



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: ZF Luftfahrttechnik GmbH	Förderkennzeichen: 20H1310
Verbund-/Vorhabensbezeichnung: Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung für Hubschrauber (Phase 2)	
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2014 – 30.06.2020	
Berichtszeitraum: 01.01.2014 – 30.06.2020	

Datum: 2020-12-23

bearbeitet:

Dr. Auspitzer (Projektleitung)

freigegeben:

Dr. Arnold (Entwicklung Rotorkomponenten)



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	2
Abkürzungsverzeichnis	4
1. Aufgabenstellung.....	5
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	7
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	9
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	10
6. Technischer Bericht zum Anteil der ZFL.....	11
6.1 AP 100 Gesamtsystemarchitektur	11
6.1.1 AP 120 Designkonzept Aktuatorintegration und Gesamtsystem.....	11
6.1.2 AP 140 System Safety Assessment.....	12
6.2 AP 200 EMA (Kombination Motor + Getriebe)	17
6.2.1 AP 290 Redesign A- zu B-Muster	17
6.2.2 AP 292 Fertigung Qualifikationsmuster (B-Muster)	27
6.2.3 AP 294 Konstruktion / Fertigung Qualifikationsprüfstände.....	34
6.2.4 AP 296 Qualifikationsversuche	42
6.2.5 AP 298 Fertigung Erprobungsmuster (Windkanalmuster)	49
6.3 AP 300 Leistungselektronik	52
6.3.1 AP 350 Redesign A- zu B-Muster	53
6.3.2 AP 360 Fertigung Qualifikationsmuster (B-Muster)	60
6.3.3 AP 370 Qualifikationsversuche	68
6.3.4 AP 380 Fertigung Erprobungsmuster (Windkanalmuster)	73
6.4 AP 400 Ansteuerung.....	75
6.4.1 AP 470 Entwicklung DO-178 Software.....	75
6.4.2 AP 475 Entwicklung DO-254 Hardware	76
6.4.3 AP 480 Entwicklung TCC	83
6.4.4 AP 485 Beschaffung und Fertigung (B-Muster).....	89
6.4.5 AP 490 Verifikations- & Qualifikationsversuche.....	90
6.4.6 AP 495 Fertigung Erprobungsmuster (Windkanalmuster)	98
6.5 AP 500 Signal- und Leistungsübertragung.....	98
6.5.1 AP 560 Design von Qualifikations- und Gesamtverkabelung.....	99
6.5.2 AP 570 Beschaffung und Fertigung.....	107
6.6 AP 600 Integration und Erprobung (drehender Prüfstand)	110
6.6.1 AP 610 Konstruktion/Fertigung/Adaption Prüfstand	110
6.6.2 AP 620 Beschaffung und Fertigung Prüfstand	114
6.6.3 AP 630 Erprobung Gesamtsystem bei ZFL	117
6.6.4 AP 640 SIL-Versuche bei SAC	124
6.6.5 AP 650 Auswertung und Dokumentation	127
6.7 AP 700 Erprobung Windkanal	146
6.7.1 AP 710 Adaptionkonstruktion und Beschaffung.....	146
6.7.2 AP 720 Einrüstung, Inbetriebnahme, Funktionsvalidierung am Whirl-Tower. 147	



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



6.7.3	AP 730	Einrüstung, Inbetriebnahme, Funktionsvalidierung im Windkanal.....	147
6.7.4	AP 740	Windkanalversuche.....	147
6.7.5	AP 750	Bewertung und Vergleich mit einer konventionellen Steuerung.....	148
6.8	AP 900	Alternative Aktuatorintegration	149
6.8.1	AP 910	Spezifikation zur alternativen Integrationsvariante	149
6.8.2	AP 920	Anpassung Redundanzarchitektur	149
6.8.3	AP 930	Alternative EMA-Auslegung	149
6.8.4	AP 940	Mechanische Aktuator-Integration	150
6.8.5	AP 950	Adaption Leistungselektronik.....	150
6.8.6	AP 960	Adaption Ansteuerung	150
6.8.7	AP 970	Aufbau Mechanik-Test-Rig und Prüfling.....	151
6.8.8	AP 980	Versuche zur Risikominimierung der mechanischen Integration.....	151
6.9	AP 800	Projektleitung und –koordination.....	151
7.		Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	152
8.		Bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen	153
9.		Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	154

Hinweis:

Für die hier vorliegende TIB-Version des Schlussberichtes zum Vorhaben wurden gemäß Nr. 11.6 NKBF 98 vertrauliche Informationen der ZF Luftfahrttechnik GmbH unkenntlich gemacht oder entfernt.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Abkürzungsverzeichnis

ACU	Actuator Control Unit
APCU	Actuator Power Control Unit (ACU+PCU)
ATP	Acceptance Test Procedure
CDR	Critical Design Review
DMS	Dehnungsmessstreifen
DNE	Do Not Exceed
EMA	Elektro-Mechanischer-Aktuator
EMK	Elektro-Magnetische Kraft
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
FPGA	Field Programmable Gate Array
HLR	High Level Requirement
HSIT	Hardware und Software Integration Test
HW	Hardware
ICD	Interface Control Document
NFAC	National Full-Scale Aerodynamics Complex
PCU	Power Control Unit (PSU+PCUC)
PCUC	Power Control Unit Converter
PDR	Preliminary Design Review
PSSA	Preliminary System Safety Analysis
PSU	Power Supply Unit
SAC	Sikorsky Aircraft Corporation
SES	System Equipment Specification
SIL	System Integration Lab
SW	Software
TCC	Test Control Computer
ZFL	ZF Luftfahrttechnik GmbH



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



1. Aufgabenstellung

Dieser Schlussbericht beschreibt die im Rahmen des Forschungsvorhabens *Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung – LIBRAS (Phase 2)*, in der Kurzform LIBRAS-2, im Zeitraum vom 01.01.2014 bis 30.06.2020 durchgeführten Arbeiten. Er folgt in seiner Gliederung den Vorgaben für Schlussberichte gemäß Nr. 8.2 NKBF 98 (Stand April 2006) des BMWi.

Im Rahmen des LuFo Vorhabens InHuS (Förderkennzeichen 20H0301A) konnte bereits gezeigt werden, dass eine rein elektrische Blattwurzelersteuerung prinzipiell machbar ist. Die Ergebnisse aus dem Vorhaben InHuS zeigten aber auch, dass den Kernkomponenten Getriebe und Leistungselektronik eine hohe Kritikalität bezüglich der Verwendung in einer luftfahrttechnischen Anwendung zugeordnet werden muss.

Im Rahmen des an InHuS anschließenden LuFo Vorhabens ELBA (Förderkennzeichen 20H0801A) wurde das Ziel verfolgt, für Getriebe und Leistungselektronik die Realisierbarkeit für diese spezielle Anwendung zu verifizieren. Die Fine-Cyclo-Technologie wurde in einer umfangreichen Studie als geeignete Lösung für den Getriebeanteil identifiziert. Ferner wurde zum Ersatz für die in InHuS noch aus Industriekomponenten aufgebaute Leistungselektronik eine hoch integrierte und dabei zuverlässige Leistungselektronik entwickelt, gefertigt und erfolgreich erprobt.

Im Rahmen des LuFo Vorhabens LIBRAS (1) (Förderkennzeichen 20H1110) wurde aus den in den Vorhaben InHuS und ELBA entwickelten und subsystemerprobten Komponenten der elektrischen Blattwurzelersteuerung ein Gesamtsystem für die Windkanalerprobung an einem Rotor des Technologiedemonstrators X2 im Originalmaßstab abgeleitet. Dabei wurden neben der Skalierung auf den Zielrotor zusätzlich zu den bisher betrachteten Kernkomponenten auch alle Peripherie-Komponenten (Signal- und Leistungsübertragung) entwickelt. Die entsprechenden Funktionsmuster für die APCU und dem EMA wurden gefertigt und es fand eine Erprobung auf Komponenten- und Gesamtsystemebene statt.

Die Arbeiten aus dem Vorhaben LIBRAS (1) sollten dann in dem sich unmittelbar anschließenden LuFo Vorhaben LIBRAS-2 fortgesetzt werden. Ausgehend von den im Vorhaben LIBRAS (1) erprobten Funktionsmustern sollten zunächst die Qualifikationsmuster und nach Abschluss der



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalprüfung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Qualifikation die Erprobungsmuster für das LIBRAS-System bestehend aus der *Actuator Power Control Unit* (APCU) und den elektromechanischen Aktuatoren (EMA) hergestellt, getestet und auf den Originalrotor des Technologiedemonstrators X2 montiert werden. Neben den Entwicklungs- und Qualifizierungstests bei der ZF Luftfahrttechnik GmbH (ZFL) waren außerdem Versuche auf dem SIL-Prüfstand bei dem ZFL Partner Sikorsky (s.a. folgender Abschnitt) und Windkanalversuche im National Full-Scale Aerodynamics Complex (NFAC) geplant.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die ZF Luftfahrttechnik GmbH (ZFL) verfügt über eine jahrzehntelange Erfahrung bei der Entwicklung, Fertigung, Wartung und Betreuung dynamischer Hubschrauberkomponenten, -baugruppen und -systeme. Im Einzelnen handelt es sich dabei um Getriebeanlagen, Rotorköpfe und -steuerungen verschiedener ziviler und militärischer Baumuster. Wichtige Entwicklungsaktivitäten bei der ZFL betreffen die Einzelblattsteuerung (*Individual Blade Control*, IBC) von Hauptrotoren zur Reduzierung von Vibrationen, Lärm und Leistungsbedarf bei Hubschraubern. Hier besitzt die ZFL sicher weltweit die meiste Erfahrung auf Grund der Vielfalt der bislang entwickelten und erprobten IBC-Anlagen für Windkanal- und Flugversuche auf Originalrotoren; ZFL kann somit aus einem großen Datenfundus schöpfen.

Des Weiteren kann ZFL bei der Entwicklung von Komponenten für elektrische Steuerungssysteme auf ein gut funktionierendes Netzwerk an Partnern im industriellen und universitären Bereich zurückgreifen. Dieses Netzwerk wurde in den Vorhaben InHuS und ELBA aufgebaut und zuletzt in LIBRAS (1) im Bereich der Softwareentwicklung mit Beteiligung der Firma embeX erweitert.

Eine weitere wichtige Voraussetzung für die Durchführung des Vorhabens war, dass ZFL für die Fortführung der Arbeiten aus dem Vorhaben LIBRAS (1) in der Phase 2 erneut die Unterstützung des US-amerikanischen Hubschrauberherstellers Sikorsky gewinnen konnte. Im Rahmen von LIBRAS-2 erklärte sich Sikorsky bereit, auf eigene Kosten nicht nur den Rotor des Technologiedemonstrators X2 als Versuchsträger für das LIBRAS-System, sondern auch die Infrastruktur zur Erprobung in ihrem SIL und die Versuchszeit im Windkanal zur Verfügung zu stellen.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Für das hier beschriebene Vorhaben war am 01.08.2013 (mit Ergänzungen vom 13.09.2013, 24.09.2013, 13.11.2013, 25.11.2013, 26.11.2013 und 02.12.2013) über den Projektträger Luftfahrtforschung ein Förderantrag gestellt worden, der mit dem Zuwendungsbescheid vom 09.12.2013 bewilligt wurde. - **vertrauliche Informationen** -. Der Bewilligungszeitraum für das Vorhaben erstreckte sich zunächst vom 01.01.2014 bis zum 31.03.2016, wurde aber im Lauf des Vorhabens auf Antrag durch die ZFL endgültig bis zum Enddatum 30.06.2020 verlängert.

Dem Förderantrag lag ein detaillierter Aufgaben- und Ressourcenplan bei. Das Vorhaben wurde dabei in acht Arbeitspakete (AP 100 - AP 800) unterteilt (siehe Abbildung 3-1). Die administrativen Tätigkeiten waren dabei im AP 800 zusammengefasst. Im Laufe des Vorhabens wurden am Projektplan Änderungen gegenüber der ursprünglichen Planung bei Antragsstellung vorgenommen. Änderungen bezüglich der Bearbeitungszeiträume wurden in den jeweiligen Zwischenberichten dokumentiert [1] - [12].

Mit dem 1. Änderungsbescheid vom 08.12.2014 wurde in Antwort auf den von ZFL gestellten Aufstockungsantrag vom 12.05.2014 (mit Ergänzungen vom 12.06.2014) die Erweiterung des Arbeitsplans um das Arbeitspaket um das AP 900 „Alternative Aktuatorintegration“ durch den Projektträger genehmigt und die Bereitstellung der Mittel gegenüber dem Zuwendungsbescheid vom 09.12.2013 geändert.

Mit dem 2. Änderungsbescheid vom 12.11.2015 wurde die Bereitstellung der Mittel gegenüber dem Änderungsbescheid vom 08.12.2014 durch den Projektträger aufgestockt.

Mit dem 3. Änderungsbescheid vom 18.04.2016 wurde in Beantwortung des von ZFL gestellten Änderungsantrags die Änderung der Vorhabensziele bezüglich des AP900 vom 24.03.2016 durch den Projektträger genehmigt und der Bewilligungszeitraum auf den 30.06.2018 verlängert.

Mit dem 4. Änderungsbescheid vom 22.11.2016 wurde in Beantwortung des von ZFL gestellten Aufstockungsantrags vom 01.04.2016 und den Ergänzungen im Zeitraum vom 15.07.2016 bis 26.10.2016 die Fördersumme erhöht und die Bereitstellung der Mittel gegenüber dem Änderungsbescheid vom 08.12.2014 durch den Projektträger aufgestockt.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelsansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Mit dem 5. Änderungsbescheid vom 09.01.2017 wurde in Abänderung des Bescheides vom 09.12.2013 die kassenmäßige Inanspruchnahme der Mittel geändert.

Mit dem 6. Änderungsbescheid vom 17.11.2017 wurde aufgrund der Zahlungsanforderung vom 13.10.2017 und in Abänderung des Bescheides vom 09.12.2013 in der Fassung vom 09.01.2017 die kassenmäßige Inanspruchnahme der Mittel geändert.

Mit dem 7. Änderungsbescheid vom 06.03.2018 wurde in Abänderung des Bescheides vom 17.11.2017 und auf Basis des von ZFL gestellten Änderungsantrags vom 30.01.2018 und 07.02.2018 der Bewilligungszeitraum bis zum 30.09.2019 verlängert.

Mit dem 8. Änderungsbescheid vom 30.05.2018 wurde in Beantwortung des von ZFL gestellten Aufstockungsantrages vom 07.02.2018 und der Ergänzung vom 24.04.2018 gegenüber dem Zuwendungsbescheid vom 09.12.2013 in der Fassung vom 06.03.2018 eine Aufstockung gewährt und die Bereitstellung der Mittel angepasst.

Mit dem 9. Änderungsbescheid vom 20.12.2018 wurde gegenüber dem Zuwendungsbescheid vom 09.12.2013 die Bereitstellung der Mittel geändert.

Mit dem 10. Änderungsbescheid vom 01.10.2019 wurde der Bewilligungszeitraum auf den 31.12.2020 verlängert und die Bereitstellung der Mittel angepasst.

Mit dem 11. Änderungsbescheid vom 25.03.2020 wurde in Antwort auf den von ZFL gestellten Änderungsantrag vom 16.03.2020 einer Änderung der Verwertungsaufgabe bezüglich der Windkanalerprobung im AP 700 und der Laufzeit des Vorhabens durch den Projektträger zugestimmt und der 30.06.2020 als Endtermin gesetzt.

Mit dem 12. Änderungsbescheid vom 25.08.2020 wurde die Bereitstellung der Mittel gegenüber dem Zuwendungsbescheid vom 09.12.2013 in der Fassung vom 25.03.2020 durch den Projektträger geändert.



LIBRAS-2

Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)

Schlussbericht



Balkenplan (aktuell)

AP	Titel	2014				2015				2016				2017				2018				2019				2020			
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
120	Designkonzept Aktuatorintegration und Gesamtsystem	[Green]																											
140	System Safety Assessment	[Green]																											
200	EMA (Kombination Motor + Getriebe)	[Green]																											
290	Redesign A zu B-Muster	[Green]																											
292	Fertigung Qualifikationsmuster (B-Muster)	[Green]																											
294	Konstruktion / Fertigung Qualifikationsprüfstände	[Green]																											
296	Qualifikationsversuche	[Green]																											
298	Fertigung Erprobungsmuster (Windkanalmuster)	[Green]																											
	<i>MS-200 Abschluss Qualifikationsversuche</i>	[Green]																											
300	Leistungselektronik	[Green]																											
350	Redesign A zu B-Muster	[Green]																											
360	Fertigung Qualifikationsmuster (B-Muster)	[Green]																											
370	Qualifikationsversuche	[Green]																											
380	Fertigung Erprobungsmuster (Windkanalmuster)	[Green]																											
	<i>MS-300 Abschluss Qualifikationsversuche</i>	[Green]																											
400	Ansteuerung	[Green]																											
470	Entwicklung DO-178 Software	[Green]																											
475	Entwicklung DO-254 Hardware	[Green]																											
480	Entwicklung TCC	[Green]																											
485	Beschaffung und Fertigung (B-Muster)	[Green]																											
490	Qualifikationsversuche	[Green]																											
495	Fertigung Erprobungsmuster (Windkanalmuster)	[Green]																											
	<i>MS-400 Abschluss Qualifikationsversuche</i>	[Green]																											
500	Signal- und Leistungsübertragung	[Green]																											
560	Design v. Qualifikations- und Gesamtverkabelung	[Green]																											
570	Beschaffung und Fertigung	[Green]																											
600	Integration und Erprobung (drehender Prüfstand)	[Green]																											
610	Konstruktion drehender Prüfstand	[Green]																											
620	Beschaffung und Fertigung Prüfstand	[Green]																											
630	Erprobung Gesamtsystem @ ZFL	[Green]																											
640	SIL-Versuche @ SAC	[Green]																											
650	Auswertung und Dokumentation	[Green]																											
	<i>MS-600 Beginn SIL-Versuche</i>	[Green]																											
700	Erprobung Windkanal	[Green]																											
710	Adaptionskonstruktionen + Beschaffung	[Green]																											
720	Einrüstung, Inbetriebnahme, Funktionsvalidierung Whirltower	[Green]																											
730	Einrüstung, Inbetriebnahme, Funktionsvalidierung Windkanal	[Green]																											
740	Windkanalversuche	[Green]																											
750	Bewertung und Vergleich mit konv. Steuerung	[Green]																											
	<i>MS-700 Beginn Windkanalversuche</i>	[Green]																											
800	Projektleitung und -koordination	[Green]																											
810	Projektleitung und -koordination	[Green]																											
820	Zwischen, Abschlussberichtserstellung	[Green]																											
830	Projektbesprechungen	[Green]																											

Stand: 30. Juni 2020

Bearbeitungszeitraum Stand Abschlussbericht

Abbildung 3-1: Balkenplan zum Projektende

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Inhalte des Fördervorhabens Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung – LIBRAS-2 konnten unter anderem auf die erarbeiteten wissenschaftlichen und technischen Grundlagen aus den LuFo-Vorhaben Innovative Steuerungskonzepte für Hubschrauber - InHuS (Förderkennzeichen 20H0301A), Entwicklung einer elektrischen Blattwurzelersteuerung - ELBA (Förderkennzeichen 20H0801A) und Technologieentwicklung und die Erprobung einer Einzelblattsteuerung (Förderkennzeichen 20H9903)



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



aufgebaut werden. Zudem baut das Vorhaben auf die maßgeblichen Vorarbeiten aus dem Vorhaben Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung für Hub-schrauber LIBRAS (1) (Förderkennzeichen 20H1110) auf und setzt diese unmittelbar inhaltlich fort. Das in diesem Vorgängervorhaben gewonnene Know-how ist in den finalen Aufbau der Systemarchitektur und die Entwicklung und Fertigung der für das LIBRAS-System relevanten Systemkomponenten, sowohl Hard- als auch Software, eingeflossen.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Fördervorhabens wurde eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen (universitären, industriellen und anderen Einrichtungen) auf verschiedenen Ebenen gepflegt. Die nachfolgend aufgeführten Organisationen haben zum Teil im Rahmen von FE-Unteraufträgen am Vorhaben LIBRAS-2 partizipiert.

