

Partner-Abschlussbericht vorgelegt durch die CirQua GmbH

im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms LuFo VI-1

Berichtszeitraum: 01.11.2020 bis 31.10.2022

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen (FKZ) 20M 1908G

E-SATstart

Technologieentwicklung zur Analyse von Sensorsignalen zur Sicherstellung des sicheren Betriebs elektrischer Antriebsstränge

Dr. David Franck
CirQua GmbH
Am Gut Wolf 2a
52070 Aachen

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	2
I. KURZBESCHREIBUNG.....	3
II. EINGEHENDE DARSTELLUNG.....	7
AP 2.3: Luftfahrtzertifizierbarer Elektromotor	7
i. AP 2.3.1.....	7
ii. 2.3.3 Erprobung.....	9
AP 2.4: Luftfahrtzertifizierbarer Umrichter	13
iii. AP 2.4.1.....	13
iv. AP 2.4.2.....	19

I. Kurzbeschreibung

1. Aufgabenstellung

Aus dem Projekt sollen durch das Gesamtkonsortium Schlüsseltechnologien für ein hybrid-elektrisches Fliegen hervorgehen.

Für den elektrohybriden Antrieb, bestehend aus elektrischer Maschine und Wechselrichter, welcher durch die Projektpartner untersucht wird, sind leichte und leistungsfähige elektrische Komponenten erforderlich, die den effizienten Betrieb ermöglichen.

Die CirQua GmbH hat sich im Rahmen des Verbundprojekts auf den Themenschwerpunkt elektrischer Antrieb und Prüfmöglichkeiten des elektrischen Antriebssystems fokussiert. Dabei standen die Entwicklung von Prüf- und Analysesystemen für elektrische Antriebe in Fluganwendungen im Vordergrund. Insbesondere werden Verfahren und Systeme zur Nachbildung von fehlerhaften Sensorsignalen untersucht. Mit diesen Themen werden die Ziele zur Entwicklung und der Aufbau des elektrischen Antriebes im Rahmen des Projektes unterstützt.

Konkrete Aufgaben der CirQua GmbH im Rahmen dieses Projektes sind:

- Erarbeitung einer luftfahrtrelevanten FMEA in Bezug auf den leistungselektronischen Teil des Antriebes
- Erarbeitung eines Konzeptes zur HiL-Simulation von gestörten Sensorsignalen und prototypische Umsetzung

Dabei wurde Primär die LuFO VI-1 Zielsetzung "Entwicklung von (hybrid-)elektrischen Antriebssystemen als möglicher Wegbereiter für disruptive Flugzeugkonfigurationen mit geringstem ökologischem Fußabdruck" aufgegriffen.

2. Voraussetzungen

Für die erfolgreiche Umsetzung der Ziele ist für die CirQua GmbH speziell die Zusammenarbeit mit dem IEM der RWTH Aachen University und der Engiro GmbH notwendig. Besonders für die Erarbeitung der FMEA ist die Zusammenarbeit in einem interdisziplinären Team notwendig.

Neben dem Hauptziel der Entwicklung einer SiL/HiL Umgebung unterstützt die CirQua GmbH prototypische Tests, welche auf Prüfständen des IEM der RWTH Aachen University durchgeführt werden.

Für die Erlangung der Ziele ist die Förderung Voraussetzung, da die beschriebene Erweiterung der Messsysteme einen erheblichen FuE Aufwand erfordern.

3. Planung

Die Arbeiten der CirQua GmbH sind im Hauptarbeitspaket 2 entsprechend der Planung des Gesamtvorhabens eingegliedert.

Konkret arbeitet die CirQua GmbH im AP 2.3 gemeinsam mit dem IEM der RWTH Aachen University und der Engiro GmbH.

Hauptziel des AP 2.3 ist die Erarbeitung der FMEA. Diese ist planmäßig zum Ende der Projektlaufzeit entsprechend Meilenstein 2.3.1 abgeschlossen worden.

Weiter wurde die Erprobung des Wechselrichter und Antriebstrang unterstützt. Die Arbeiten sind zum einem dem Elektromotor und zum anderen der Leistungselektronik zugeordnet. Die Erprobung wurde entsprechend den Meilensteinen 2.3.3 und 2.4.3 abgeschlossen.

Hauptziel von AP 2.4 ist die Untersuchung einer SiL/HiL Umgebung. Dazu wurde eine Schnittstellendefinition laut Meilenstein 2.4.1 erarbeitet. Die SiL/HiL Test wurden laut Meilenstein 2.4.2 zum Ende der Projektlaufzeit abgeschlossen.

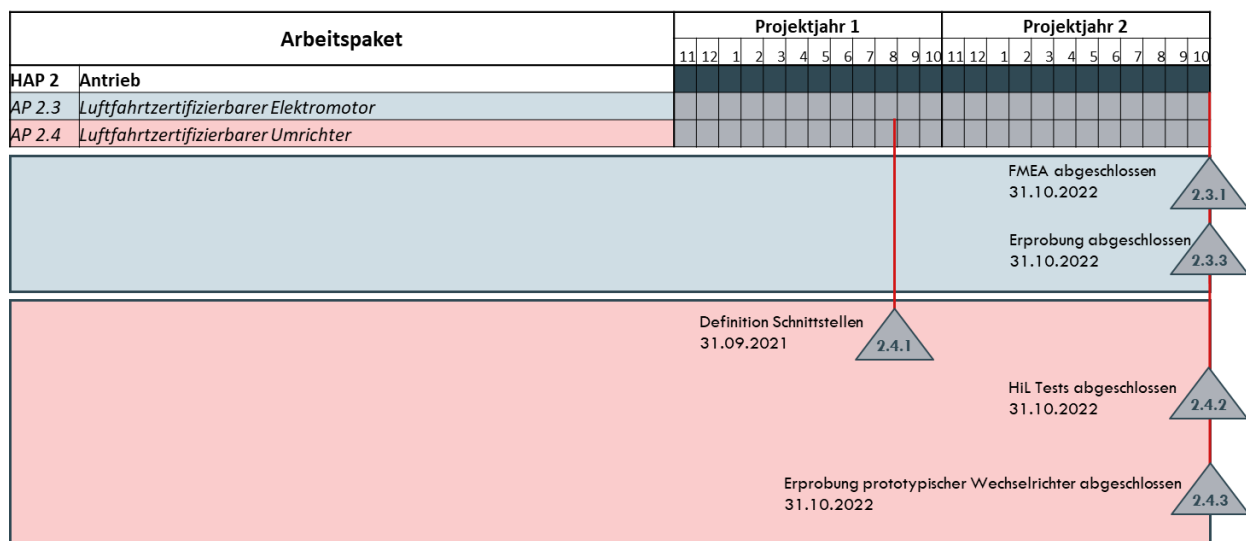


Abbildung 1 Zeitplanung

4. Technischer und wissenschaftlicher Stand

Die Durchführung von Fehlermöglichkeits- und Einflussanalysen (FMEA) stellt ein standardisiertes Verfahren zur präventiven Vermeidung von Fehlern und Reduktion der Auswirkungen dar. Auf Basis einer Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Engiro GmbH und IEM der RWTH Aachen University wird eine FMEA für einen elektrischen Antriebstrang entwickelt.

Im Fokus für die CirQua GmbH steht die Entwicklung einer SiL/HiL Umgebung für die Untersuchung von fehlerhaften Sensorsignalen. Auf dieser Basis soll der Einfluss möglicher Sensorausfälle bewertet werden. Laut [1] sind an 80% der Fehlerfälle innerhalb eines Luftfahrtantriebsstrangs Sensorausfälle beteiligt. Daher sind redundant ausgeführte Systeme zur Messdatenerfassung Stand der Technik. Jedoch fehlen bei der Anwendung elektrischer Antriebstränge im Bereich der Luftfahrt Erfahrungswerte und ein vertieftes Verständnis der zugrundeliegenden technisch-physikalischen Wirkzusammenhänge. Für Anwendungsfelder wie automobiler Traktionsantriebe gibt es Veröffentlichungen zu wissenschaftlichen Arbeiten und auch kommerziell verfügbare redundante Sensoren (z.B. integrierte Rotorpositionserfassungssysteme mittels AMR und GMR [2]).

