondere in Abhängigkeit des Durchflussstroms und der eingeprägten Verlustleistung zu untersuchen.



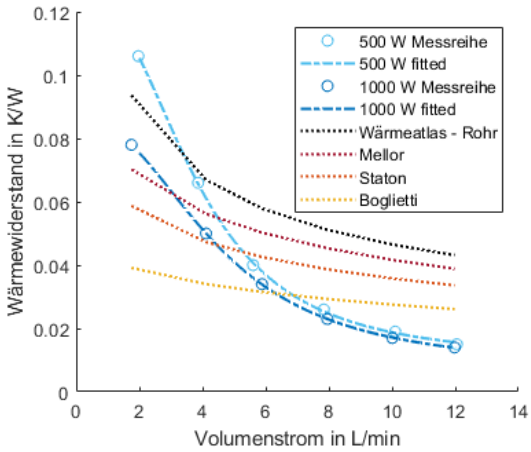


Abbildung: Forschungsplattform Nutkühlung (links) und Messreihe zum thermischen Widerstand in Abhängigkeit der Nutdurchströmung im Vergleich zu Ansätzen aus der Literatur

Durch die Arbeitsgruppe Leistungselektronik wurde eine skalierte, auf multi-level Umrichter ausgerichtete Forschungsplattform entworfen und aufgebaut, anhand derer Aufbaumöglichkeiten untersucht und Performanceabschätzungen durchgeführt wurden. Hierbei wurden insbesondere für die dreistufige ANPC-Topologie hybride Halbleiterbestückungsoptionen, verschiedene Modulationsstrategien/ Ansteuerpulsmuster, sowie die limitierende inhomogene Verlust- und Temperaturverteilung über die topologischen Schalter untersucht.

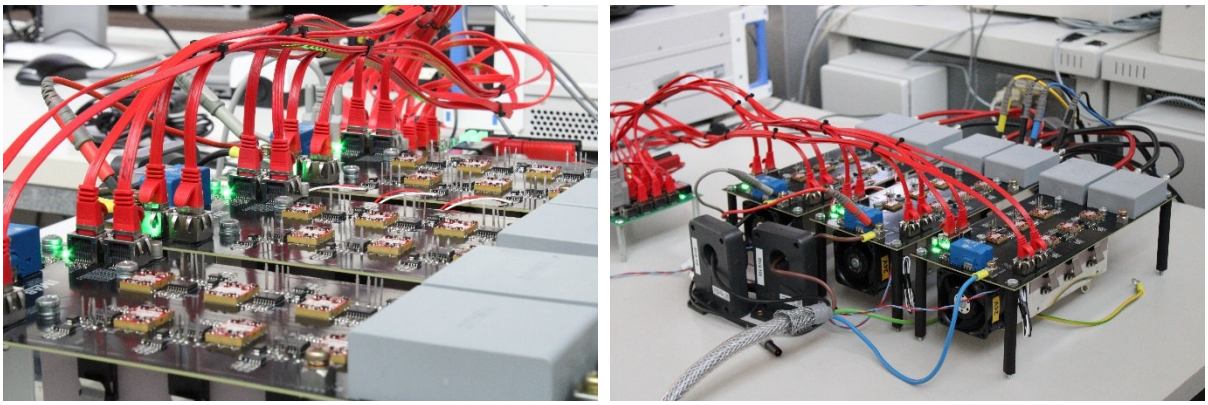


Abbildung: Forschungsumrichterplattform der AG Leistungselektronik des IMAB

Verschiedene Einzeltechnologien wie Halbleiterbestückungen wurden in diesem Aufbau untersucht. Ebenso wurden verschiedene Modulationsstrategien untersucht. Die Ergebnisse wurden mit den erstellten Modellen abgeglichen. Ein besonderer Fokus lag hierbei auf der intrinsisch inhomogenen Verlustleistungsverteilung über die topologischen Schalter der ANPC-Topologie und die Wechselwirkung dieser mit dem Kühlsystem. Ansätze zur Verlustleistungs- und Temperaturhomogenisierung wurden intensiv in der Praxis untersucht.