Organisation	Thema
MACCON Elektroniksystementwicklung und Beratungs-GmbH (MACCON)	Unterstützung und Zusammenarbeit mit der ZFL bei Entwicklung, Fertigung und Qualifikation der elektrischen Maschine für den Aufbau eines Qualifikationsmusters des Elektro-Mechanischen Aktuators (EMA) im AP 200 sowie bei der Inbetriebnahme des Systemprüfstands im AP600.
Fraunhofer Gesellschaft Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM)	Unterstützung und Zusammenarbeit mit der ZFL bei der Entwicklung, Fertigung und Qualifikation der Hardware für den Aufbau von Qualifikationsmustern der <i>Power Control Unit</i> (PCUC) und der <i>Power Supply Unit</i> (PSU), sowie der mechanischen/elektrischen Integration in der <i>Actuator Power Control Unit</i> (APCU) im AP 300.
embeX GmbH (embeX)	Unterstützung und Zusammenarbeit mit der ZFL bei der Entwicklung, Fertigung und Qualifikation von Soft- und Hardware für den



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Organisation	Thema
	Aufbau von Qualifikationsmustern der <i>Actuator Control Unit (ACU)</i> im AP 400, der mechanischen/elektrischen Integration in der APCU im AP300 und der Inbetriebnahme des Gesamtsystems im AP600.
Sumitomo Cyclo Drive Germany GmbH (SHI)	Unterstützung und Zusammenarbeit mit der ZFL bei der Integration und Fertigung eines kommerziell verfügbaren Getriebes für den Aufbau der Qualifikations- und Erprobungsmuster des Elektro-Mechanischen Aktuators (EMA) im AP 200.

Tabelle 5-1: Übersicht zur Beteiligung von universitären, industriellen und anderen Einrichtungen im Rahmen von LIBRAS-2

6. Technischer Bericht zum Anteil der ZFL

6.1 AP 100 Gesamtsystemarchitektur

Im Arbeitspaket AP 100 wurden Arbeiten zur Konzeption der Gesamtsystemarchitektur und der Festlegung von Spezifikations- und Redundanzforderungen durchgeführt.

6.1.1 AP 120 Designkonzept Aktuatorintegration und Gesamtsystem

Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung von weiterführenden Konzeptstudien zur Integration der EMA-Komponenten in das drehende System einer Koaxial-Rotoranordnung und Untersuchungen zur Integration der APCU.

Im Vorhaben LIBRAS (1) waren die Arbeiten zur Integration der EMAs in den Rotorkopf und zum Design des Gesamtsystems bereits im Wesentlichen abgeschlossen. Das im System Design & Development Plan [4] vorgesehene System CDR fand im Juli 2017 statt. Aus dem System CDR ergaben sich 10 Action Sheets, die nach den gängigen ZFL Richtlinien klassifiziert wurden und sich wie folgt verteilen:

- 3 Action Sheets vom Typ Class A (Potential impact on design; completion before next process step necessary).



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



- 7 Action Sheets vom Typ Class B (Action to be considered; completion before next review/gate necessary).

Die Bearbeitung der aus dem System CDR entstandenen Action Sheets erfolgte in den inhaltlich betroffenen Arbeitspaketen (AP 200 – AP 400). Mit dem Abschluss der Bearbeitung und der damit verbundenen Schließung der Action Sheets wurde das System CDR im Februar 2018 formal abgeschlossen. Gleichzeitig wurden damit auch die Arbeiten im AP 120 abgeschlossen und es erfolgte der Übergang in die Fertigungsphase in den Arbeitspaketen (AP 200 – AP 400).

6.1.2 AP 140 System Safety Assessment

Begleitend zu den Arbeiten in den Arbeitspaketen AP 200, AP 300 und AP 400 erfolgte in diesem Arbeitspaket die Sicherheitsbewertung des Gesamtsystems, auf deren Grundlage eine Freigabe des Konzeptes zur Herstellung und Einrüstung in die jeweilige Versuchsumgebung erfolgen konnte. Da die Anforderungen an Ausfallraten und -verhalten hinsichtlich der ursprünglich im Vorhaben geplanten Windkanalerprobung ähnlich denen einer Hubschraubereinrüstung für den fliegenden Betrieb sind, können die gewonnenen Erkenntnisse direkt auf eine spätere Systemintegration übertragen werden.

Im AP 140 wurde das bereits im Vorhaben LIBRAS (1) begonnene Safety Assessment mit weiterführenden Arbeiten am Preliminary System Safety Assessment (PSSA) und Weiterführung der System FMEA [26], [50] fortgesetzt. Im Rahmen dieser Arbeiten zeigte sich, dass einige der im EMA verbauten Wälzlager teils große Anteile an der resultierenden Ausfallrate hatten (s.a. folgender Absatz). Im Rahmen einer zweitägigen Statusbesprechung mit SAC wurde dieses Thema adressiert und es bestand zu dem damaligen Zeitpunkt Einigkeit darüber, dass hieraus eventuell die Notwendigkeit zusätzlicher und spezifischer Versuche zum Nachweis der mechanischen Integrität entstehen könnte. Im weiteren Projektverlauf (unter anderem aufgrund des Entfalls der Windkanalerprobung AP 700) manifestierte sich jedoch bei ZFL und SAC, dass für die letztendlich geplante Erprobung im Vorhaben diese Notwendigkeit nicht bestand. Gesamtheitlich zeigten die Arbeiten des Safety Assessment, dass sich die Wahrscheinlichkeit kritischer Fehler in geforderter Größenordnung ergab und keine grundsätzlichen Änderungen am Design- und Redundanzkonzept notwendig wurden.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Im Zusammenhang mit der Finalisierung der Lastermittlung [84] wurden die Fehlerraten für die in Abbildung 2-1 dargestellten Lager des EMA aktualisiert. Dabei bestand, wie Tabelle 5-1 zeigt, ein deutlicher Unterschied zwischen Fehlerraten der Lager des Getriebes (4, 5 und 6) und den Lagern der Motor- und Sensorwelle (1, 2 und 3).

Current Layout of EMA Bearings and Failure Rate Evaluation				3-parametric Weibull Distribution (b = 1.5, ftb = 0.05)			
Nr.	Bearing Type	Qty per EMA	Lifetimes (LIB-2399) B10 [h]	Failure Free Time t0 [h]	Safety Factor t0/top (top=200h)	Characteristic Lifetime [h]	Hazard Rate @ top=200h
1	Type 1	1	23132	1157	5,78	89735	3,29E-07
2	Type 2	1	78035	3902	19,51	302718	4,37E-08
3	Type 3	1	100000	5000	25,00	387925	2,89E-08
4	Type 4	2	15117	756	3,78	58643	6,66E-07
5	Type 5	2	8545	427	2,14	33148	1,72E-06
6	Type 6	3	9111	456	2,28	35344	1,54E-06
Remarks:						Motor&Sensor Shafts	4,01E-07
5	Preliminary, confirmation from Sumitomo outstanding					Gearbox	9,40E-06
3	Preliminary, not yet calculated, high B10 expected as loaded low					Total	9,80E-06

Tabelle 6-1: B10 Lebensdauern, Fehlerfreie Zeiten und Fehlerraten der EMA Lager

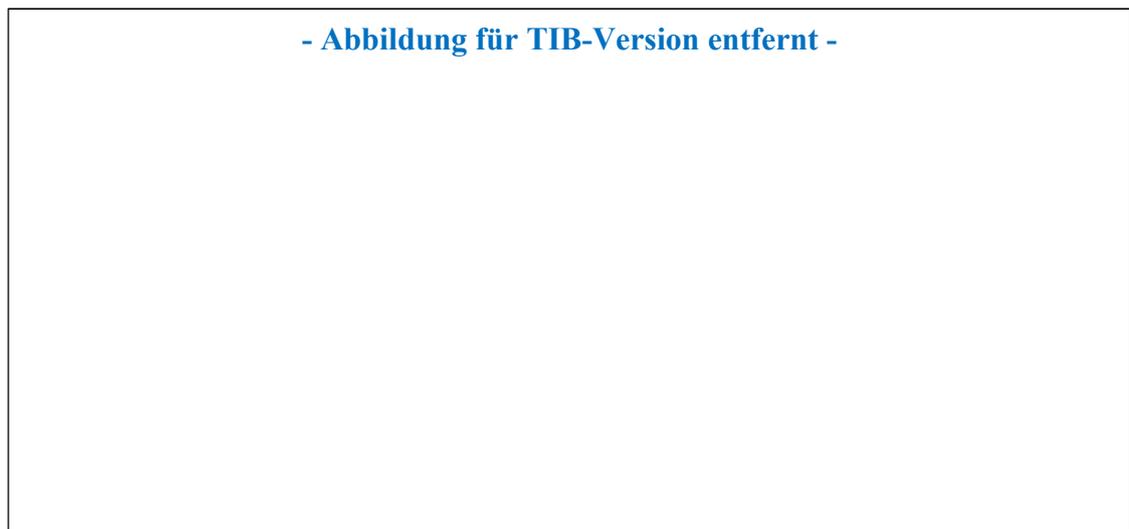


Abbildung 6-1: Position der Lager des EMA und speziell des Getriebes, dargestellt jeweils im Querschnitt

Die B10 Lebensdauerberechnung erfolgt auf Basis der ISO 281, wobei geometrische Daten der ausgewählten Lager und ihre Betriebslasten eingehen. Mit der 3-parametrischen Weibullverteilung konnte den Lagern



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



eine fehlerfreie Anfangszeit zugeordnet werden, die im Verhältnis zur voraussichtlichen Betriebsdauer (hier für 200h dargestellt) der Versuche einen Sicherheitsfaktor darstellt.

Da das verwendete Softwaretool für den Fehlerbaum Fehlerraten gemäß der Weibullverteilung nicht bereitstellte, wurden konservativ die Fehlerraten der Lager am Ende der erwähnten Betriebsdauer von 200 h unter Verwendung der 2-parametrischen Weibullverteilung, die mit dem Formfaktor 1,66 eine über die Betriebsdauer ansteigende Rate ergibt, angesetzt.

Mit diesen Fehlerraten der Lager ergab sich eine Überschreitung der geforderten Ausfallwahrscheinlichkeit einer einzelnen Lane von $1,60E-04$ um ca. 25%. In der Diskussion mit SAC wurde einvernehmlich festgestellt, dass dies kein essentielles Problem darstellt. Offen blieb, ob die tabellierten Sicherheitsfaktoren ausreichen, um die aus den besonderen Bedingungen der Anwendung (hohe Zentrifugallasten bei Fettfüllung und Reversierbetrieb) resultierenden Risiken zu kompensieren.

Mit Blick auf die Fault Tree Analysis wurde das angesetzte Missionspektrum überprüft, Temperaturniveaus der APCU korrigiert und in Absprache mit SAC *Common Cause* Fehler im Fehlerbaum berücksichtigt. Letzteres erfolgte durch die Einführung des Beta-Faktors für die redundanten Komponenten gemäß IEC 61508-6, der mittels eines umfangreichen Fragebogens bzgl. sogenannter Common Cause Defenses ermittelt wurde. Außerdem erfolgte die Harmonisierung der softwaregestützten Fehlerratenvorhersage indem unter MIL-STD-217E mit „custom, no stress“ geführte Bauteile in die dem Missionspektrum unterliegende IEC TR 62380 überführt wurden. Bei einigen Sensoren musste auf Herstellerangaben zur Fehlerrate zurückgegriffen werden.

Neben den einzelnen Bauteilen musste auch den Platinen der APCU eine Fehlerrate zugewiesen werden, die von Größe und Anzahl der Lagen sowie der Anzahl der Verbindungen abhing. Da sich auf den Platinen Bauteile verschiedener funktionaler Blöcke befinden, wurden die nicht unerheblichen Fehlerraten der jeweiligen Platine über die jeweilige Anzahl der Pins auf die funktionalen Blöcke verteilt. Mit den geschilderten Korrekturmaßnahmen und Anpassungen ergibt sich zunächst eine Reduktion für die Ausfallwahrscheinlichkeit einer Lane, wie in Abbildung 6-2 gezeigt.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

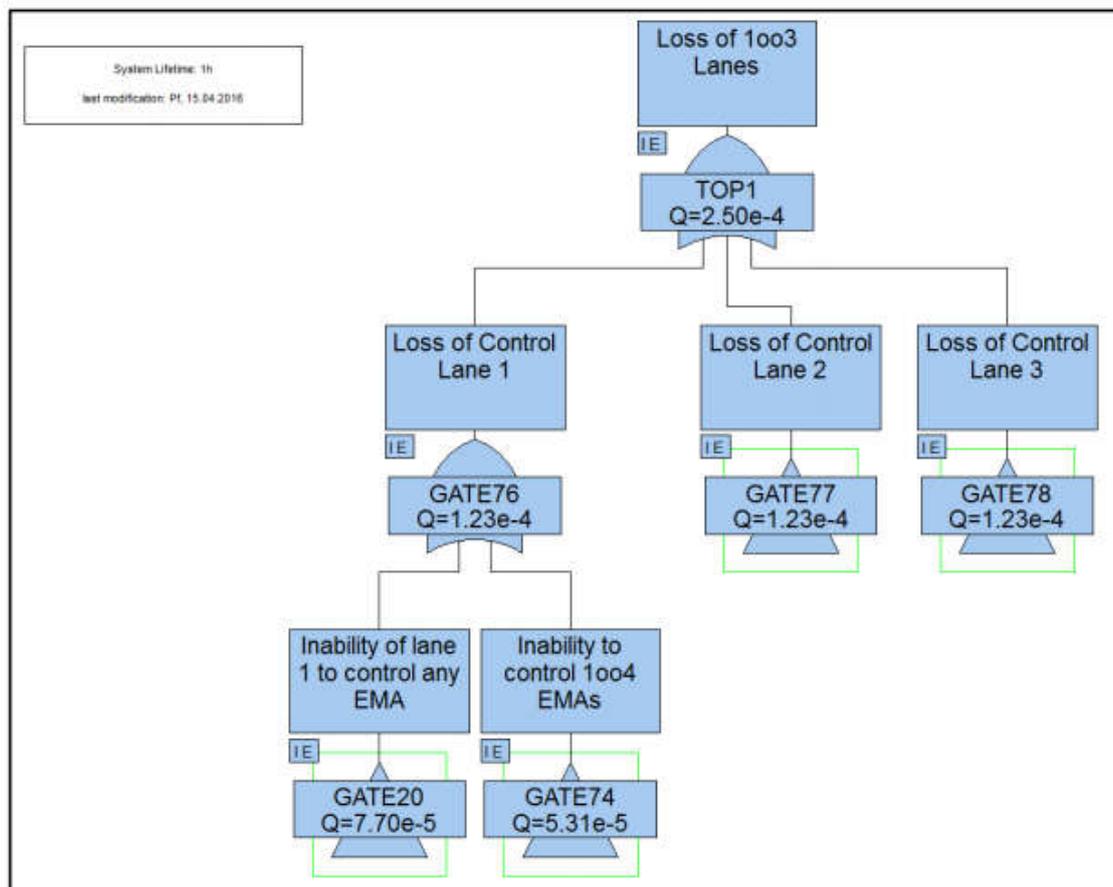


Abbildung 6-2: Ausschnitt aus dem Top Level Fault Tree – Ausfall einer von drei Lanes (Loss of 1003 Lanes)

Im Fehlerbaum für das Top Level Events „Loss of System“ (s. Abbildung 6-3) wurde der direkte Beitrag eines Wälzlagerfehlers zunächst nicht berücksichtigt/dargestellt. Da die im EMA verbauten Wälzlager im Gegensatz zu beispielsweise der Sensorik nicht redundant ausgeführt sind und somit auch nicht spezifischen Lanes zugeordnet werden können, tauchen die entsprechenden Fehleranteile auch in separaten Pfaden je EMA auf. Das Eintreten eines Lagerfehlers in einem EMA trägt damit auch direkt zum Fehlermode „Loss of System“ bei und ist nicht nur bei der Ermittlung der Fehlerrate für den Event „Loss of Control Lane X“ zu berücksichtigen. Auf dem Top Level Event sind die verschiedenen Fehleranteile jedoch nicht zu addieren, sondern die Rate ergibt sich hier aus dem Zweig mit höherer Ausfallrate.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

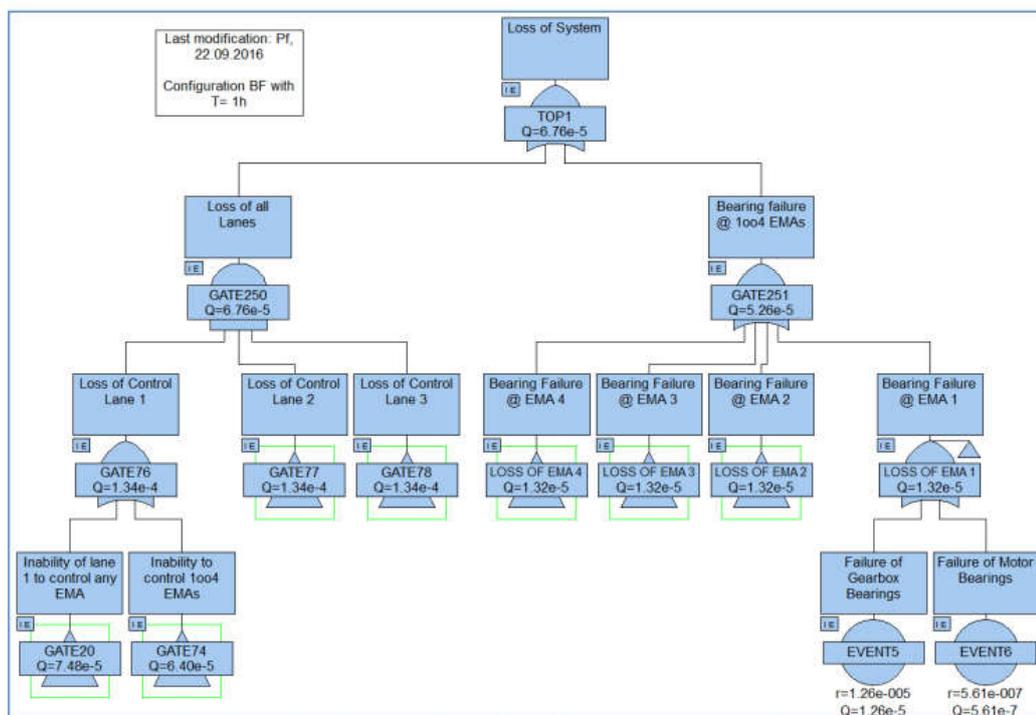


Abbildung 6-3: Top Level Fault Tree

Auf der zweiten Ebene von unten ist unter „Loss of Control Lane X“ weiterhin zu erkennen, dass die Fehlerratenanforderung aus der Systemspezifikation von $1.6e-4$ mit dem aktuellen Vorhersagewert von $1.34e-4$ erfüllt ist. Die durchgeführten Arbeiten führten somit zu keiner nennenswerten Abänderung formulierter Sicherheitsaussagen.