Die Auswirkungen von fehlerhaften Sensorwerten der Rotorpositionserfassung auf die Regelung elektrischer Maschinen werden in [3] dargestellt. In [4] wird der Einsatz von redundanten Sensorsystemen untersucht. Weiter wird in der Dissertation [5] die gesamte Regelstrecke am Beispiel einer Synchronmaschine untersucht. Eine Erkennung von nicht-plausiblen Messwerten von Stromsensoren wird in [6] untersucht.

Alle gefunden Veröffentlichungen basieren auf simulativen Untersuchungen. Aufbauend auf diesem Stand soll eine Echtzeitmodellumgebung untersucht werden.

[1] Z. Zhao, Y. Sun and J. Zhang, "Fault detection and diagnosis for sensor in an aero-engine system," 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Yinchuan, 2016, pp. 2977-2982. doi: 10.1109/CCDC.2016.7531492

[2] <https://www.infineon.com/cms/de/product/sensor/magnetic-sensors/magnetic-position-sensors/angle-sensors/tle5009a16d-e1210/>, abgerufen am 20.09.2019

[3] M. Bourogaoui, H. Ben Attia Sethom, I. Slama Belkhodja, "Speed/position sensor fault tolerant control in adjustable speed drives – A review", ISA Transactions, Volume 64, 2016, Pages 269-284, ISSN 0019-0578, doi: 10.1016/j.isatra.2016.05.003.

[4] Wolfgang Granig, Lisa-Marie Faller, Dirk Hammerschmidt, Hubert Zangl, "Dependability considerations of redundant sensor systems", Reliability Engineering & System Safety, Volume 190, 2019, 106522, ISSN 0951-8320, doi: 10.1016/j.ress.2019.106522.

[5] Jens Gächter, "Evaluation of Rotor Position Sensor Characteristics and Impact on Control Quality of Permanent Magnet Synchronous Machines", Doctoral Thesis, Graz University of Technology, 2017

[6] Gang Huang, Edwardo F. Fukushima, Jinhua She, Changfan Zhang, Jing He, "Estimation of sensor faults and unknown disturbance in current measurement circuits for PMSM drive system", Measurement, Volume 137, 2019, Pages 580-587, ISSN 0263-2241, doi: 10.1016/j.measurement.2019.01.076.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Konsortium des Projektes umfasst folgende Partner:

- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.
- Helix Carbon GmbH
- ENGIRO GmbH
- IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH
- CirQua GmbH

- MTU Aero Engines AG
- Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH

Im Rahmen der Arbeitspakete 2.3 und 2.4 arbeitet die CirQua GmbH eng mit den Partnern IEM und IST der RWTH Aachen University sowie der Engiro GmbH zusammen.

Das IEM der RWTH Aachen University hat eine große Expertise in den Bereichen Entwurf, Berechnung, Analyse, Simulation und Regelung von elektrischen Antrieben. In zahlreichen Forschungsprojekten wurden innovative Antriebskonzepte am Institut entwickelt, prototypisch aufgebaut und validiert. Das Institut verfügt über Prüfstände mit umfangreichen Prüfmöglichkeiten und ein Elektroniklabor zur Umsetzung von prototypischen Wechselrichtern.

Gemeinsam mit den o.g. Partnern und dem IST der RWTH Aachen University, welche die Systemkompetenz des Gesamtflugzeuges mitbringt, wird die wichtige FMEA durchgeführt.

II. Eingehende Darstellung

AP 2.3: Luftfahrtzertifizierbarer Elektromotor

i. AP 2.3.1

Die Arbeiten an der FMEA für den Elektromotor wurden in Kooperation mit dem IEM der RWTH Aachen University und der Engiro GmbH durchgeführt. Es wurden Funktionen, Fehlermöglichkeiten und Ursachen für Probleme in Elektromotoren mit den Partnern erarbeitet. Weiter, hat sich die CirQua GmbH bei den Arbeiten an der FMEA auf den Wechselrichter fokussiert. Da der Entwicklungsstand des Umrichters zum Zeitpunkt der Erstellung der FMEA noch in der Konzeptphase befand, wurde ein Top-Down-Ansatz mit einer qualitativen Bewertung von Ausfallwirkungen und Ausfallursachen verfolgt.

Die einzelnen Termine der FMEA werden durch das IEM der RWTH Aachen University organisiert. Die Ausführliche Dokumentation des Vorgehens wird durch das IEM der RWTH Aachen University dargestellt. Hier werden die für das Projekt der CirQua GmbH relevanten Schritte dokumentiert.

Die Durchführung der FMEA umfasst folgende Schritte:

- FMEA Planung
- Strukturanalyse
- Funktions- und Fehleranalyse: Qualitative Top-Down Analyse auf Basis des Konzeptstands des Wechselrichters (Lebensphase 4: Konzept):
 - Die Analyse der notwendigen Funktionen und physikalischen Komponenten für Treiber, Sensorik und Leistungsteil des Wechselrichters sind durchgeführt
 - Fehlerarten, mögliche Ursachen und Auswirkungen sind analysiert
- Verknüpfung mit luftfahrtspezifischen Randbedingungen aus der FHA
- Bewertung der sicherheitskritischen Komponenten und Fehlerfälle
- Risikooptimierung
 - Ableitung von Vermeidungsstrategien für Fehlerfälle mit hoher Priorität
 - Neubewertung der Fehlerfälle in Bezug auf die Bedeutung (B), Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) und Auftretenswahrscheinlichkeit (A)

Die Funktions- und Fehleranalyse ist auf Grund des Entwicklungsstandes eines möglichen Wechselrichters als Top-Down Analyse durchgeführt. D.h. es wird von der Zielfunktion in der Anwendung ausgegangen und mögliche Fehlerfälle werden von diesen Funktionen abgeleitet. Die Fehlerfolgen werden auf mögliche Komponenten übertragen.

Bei der Risikoanalyse ist eine spezifische Skala zur Einordnung der Bedeutung (B), Auftretenswahrscheinlichkeit (A) und Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) entwickelt und eingesetzt worden. Zur Bewertung der einzelnen Fehlerfälle wird die Risikoprioritätszahl (RPZ) als Multiplikation von B, A und E eingesetzt. Auf Grundlage einer Priorisierung von Maßnahmen durch eine Verknüpfung der RPZ und der Skalierung von B, A und E wird eine Einstufung der Fehlerfälle nach hoher, mittlerer und niedriger Priorität durchgeführt. Im Weiteren werden Maßnahmen nur für Fehlerfälle mit hoher Priorität analysiert.

Nach Analyse und Definition möglicher Maßnahmen zur Reduktion der Einstufung von B, A oder E werden eine neuerliche Berechnung der RPZ und eine Priorisierung durchgeführt.

Das Ergebnis der FMEA in Form einer Excel Tabelle ist in Abbildung 2 dargestellt. Da der Fokus der CirQua GmbH auf dem Umrichter liegt, ist nur dieser Abschnitt der FMEA Tabelle dargestellt.