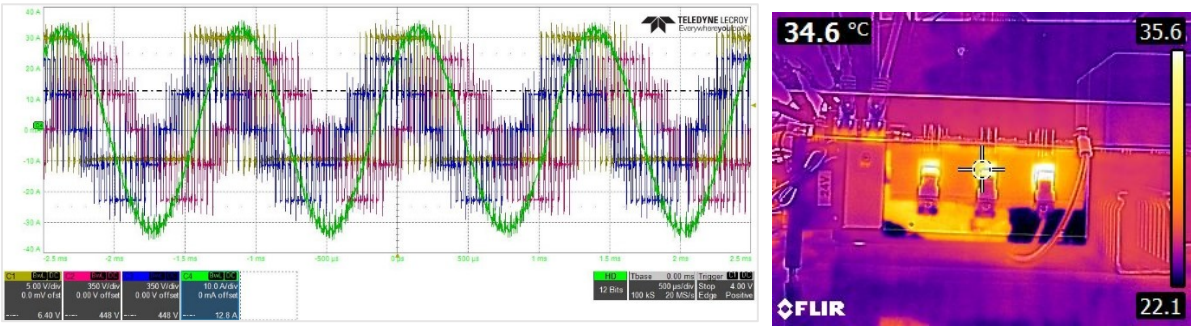


Abbildung: Links: Im experimentellen Aufbau gemessene Gate-Signale, Leiter-Leiter Spannungen und Phasenstrom für einen Arbeitspunkt des 3-level ANPC-Wechselrichters (Modulationsverfahren: SSCM2). Rechts: Aufnahme Thermokamera zur Überprüfung der Halbleitertemperaturen

2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Rahmen des Projekts wurden am elenia-Institut verschiedene Anschaffungen zur Unterstützung der technischen Arbeiten und Untersuchungen getätigt. Für die projektbegleitenden Lastfluss- und Transientenberechnungen wurden Lizenzgebühren für das Simulationsprogramm PSCAD entrichtet. Zur Durchführung und Erprobung der Schutzkonzepte in einer Laborumgebung wurde ein Hardware-in-the-Loop-System mit einem Real-Time-Simulator beschafft. Darüber hinaus wurden Tastköpfe und weitere Messtechnikkomponenten zur Messung von Spannungen und Strömen im Labor eingesetzt. Zur Aufzeichnung und Analyse der elektrischen Signalverläufe kamen zudem Oszilloskope zum Einsatz. Die für das Projekt nötigen Kabel und Filter wurden aus dem Institutsbestand entnommen und die Mittel für eine high-performance Workstation umgewidmet, die die Steuerung des Echtzeitsystems unterstützt und Simulationen von Transienten bei Fehlerfällen mit höherer Genauigkeit ermöglicht.
Im Rahmen des Projekts wurde in der Arbeitsgruppe Elektrische Antriebstechnik am Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen Bauteile für den Aufbau der modularen Nutkühlplattform beschafft. Die größten Positionen waren hierbei die Sensorik (u.a. Durchfluss-, Temperatur- und Drucksensoren) und Signalaufbereitung. Darüber hinaus wurden Probekörper, Material für das Prüfstandsgehäuse und Kühlmittel beschafft. Für die Durchführung von Untersuchungen an

Kühlstrukturen wurde ein System bestehend aus Controller und rekonfigurierbaren Eingabe-und-Ausgabe-Modulen beschafft.
Von der Arbeitsgruppe Leistungselektronik wurden Bauteile für den Aufbau der modularen Forschungsumrichterplattform für HVDC-Bordnetze beschafft. Die größten Positionen waren hierbei die Leistungshalbleiterschalter. Zusätzlich wurde Messelektronik bzw. -equipment (Temperaturfühler, Spannungs- bzw Strommesssensorik) beschafft. Darüber hinaus wurden Kühlkörper und Material für Kühlkörper beschafft. Für die Durchführung von Untersuchungen an Kühlstrukturen war die Beschaffung eines Systems bestehend aus Controller und rekonfigurierbaren Eingabe-und-Ausgabe-Modulen erforderlich. Ein Lastwiderstand, der für die HVDC-Umrichterforschungsplattform erforderlich wurde, war ebenfalls Gegenstand der Beschaffung.