Das System Safety Assessment wurde während der gesamten Laufzeit des Vorhabens fortgeführt und bei Bedarf aktualisiert, d.h. Überarbeitungen bzw. Korrekturen in den unterschiedlichen Anteilen der System Safety Assessment Dokumente [26], [50] und [104] verliefen parallel zum Designfortschritt bei der Entwicklung der Systemkomponenten in den Arbeitspaketen AP 200 – AP400. Mit dem Erreichen des für die Freigabe der Fertigung erforderlichen K30-Standes aller Bauteile und Baugruppen des LIBRAS-Systems waren dann nur noch geringfügige Änderungen im Bereich des Safety Assessment notwendig. Die zentralen Dokumente wie die Fault Tree Analysis [104], die in [50] beschriebene Bewertung der Lagerproblematik sowie die in [26] ausgeführte Failure Mode and Effects Analysis wurden freigegeben und damit das Arbeitspaket abgeschlossen.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



6.2 AP 200 EMA (Kombination Motor + Getriebe)

Im AP 200 sind alle Arbeiten zusammengefasst, die die Konstruktion und Fertigung der Motor-, Getriebe- und mechanischen Komponenten der Aktuatorik betreffen. Zudem wurden in diesem Arbeitspaket Versuche zur Inbetriebnahme und Qualifizierung mit dem Motor bzw. EMA absolviert.

6.2.1 AP 290 Redesign A- zu B-Muster

Das innerhalb des Vorhabens LIBRAS (1) konstruierte, gefertigte und erprobte A-Muster-Design wurde in diesem Arbeitspaket entsprechend den Anforderungen der Windkanalversuchsanlage und unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus LIBRAS (1) modifiziert. Mit dem daraus entstandenen B-Muster-Design wurden zunächst Qualifikationsmuster gefertigt und erprobt (vgl. Abschnitt 6.2.4). Auf Grundlage von Review-Ergebnissen und Ergebnissen aus verschiedenen Versuchen wurden dann die Erprobungsmuster für die ursprünglich geplante Windkanalerprobung entwickelt und gefertigt.

Zu Beginn der Arbeiten in diesem Arbeitspaket erfolgte die Inbetriebnahme und Erprobung der beiden im Vorhaben LIBRAS (1) aufgebauten Funktionsmuster (vgl. [210]) in Zusammenarbeit mit MACCON. Ziel der Erprobung war die Validierung der von MACCON durchgeführten Auslegungsrechnungen für die elektrische Maschine und der sich aus der geänderten Stator Gestaltung ergebenden höheren Leistungsdichte, die dann vor allem zur Reduzierung der Länge der elektrischen Maschine nutzbar wäre. Die ersten Ergebnisse zeigten bereits für den „konventionellen“ Stator eine gute Übereinstimmung zwischen der Auslegung und den Messwerten.

Für die Festlegung der Integration der Schnittstellen für die Energieversorgung (Leistung) und die Sensorsignale (Sensorik) wurden zunächst zwei Varianten entwickelt, von denen die der stirnseitigen Anbindung letztendlich gewählt wurde. Abbildung 6-4 zeigt einen Schnitt durch den EMA, der die konstruktive Ausführung der Schnittstellenintegration zeigt.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-4: Redesign EMA (Schnittzeichnung)

Wegen technologischer und terminlicher Risiken für den Gesamtfortschritt des Vorhabens, aber auch der Tatsache, dass mit der konventionellen Gestaltung des Stators die Leistungsanforderungen erreichbar und eine Integration des EMA in den zur Verfügung stehenden Bauraum möglich sein sollte, wurde die Gestaltung des Stators für den Technolgie-demonstrator aus dem Vorhaben InHuS übernommen.

Für die Detailierung des Getriebeabtriebs (s. Abbildung 6-5, links) zur Anbindung des Rotorblattes über eine Steuerstange an den EMA wurde in Zusammenarbeit mit Sumitomo (vgl. Abschnitt 5) eine Lösung erarbeitet, die nur geringfügige Änderungen an der eigentlichen Konstruktion des (Serien-)Getriebes erfordert, aber gleichzeitig geringen Bauraumbedarf aufweist. Letzteres gilt auch für die Integration des **XXX**-Sensors für die abtriebsseitige Positionsmessung am EMA (s. Abbildung 6-5, rechts).



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Abbildung 6-5: Detailierung EMA – Getriebe und Getriebeabtrieb (links) und
 Sensorintegration für die abtriebsseitige Positionsmessung (rechts)

Abbildung 6-6 und Abbildung 6-7 zeigen den Stand der EMA-Gesamt-Konstruktion inkl. der zugehörigen Verkabelungen zum Anschluss an die APCU (je drei Lanes für Signale und Leistung).

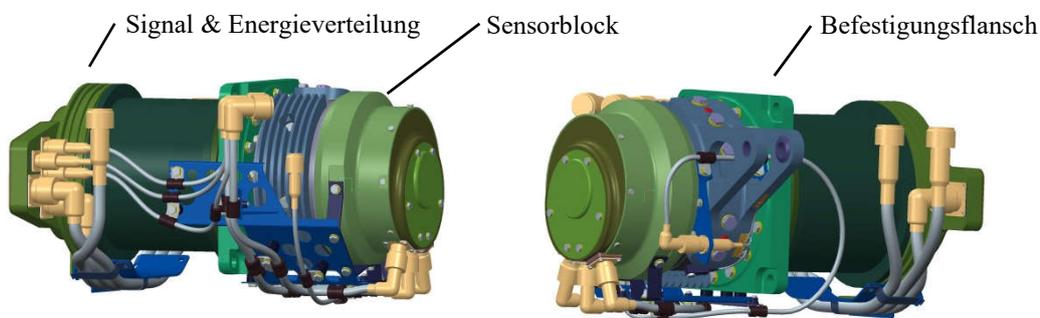


Abbildung 6-6: EMA – Seitenansichten mit Anschlüssen und Kabelführungen für Energie- und Signalleitung, sowie die Blattanbindung



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-7: Schnittzeichnung des EMA

Der iterative Austausch von CAD-Modellen mit SAC im Konstruktionsprozess stellte sicher, dass es bei der späteren Integration des EMA auf dem Rotorkopf zu keinen mechanischen Kollisionen mit angrenzenden Baugruppen kam (vgl. Abschnitt 6.6.4). So konnten wichtige Schnittstellen und Schnittstellenmaße für die Integration des EMA in den Rotorkopf eingefroren werden, was auch den Austausch eines einzelnen EMA im Schadensfall mit vertretbarem Zeitaufwand realisierbar machte. Abbildung 6-8 zeigt die Integration der vier EMAs auf dem Rotorkopf und deren Anbindung an die APCU.

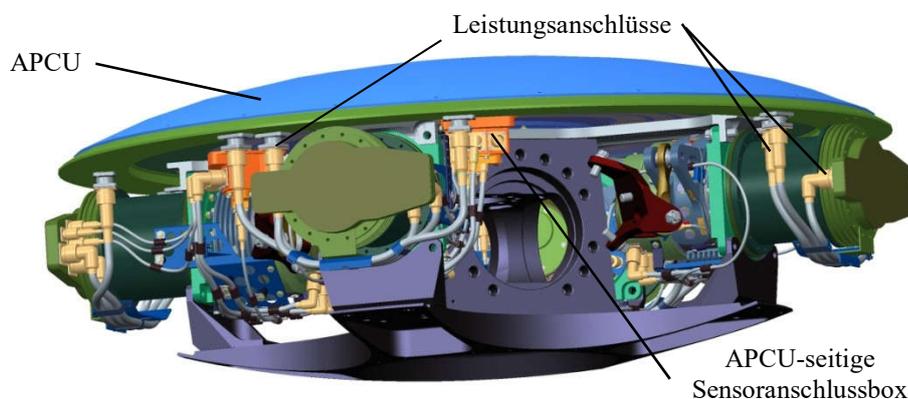


Abbildung 6-8: Integration des EMA auf dem Rotorkopf

Das Redesign des EMAs wurde mit Rotor und Stator der elektrischen Maschine fortgeführt (s. Abbildung 6-9 und Abbildung 6-10).



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-9: EMA – Integration des Statorpakets

MACCON führte im Rahmen der Unterbeauftragung Berechnungen und Versuche zur Fixierung (Verklebung und/oder Bandagierung) der Magnete auf der Rotorwelle durch (Abbildung 6-10). Diese ergaben, dass Klebung und Bandagierung ausreichten, um eine sichere Fixierung der Magnete auf der Rotorwelle unter allen Betriebsbedingungen zu gewährleisten.

Zur Absicherung der theoretischen Nachweise, aber auch zur Untersuchung der Herstellbarkeit bzw. der Herstellverfahren, wurden an einem Dummy-Rotor Bandagier- und nachfolgende Schleuderversuche durchgeführt. Die folgende Abbildung 6-10 zeigt ein erstes Versuchsmuster bei der Durchführung der Schleuderversuche, die auch unter Hochtemperaturbedingungen erfolgreich waren.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Abbildung 6-10: Experimentelle Versuche zur Fixierung der Magnete

Die Anbindung des Rotorblattes an den Getriebeausgang erfolgt über das Blatthorn (*Pitch Horn*). Dieses Bauteil wird direkt am Abtrieb des Fine-Cyclo-Getriebes montiert, das hierzu entsprechend modifiziert wurde. Da über dieses Bauteil die Blattlasten in den EMA eingeleitet werden und ein Versagensfall katastrophale Auswirkungen (Totalverlust der Steuerfähigkeit) hat, wurde mittels FEM-Berechnungen die Lastverteilung untersucht (s. Abbildung 6-11). Als Ergebnis zeigte sich, dass die aktuelle Konstruktion des Blatthorns ausreichende Reserven bzgl. der Festigkeit aufwies.

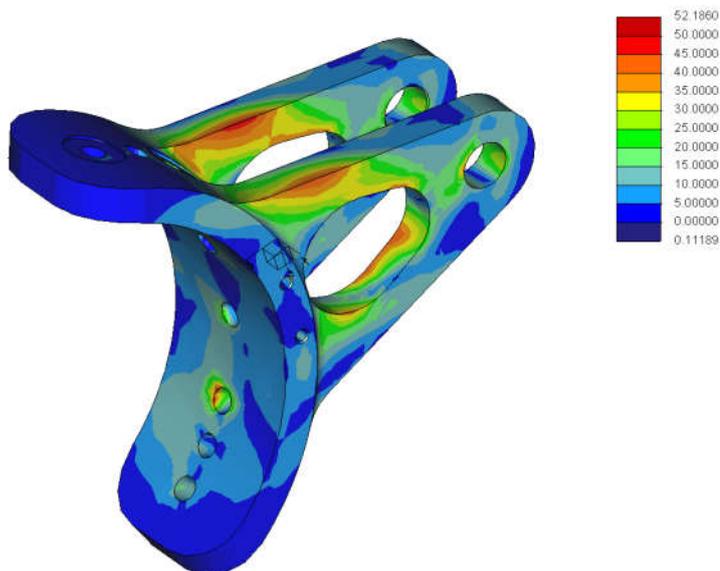


Abbildung 6-11: Lastenberechnung Pitch Horn



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Die Spannungsverteilung gemäß Abbildung 6-11 wurde verwendet, um geeignete Positionen zur Applikation von Dehnungsmessstreifen zur Kraftmessung festzulegen und das entsprechende Übertragungsverhalten zu ermitteln.

Auf Basis der EMA Verlustleistung legte SAC ein separates Kühlsystem zur Ableitung der von den EMAs erzeugten thermischen Verlustleistung aus. Das Design der EMAs weist zur besseren mechanischen/thermischen Anbindung an das Kühlsystem keine Rippen zur Vergrößerung der Oberfläche auf. Jedoch zeigten die von SAC durchgeführten thermischen Simulationen, dass die Kühlleistung dieses Kühlsystems nicht für jeden Fortschrittsgrad ausreichte. ZFL und MACCON unternahmen aufgrund dieser Problematik eigene thermische Simulationen für Betriebszustände bei einer niedrigeren Abtriebsleistung, für die die von SAC bereitgestellten Kraft-/Wegtrajektorien verwendet wurden. Auf Grundlage dieser Ergebnisse zur benötigten Kühlleistung konnte SAC dann erneut das Design des Kühlsystems überprüfen und schließlich die ausreichende Dimensionierung bestätigen.

Zusammen mit MACCON erfolgten, wie bereits ausgeführt, Untersuchungen zu mechanischen Festigkeit von Stator und Rotor der elektrischen Maschine. Es wurden verschiedene Varianten zur Fixierung des aus Einzelblechen bestehenden Blechpaketes ausgearbeitet und im Hinblick auf Umwelt- und Lastbedingungen analysiert, aber auch auf die elektrischen/magnetischen Eigenschaften und die Festigkeit der elektrischen Maschine. Des Weiteren erfolgten vertiefte Untersuchungen zur Fixierung der Magnete auf der Rotorwelle und den Eigenfrequenzen, von denen keine in kritischen Bereichen lag.

Auch für die übrigen mechanischen Komponenten des EMAs wurde auf Basis der von SAC genannten Lasten und Geometrien die Festigkeitsbetrachtung erweitert und in ProE numerisch modelliert oder aber analytisch berechnet. Abbildung 6-12 zeigt beispielsweise die Ergebnisse der Berechnung für den Flansch über den der EMA auf dem Rotorkopf fixiert wird, im Ergebnis ohne kritische Last- bzw. Spannungszustände.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

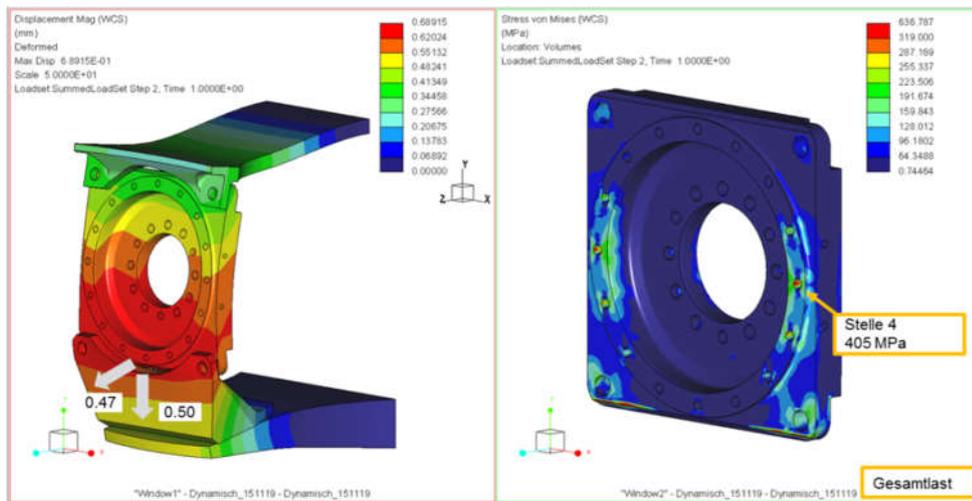


Abbildung 6-12: EMA Flansch - Kontaktrechnung mit der Gesamtlast

Der Designprozess bezüglich des EMAs wurde mit dem kombinierten *Preliminary und Detailed Design Review* für das Subsystem EMA basierend auf für das Forschungsprogramm angepassten Checklisten abgeschlossen. In diesem Review wurde u.a. das Design auf die Erfüllung der dem EMA zugeordneten Subsystemrequirements im Detail überprüft, was auch die dem PDR/CDR-Gate zugeordneten Verifikationsprozesse einschloss. Das Review und das Reviewergebnis sind im Review Summary Report [44] dokumentiert.

Nach Abarbeitung der im Review festgestellten Aktionen wurden die vorhandenen Fertigungszeichnungen des EMA mit 25 Unterbaugruppen und 67 Einzelteilen in den Zustand K30 (Zustand, der gemäß Qualitätsmanagementplan [26] für die Freigabe der Fertigung benötigt wird) überführt.

In Vorbereitung auf die Fertigung, die Montage und den Transport des EMA wurden verschiedene Vorrichtungen konstruiert. So wurde für die Kalibrierung der Dehnungsmessstellen am Getriebeabtriebshebel eine Montage- und Kalibriervorrichtung entworfen und gefertigt, als Adaption einer bei der ZFL vorhandenen Kalibriervorrichtung. Die folgende Abbildung zeigt die ZFL-eigene Kalibriervorrichtung und eine 3D-Darstellung der adaptierten Vorrichtung.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

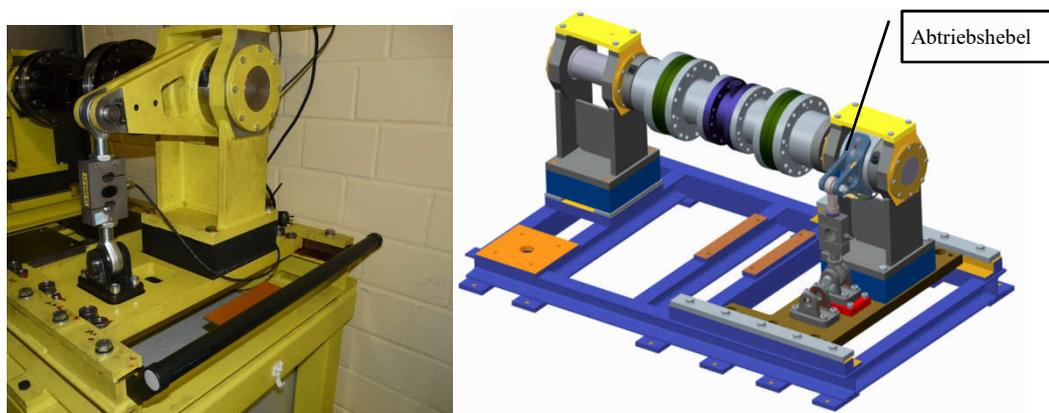


Abbildung 6-13: Vorhandene Kalibriervorrichtung und 3D-Modell der Vorrichtung mit benötigter Adaption und DMS-beklebtem Abtriebshebel

Eine weitere Montagevorrichtung (Abbildung 6-14) ermöglicht es, den Rotor in den vormontierten Stator inkl. Gehäuse zu verbringen. Diese Vorrichtung war notwendig, da nur ein sehr geringer Luftspalt zwischen Stator und Rotor vorhanden ist und ein Anliegen des Rotors am Statorblechpaket während der Montage bei hohen Magnetkräften nicht auftreten durfte.