A - Elektrische Maschine															
Nr.	Komponente, Arbeitsschritt, konstruktives Feature	Fehlerfolgen/-wirkungen	Berechtigter Zustand					Kommentar	Verbesserter Zustand						
			Detektion des Fehlers (Messverfahren)	Bedeutung (B)	Auftretenswahrscheinlichkeit (A)	Entdeckungswahrscheinlichkeit (E)	RPZ B*A*E		getroffenes Maßnahme	Bedeutung (B)	Auftretenswahrscheinlichkeit (A)	Entdeckungswahrscheinlichkeit (E)	RPZ B*A*E	Actions Priority (AP)	Kommentar
B - Umrichter															
I - Physikalische Kräfte															
101	Leistungsmodul	Klein Driftstrom kann gesteuert werden (als Schalter defekt, kein Stromfluss)	Strommessung	10	10	1	100 H	(E) Strommessung	Prototypenprüfung in mit Serienanfertigung gefertigtes Prototypen	10	4	1	40 M		
		Ungewöhnlicher Strom-Fluss (Schalter teilweise defekt)		7	10	7	430 M		Prototypenprüfung in mit Serienanfertigung gefertigtes Prototypen	7	4	4	112 M		
		Ungewöhnlicher Strom-Fluss -> Dynamische Driftstroms können erkannt werden		10	10	7	700 M		Prototypenprüfung in mit Serienanfertigung gefertigtes Prototypen	10	4	4	160 H		
102	Wärmepumpe	Fehlerrückmeldung Modell	Fehlerrückmeldung Triebwerk	1	10	1	10 L	(E) Triebwerk-Fehlerrückmeldung							
		Rückstrom-Temperatur im Betrieb als Warnung -> Dauerbetriebsspannung nicht einstellbar		4	1	4	16 L	(A) Wärmepumpe nicht vorinstalliert							
100	Güter-Treiber	Güter-Treiber Schalter		10	10	7	700 M		HSFL-Test	10	4	4	160 H		
		Güter-Treiber Schalter		10	10	7	700 M		Signalüberprüfung	10	4	4	160 H		
		Klein Schalter		10	10	7	700 M		4P-Kommunikations-/Vibrationschutz von Driftstrom -> A wird gesteuert -> zeitliche Kommunikationsverzögerung, zwischen Regelstrom und Triebwerk -> E wird gesteuert	10	1	4	40 L		
		Klein Schalter		10	10	1	100 M		Vibrationschutz	10	1	1	10 L		
		Klein Schalter		10	10	1	100 M		Prototypenprüfung in mit Serienanfertigung gefertigtes Prototypen	10	1	1	10 L		
		Klein Schalter		10	10	1	100 M		Prototypenprüfung in mit Serienanfertigung gefertigtes Prototypen	10	1	1	10 L		
		Klein Schalter		10	10	4	400 M		4P-Kommunikations-/Vibrationschutz von Driftstrom -> A wird gesteuert -> zeitliche Kommunikationsverzögerung, zwischen Regelstrom und Triebwerk -> E wird gesteuert	10	1	4	40 L		
		Klein Schalter		10	10	4	400 M		4P-Kommunikations-/Vibrationschutz von Driftstrom -> A wird gesteuert -> zeitliche Kommunikationsverzögerung, zwischen Regelstrom und Triebwerk -> E wird gesteuert	10	1	4	40 L		
		Schutzfunktion FIRM vor		10	10	4	400 M		Sensor mit eigener Fehlbewertung	10	10	1	100 H		
		Güter-Treiber schaltet vor		10	10	1	100 M		Prototypenprüfung in mit Serienanfertigung gefertigtes Prototypen	10	4	1	40 M		
		Schutzfunktion FIRM vor		10	10	1	100 M		Vibrationschutz	10	4	1	40 M		
		Schutzfunktion FIRM vor		10	10	4	400 M		Prototypenprüfung in mit Serienanfertigung gefertigtes Prototypen	10	4	1	40 M		
104	Kondensator (DC-Zwischenkreis)	Schutzfunktion FIRM vor		10	10	1	100 M		Vibrationschutz	10	4	1	40 M		
		Antriebs-Temperatur des Kondensators übersteigen		4	4	4	64 L								
		Übersteigen der Lebensdauer		1	4	7	28 L								
		Schutzfunktion FIRM vor		10	4	4	160 M		HSFL-Test	10	1	4	40 L		
		Schutzfunktion FIRM vor		10	4	4	160 M		HSFL-Test	10	1	4	40 L		
		Güter-Treiber schaltet vor		10	4	1	40 M								
		Güter-Treiber schaltet vor		10	4	1	40 M								
		Schutzfunktion FIRM vor		10	7	4	280 M		4P-Kommunikations-/Vibrationschutz von Driftstrom -> A wird gesteuert -> zeitliche Kommunikationsverzögerung, zwischen Regelstrom und Triebwerk -> E wird gesteuert	10	4	1	40 M		
		Schutzfunktion FIRM vor		10	4	1	40 M								
		Ungewöhnliche Drehmomentverhältnisse		1	4	7	28 L								
		Güter-Treiber schaltet vor (führt zu Überstromschutz)		7	4	10	280 M	(E) Falsch Spannungsversorgung vorhanden ist, kann ggf. Strommessung durchgeführt werden	HSFL-Test	7	4	1	28 M		
		105	Sensorik	Falscher Strom wird gesteuert	Strom-/Spannungsmessung	7	4	1	40 M		Sensor mit eigener Fehlbewertung	7	4	1	28 M
Triebwerk gegen				10	4	1	40 M								
Ungewöhnliche Drehmomentverhältnisse				1	4	7	28 L								
Kaltes Betriebs-/Temperatur vom Motor und Modul				1	4	4	16 L								
Güter-Treiber schaltet vor				10	4	1	40 M								
Güter-Treiber schaltet vor				10	4	1	40 M								
Schutzfunktion FIRM vor				10	7	4	280 M		4P-Kommunikations-/Vibrationschutz von Driftstrom -> A wird gesteuert -> zeitliche Kommunikationsverzögerung, zwischen Regelstrom und Triebwerk -> E wird gesteuert	10	4	1	40 M		
Schutzfunktion FIRM vor				10	4	1	40 M								
Güter-Treiber schaltet vor (gekaufter Temperatur zulässig) -> Verlust der Selbstschuttfunktion				1	4	7	28 L								
Klein Überstromschutz				10	4	7	280 M								
Güter-Treiber schaltet vor				10	4	1	40 M		Modulare Sensoren (Redundanz)	10	4	1	40 M		

Diese Ableitung ist durch die identifizierte RPZ und Priorität begründet. Fehlerhafte Sensorsignale sind in bestimmten Szenarien schwierig zu erkennen und daher im Betrieb unter Umständen nicht detektierbar. Weiter können fehlerhafte Signale zu einem nicht erwarteten und gefährlichen Verhalten führen.

Die CirQua GmbH hat alle notwendigen Zwischenergebnisse bei der Erarbeitung der FMEA an das IEM der RWTH Aachen University weitergegeben.

ii. 2.3.3 Erprobung

Das IEM der RWTH Aachen University hat zur Erprobung des elektrischen Antriebs einen Prüfstand aufgebaut. Abbildung 3 zeigt schematisch den Aufbau des Prüfstandes.

Zur Erprobung des elektrischen Motors wird dieser von dem in AP2.4 entwickelten Wechselrichter angesteuert. Die notwendige Batteriespannung wird von einem Batteriesimulator erzeugt. Die mechanische Last wird durch einen Antrieb zur Verfügung gestellt. Gemessen werden Ströme, Spannungen, Drehmoment, Wickelkopftemperatur des Prüflings, sowie die Temperatur der MOSFETs des Wechselrichters. Neben den dargestellten Komponenten sind sowohl der Wechselrichter als auch der Motorprüfling flüssigkeitsgekühlt.

Hier wird die Inbetriebnahme des Antriebs beschrieben. Obwohl die Unterstützung der Entwicklung des prototypischen Wechselrichters grundsätzlich in den Kapitel zu AP 2.4.1 und 2.4.2 dargestellt sind, werden hier zusätzlich auch die Ergebnisse der Funktionstests des Wechselrichters dokumentiert, da diese auch im Rahmen des Projektes gleichzeitig erzielt worden sind und sich die Messdaten überschneiden.

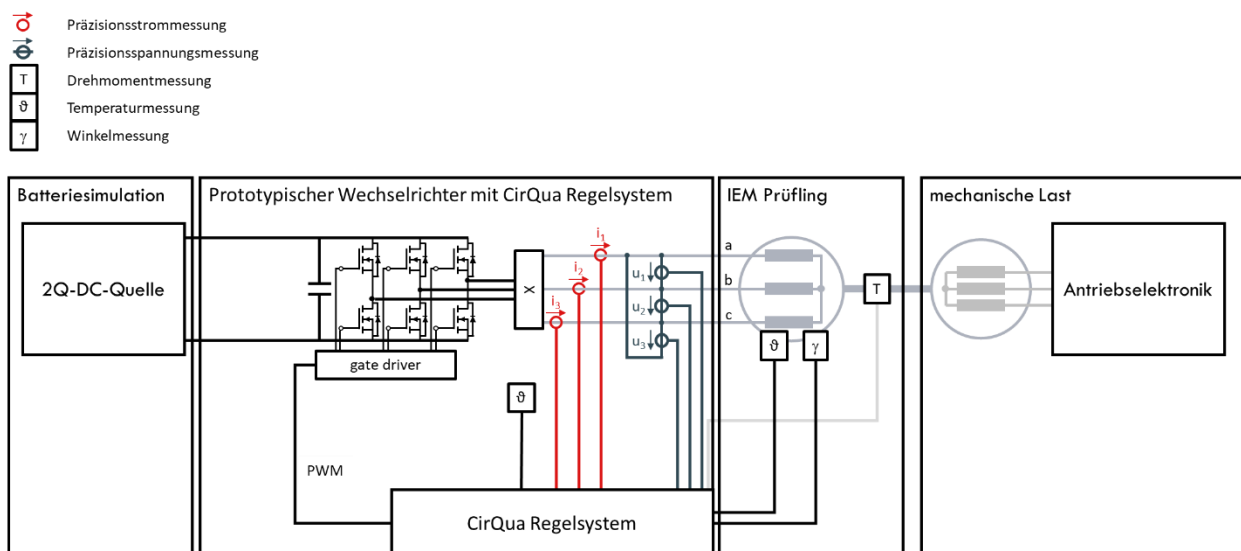


Abbildung 3 Schematische Darstellung des Prüfaufbaus.