2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme entwickelte im Rahmen des Projekts ein elektrisches Netzmodell in Matlab Simulink. Dieses Simulationsmodell ermöglichte eine kosteneffiziente Prüfung von Konzepten bereits in der frühen Entwicklungsphase. Im ETHAN Projekt diente das Modell zudem als direkter Input für die Überprüfung der Schutzkonzepte und war somit entscheidend für die Umsetzung und Zielerreichung des Arbeitspakets 2.2.
Die Arbeit an kritischen Systemen wie dem Bordnetz in Hinblick auf Fehlerfällen ist bei der Entwicklung von Luftfahrzeugen notwendig und kritisch zu betrachten. Basierend auf den Referenzarchitekturen unterschiedlicher Flugzeugsysteme wurden detaillierte Betrachtungen bei unterschiedlichen Fehlerfällen durchgeführt. Solche Fehler-Betrachtungen sind bei Luftfahrzeug-Entwürfen immer zwingend erforderlich, bei den anvisierten Gleichstromnetzen mit kurzen Kabellängen und kapazitivem Verhalten aber weitgehend neu. Das Schutzsystem musste komplett neu entwickelt werden, was in Form von Konzepten, Simulationsmodellen und einer lauffähigen Ko-Simulation (FPGA und CPU) gelang.
Im Teilvorhaben der Arbeitsgruppe Elektrische Antriebstechnik des Instituts für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen erfolgte eine detaillierte Analyse von Kühlmethoden und Kühlmedien für die (hybrid)elektrischen Luftfahrt. Es wurde ein umfangreicher Vergleich der Kühlmethoden hinsichtlich thermischer Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Gewicht durchgeführt. Dabei wurde auf die Abhängigkeiten zwischen Kühlung und elektrischen Maschinen fokussiert.
Im Teilvorhaben der Arbeitsgruppe Leistungselektronik erfolgte eine detaillierte Analyse von Lösungen für Antriebswechselrichter in der (hybrid)elektrischen Luftfahrt. Diverse leistungselektronische Topologien sowie Komponenten, insbesondere Leistungshalbleiterschalter, wurden untersucht. Intensiv wurden die komplexen Zusammenhänge in mehrstufigen Umrichtern betrachtet.
Alle zuvor beschriebenen Arbeiten waren notwendig und angemessen und führten im Verbund mit den Beiträgen der Partner dazu, dass die Vorhabenziele erreicht wurden.

2.4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die Arbeitsergebnisse des TU Braunschweig im Rahmen von ETHAN werden hinsichtlich der in den kommenden Jahren erwarteten ersten Implementierungen elektrischer Antriebe in Regional-flugzeugen von Bedeutung sein. Insbesondere die erarbeiteten methodischen Fähigkeiten zur gewichts- und effizienzoptimierten Auslegung sicherer elektrischer und thermischer Netzwerke für Flugantriebe werden es der TU Braunschweig ermöglichen, eine wichtige Position als Partner für Kooperationen mit Wissenschaft und Industrie einzunehmen und ihre strukturellen Schwerpunkte auszubauen.
Das entwickelte elektrische Netzmodell stellt einen flexiblen und wiederverwendbaren Beitrag zur weiteren Forschung und Entwicklung im Bereich elektrischer Antriebssysteme dar. Da das Modell in der weit verbreiteten Software Simulink implementiert ist, kann es sowohl in der akademischen Forschung als auch in der Industrie vielseitig eingesetzt werden. Es ermöglicht beispielsweise den direkten Vergleich unterschiedlicher Bordnetzarchitekturen sowie die Auslegung und Analyse relevanter Teilsysteme, beispielsweise die Schutz- und Erdungssysteme. Darüber hinaus kann das

Modell zur Untersuchung des Verhaltens einzelner Komponenten oder Komponenten-Topologien unter veränderten Bedingungen genutzt werden. Mit der geplanten Veröffentlichung werden die Ergebnisse auch einer breiteren Fachöffentlichkeit zugänglich gemacht und können dadurch künftig zur Weiterentwicklung elektrischer Antriebssysteme beitragen.
Die Ergebnisse im Rahmen des ETHAN-Projekts werden außerdem von Bedeutung sein für die Umsetzung zuverlässiger Schutzstrategien in zukünftigen Gleichstromsystemen im Allgemeinen sowie in zukünftigen Gleichstrom-Antriebssystemen für Luftfahrzeuge im Besonderen. Die erzielten Forschungsergebnisse zu den Schutzkonzepten wurden auf zwei wissenschaftlichen Konferenzen veröffentlicht und werden zu weiteren Projekten und zur Zusammenarbeit mit Industriepartnern führen. Zukünftige Projekte, wie beispielsweise das Projekt MSPROSYS mit dem DLR, werden von den gewonnenen Erkenntnissen profitieren.
Die Arbeiten der Arbeitsgruppen Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik des Instituts für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen sind im Bereich der Forschung zu verorten. Erzielte Forschungsergebnisse versprechen durch die zukünftige Zusammenarbeit mit Partnern aus der Industrie einen wirtschaftlichen Nutzen. Resultate der durchgeführten Forschung wurde auf unterschiedlichen Konferenzen, Kongressen und Workshops und in wissenschaftlichen Journalen veröffentlicht. Darüber hinaus finden die Projektergebnisse Anwendung in der Lehre und im Rahmen von studentischen Abschlussarbeiten. Auch bereits laufende Fördervorhaben, wie bspw. die Projekte KryoLE, DriveForGaN oder der Projektverbund TEN.efzn profitieren von den gewonnenen Erkenntnissen.