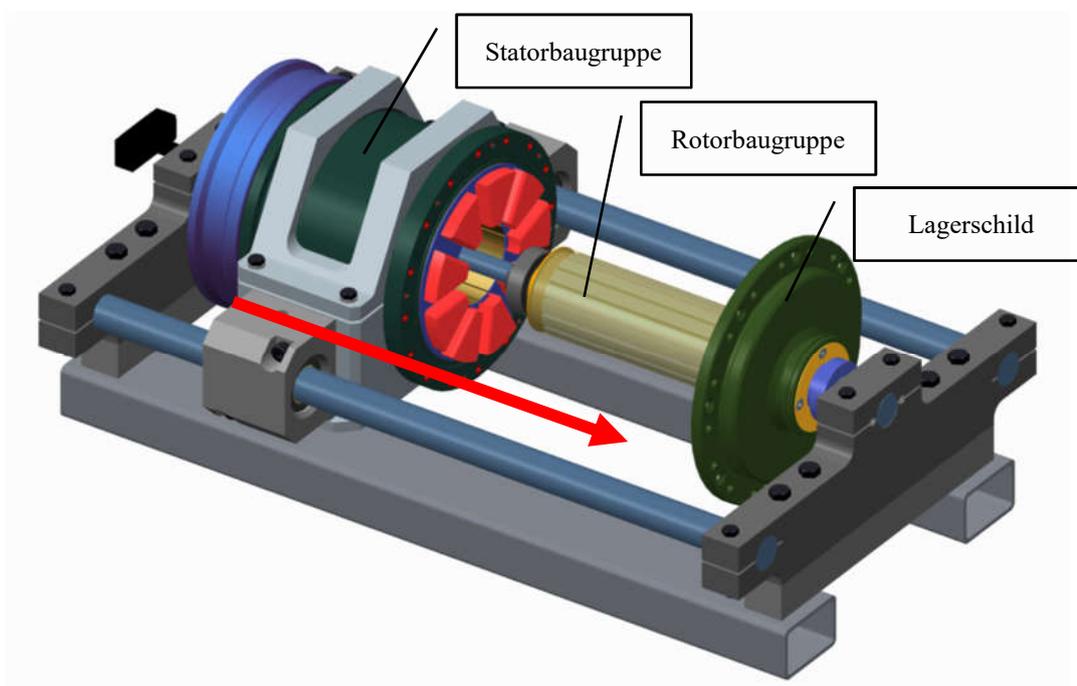


Abbildung 6-14: 3D-Modell der Montagevorrichtung E-Maschine inkl. vormontierter Stator- und Rotorbaugruppe mit Lagerschild



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Für den Transport und die Lagerung der EMAs forderte das System CDR eine Vorrichtung, deren Umsetzung in Abbildung 6-15, bestückt mit einem EMA, gezeigt ist. Die Ausführung der Vorrichtung (X99-0029.980.20) ermöglicht neben der sicheren Ablage des kompletten EMA auch den Transport per Kran im Zuge der Installation auf dem Rotorkopf.

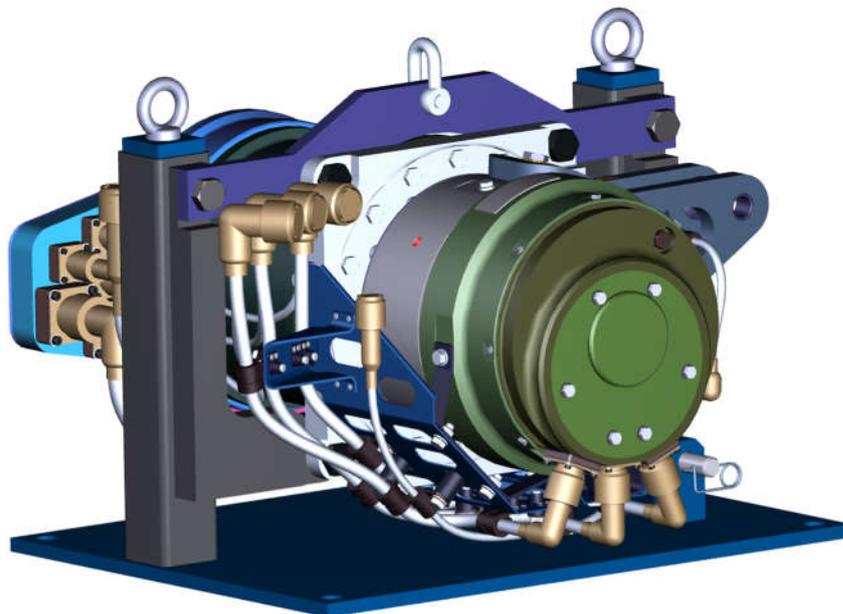


Abbildung 6-15: Transportgestell EMA X99-0029.980.20 mit montierten EMA für die Verwendung bei Transport und Lagerung

Im Rahmen des CDR für das LIBRAS[®]-System ergaben sich auch bezüglich des EMAs Action Sheets, die im Wesentlichen die Arbeiten zur (Betriebs-)Festigkeit betrafen. Die zugehörigen Berechnungen wurden einer vollständigen Überprüfung unterzogen und sofern erforderlich korrigiert und ergänzt. So konnte z.B. bestätigt werden, dass unter den spezifizierten Lasten die minimale sichere Betriebszeit des EMAs rechnerisch 500h beträgt, resultierend aus den Berechnungen für das Fine-Cylco-Getriebe, und laut SAC ausreichend ist für die Windkanalerprobung.

Mit Bearbeitung der EMA-relevanten Action Sheets (u.a. bzgl. Festigkeit) wurde das CDR für das LIBRAS[®]-System ebenfalls abgeschlossen und damit auch die wesentlichen Arbeiten zum Redesign vom A- zum B-Muster, vorbehaltlich etwaiger Änderungen am Design aufgrund von Ergebnissen aus den Qualifikationsversuchen.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelsansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



6.2.2 AP 292 Fertigung Qualifikationsmuster (B-Muster)

Gebündelt in diesem AP wurden alle fertigungsbezogenen Arbeiten durchgeführt. Hier galt es insbesondere, die Anforderungen an Fertigungsverfahren und Materialverfolgbarkeit einzuhalten. Abschließend wurden die gefertigten Teile montiert und für die Qualifikationserprobung (beschränkt auf Qualifikationstests zum Nachweis des sicheren Versuchsbetriebes) bereitgestellt. Die Beschaffung aller strukturmechanischen Komponenten, wie z.B. Gehäuse und Motorwelle, oblag der Verantwortung von ZFL; die Fertigungsbetreuung der elektrischen Maschine (Stator und Rotor) erfolgte durch die Fa. MACCON GmbH.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den Versuchen an den Funktionsmustern und aus dem *Preliminary Design Review* (PDR) für das LIBRAS[®]-System [27] erfolgte aufgrund der Terminlage eine Risikoabschätzung bzgl. der zeitgleichen Beschaffung von Bauteilen für die Erprobungsmuster und die Qualifikationsmuster.

Vor der Angebotsanfrage wurden jeder einzelnen Baugruppe, jedem Einzelteil technische Qualitätsforderungen zugeordnet. Diese erstrecken sich hierbei auf Grund der Zielanwendung im Windkanal von einfachen Zeugnisanforderungen (CoC, Werkbescheinigungen, Werkszeugnissen, Abnahmeprüfzeugnissen etc.) über Anforderungen an die Erstellung, Freigabe und Lieferung von Arbeits- und Prüfplänen sowie Durchführung von Acceptance Tests Procedures bis hin zur Lieferung der Bauteile mit einem FAI-Report. Die Arbeits- und Prüfpläne für Bauteile mit sicherheitsrelevanter Funktion waren vom Fertiger mit der ZFL abzustimmen und von der ZFL freizugeben.

Nachfolgend sind exemplarisch Detailabbildungen von Bauteilen bzw. vormontierter Unterbaugruppen aus der Fremdfertigung dargestellt. Abbildung 6-18 zeigt dabei einen zwischenzeitlichen Fertigungsstand des Schweißbauteils Motorwelle, bestehend aus drei Wellensegmenten (angedeutet durch den überlagerten Zeichnungsausschnitt). Nach der Vergütung/Härtung erfolgte noch die mechanische Fertigbearbeitung und Oberflächenbeschichtung, bevor das Bauteil dem Unterlieferanten der Motorfertigung beigelegt wurde.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Abbildung 6-16: Baugruppe Steckergehäuse Motor, Assy., X99-0029.200.01.03



Abbildung 6-17: Baugruppe Montageblech vollständig, X99-0029.200.05



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

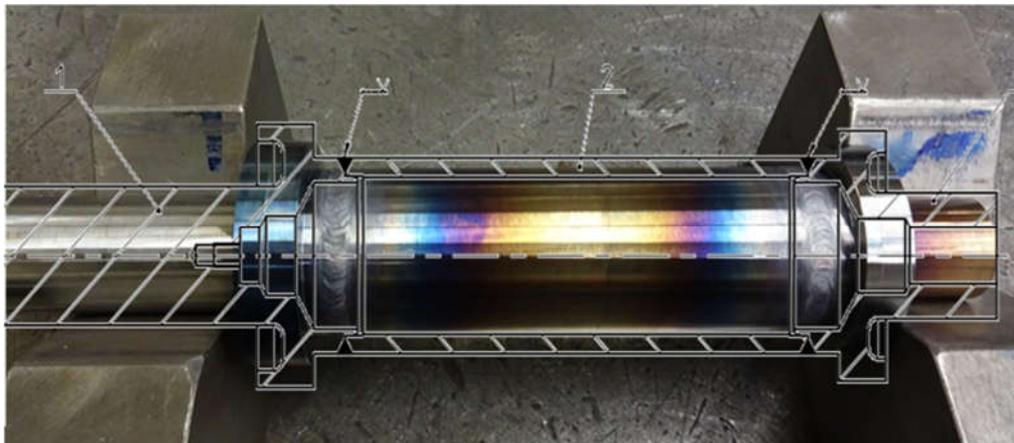


Abbildung 6-18: Schweißbauteil der Motorwelle X99-0029.200.01.01.01, bestehend aus den drei Wellensegmenten

Zu den Bauteilen mit langer Fertigungszeit zählte unter anderem das von SHI in Abstimmung mit ZFL angepasste Fine-Cyclo-Getriebe (Abbildung 6-19). Weitere Bauteile mit zum Teil erheblichen Fertigungszeiten waren das Gehäuse der elektrischen Maschine und der Flansch zur Montage des EMA an den Rotormast.



Abbildung 6-19: Für LIBRAS-2 modifiziertes Fine-Cyclo-Getriebe mit Schnittstelle zur Montage des Abtriebhebels (Getriebe mit Spuren vom Konservierungsmittel zum Schutz der Oberflächen)

Parallel zur Fertigungsphase erfolgte die Beschaffung der für die Montage des EMA benötigten Norm- und Standardteile, sowie der Magnete



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



für den Rotor und das weichmagnetische Blechmaterial für den Stator der elektrischen Maschine.

Die Montage der ersten elektrischen Maschine begann mit der Erstmontage des Blechpaketes und einem anschließenden Wickelversuch (s. Abbildung 6-20), bei dem der Füllgrad und die Höhe der Wickelköpfe die zuvor spezifizierten Werte nicht erreichten. Erst nach Lösung dieser Problematik und Freigabe der im QM-Plan geforderten Arbeits- und Prüfpläne konnte dann die eigentliche Montage der Baugruppen Rotor und Motorgehäuse durch den Motorlieferanten erfolgen. Hierzu gab es einen engen Austausch zwischen ZFL und dem Motorlieferanten.

- **Abbildung für TIB-Version entfernt** -

Abbildung 6-20: Blechpaket für den Stator der elektrischen Maschine mit einer ersten Probewicklung zur Ermittlung des Füllgrads und der Höhe der Wickelköpfe

Die beiden Bauteile Montageflansch (X99-0029.200.04) und Hebel des EMA (X99-0029.200.02.01-001) wurden aufgrund der zum damaligen Zeitpunkt bestehenden US-exportrechtlichen Einschränkungen intern bei ZFL gefertigt. Nach Fertigstellung der Baugruppen Rotor (X99-0029.200.01.01) und Stator X99-0029.200.01.01) konnte die Montage des



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



ersten EMA Qualifikationsmusters auf Basis der Arbeits- und Prüfpläne für

- die elektrische Maschine X99-0029.200.01
- den Stelltrieb X99-0029.200.02
- und den EMA X99-0029.200

erfolgen.

Die durchgeführte Instrumentierung des Abtriebhebels des EMAs (s. Abbildung 6-21) war Bestandteil der Montage und erfolgte anhand der erstellten Vorschriften. Die auf dem Hebel verklebten Dehnungsmessstreifen (DMS) dienen zur Messung der abtriebsseitigen Lasten des EMAs und werden auf dem eigens dafür adaptierten Prüfstand kalibriert (s. Abbildung 6-22). Die Kalibrierfaktoren werden mittels des TCC später im Rahmen der Inbetriebnahme auf die APCU übertragen und dort gespeichert.



Abbildung 6-21: Instrumentierung am Hebel des EMA mit DMS-Messstellen



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

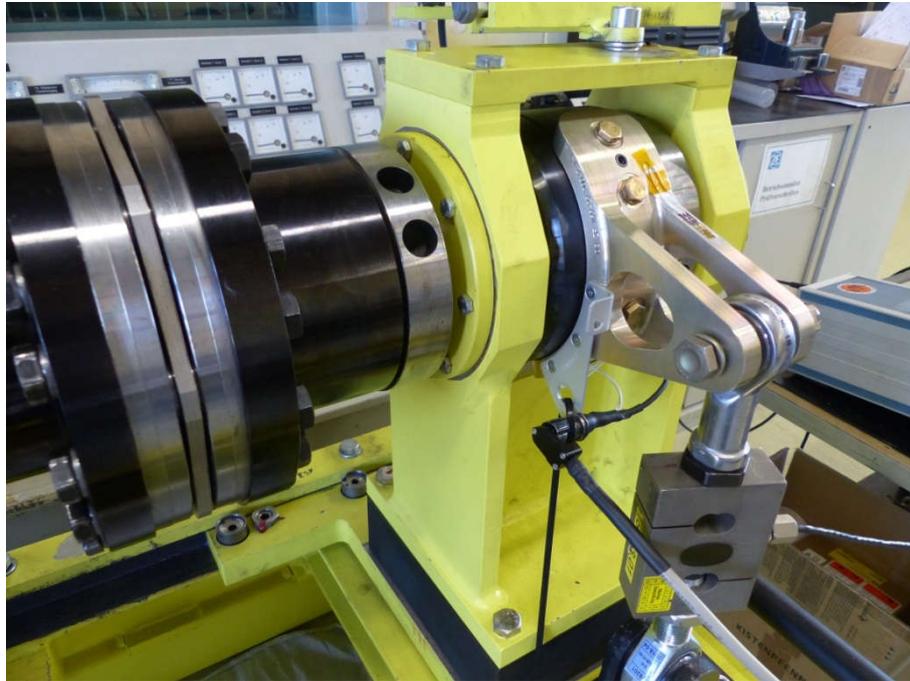


Abbildung 6-22: Kalibrierung der DMS-Messstelle am Hebel des EMA

Nach Abschluss der Montage des ersten Qualifikationsmusters erfolgte eine Überarbeitung und Anpassung der aufgeführten Arbeits- und Prüfpläne aufgrund von Erkenntnissen, die bei der Erstmontage gewonnen wurden. In den folgenden Abbildungen (Abbildung 6-23, Abbildung 6-24) sind der Zusammenbau von Motorgehäuse und Rotor mit der hierfür gefertigten Vorrichtung und der fertig montierte EMA in seiner Transportvorrichtung zu sehen.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelnsteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

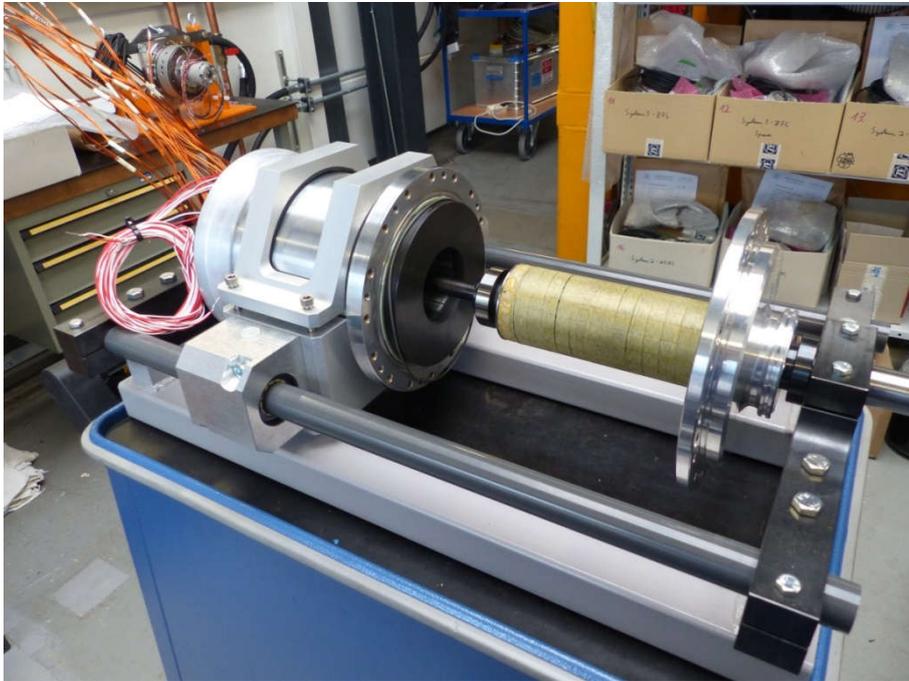


Abbildung 6-23: Qualifikationsmuster der E-Maschine in der Vorrichtung vor der Montage von Motorgehäuse und Rotor

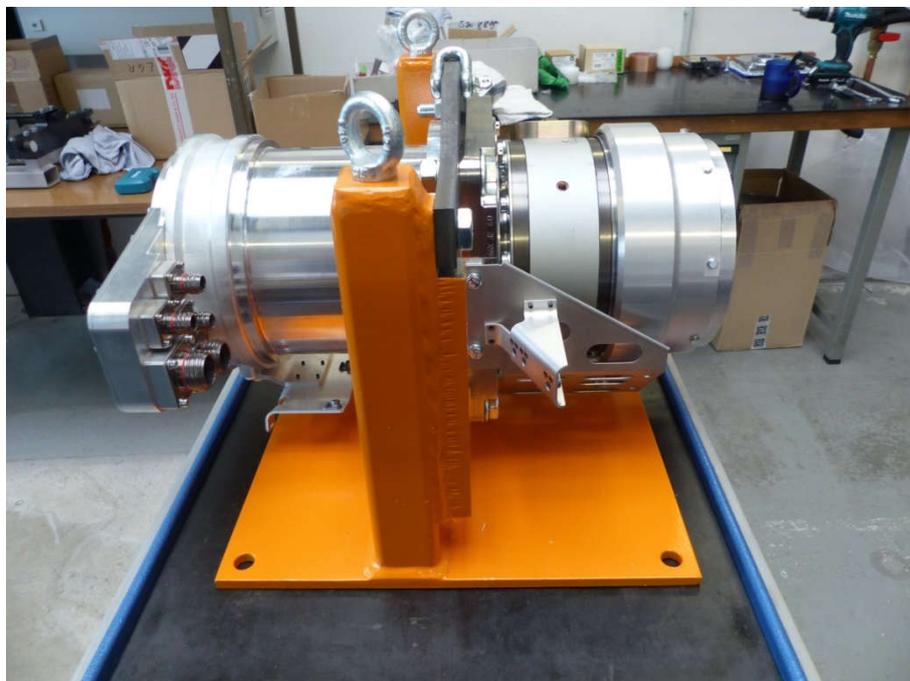


Abbildung 6-24: Qualifikationsmuster EMA nach Abschluss der Erstmontage



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Auch die in AP 290 konstruierten Montage- und Hilfsvorrichtungen wurden gefertigt. Die folgende Abbildung 6-25 zeigt die Montagevorrichtung, die verwendet wurde, um das Gehäuse der E-Maschine (mit integriertem Stator) im Montageprozess schädigungsfrei mit der Motorwelle zu vereinen.