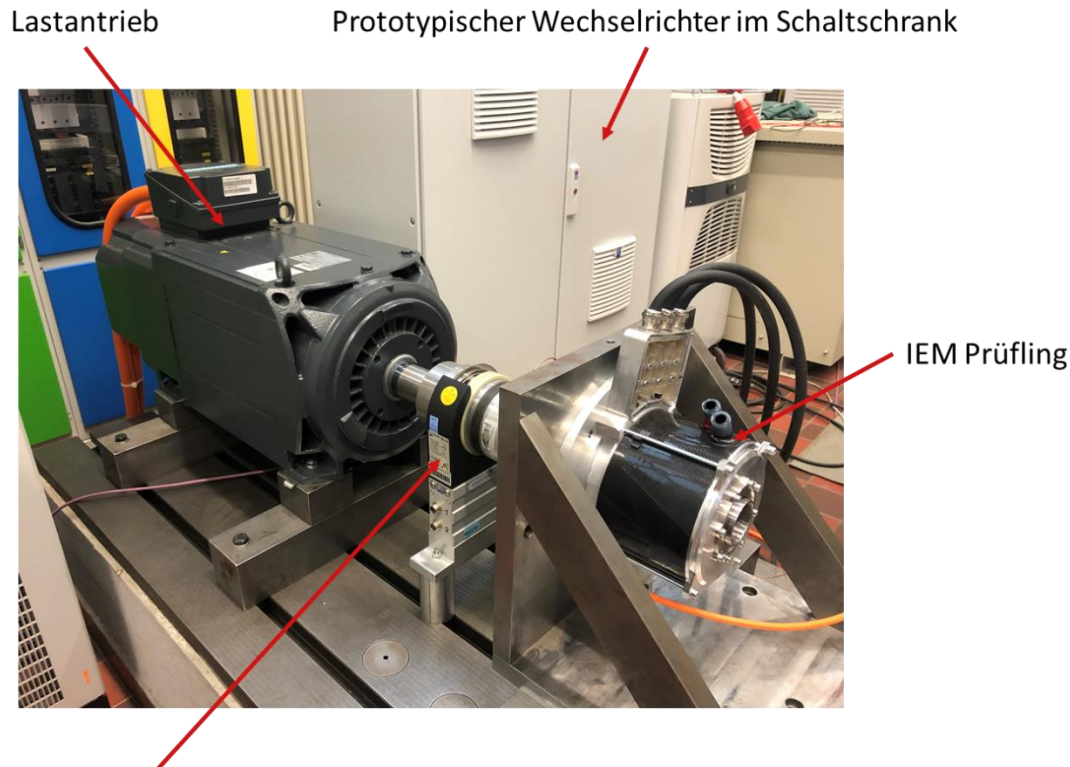


Abbildung 4 Foto des Prüfaufbaus.

Die CirQua GmbH ist im Rahmen dieses Projektes für die Inbetriebnahme des am IEM der RWTH Aachen University aufgebauten Motors verantwortlich. Dazu wird die Regelung des Motors entwickelt. Es wird der Prüfling messtechnisch charakterisiert, um die optimale Ansteuerung der Maschine zu bestimmen. Der Aufbau des IEM Prüfstand ist in Abbildung 4 gezeigt.

Das allgemeine Vorgehen zur Entwicklung der Ansteuerung ist in Abbildung 5 dargestellt. Hier soll näher auf die Identifikation der Flussverkettungskennfelder und der Steuertabellen eingegangen werden.

Zur Identifikation der elektromagnetischen Eigenschaften der elektrischen Maschine werden Flussverkettungen in d- und q-Richtung als Kennfelder über die Motorströme i_d und i_q identifiziert. Dazu werden bei einer konstanten Drehzahl des Prüflings alle notwendigen Kombinationen der Motorströme angefahren und es werden synchron Ströme und Spannungen gemessen. Aus den so aufgenommenen Messwerten werden die benötigten Flussverkettungskennfelder berechnet. Es werden zwei Flussverkettungskennfelder Ψ_d und Ψ_q jeweils über i_d und i_q identifiziert. Die Kennfelder werden je Stromkoordinate mit 128 Stützstellen aufgenommen. Die identifizierten Flussverkettungskennfelder sind in Abbildung 6 dargestellt.

Auf Basis der identifizierten Flussverkettungskennfeldern werden Vektorsteuertabellen nach der Optimierungsvorschrift maximales Drehmoment pro Strom (Maximum Torque per Ampere – MTPA) bestimmt. Diese Tabellen geben eine optimale Ansteuerung des Prüflings unter Berücksichtigung der verfügbaren Batteriespannung und nichtlinearen elektromagnetischen Eigenschaften an. Es werden Tabellen für die beiden Ströme i_d und i_q über Ist-Drehzahl n und

Solldrehmoment M bestimmt. Die identifizierten Vektorsteuertabellen sind in Abbildung 7 dargestellt.

Diese Informationen werden so aufbereitet, dass sie im CirQua Regelsystem zur Ansteuerung des Prüflings eingesetzt werden können.

Ergebnis der Inbetriebnahme sind funktionsfähige Stromregler und eine tabellenbasierte, nichtlineare Steuervorschrift für eine Drehmomentregelung. Die CirQua GmbH hat alle Ergebnisse der Inbetriebnahme an das IEM der RWTH Aachen University zur weiteren Verwendung und Veröffentlichung übergeben.



Abbildung 5 Vorgehen zur Inbetriebnahme des IEM Motors und Entwicklung der Regelung.

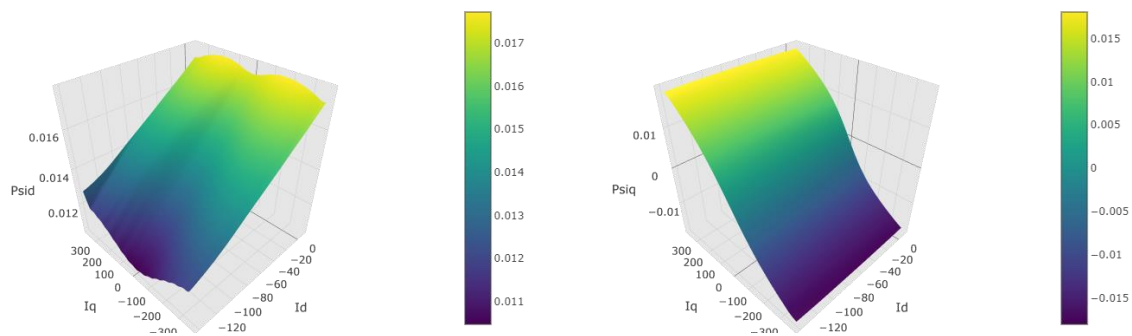


Abbildung 6 Messtechnisch identifizierte Flussverkettungskennfelder

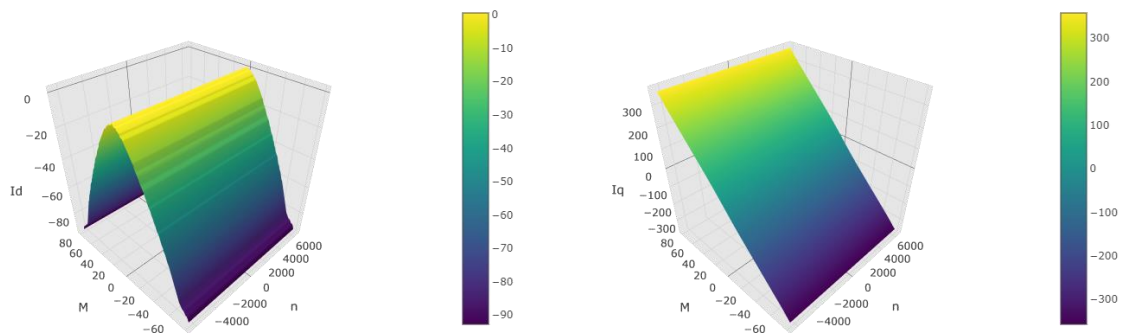


Abbildung 7 Vektorsteuertabellen nach MTPA

Zusammenfassung AP2.3

Ein Vergleich der geplanten und erzielten Ergebnisse ist in Tabelle 1 gegeben. Alle geplanten Ziele sind erreicht worden.