2.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Eine Vielzahl an Akteuren aus der akademischen Forschung und Industrie befasst sich mit der Elektrifizierung der Luftfahrt.
Das Exzellenzcluster SE²A (Sustainable and Energy-Efficient Aviation) forscht intensiv an der Definition des Bordnetzes sowohl auf System- als auch auf Komponentenebene. Diese Forschung erfolgt interdisziplinär und fokussiert auf nachhaltige und energieeffiziente Entwicklungen in der Luftfahrt. Zudem sind relevante Publikationen erschienen, darunter folgende Arbeiten, welche eine umfassende Übersicht zum Thema elektrisches Fliegen bieten und detailliert die Topologien verschiedener Komponenten wie beispielsweise Wandler und Schalter diskutieren:

- H. Schefer, L. Fauth, T. H. Kopp, R. Mallwitz, J. Friebe and M. Kurrat, "Discussion on Electric Power Supply Systems for All Electric Aircraft," in IEEE Access, vol. 8, pp. 84188-84216, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2991804.
- H. Schefer, W. -R. Canders, J. Hoffmann, R. Mallwitz and M. Henke, "Cryogenically-Cooled Power Electronics for Long-Distance Aircraft," in IEEE Access, vol. 10, pp. 133279-133308, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3228161.

Im Exzellenzcluster SE²A wurden außerdem Beiträge zur Direktleiterkühlung veröffentlicht, welches einen weiteren vielversprechenden Kühlansatz darstellt. Darüber hinaus ist eine Überblicksstudie zur Kühlung elektrischer Maschinen erschienen. Auch im Bereich der Leistungselektronik sind, wie im Folgenden aufgelistet, Arbeiten bekanntgeworden.

- N. Blanken, R. J. Keuter and B. Ponick, "Stator Slot Design Guidelines for Concentrated Windings with Direct Liquid Cooling Channels for Electrified Aviation," 2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Torino, Italy, 2024, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICEM60801.2024.10700410.
- Konovalov, D.; Tolstorebrov, I.; Eikevik, T.M.; Kobalava, H.; Radchenko, M.; Hafner, A.; Radchenko, A. Recent Developments in Cooling Systems and Cooling Management for Electric Motors. Energies 2023, 16, 7006. https://doi.org/10.3390/en16197006
- J. Ebersberger, R. J. Keuter, B. Ponick and A. Mertens, "Power Distribution and Propulsion System for an All-Electric Regional Aircraft," 2023 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International

Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Venice, Italy, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/ESARS-ITEC57127.2023.10114868.

- L. Fauth, J. Ebersberger, Y. Cao and J. Friebe, "Advantages of a Variable Board Supply Voltage in All-Electric Aircraft with Regard to Cosmic Radiation Induced Failures," 2023 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Venice, Italy, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ESARS-ITEC57127.2023.10114811.
- Y. Cao et al., "Inverter design for future electrified aircraft propulsion systems under consideration of wear-out failure and random failure," 2023 25th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'23 ECCE Europe), Aalborg, Denmark, 2023, pp. 1-10, doi: 10.23919/EPE23ECCEEurope58414.2023.10264306.
- Y. Cao, H. Lyu and A. Mertens, "Mission profile-based operation strategies to improve the reliability of an ANPC inverter in future electrified aircraft propulsion systems," 2024 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Chicago, IL, USA, 2024, pp. 1-8, doi: 10.1109/ITEC60657.2024.10598878.

2.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Resultate der durchgeführten Forschung wurde auf unterschiedlichen Konferenzen, Kongressen und Workshops und in wissenschaftlichen Journalen veröffentlicht. Die im Rahmen des Projektes erfolgten Veröffentlichungen und entstandenen Beiträge sind im Folgenden aufgeführt.