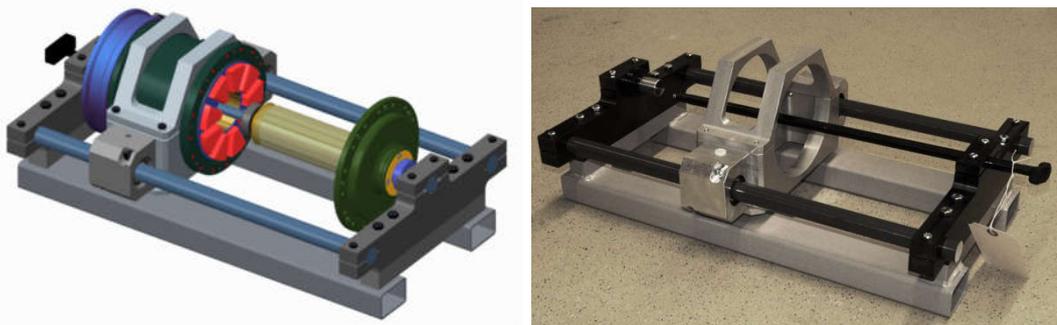


Abbildung 6-25: Montagevorrichtung E-Maschine, X99-0029.980.05
 (links: 3D-Modell E-Motor-Komponenten; rechts: gefertigte Vorrichtung)

Zudem wurden weitere Montagevorrichtungen gefertigt, mit deren Hilfe sich die elektrische Maschine, der Flansch, das Getriebe und der Sensorblock schrittweise montieren und die Positionssensoren nach dem Zusammenbau kalibrieren ließen.

6.2.3 AP 294 Konstruktion / Fertigung Qualifikationsprüfstände

Im Arbeitspaket AP 294 wurden für die Erprobung der Strukturbauteile und der elektrischen Maschine neue Prüfstände konstruiert und gefertigt bzw. Adaptionen an bestehenden Prüfumgebungen der ZFL durchgeführt. Da unterschiedliche Fragestellungen innerhalb der Versuche beantwortet werden sollten (Funktionsnachweise, Festigkeitsthemen, thermische Leistungsfähigkeit der elektrischen Maschine etc.), wurden speziell angepasste Prüfstände mit entsprechenden Lasteinheiten benötigt. Zur Ansteuerung der elektrischen Maschine des EMAs konnte dabei auf bereits vorhandene Komponenten aus den Vorhaben InHuS, ELBA und LIBRAS (1) zurückgegriffen werden.

Im Zuge der Entwicklung und Qualifizierung von Komponenten des LIBRAS[®]-Systems war der Aufbau von drei Prüfständen bei der ZFL vorgesehen:

- Motorprüfstand für die Erprobung und Vermessung der elektrischen Maschine

- Fatigue- und Funktionsprüfstand für Fatigue- und dynamische Funktionsversuche mit dem kompletten EMA
- Systemprüfstand für die Erprobung des Gesamtsystems.

Begonnen wurde mit der mechanischen Konstruktion des Motorprüfstands, der im Wesentlichen auf bereits existierenden Prüfständen aus verschiedenen abgeschlossenen LuFo-Vorhaben der ZFL basiert. Für die Aufnahme des Prüflings sowie der Lasteinheit wurden entsprechende Aufnahmen konstruiert. Der Gesamtaufbau des Motorprüfstands ist in Abbildung 6-26 dargestellt.

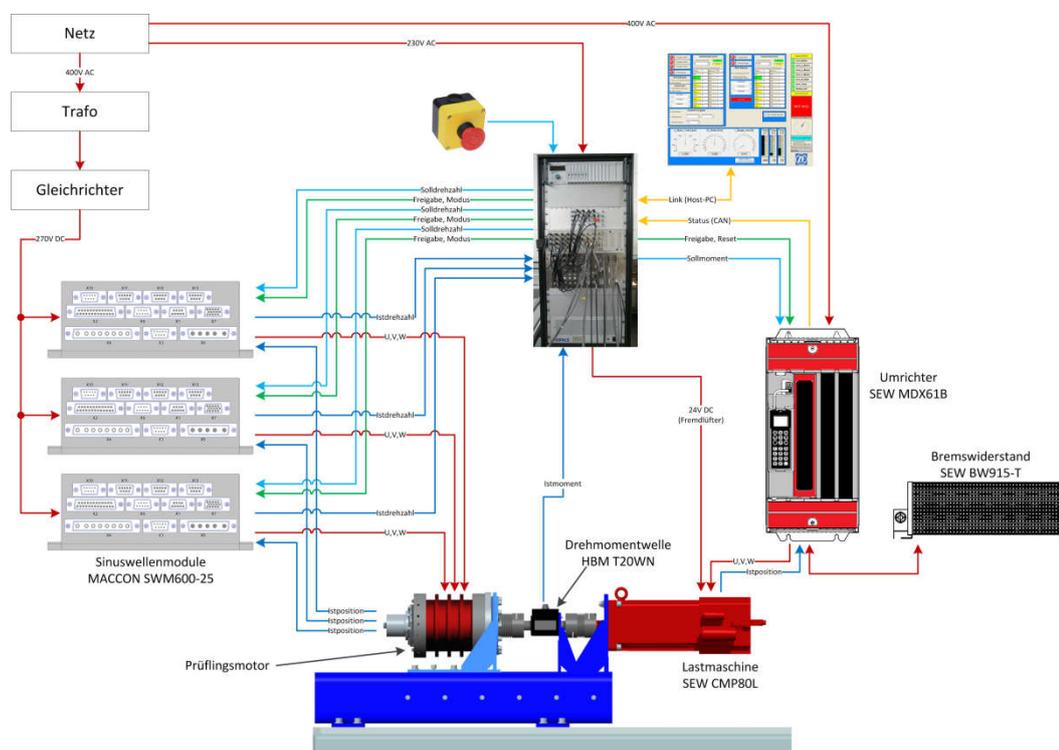


Abbildung 6-26: Schematische Darstellung des Motorprüfstands

Die Software für die Ansteuerung und Überwachung des Prüfstands (s. Abbildung 6-27) wurde auf einem dSPACE-System implementiert. Für die Inbetriebnahme wurde das Funktionsmuster des EMAs aus dem Vorhaben LIBRAS (1) verwendet. Abbildung 6-28 zeigt den kompletten Motorprüfstand mit dem eingerüsteten Funktionsmuster des EMAs und angeschlossener Lasteinheit.



LIBRAS-2

Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelnsteuerung (Phase 2)

Schlussbericht

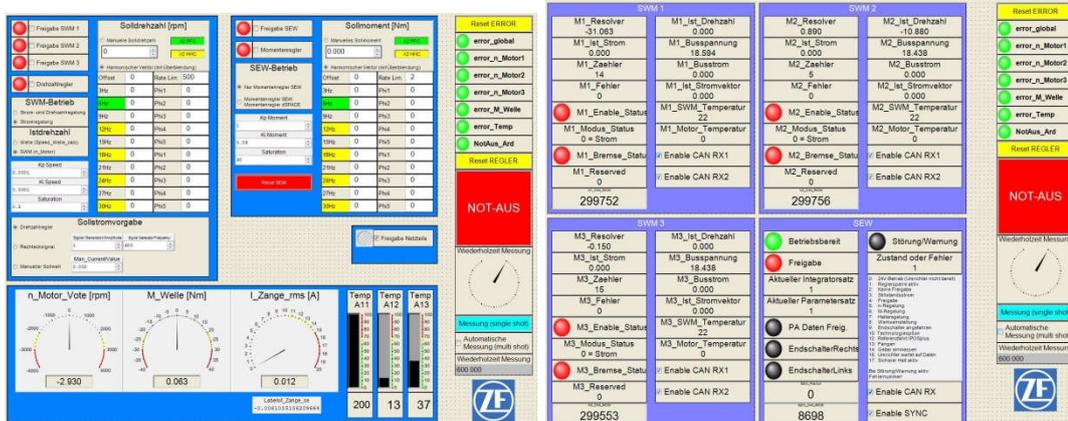


Abbildung 6-27: Motorprüfstand – dSPACE Kontrollsystem zur Ansteuerung und Überwachung des Motorprüfstands

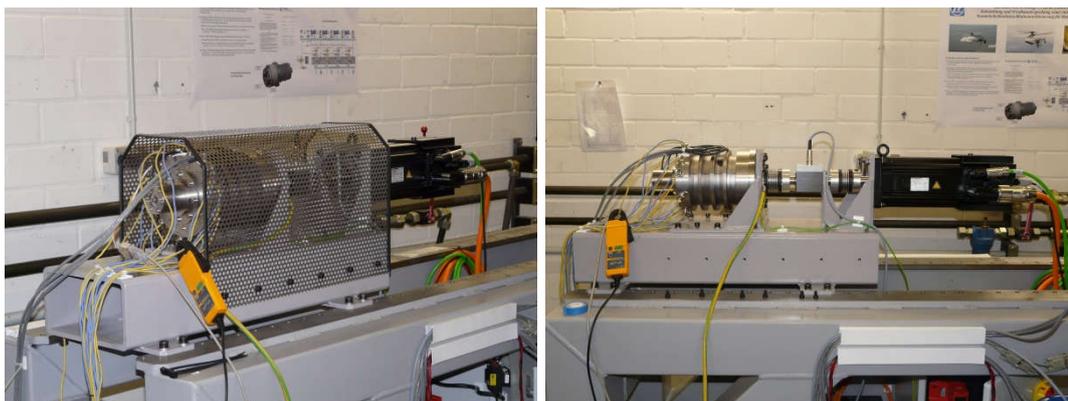


Abbildung 6-28: Motorprüfstand – Funktionsmuster eingerüstet und an die externe Lasteinheit angeschlossen (links: mit Wellenfangvorrichtung; rechts: ohne Wellenfangvorrichtung)

Auch beim Fatigue- und Funktionsprüfstand wurde angestrebt, bereits vorhandene und verfügbare Komponenten aus früheren LuFo-Vorhaben zu verwenden. Abbildung 6-29 zeigt das 3D-Modell des Fatigue-Prüfstands. Das dem Prüfstand zugrundeliegende Konzept sieht vor, dass zwei Prüflinge (Test Specimen) gleichzeitig erprobt werden, um den Zeitaufwand für die Fatigue- und Funktionserprobung zu reduzieren. In Abbildung 6-29 ist zu erkennen, dass der Fatigue- und Funktionsprüfstand über drei unabhängige Lasteinheiten verfügt. Zwei (elektrische) Lasteinheiten dienen der Simulation der auf den EMA wirkenden Fliehkräfte (CF Load F_1 und CF Load F_2) aufgrund der Installation im drehenden System. Die dritte Lasteinheit (Hydraulic Load F_3) besteht aus einem



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalprüfung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



hydraulischen Lastzylinder, mit dem die am Abtrieb des EMA wirkenden Blattlasten (External Load F_4) eingepreßt werden, indem die beiden „starr“ gekoppelten Prüflinge gegeneinander verspannt werden, unabhängig von der gleichsinnigen Bewegung die sie ausführen. Dieses Konzept ermöglicht eine Fatigue- und Funktionserprobung der EMAs, die unter einer externen Last aktiv positionsgeregelt betrieben werden.

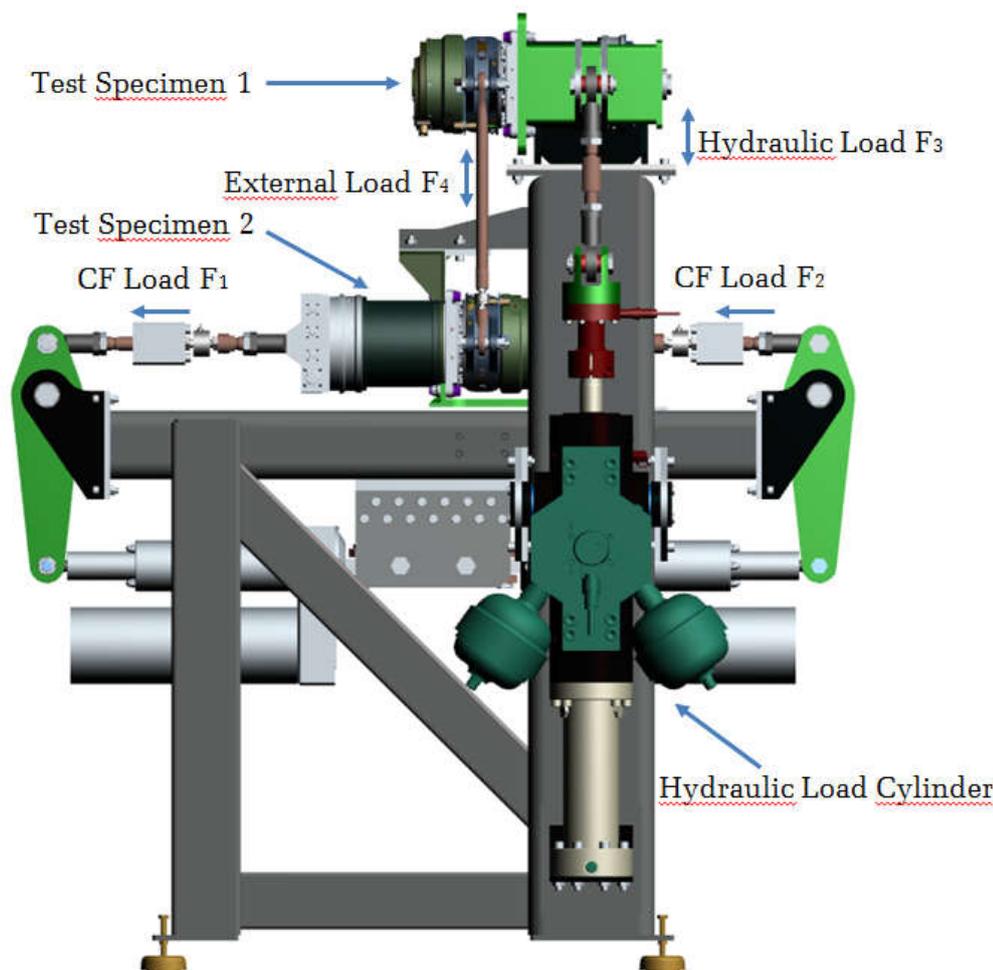


Abbildung 6-29: Zusammenbau Fatigue- und Funktionsprüfstand

Für die Erprobung am Fatigue- und Funktionsprüfstand und am Systemprüfstand wurde für den Betrieb und die Ansteuerung der EMAs eine Energieversorgung mit 270VDC Ausgängen benötigt, die als mobile Einheit (s. Abbildung 6-31) entworfen, aufgebaut und in Betrieb genommen wurde. Eine Eigenschaft des LIBRAS[®]-Systems ist, dass in bestimmten Betriebszuständen des Rotors Energie aus dem System in die Hubschrauber-Energieversorgung zurückgespeist werden kann. Am Prüfstand wird



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



diese Energie nicht in das lokale Stromnetz zurückgespeist sondern von einem sogenannten (geregelten) *Brems-Chopper*-Widerstand (s. Abbildung 6-30) aufgenommen, der vom Fraunhofer IZM auf Basis der von ZFL erstellten Spezifikation konzipiert und ausgelegt wurde.



Abbildung 6-30: Komponente für die *Brems-Chopper* Widerstände

Konsistent mit der Topologie der elektrischen Maschine und der Systemarchitektur des LIBRAS-Systems sind alle Komponenten der elektrischen Versorgungseinheit dreifach vorhanden und unabhängig betreibbar. Im Einzelnen besteht die Energieversorgung aus:

- 3 x regelbares 6kW Netzteil
- 3 x Isolationsüberwachung
- 3 x Bremswiderstände mit dazugehöriger Chopper-Elektronik



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelnsteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Abbildung 6-31: Energieversorgung (inkl. Bremswiderstände und Chopper-Elektronik) zur Verwendung an Fatigue- und Systemprüfstand, angesteuert und kontrolliert durch dSPACE System

Für die geplante Erprobung der elektrischen Maschine am Motorenprüfstand (vgl. Abschnitt) wurden Kabelzeichnungen erstellt für:

- das Leistungskabel Motor (Motorprüfstand)
- die Sensorkabel Motorphasentemperaturen (Motorprüfstand)
- und den Anschlussadapter Motorphasen (Motorprüfstand).

Den am Motorprüfstand benötigten Kabelsatz zeigt im gefertigten Zustand die Abbildung 6-32.



Abbildung 6-32: Kabelsatz für die Erprobung der elektrischen Maschine am Motorprüfstand



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Für den Fatigue- und Funktionsprüfstand wurden Kabelzeichnungen erstellt für:

- Leistungskabel Motor (Fatigue- und Funktionsprüfstand)
- Sensorkabel Getriebe (Fatigue- und Funktionsprüfstand)
- Sensorkabel EMA (Fatigue- und Funktionsprüfstand).

Die folgende dreigeteilte Abbildung zeigt exemplarisch jeweils ein Kabel jedes bereits gefertigten Typs, benötigt am EMA Fatigue- und Funktionsprüfstand.



Abbildung 6-33: Kabel für den Betrieb am EMA Prüfstand (von links nach rechts): Sensorkabel Getriebe X99-0029.960.99.01, Leistungskabel Motor X99-0029.960.99.02 und Sensorkabel EMA X99-0029.960.99.03

Für den Fatigue- und Funktionsprüfstand wurden außerdem noch Kabelzeichnungen für weitere notwendige Kabel erstellt. Dies waren:

- Energieversorgung APCU (EMA Prüfstand), X99-0029.960.99.04
- Rotorazimut (EMA Prüfstand), X99-0029.960.99.05
- FCC/TCC (EMA Prüfstand), X99-0029.960.99.06

Sämtliche in den vorherigen Absätzen beschriebene und für den Betrieb von Systemkomponenten erforderliche Kabel wurden vorwiegend extern gefertigt, mit Ausnahme einiger durch ZFL speziell gefertigter Interface-Bauteile, um dem US-Exportrecht zu entsprechen.