Tabelle 1 Vergleich erzielter Ergebnisse mit dem Antrag

Zeile	Ziele laut Antrag	Erreichte Ziele
1	Identifikation möglicher Fehler sowie deren Auswirkungen auf den elektrischen Antriebsstrang bestehend aus Umrichter und elektrischer Traktionsmaschine.	Ziel wurde erreicht.
2	Erprobung des elektrischen Antriebssystems auf einem Prüfstand des IEM der RWTH Aachen University.	Ziel wurde erreicht.

Um die Ergebnisse von AP 2.3 zu erzielen wurden Personalaufwände geleistet. Es wurden alle Ziele laut Antragstellung erreicht. Die erzielten Ergebnisse AP 2.3.1 waren für die Bearbeitung von AP 2.4.1 notwendig. Die Ziele aus AP 2.3.3 waren für die Überprüfung der Funktion des prototypischen Wechselrichters nach AP 2.4.2 und die weitere Bearbeitung der Projektziele von dem Partner IEM RWTH Aachen University notwendig.

AP 2.4: Luftfahrtzertifizierbarer Umrichter

iii. AP 2.4.1

Entwicklung integrierte Antriebseinheit mit dem Fokus Wechselrichter

Im Rahmen des Arbeitspaketes 2.4.1 werden durch die CirQua GmbH folgende Themen bearbeitet:

1. Anforderungen für ein SiL/HiL-System zur Nachbildung gestörter Sensorsignale auf Basis der Ergebnisse der FMEA aus AP 2.3
2. Modelle zur Nachbildung der Auswirkungen von fehlerhaften Sensorsignalen auf das Verhalten des elektrischen Antriebes
3. Entwicklung SiL/HiL-System
4. Unterstützung des IEM bei Entwicklung eines prototypischen Umrichters und der messtechnischen Charakterisierung.

SiL/HiL System

Im ersten Projektjahr werden zunächst grundlegende Eigenschaften für das zu entwickelnde SiL/HiL System definiert, die unabhängig von den Ergebnissen der FMEA sind.

Das SiL/HiL System ist eine Hardwarelösung, die eine Kombination aus einem Prozessor und FPGA mit externen analogen und digitalen Schnittstellen enthält.

Auf Basis der Priorisierung, die als Ergebnis aus der FMEA-Analyse vorliegen, wurde die Nachbildung der Sensorsignale der Rotorpositionserfassung und Stromsensorik als Fokus abgeleitet. D.h. fehlerhafte Signale dieser Sensoren sollen mit dem zu entwickelnden SiL/HiL System nachgebildet werden können.

Für diese Entwicklung ist es zusätzlich notwendig ein Modell der elektrischen Maschine zu entwickeln. Im Rahmen des Projektes wird vom Partner IEM RWTH Aachen eine permanentmagneterregte Synchronmaschine untersucht, daher wird ein Modell für diese Maschinenart entwickelt.

Grundlage der Spezifikation des Systems bilden folgende Annahmen:

Als elektrische Schnittstellen werden analoge und digitale Ein- und Ausgänge benötigt.

Es soll das Grundwellenverhalten der elektrischen Maschine nachgebildet werden.

Die zu emulierenden Eigenschaften der elektrischen Maschine sollen auf Signalebene nachgebildet werden. Diese Signale sollen mit einem Regelsystem für elektrische Maschinen verbunden werden.

Es soll ein System auf Basis der Kombination eines FPGAs mit Prozessorkernen umgesetzt werden. Die Eigenschaften der Schnittstellen ist spezifiziert worden.

Die CirQua GmbH hat auf Basis des eigenen Mess- und Regelsystem eine Plattform zur Modularisierung entwickelt. Dazu wurde ein neues Mainboard mit vier Steckplätzen für Erweiterungskarten entwickelt.

Ein Foto des entwickelten und prototypisch aufgebauten Mainboards für den SiL/HiL Simulator ist in Abbildung 8 dargestellt.

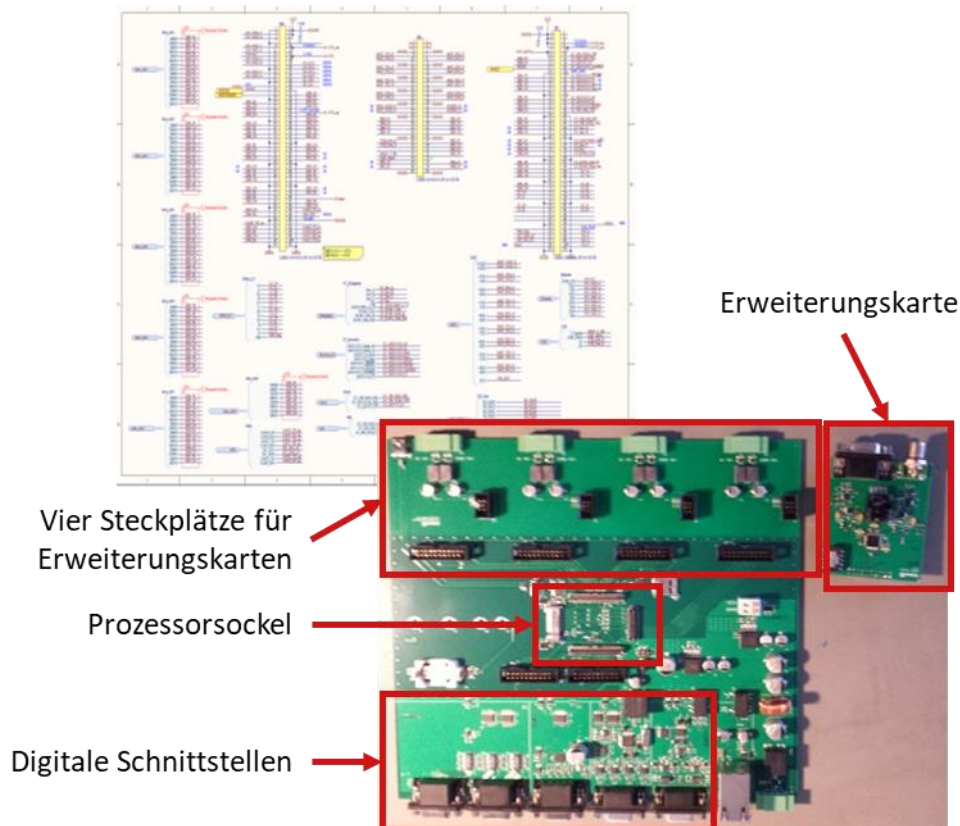


Abbildung 8 Foto des Prototyps des entwickelten Mainboards

Als Prozessor wird ein Kria SOM des Herstellers Xilinx eingesetzt.

Weiter wird eine Softwareumgebung, ein Betriebssystem für die entwickelte Hardwareplattform sowie eine grafische Benutzerschnittstelle entwickelt, um die notwendigen Funktionen zur Interaktion mit dem SiL/HiL System bereitzustellen. Fokus wurde hier auf eine Möglichkeit zur Änderung notwendiger Parameter und dem Einspielen von Simulationsmodellen gesetzt. Für die Software- und Modellentwicklung, sowie der Erstellung von Echtzeitmodellen wird die Software Matlab, Matlab-Simulink und weitere Matlab Erweiterungen eingesetzt.