- F. Zeng, T. Kopp, D. Bösche, L. Claaßen, P. Vieth, M. Terörde, M. Kurrat, "Investigation of DC circuit breaker with extinguishing chamber at reduced ambient pressure for an application in avionics," NEIS 2023; Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems, Hamburg, Germany, 2023, pp. 175-178.
- H. Jiope, W. H. Syed, F. Zeng, F. Witt, E. Hanli, M. Kurrat, M. Terörde, "Distributed Control Algorithm Validation for Voltage Regulation and Load Sharing in Series-Hybrid-Electric Aircraft Propulsion Systems," NEIS 2024; Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems, Hamburg, Germany, 2024, pp. 78-83, doi: 10.30420/566464009.
- F. Zeng, A. Mehraban, A. Naderi, M. Terörde and M. Kurrat, "Influence of Power Split Ratio on Mass, Volume, and CO2 Emissions in Aircraft Electric Hybrid Propulsion Systems: A Multi-Criteria Decision-Making Approach," in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, doi: 10.1109/TAES.2025.3618208.
- H. Jiope, M. Kurrat and M. Terörde, "DC Protection in Series-Hybrid-Electric Aircraft Propulsion Systems with Ultra-fast Momentary Circuit Interrupter and Fault Detection Algorithm," 2025 IEEE Kiel PowerTech, Kiel, Germany, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/PowerTech59965.2025.11180682.
- K. R. Konda, J. Franzki, D. Sharma, P. König, A. Mathiazhagan, M. Henke, K. Höschler, "Quantitative Assessment of Cooling Methods for Electrical Machines in Aircraft Drives," in IEEE Access, vol. 12, pp. 192768-192785, 2024. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3517319.
- J. Franzki and M. Henke, "Design and Scaling Effects of Permanent Magnet Synchronous Machines for Propeller Direct Drives," 2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Torino, Italy, 2024, pp. 1-7. doi: 10.1109/ICEM60801.2024.10700166.
- J. Franzki and M. Henke, "Fast Electromagnetic and Thermal Design Space Analysis for PMSM Propeller Drives," 2023 IEEE 14th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), Montreal, QC, Canada, 2023, pp. 1-6. doi: 10.1109/PEDS57185.2023.10246713.
- D. Sharma, L. Radomsky, A. Mathiazhagan, M. Asli, K. Höschler, and R. Mallwitz, "Thermal analysis of metal foam integrated heatsink for electrified aircraft applications," International Journal of Thermofluids, vol. 30, p. 101465, Nov. 2025, doi.org/10.1016/j.ijft.2025.101465.
- L. Radomsky, R. Keilmann, R. Mallwitz, "Mission Profile-Based ANPC Inverter Design Aspect and Reliability Analysis," International Exhibition and Conference for Power Electronics,

Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM) Europe 2025, 06 – 08 May 2025, Nuremberg, Germany, 2024. doi: 10.30420/566541180.

- D. Sharma, L. Radomsky, A. Mathiazhagan, G. Hammami, K. R. Konda, M. Asli, K. Höschler, R. Mallwitz, "Strut-Based Porous Media Heatsinks for High-Performance Power Electronics Thermal Management in Electrified Aircraft," Proceedings of the ASME Turbo Expo 2025: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 16-20 June 2025, Memphis, TN, USA. V004T06A011. ASME. doi: 10.1115/GT2025-152670.
- R. Keilmann, L. Kösters, L. Radomsky, J. Franzki, M. Henke, M. Heere, R. Mallwitz, “A Comprehensive Review of Reliability Factors in All-Electric Aviation“, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2024, 30 September - 02 October 2024, Hamburg, Germany. doi: 10.24355/dbbs.084-202410150446-0.
- R. Keilmann, L. Radomsky, D. Ferch and R. Mallwitz, "Study of Inverter Topologies for Electrified Aircraft Propulsion Systems Based on Cyclic Loading Induced Bond Wire Fatigue," 2024 Energy Conversion Congress & Expo Europe (ECCE Europe), Darmstadt, Germany, 2024, pp. 1-8. doi.org/10.1109/ECCEEurope62508.2024.10752026.
- L. Radomsky, M. Klintz, R. Mallwitz, "Conceptualization and Experimental Assessment of Design Aspects for 3-Level ANPC Inverters," International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM) Europe 2024, 11-13 June 2024, Nuremberg, Germany, 2024. doi: 10.30420/566262463.
- L. Radomsky, R. Keilmann, D. Ferch, R. Mallwitz, "Challenges and Opportunities in Power Electronics Design for All- And Hybrid Electric Aircraft: A Qualitative Review and Outlook", CEAS Aeronautical Journal, 2024. doi: 10.1007/s13272-024-00770-6.
- L. Radomsky, R. Mallwitz, "Review, Comprehensive Analysis and Derivation of Analytical Power Loss Calculation Equations for Two- to Three-Level Midpoint Clamped Inverter Topologies with Hybrid Switch Configurations", Energies, 2023, 16, 6710. doi: 10.3390/en16186710