Der Aufbau und die Inbetriebnahme des Motorprüfstands wurde mit einer Acceptance Test Procedure [83] erfolgreich abgeschlossen. Auch die grundlegenden funktionalen Aspekte des Fatigue- und Funktionsprüfstand konnten mit Ausnahme der Fliehkräftsimulation (CF Load F_1 und CF Load F_2) zum Ende des Vorhabens demonstriert werden. Abbildung 6-34 und Abbildung 6-35 zeigen den Fatigue- und Funktionsprüfstand



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



während und nach Abschluss der Aufbauphase und mit den beiden als Versuchsträger eingerüsteten EMAs.

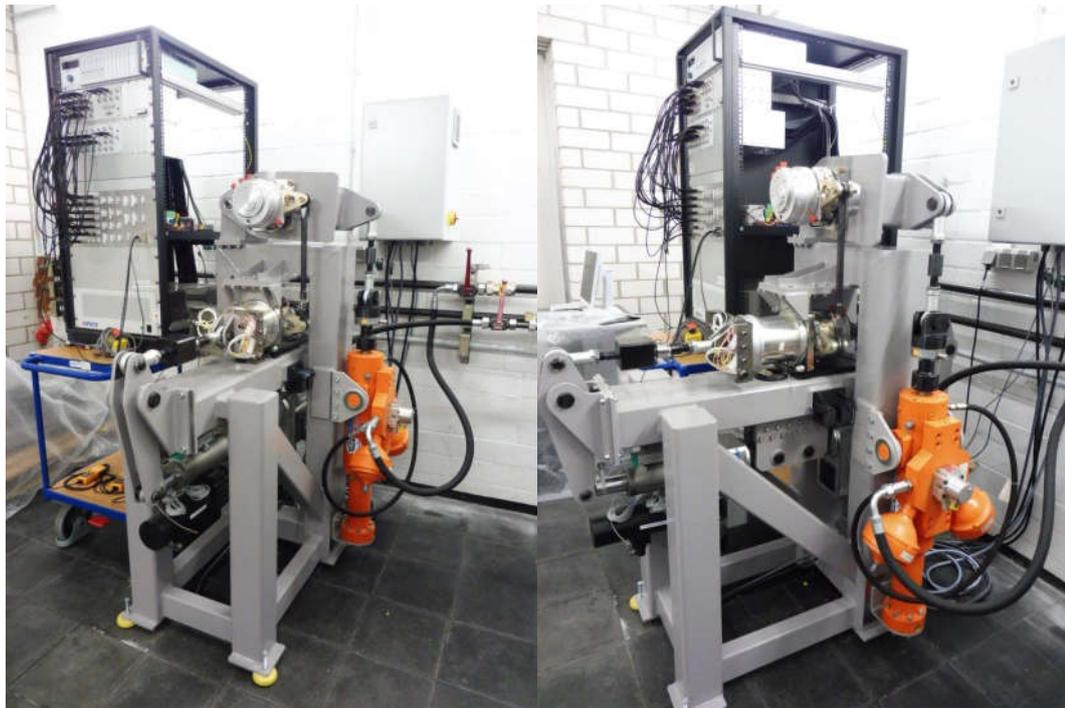


Abbildung 6-34: Fatigue- und Funktionsprüfstand während der Aufbauphase mit der Hydrauliklasteinheit, dem dSPACE-Steuerrack und den elektrischen Aktuatoren der Fliehkraftsimulation (inkl. der dazugehörigen Energieversorgung)



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Abbildung 6-35: Fatigue- und Funktionsprüfstand nach Abschluss der Aufbauphase und Einrüstung der beiden EMAs

6.2.4 AP 296 Qualifikationsversuche

Im Arbeitspaket AP 296 erfolgte die Inbetriebnahme und die Erprobung unter Verwendung der im AP 292 gefertigten Qualifikationsmuster des EMAs. Die optionale in diesem Arbeitspaket vorgesehene zusätzliche Erprobung von strukturmechanischen Subkomponenten erwies sich aufgrund des Vorhabenverlaufes als nicht notwendig. Unter Berücksichtigung der Entwicklungsziele entstand ein Qualifikationskonzept für den EMA, für das eine Anzahl von Prüfanweisungen erstellt wurde. Dabei fand die Erprobung der EMAs (mit Ausnahme von fertigungsbegleitenden Versuchen bei Lieferanten) durchgehend bei der ZFL statt.

Zu Beginn des Vorhabens wurde auf Grundlage des Qualifikationskonzepts mit der Erstellung der Prüfanweisungen/Testprogramme begonnen. Dabei lag der Fokus zunächst auf der Detaillierung des Qualifikationskonzeptes für etwaige Festigkeits- und Fatigueversuche, für die die



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Randbedingungen wie Lastniveaus, Anzahl Lastzyklen, Frequenz und Form des Lastverlaufes, Berücksichtigung thermischer Randbedingen usw. festgelegt wurden. Konkret wurden u.a. folgende Testprogramme erstellt:

- Performance Test E-Maschine auf dem Motorprüfstand
- Performance Test EMA auf dem Fatigue- und Funktionsprüfstand
- Fatigue Test EMA auf dem Fatigue- und Funktionsprüfstand
- Ultimate Load Test EMA auf dem Fatigue- und Funktionsprüfstand.

Nach Fertigung des Qualifikationsmusters für die E-Maschine erfolgte deren Einrüstung auf dem Motorprüfstand. Im Anschluss daran wurde ein vollständige Acceptance Test Procedure [83] mit dem Qualifikationsmuster der E-Maschine durchgeführt und damit ihre Funktionstüchtigkeit geprüft (Abbildung 6-36). Unter anderem wurden folgende Eigenschaften untersucht:

- Messung der Gegen-EMK
- Kurzschlussstrom
- Momenten-Konstante
- Betrieb an den Auslegungspunkten
- Momenten-Ripple im Falle einer kurzgeschlossenen Phase bzw. einer kurzgeschlossenen Lane
- Erwärmung im Betrieb unter Last
- Ausdauertest bezüglich der Lagerung und Bandagierung des Rotors
- Verhalten bei Überdrehzahl.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Abbildung 6-36: Aufbau Performance Test - Qualifikationsmuster E-Maschine mit externer Zusatzkühlung am Motorprüfstand

Nach dem positiven Abschluss der ATP wurde der Performance Test gemäß dem Testprogramm in derselben Konfiguration durchgeführt. Im Rahmen der Dokumentation und Auswertung des Performance Tests für die E-Maschine zeigt Abbildung 6-37 beispielsweise die für alle neun Phasen der E-Maschine ermittelte Gegen-EMK in Abhängigkeit der Motordrehzahl. Die Auswertung ergab außerdem, dass von acht im Testprogramm definierten Testfällen, sechs Testfälle bestanden und zwei Testfälle nicht bestanden wurden. Die nicht bestandenen Testfälle betrafen die ermittelte Momentenkonstante k_T (lag außerhalb der 10% Toleranzgrenze), was höhere Phasenströme und -temperaturen verursacht.

Für die auf Grundlage der frei verfügbaren XH-59 Daten spezifizierten Designpunkte lagen die ermittelten Spitzen- und RMS-Werte der Phasenströme zwar oberhalb der aus der Simulation erwarteten, aber deutlich innerhalb der für die E-Maschine spezifizierten Grenzen. Für die von Daten des Technologiedemonstrators X2, die in der Designphase der E-Maschine aus exportrechtlichen Gründen ZFL nicht zugänglich waren, abgeleiteten Testpunkte des Performance Test ergab sich jedoch ein anderes Bild, da hier die ermittelten Spitzen- und RMS-Werte der Phasenströme außerhalb der spezifizierten Werte lagen.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-37: Gemessene Gegen-EMK in Abhängigkeit der Motordrehzahl

Im Falle der Messung der Motorphasentemperaturen verhinderten offenkundige EMV-bedingte Störungen in einzelnen Phasen, dass der Testfall erfolgreich bestanden wurde. Zusammenfassend ließen die Versuchsergebnisse aus dem Performance Test mit der E-Maschine erkennen, dass die vorliegende Ausführung der E-Maschine die wesentlichen Designanforderungen erfüllt.

Nach der ursprünglichen Planung sollte nach Fertigung und Abnahme der EMA Qualifikationsmuster die Erprobung auf dem Fatigue- und Funktionsprüfstand fortgesetzt werden. Entsprechende Testprogramme für diese Erprobung (Fatigue und Funktion) waren dazu vorbereitet worden. Für die Durchführung der geplanten Versuche wurde jedoch eine vollständig funktionierende APCU (Hard- und Software) zur Ansteuerung der beiden Qualifikationsmuster auf dem Fatigue- und Funktionsprüfstand benötigt. Des Weiteren erfordert die effektive, aber auch komplexe mechanische Mimik des Prüfstandes mit den in Wechselwirkung stehenden Regelkreisen für die Blattlasten (External Load F_4) und die Position der beiden EMAs eine validierte und erprobte Konfiguration der für die Positionsregelung des einzelnen EMA implementierten kaskadierten Regelschleifen.

Die bei der Inbetriebnahme der APCU aufgetretenen Probleme im Zusammenhang mit der Ansteuerung der Leistungselektronik und damit der EMAs (vgl. Abschnitte 6.3.4 und 6.6.3) beeinflussten die Erprobung am Fatigue- und Funktionsprüfstand nachhaltig. So konnte erst zum



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Ende des Vorhabens der Prüfstand in Betrieb genommen und die prinzipielle Funktionsweise demonstriert werden (Proof-of-Concept), s. dazu im Folgenden Abbildung 6-38 bis Abbildung 6-42 aus der Inbetriebnahme des Fatigue- und Funktionsprüfstands. Für den Nachweis der Funktionsweise wurden dabei die folgenden Messwerte herangezogen:

- F_Hyd: Kraftmessung am Hydraulikzylinder F_3
- F_Stange: Kraftmessung an der Koppelstange F_4 (Regelgröße)
- F_Soll: Sollwertvorgabe für die Regelgröße (F_4)
- Pos_Hyd: Positionsmessung am Hydraulikzylinder
- THETA: Positionsmessung am EMA (Test Specimen 1 und 2)
- TORQUE: Momentenmessung am EMA (Test Specimen 1 und 2).

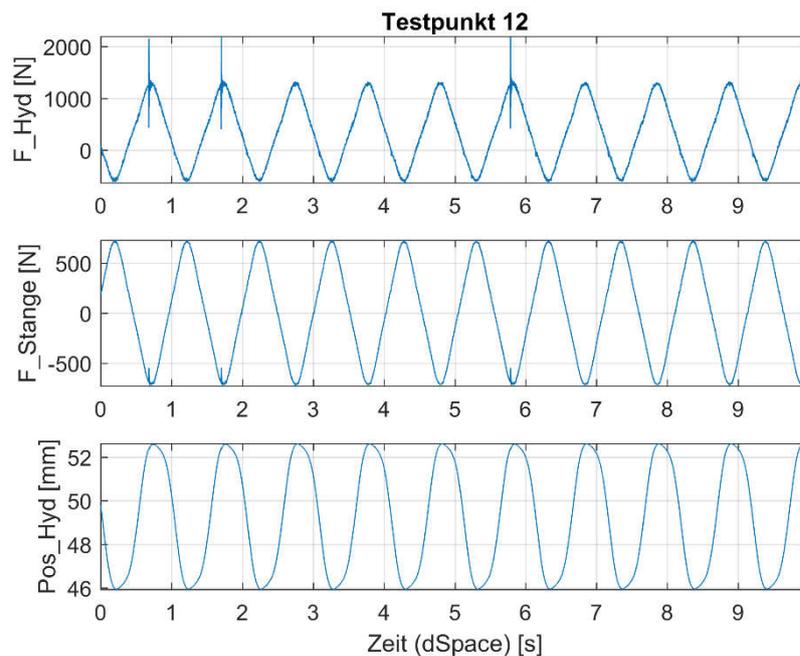


Abbildung 6-38: Zeitverläufe für Kräfte und Position



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelnsteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

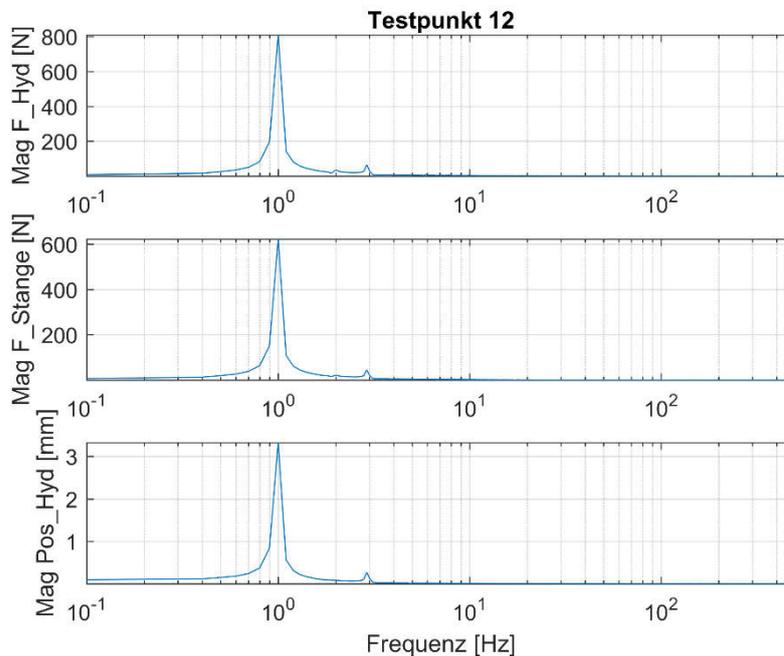


Abbildung 6-39: Amplitudenspektrum für Kräfte und Position

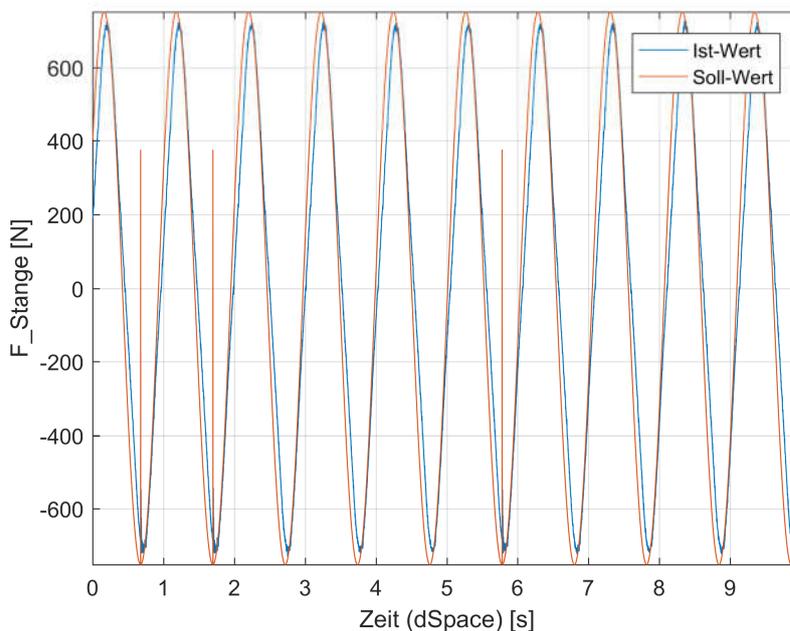


Abbildung 6-40: Zeitverläufe der Soll-/Regelgröße



LIBRAS-2 Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2) Schlussbericht

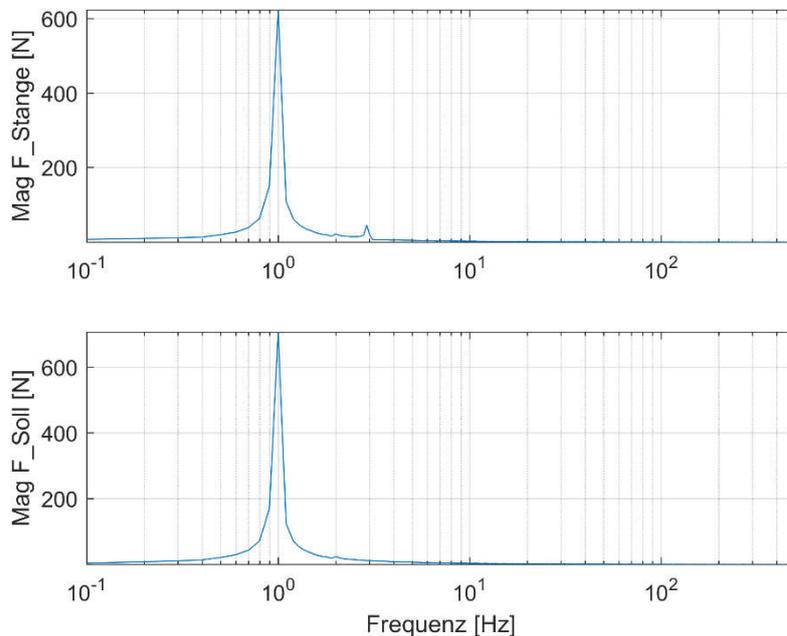


Abbildung 6-41: Amplitudenspektrum der Soll-/Regelgröße

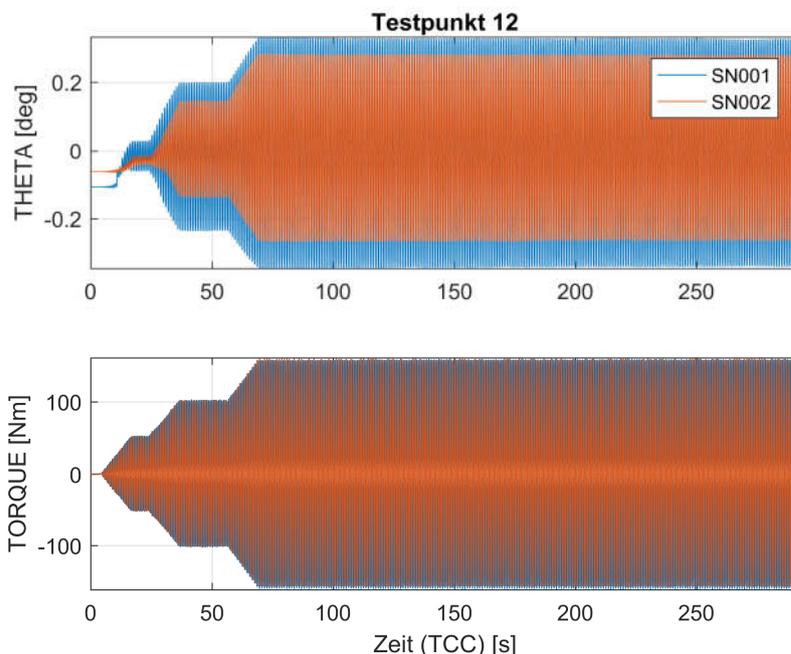


Abbildung 6-42: Zeitverläufe der positionsgeregelten Test Specimen –
Position und Lasten

Für die angedachte Erprobung der EMA Qualifikationsmuster in vollem Umfang ist die erreichte Leistungsfähigkeit der APCU nicht ausreichend



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



bzw. konnte während der Laufzeit des Vorhabens nicht zuverlässig erzielt werden (vgl. Abschnitt 6.6.3). Aus diesen Gründen musste auf die Durchführung eines vollständigen Performance Tests verzichtet werden. Die Leistungsfähigkeit des EMAs wird aber im Wesentlichen von der elektrischen Maschine bestimmt. Somit lassen die Ergebnisse des Performance Tests für die E-Maschine hinreichende Rückschlüsse auf den EMA zu. Ergänzend dazu erlauben die Messdaten und Ergebnisse aus der Inbetriebnahme der APCU (in den verschiedenen Versuchsaufbauten und einschließlich der Systemerprobung am SIL) eine zusätzliche qualitative Beurteilung.