Als Erweiterungskarten werden analoge Eingänge und Ausgänge geplant. Die Karte für analoge Eingänge konnte im Verlauf des Projektes als Prototyp umgesetzt werden.

Für die analogen Ausgänge konnte der geplante Digital-Analogwandler und das analoge Frontend in einem Testaufbau erprobt werden.

Es konnten erfolgreich alle notwendigen Systemtests durchgeführt werden.

Ein prototypischer Test für analoge Ausgänge, die für den Betrieb einer HiL Simulation notwendig sind, ist erfolgreich durchgeführt worden. Der benutzte Versuchsaufbau ist in Abbildung 9 dargestellt.

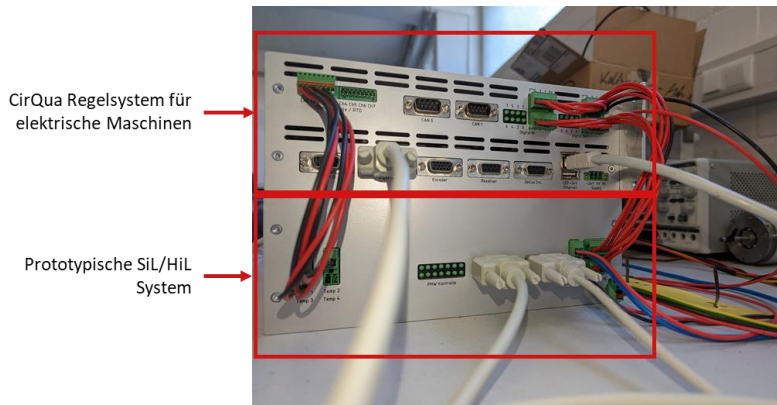


Abbildung 9 Versuchsaufbau mit prototypischen SiL/HiL System

Modelle und SiL/HiL Simulationsergebnisse

Für die Tests der SiL/HiL Umgebung ist eine Echtzeitnachbildung des Verhaltens der elektrischen Maschine entwickelt, die im Rahmen dieses Projektes untersucht wird. Die Modellierungsumgebung ist Matlab-Simulink. Auf Basis von diesem Modell werden aus anliegenden Spannungen und Drehzahl die Motorströme und das Drehmoment berechnet. Weiter wurden Modelle zur Nachbildung von Störungen von Sensorsignale entwickelt. Konkret können Störungen als überlagerte Offsets beliebig modelliert werden.

Aufgrund der fehlenden analogen Ausgänge des prototypischen SiL/HiL Systems wurden diese Schnittstellen als alternative Kommunikation per Software getestet. Auf Basis dieses Vorgehens konnte das Softwarekonzept des entwickelten SiL/HiL Systems validiert werden. Diese Softwareschnittstelle hat jedoch Einschränkungen in der abbildbaren Dynamik gezeigt.

Daher wurden in Zusammenarbeit mit dem IEM der RWTH Aachen University die Echtzeitmodelle mit einem dort verfügbaren HiL-Simulator zusätzlich getestet. Der Aufbau ist in Abbildung 10 dargestellt.

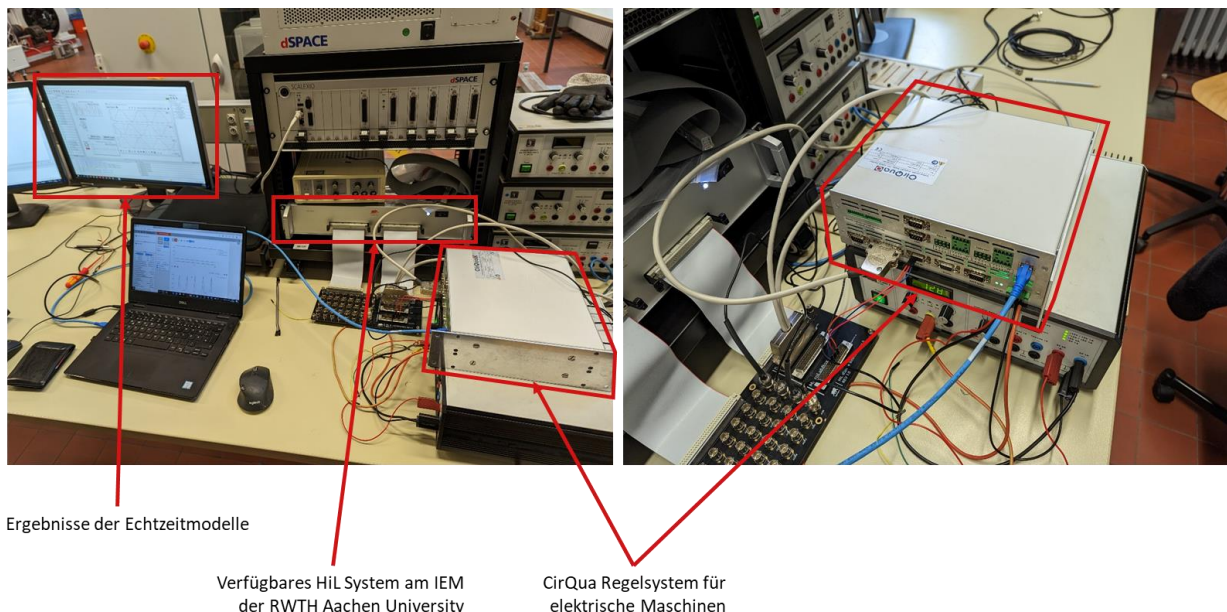


Abbildung 10 Gemeinsamer HiL Versuchsaufbau mit dem IEM der RWTH Aachen University

Zur Untersuchung der SiL/HiL Simulationsumgebung wurden zwei Szenarien als Grenzversuche definiert. Szenario 1 stellt eine Störung der Strommessung dar. In Szenario 2 wird eine Störung der Rotorpositionsmessung untersucht.

Bei beiden Szenarien wird in der Simulation eine konstante Drehzahl extern erzeugt und ein Drehmomentsprung auf ein Sollmoment wird vorgegeben. Als Referenz wird eine ungestörte Simulation herangezogen.

In Szenario 1 wertet das Regelsystem durch gestörte Signale der Strommessung falsche Stromwerte aus. Auf Basis dieser falschen Stromwerte reagiert der Stromregler und stellt ungewünschte Ströme. Dadurch ändert sich der magnetische Zustand der elektrischen Maschine im Vergleich zum gewünschten Auslegungspunkt. Es werden im untersuchten Spezialfall größere Verluste durch die größere Effektivströme in der Maschine erzeugt, wie in den drei oberen Graphen in Abbildung 11 dargestellt ist. Weiter wird die Güte der Drehmomentregelung verschlechtert und im dynamischen Betrieb werden große und ungewollte Drehmomente gestellt, wie im unterer Graph in Abbildung 11 dargestellt ist. Im stationären Betrieb werden erhöhte Drehmomentschwankungen erzeugt.