Auch die Durchführung des Fatigue-Versuchs war von den Problemen bezüglich der Verfügbarkeit einer funktionstüchtigen APCU betroffen. Im Verlauf wurden die Vorhabensziele aufgrund des Fortschrittsgrades in Abstimmung mit dem Projektträger und mit SAC aktualisiert (vgl. Abschnitt 3). Mit dem Entfall der im AP 700 ursprünglich geplanten Windkanalerprobung hatte der Fatigue-Versuch an Relevanz für die unmittelbare Erreichung des neuen Vorhabensziels verloren. Nach interner Prüfung und in Abstimmung mit SAC wurde festgelegt, dass für den Betrieb des LIBRAS-Systems auf dem Systemprüfstand bei ZFL und auf dem SIL bei SAC der Abschluss des Fatigue-Versuchs, zumindest für den in der Laufzeit des Vorhabens und aufgrund des von der APCU Problematik abhängigen realisierbaren Versuchsumfangs, nicht notwendig ist.

6.2.5 AP 298 Fertigung Erprobungsmuster (Windkanalmuster)

Die Fertigung der für den Einsatz im Windkanal vorgesehenen Erprobungsmuster (gemäß ursprünglicher Planung nach Abschluss der Arbeiten im AP 296) war Gegenstand der Arbeiten im AP 298.

Im Verlauf des Vorhabens wurde bereits die Beschaffung für die Erprobungsmuster parallel zu der Beschaffung für die Qualifikationsmuster (s. Abschnitt 6.2.2) eingeleitet.

Rotor und Motorgehäuse wurden zunächst nur für die beiden Qualifikationsmuster gefertigt. Nach dem erfolgreichen Abschluss der ATP und des Performance Tests mit dem Qualifikationsmuster der E-Maschine (vgl. Abschnitt 6.2.4) erfolgte dann auch die Fertigung von Rotoren und Motorgehäusen für die Erprobungsmuster.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Parallel zur der Fertigung der Qualifikationsmuster wurden Abnahmetestprogramme (Acceptance Test Procedure) für den E-Motor und den EMA erstellt. Deren Durchführung war Bestandteil der Arbeits- und Prüfpläne für den EMA, um die Funktionstüchtigkeit der Erprobungs- und Qualifikationsmuster nach erfolgter Montage zu überprüfen und zu dokumentieren.

Nach Montage der Erprobungsmuster zeigten die durchgeführten Messungen der Momentenkonstante im Rahmen der ATPs der E-Maschine über alle Muster eine gute Konsistenz. Die in der ATP ermittelten Werte sind dabei von vergleichbarer Größenordnung wie bei dem im Performance Test eingesetzten Qualifikationsmuster. Nach Abschluss der ATPs für die E-Maschine erfolgte dann die Komplettmontage der EMA Erprobungsmuster (s. Abbildung 6-43 und Abbildung 6-44) für die drei geplanten LIBRAS-Systeme (ZFL Systemprüfstand, SIL Prüfstand bei SAC und Windkanal). Insgesamt wurden 15 EMA mit dem Konstruktionsstand des Erprobungsmusters gefertigt, von denen 2 EMA im Zuge der Inbetriebnahme der APCU zum Einsatz kamen.



Abbildung 6-43: Vollständig montiertes EMA Erprobungsmuster
in der dazugehörigen Transportvorrichtung



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Abbildung 6-44: Fertig montierte Erprobungsmuster

Für diese beiden EMAs sowie für die insgesamt fünf EMAs, die von ZFL für das am SIL eingesetzte LIBRAS-System in die USA zu SAC versendet wurden (vgl. Abschnitt 6.6.4) wurden Fertigung und Montage der EMA Erprobungsmuster mit der Kalibrierung der internen Sensoren, sowie der Durchführung der ATP abgeschlossen. Bei der Kalibrierung als auch der daran anschließenden ATP wurde die im Vorhaben konstruierte und gefertigte Vorrichtung (s. Abbildung 6-45) eingesetzt.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

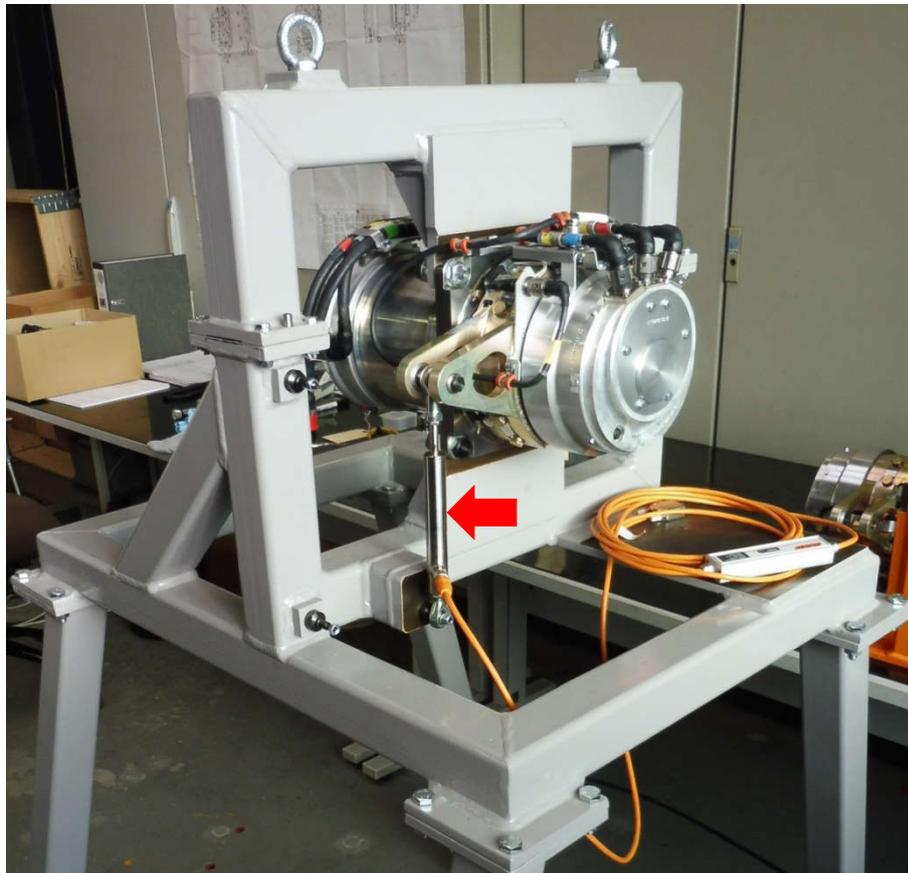


Abbildung 6-45: EMA Erprobungsmuster in der Vorrichtung für die Kalibrierung der Positionssensoren der Sensoreinheit mittels eines Referenzsensors (roter Pfeil).

6.3 AP 300 Leistungselektronik

Die Arbeiten zur Leistungselektronik und dem Zwischenkreis wurden im Arbeitspaket AP 300 gebündelt, um eine Leistungselektronik zu entwickeln, die den Ansprüchen einer Integration in den Versuchsrotor genügt. Während die Auslegung der Komponenten der Leistungselektronik, PSU und PCUC, durch das Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Integration (IZM) erfolgte, bearbeitete die ZFL alle Integrations- und Anbindungsfragen im Zusammenhang mit der Installation aller Systemkomponenten auf dem Rotorkopf des Technologiedemonstrators X2. Die Bearbeitung dieser Fragen führte letztendlich zu der hochintegrierten Lösung der APCU, die neben den beiden Komponenten der Leistungselektronik im finalen Design auch die ACU (vgl. Abschnitt 6.4) für die Ansteuerung beinhaltet. Das Design und die Fertigung der APCU werden in den relevanten Unterarbeitspaketen des AP 300 beschrieben.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalprüfung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelssteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



6.3.1 AP 350 Redesign A- zu B-Muster

Das A-Muster-Design wurde bereits innerhalb des Vorhabens LIBRAS (1) entwickelt und teil-erprobt. In dem Arbeitspaket AP 350 wurde dann in LIBRAS-2 die Erprobung zunächst fortgeführt und dann das Design auf Basis der erlangten Erkenntnisse mit dem A-Muster Design entsprechend den Anforderungen der Windkanalversuchsanlage entsprechend modifiziert und in ein B-Muster-Design überführt.

Nach Aufbau und Inbetriebnahme der Prüfumgebung (s. Abbildung 6-46 und Abbildung 6-47) durch das Fraunhofer IZM und der Inbetriebnahme begann die Fortsetzung der Erprobung der aus LIBRAS (1) vorhandenen Funktionsmuster von PCU und PSU.

Die Inbetriebnahme und Erprobung der PSU ergab keine zwingenden Gründe für eine grundlegende Änderung des Schaltungsdesigns. Somit lag der Schwerpunkt des Redesigns auf der Anpassung des Platinen-Designs an die Vorgaben, die sich aus der Integration der PSU in der APCU ergaben (s. folgender Abschnitt) und auf dem Austausch der im Funktionsmuster eingesetzten Industrieteile gegen Bauteile höherer Qualitätsklassen (z.B. bzgl. der zu erfüllenden Umweltbedingungen).

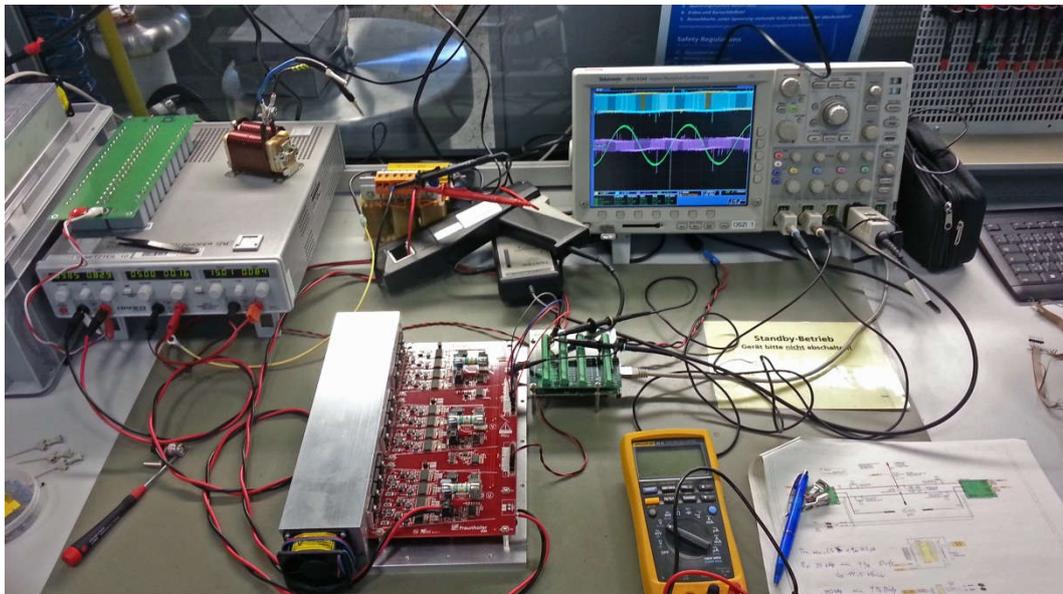


Abbildung 6-46: Laborversuchsaufbau am Fraunhofer IZM zur Inbetriebnahme und Erprobung mit dem Funktionsmuster PCUC



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

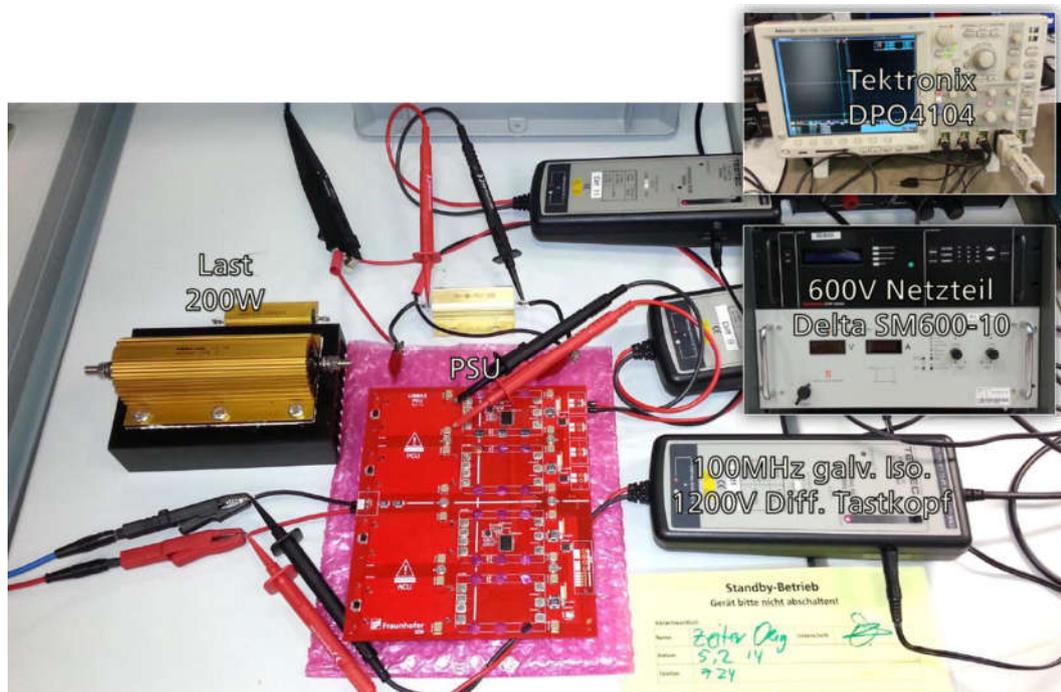


Abbildung 6-47: Laborversuchsaufbau am Fraunhofer IZM zur Inbetriebnahme und Erprobung mit dem Funktionsmuster PSU

Basierend auf Input aus dem *Safety Assessment* und der Funktionsentwicklung ergaben sich zwingend notwendige Anpassungen am Schaltplan der PCUC. Zur Erhöhung der Betriebssicherheit wurde eine zusätzliche und unabhängige analoge hardwarenahe Überstromüberwachung auf der PCUC ergänzt, zusätzlich zur Erkennung über die an die ACU angebundene Sensorik und die Fehlerbehandlung per Applikationssoftware. Damit können z.B. Überströme, erzeugt durch eine fehlerhafte Strommessung auf der ACU oder durch sonstige ACU-Fehler, erkannt und entsprechende Fehlerbehandlungsmaßnahmen umgesetzt werden.

Die zweite Änderung betraf die Anpassung der bisherigen im Funktionsmuster verwendeten Bootstrapschaltung für die Energieversorgung der Treiberbausteine der PCUC. Hier wurde zur Erhöhung der Betriebssicherheit die einfachere Variante verworfen und auf eine zuverlässigere und sichere Lösung aufbauend aus der im Vorhaben ELBA erprobten Schaltungsvariante zurückgegriffen.

Die beschriebenen Anpassungen am Schaltungskonzept erhöhten zunächst einmal den Platzbedarf für die PCUC innerhalb der ACPU. Im Designprozess und in enger Abstimmung zwischen dem Fraunhofer IZM



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



und der ZFL gelang es aber, ein geeignetes Konzept für das Packaging unter Einhaltung der mit SAC abgestimmten Randbedingungen zu entwickeln. Im Anschluss daran konnten am Fraunhofer IZM auch die Versuche mit dem Funktionsmuster der *Power Control Unit Converter* (PCUC) erfolgreich abgeschlossen werden.

Ein wichtiger Schritt im Entwicklungsprozess von PSU und PCUC war der erste Integrationstest mit der *Actuator Control Unit* (ACU), im AP 400 entwickelt von embeX. Abbildung 6-48 zeigt den am Fraunhofer IZM hierzu aufgebauten Versuchsaufbau, in dem die Funktionsmuster von PSU, PCUC und ACU miteinander verkabelt und betrieben wurden. Die Versuche verliefen positiv und haben im Gegensatz zu der späteren Inbetriebnahme der APCU bei ZFL keine technischen Probleme aufgeworfen.

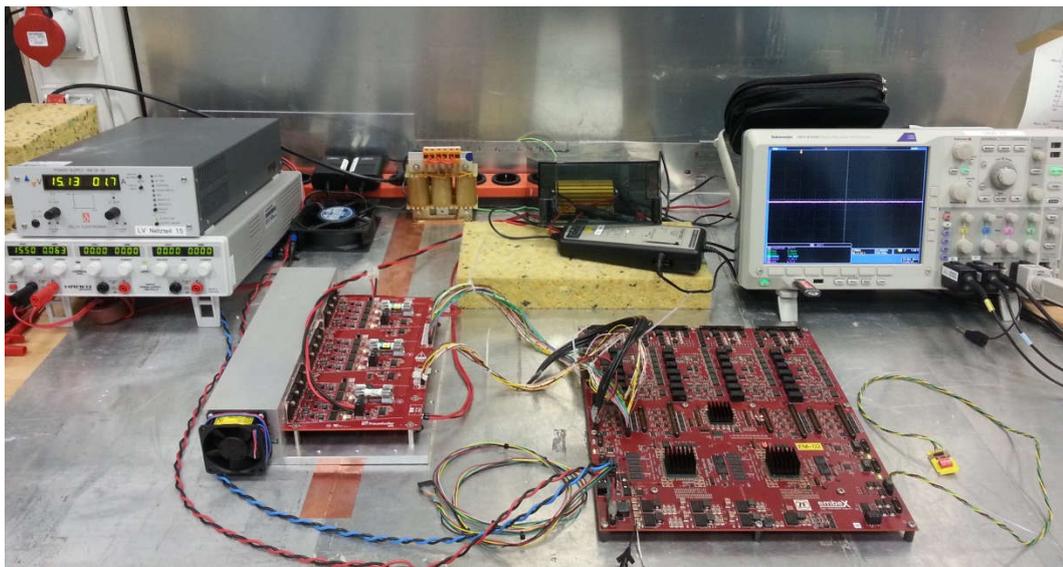


Abbildung 6-48: Funktionsmusterintegration (hier: ACU und PCUC)

Mittels einer Thermo-Kamera wurden die Hotspots von ACU und PCUC in verschiedenen Betriebszuständen an einer externen elektrischen Last identifiziert. Abbildung 6-49 lässt erkennen, dass erwartungsgemäß auf der PCUC die Leistungshalbleiter und auf der ACU die Prozessoren thermisch hervortreten.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelnsteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

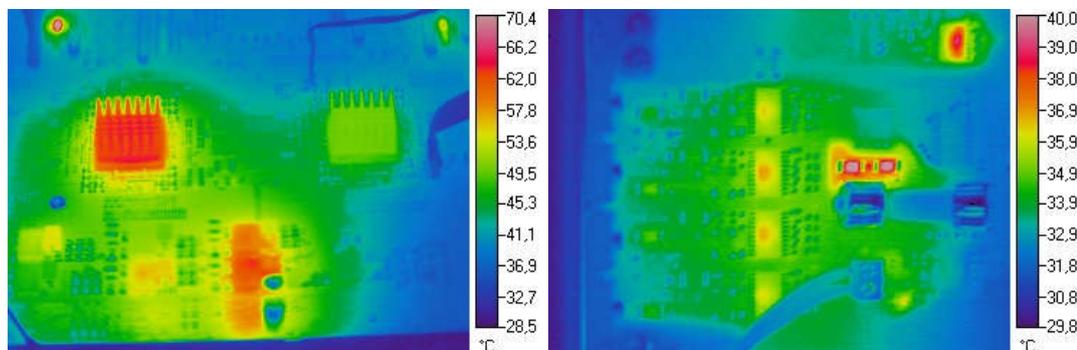


Abbildung 6-49: Temperaturverteilung auf ACU und PCUC im Betrieb

Bei der mechanischen Integration aller Komponenten im APCU-Gehäuse war die Festlegung der Verbindungstechnik innerhalb der APCU ein wesentlicher Punkt. Die Auswahl geeigneter Steckverbinder erwies sich dabei aufgrund des eingeschränkten Bauraumes und der vorgegebenen Bauform des APCU-Gehäuses als besonders schwierig. So galt es, Kollisionen mit anderen Komponenten innerhalb der hochintegrierten APCU zu vermeiden. Auch die Montierbarkeit der einzelnen Komponenten und die Zugänglichkeit bei einem Komponentenaustausch im Schadensfall stellten sich als Herausforderung dar, da der Zugang zu den Komponenten aufgrund des Designs der APCU nur über die Unterseite des APCU-Gehäuses erfolgen konnte. Es zeigte sich, dass dies aus den genannten Gründen nicht über eine konventionelle Stecker-Kabel Verbindung möglich sein würde. Stattdessen wurde eine zuverlässige Lösung mittels Starr-Flex Platinen entworfen, die speziell für APCU gefertigt wurden.