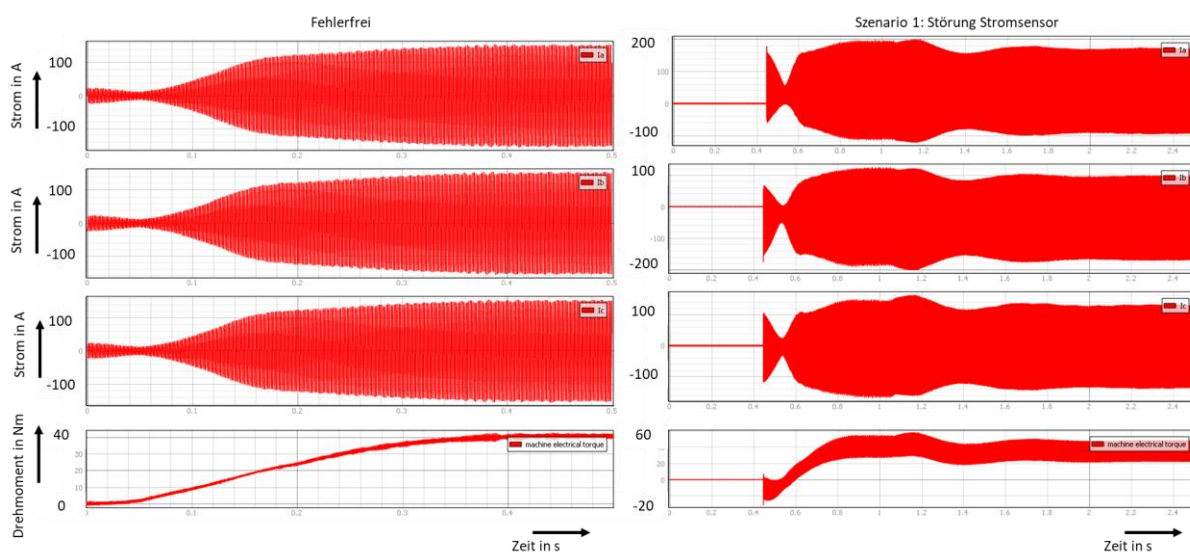


Abbildung 11 Simulationsergebnisse für Szenario 1

In Szenario 2 wird ein fehlerhafter Lagegeber mittels Modellierung eines Winkeloffsets untersucht. Das Regelsystem ist nicht in der Lage diesen Fehler festzustellen. Daraus resultiert, dass die Ströme nicht in die gewollten magnetischen Achsen der Maschine geregelt werden und somit andere magnetische Zustände in der Maschine vorherrschen. Je nach Ausprägung dieses Fehlers können überhöhte Klemmenspannungen, ungenaue Drehmomentstellung und ungewollte Drehmomentschwankungen im stationären Betrieb entstehen. In Abbildung 12 werden als Übersicht die Strom- und Drehmomentverläufe im stationären Betrieb gezeigt. Die gewünschten Stromamplituden werden korrekt gestellt. Auffällig ist das Drehmoment, das in diesem Fall einen negativen Mittelwert aufzeigt. Dies

würde in einem hybriden Flugantriebsstrang zu Reduktion des Summennutzmoments des Antriebs führen.

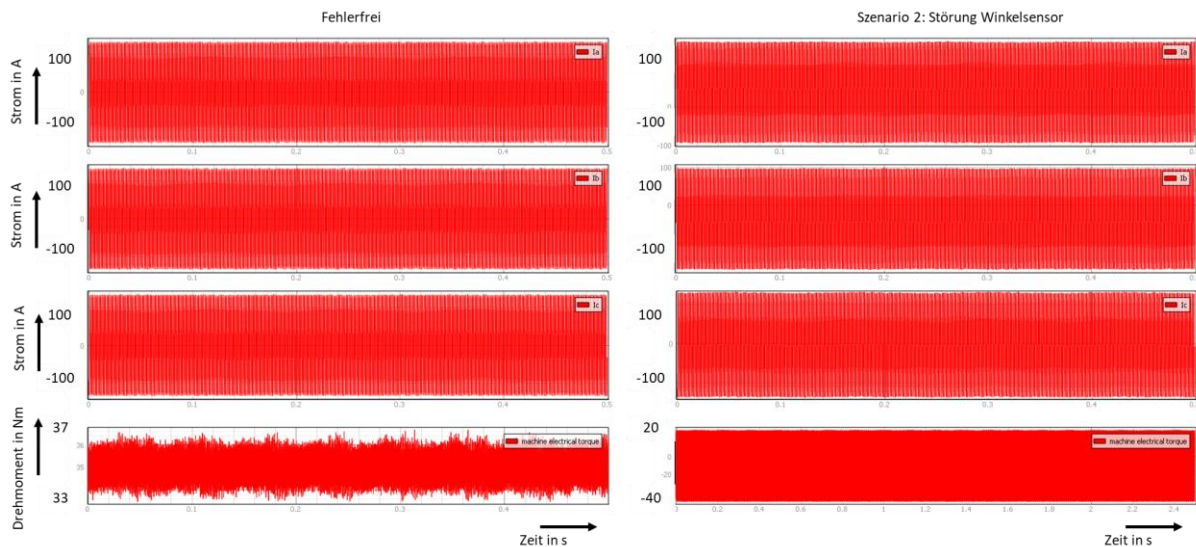


Abbildung 12 Simulationsergebnisse für Szenario 2

Auf Basis dieser beiden Szenarien konnten die entwickelten Modelle prototypisch getestet werden. Es wurde gezeigt, dass ohne weitere Maßnahmen das Regelsystem die untersuchten Fehler nicht erkennen kann. Als Sensoreinsatz wird empfohlen, dass für eine dreisträngige Maschine die drei Phasenströme gemessen werden. Weiter sollten zur Identifikation möglicher erhöhter Wicklungsverluste die Temperaturen der Statorwicklungen überwacht werden. Um Fehler in einer Rotorpositionssensorik zu erkennen kann der Einsatz eines Beobachters untersucht werden.

Unterstützung bei der Entwicklung eines prototypischen Umrichters

Auf Basis der vorgegebenen Spezifikationen der im Projekt untersuchten Antriebseinheit wurden Spezifikationen für den leistungselektronischen Teil der Antriebseinheit durchgeführt. Es wurde eine Modellumgebung zur Prüfung des thermischen Verhaltens des Wechselrichters entwickelt.

Es wurden Grenzpunktanalysen durchgeführt und die Ergebnisse wurden dem IEM der RWTH Aachen University zur Verfügung gestellt.

Gemeinsam mit dem IEM der RWTH Aachen University wurden passende Schaltelemente ausgewählt.

Es wurde ein Modell zur Untersuchung des Schaltverhaltens und zur Definition der zulässigen Streuinduktivität zur Anbindung des Zwischenkreiskondensators entwickelt. Das Modell und exemplarische Ergebnisse sind in Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellt. Die Ergebnisse wurden dem IEM der RWTH Aachen University übergeben.

Eine Übersicht des Modells und beispielhafte Ergebnisse sind in Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellt.

Auf Basis der Ergebnisse des Simulationsmodells wurden am Markt verfügbare Kondensatoren analysiert und eine Auswahl für die prototypische Anwendung im Projekt getroffen. Das IEM der RWTH Aachen University hat diese Informationen als Grundlage für die Auslegung der Endstufe des Wechselrichters benutzt.

Weiter wurde auf Grund der schnellen Schaltflanken die Ausgangsspannung der Wechselrichterbrücke auf Basis der o.g. Simulation analysiert. Ergebnis ist, dass ein Common-Mode Filter am Motorabgang und eine geeignete Filterung am DC-Eingang zu empfehlen sind. Für den Motorabgang wurde aufgrund des zu erwartenden Frequenzbereiches der Common-Mode Störungen ein nanokristalliner Common-Mode Kern als Filterung für den Prüfstand vorgeschlagen. Auf Basis der Ströme der Zielanwendung im Projekt wurde ein am Markt verfügbarer Kern ausgewählt und dem IEM der RWTH Aachen University vorgeschlagen. Der Bedarf einer solchen Filterung soll am Komponentenprüfstand der Hochschule erneut überprüft werden.

Um die gemeinsame Funktion des CirQua Regelsystems und der prototypischen Leistungsendstufe vorzubereiten, ist gemeinsam mit dem IEM der RWTH Aachen University eine Schnittstellendefinition zwischen der von IEM der RWTH Aachen University entwickelten Endstufe und dem CirQua Regelsystems entwickelt worden.

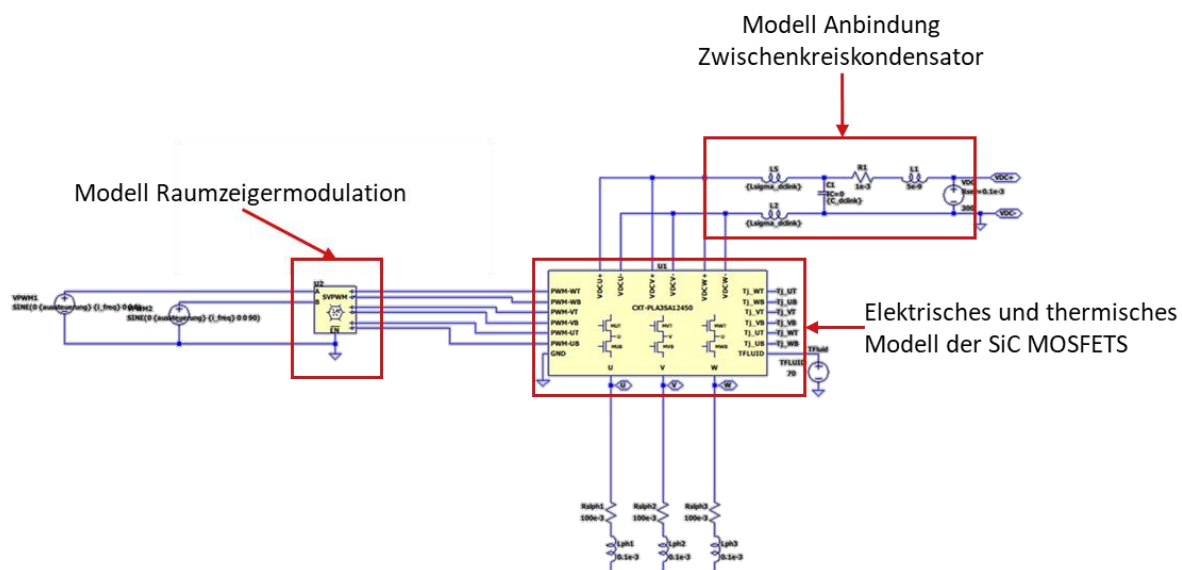


Abbildung 13 Modell der MOSFET Brücke zur Abschätzung der maximalen Streuinduktivität zum Zwischenkreiskondensator

Schaltverhalten

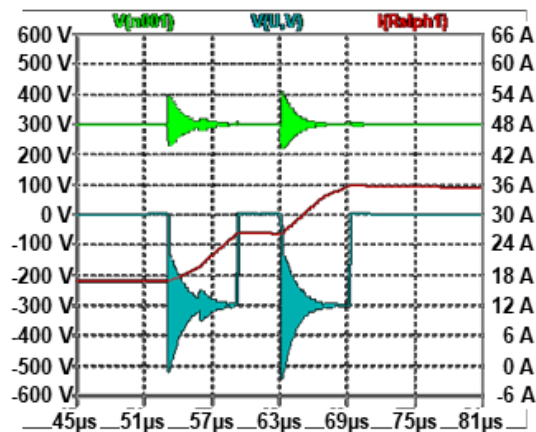


Abbildung 14 Ergebnis des simulierten Schaltverhaltens

iv. AP 2.4.2

Wie geplant wurde die Endstufe des Antriebssystems vom IEM der RWTH University mit den oben dargestellten Unterstützungen der CirQua GmbH aufgebaut. Für die geplanten Prüfstanduntersuchungen an der Hochschule wurde mit dem IEM der RWTH Aachen University der Prüfaufbau zum Testen eines elektrischen Antriebsstrangs abgestimmt. Es wurden die Randbedingungen für das Prüfgehäuse des Wechselrichters gemeinsam definiert. Die CirQua GmbH hat die Konstruktion des Prüfstandsbaus des Wechselrichters durchgeführt, welcher für die geplanten Vermessungen in einen Schaltschrank integriert ist. Der Konstruktionsstand und Aufbau des Wechselrichters ist in Abbildung 15 dargestellt.

Der für die CirQua GmbH relevante Teil der Prüfstandtests ist in AP 2.3.2 dargestellt.

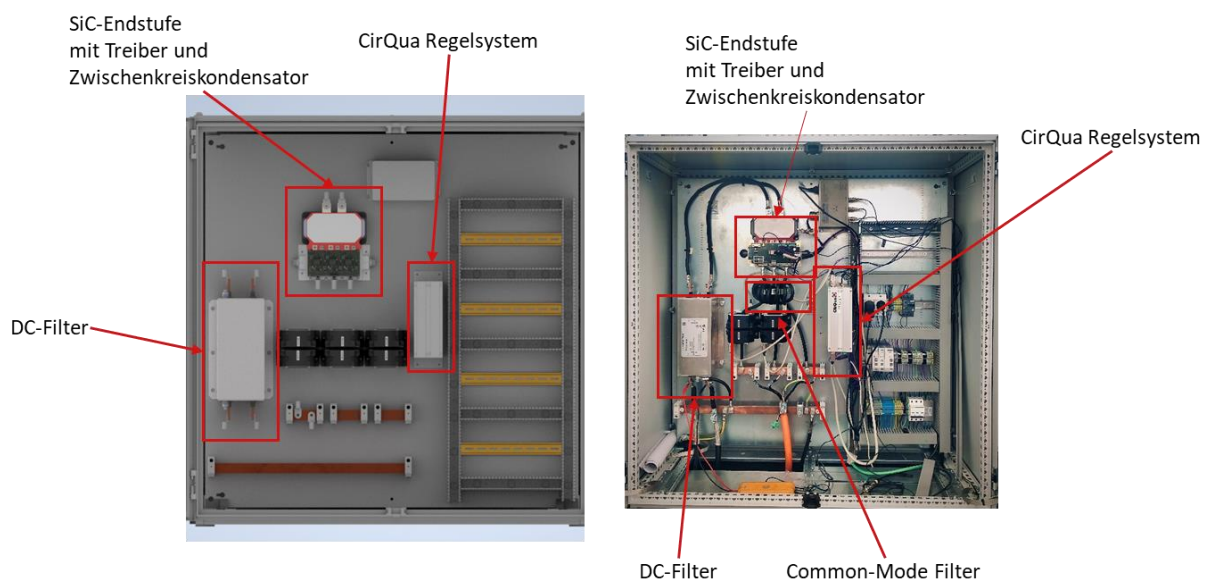


Abbildung 15 Konstruktion und Aufbau des prototypischen Wechselrichters

Zusammenfassung AP 2.4

Im Rahmen von AP 2.4 konnten die notwendigen Schnittstellendefinitionen zum CirQua Regelsystem definiert werden. Der prototypische Test des SiL/HiL Systems und die Erprobung der Antriebseinheit sind erfolgreich abgeschlossen worden.

Ein Vergleich der geplanten und erzielten Ergebnisse ist in Tabelle 2 gegeben. Alle geplanten Ziele sind erreicht worden.

Tabelle 2 Vergleich erzielter Ergebnisse mit dem Antrag

Zeile	Ziele laut Antrag	Erreichte Ziele
1	Ableitung der Anforderungen für ein SiL/HiL-System zur Nachbildung gestörter Sensorsignale auf Basis der Ergebnisse der FMEA aus AP 2.3	Ziel wurde erreicht.
2	Modelle zur Nachbildung der Auswirkungen von fehlerhaften Sensorsignalen auf das Verhalten des elektrischen Antriebes	Ziel wurde erreicht.
3	Entwicklung SiL/HiL-System	Ziel wurde erreicht.
4	Unterstützung des IEM bei Entwicklung eines prototypischen Umrichters und der messtechnischen Charakterisierung.	Ziel wurde erreicht

Um die Ergebnisse von AP 2.4 zu erzielen wurden Personal-, Material- und Softwarekosten benötigt. Alle Materialkosten des Projektes wurden für den prototypischen Aufbau des SiL/HiL Systems eingesetzt. Für die Entwicklung von echtzeitfähigen Modellen und Software im Rahmen von AP 2.4.1 wurde Matlab eingesetzt welches über das Projekt finanziert wurde.

Die Ergebnisse aus AP 2.4.1 sollen in die Erweiterung von bestehenden Produkten der CirQua GmbH in Form der Überführung des untersuchten modularen Hardwarekonzepts einfließen.

Alle notwendigen Ergebnisse der CirQua GmbH sind dem IEM der RWTH Aachen University zum Zweck der weiteren Nutzung und Veröffentlichung übergeben worden.

Es ist im Rahmen der Verwertung geplant die Modularisierung und die Echtzeitmodelle in weiterentwickelte Mess- und Regelsysteme der CirQua GmbH zu überführen.

Zur Veröffentlichung der Ergebnisse ist eine gemeinsame Veröffentlichung mit dem IEM der RWTH Aachen University auf der Anwenderkonferenz PCIM Europe geplante. Die Vorstellung des Co-design und Prototypenaufbau des Wechselrichters ist für den 09.05.2023 [7] geplant.

[7] S. Svetomir, D. Franck, S. Mönninghoff, B. Groschup, K. Hameyer, “Co-design and Prototyping of a Wide Bandgap-Based Two-Level Inverter for Variable Speed Electrical Propulsion Drives”, PCIM Europe, Nürnberg, Germany, 9.05.2023