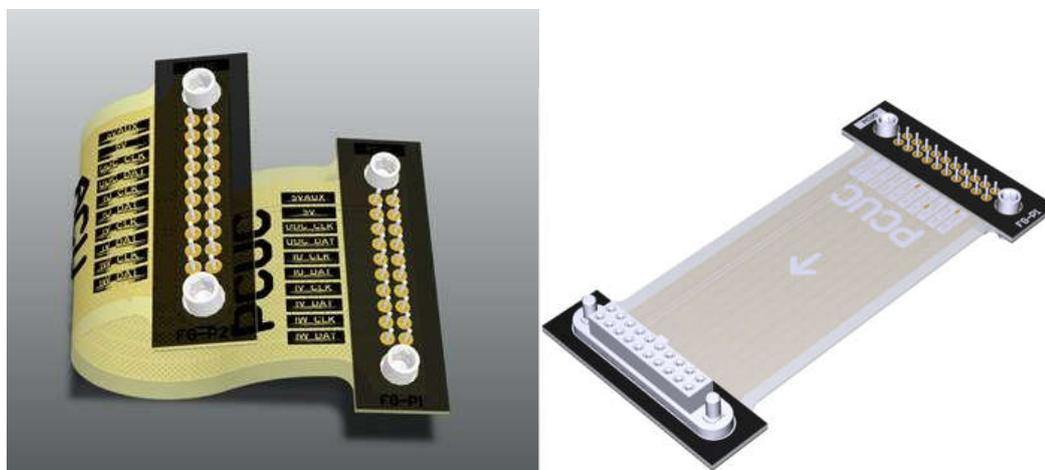


Abbildung 6-50: CAD-Modell mit PIN-Belegung für die Starr-Flex Platine für die Messsignale



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalproben einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelnsteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Aufgrund der Anforderungen an eine hochintegrierte Lösung für die Unterbringung der zur Ansteuerung der Aktuatoren erforderlichen Systemkomponenten (Steuer- und Leistungselektronik) wurden thermische Simulationsrechnungen während der Arbeiten im AP 350 durchgeführt. Die folgende Abbildung 6-51 zeigt beispielhaft für zwei verschiedene Betriebszustände die Wärmeverteilung innerhalb der APCU.

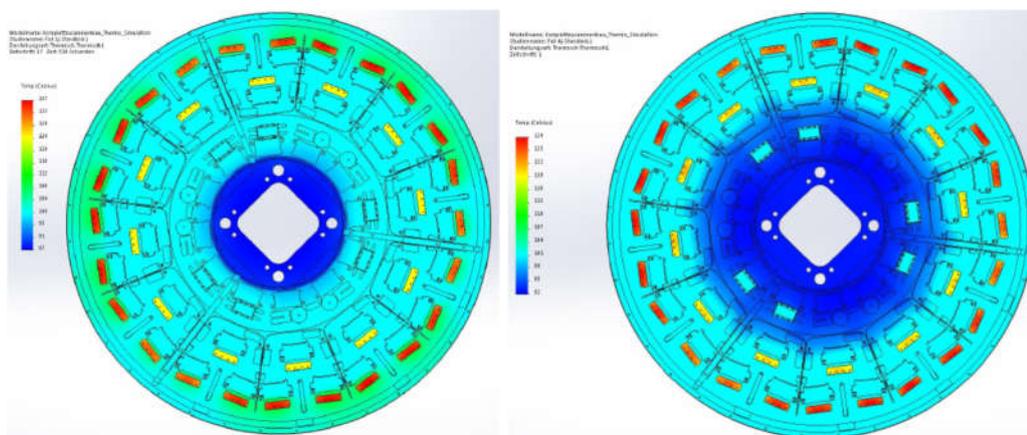


Abbildung 6-51: Ergebnisse der thermischen Simulationsrechnung für zwei verschiedene Betriebszustände

Anhand der thermischen Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass die APCU bei drehendem Rotor (im nominellen Betriebsbereich von 360rpm – 442rpm) und/oder einer Anströmung entsprechend der Vorwärtsgeschwindigkeit die spezifizizierte Performance unter den thermischen Bedingungen zur Verfügung stellen kann. Den für den Betrieb der APCU limitierenden Faktor bilden die DC/DC-Wandler der PSU, da diese bereits ab 100°C Base-Temperatur degradieren, was aber nur bei der maximal angenommenen Umgebungstemperatur von 50°C und konservativ angewandter Sicherheitsfaktoren auftritt. Für den Betrieb bei nicht-drehendem Rotor gilt also die Einschränkung, dass die APCU ohne eine gesonderte Kühlung bei maximaler Leistung nicht dauerhaft betrieben werden kann. Entsprechend wurden im Design der APCU Temperatursensoren vorgesehen, die eine Überwachung mittels des TCC während der Erprobung ermöglichen.

Für PSU und PCUC wurden kombinierte *Preliminary/Critical Design Reviews* durchgeführt und die daraus entstandenen Action Sheets bearbeitet.



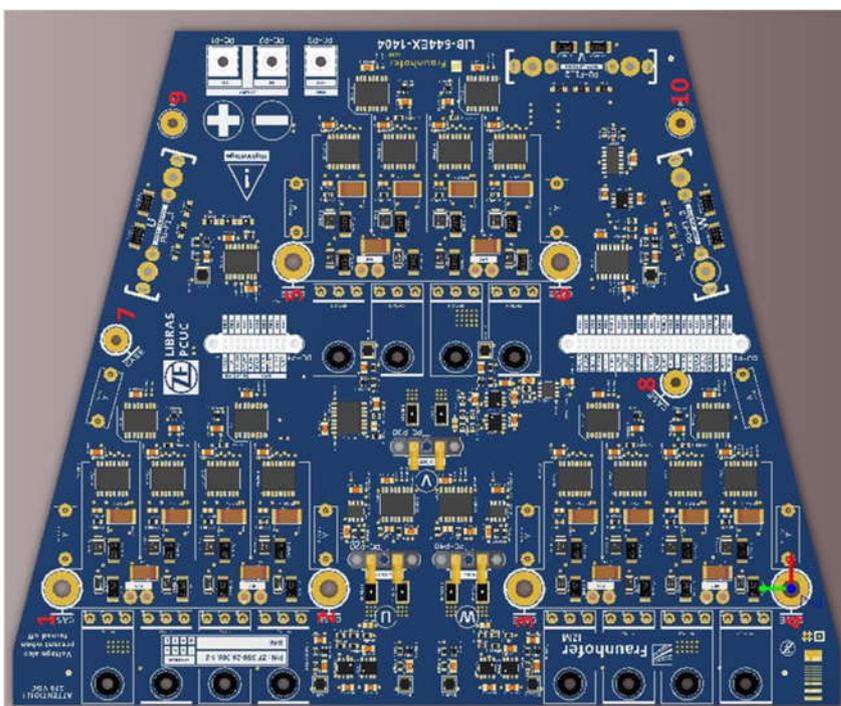
LIBRAS-2 Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2) Schlussbericht



Nach Bearbeitung der erstellten *Action Sheets* erfolgte die Finalisierung des Layouts und des mechanischen Aufbaus für PCUC und PSU (s. Abbildung 6-52, Abbildung 6-53). Auch die Layer Stacks der Platinen wurden mit dem ausgewählten Fertiger abgestimmt.



Abbildung 6-52: CAD-Modell der bestückten PSU (die Ziffern bezeichnen die Befestigungspunkte für die Fixierung am Gehäuse der APCU)





LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Abbildung 6-53: CAD-Modell der bestückten PCUC (die Ziffern bezeichnen die Befestigungspunkte für die Fixierung am Gehäuse der APCU)

Für die spätere Fertigung der PSU und der PCUC wurden parallel zum Design der beiden Komponenten zusätzlich Löt- und Montagevorrichtungen wegen der komplexen Integrationsrandbedingungen konstruiert, z.B. um die Nicht-SMD-Bauteile wie die Leistungshalbleiter sehr genau auszurichten. Abbildung 6-54 zeigt die Vorrichtung für die Montage und Ausrichtung der Zwischenkreiskondensatoren und Leistungshalbleiter auf der Platine des PCUC. Die korrekte Montage dieser Komponenten ist Voraussetzung für die mechanische Absicherung der Kondensatoren gegen die wirkenden Fliehkräfte und die gute thermische Anbindung (Kühlung) der Leistungshalbleiter an das Gehäuse der APCU (vgl. Absatz zur thermischen Simulation).



Abbildung 6-54: Montagevorrichtung PCUC (links) und Verwendung für den Montageschritt der Ausrichtung und Fixierung der Zwischenkreis Kondensatoren („A“) auf der PCUC-Platine (rechts)

Die Gesamtintegration der APCU erforderte eine Montagevorrichtung, mit der sich aufgrund der hohen Komplexität der Gesamtintegration (Form und Struktur des Gehäuses) die PSUs, PCUCs und die ACU zusammen mit den Kabelführungen für Signale und Energie zur APCU montieren ließen.

Nach Abschluss des Layouts der ACU konnte auch das Design der APCU bzgl. der Integration der ACU inkl. Signalverteilung innerhalb des APCU-Gehäuses abgeschlossen werden, sodass sämtliche Bauteile des



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



APCU Gehäuses in den K30- Zeichnungsstand gebracht werden konnten. Damit waren die Voraussetzungen für den Übergang in die Fertigungsphase des ersten Qualifikationsmusters erfüllt.

Im Rahmen des System CDR ergaben sich auch bezüglich der APCU Action Sheets, die im Wesentlichen die (Betriebs-)Festigkeit betrafen. Die Überprüfung bestätigte, dass das APCU-Gehäuse ausreichend dimensioniert ist, um im eingebauten Zustand den aerodynamischen (Wind)Lasten und den (Zentrifugal)Lasten aus der Drehung des Hauptrotors zu widerstehen. Auch die im Design vorgesehene Fixierung von größeren Bauteilen auf der PSU und PCUC war für die untersuchten Lastfälle ausreichend dimensioniert.

Zum Abschluss des Redesigns wurde auch für die APCU eine Vorrichtung für den Transport und die Lagerung des konstruiert (siehe Abbildung 6-55).

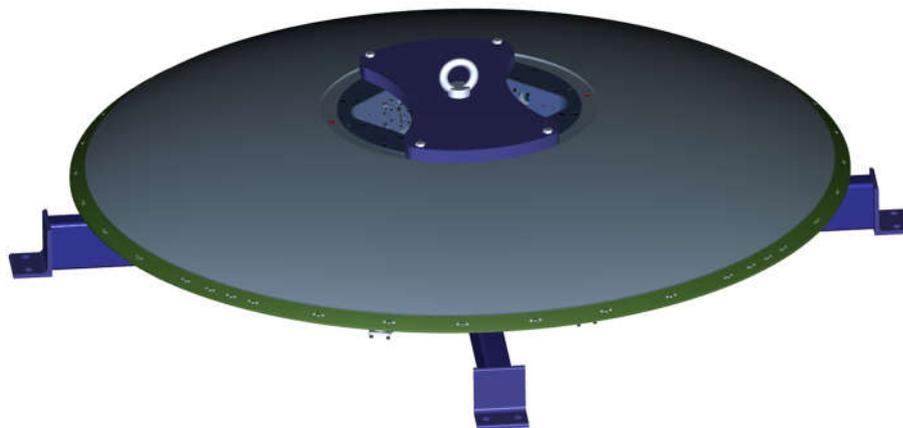


Abbildung 6-55: Transportvorrichtung aus Gestell X99-0029.980.30 und Hebegeschirr X99-0029.980.40 mit montierter APCU für die Verwendung bei Transport und Lagerung

6.3.2 AP 360 Fertigung Qualifikationsmuster (B-Muster)

Auf Grundlage des innerhalb des AP 350 entworfenen B-Musters der Leistungselektronik wurden in diesem Arbeitspaket die Qualifikationsmuster für die PSU und die PCUC gefertigt. Die gefertigten Qualifikationsmuster wurden dann anschließend im AP 370 im Rahmen der Qualifikationsversuche getestet.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalproben einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelssteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Auf Basis der aktualisierten Stücklisten für PSU und PCUC wurden verschiedene zertifizierte (EN9100) Fertiger bzgl. der Bauteilbeschaffung und Bestückung der Platinen angefragt, technische Rückfragen diskutiert und vorliegende Angebote nach den Kriterien Kosten, Termine und Fertigungskompetenz beurteilt. Zu einer teilweise deutlich längeren Lieferzeit haben Abkündigungen einzelner Bauteile und deutlich verlängerte Lieferzeiten von Custom-Made- oder nicht zeichnungskonformer Fertigung (Drosseln der PSU) geführt.

Für die Fertigung des ersten Loses (3 PCUC bzw. 1 PSU) der für Funktionsversuche vorgesehenen Qualifikationsmuster wurden Löt- und Montagevorrichtungen genutzt. In Abbildung 6-56 sind die integrierten „Ball Springs“ gut zu erkennen, die sicherstellen, dass die großen THT-Bauteile vor dem Lötprozess korrekt ausgerichtet sind. Dieses Ausrichten sollte sicherstellen, dass sich die Bauteile bei der späteren Montage im APCU-Gehäuse an die vorgesehenen Flächen anlegen und somit die hohen Fliehkräfte die Bauteillötverbindungen nicht zu stark belasten.

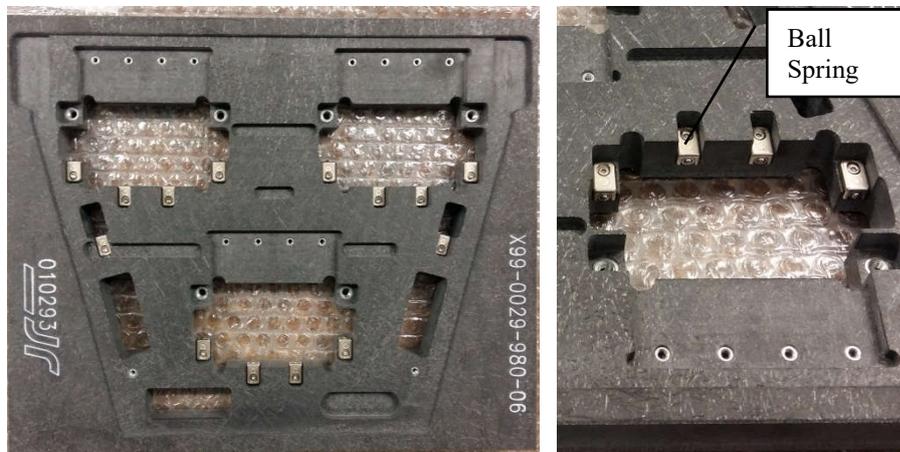


Abbildung 6-56: Montage-/Lötvorrichtung X99-0029.980.06 – PCUC

Verzögerungen bei Unterlieferanten gab es bedingt durch Abweichungen bzgl. spezifizierter mechanischer Toleranzen bei Montage- und Befestigungsbohrungen auf den Platinen von PSU und PCUC. Beispielhaft sind einige der betroffenen Bohrungen in der nachfolgenden Abbildung rot eingekreist.



LIBRAS-2

Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelnsteuerung (Phase 2)

Schlussbericht



Abbildung 6-57: Unbestückte PSU-Platine (Fertigungslos 2)

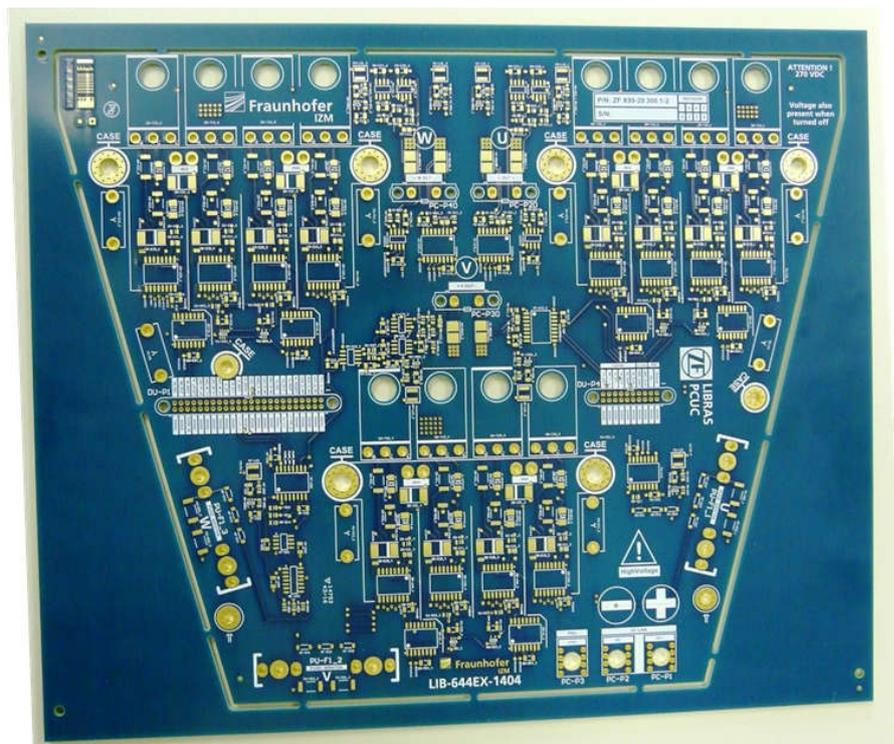


Abbildung 6-58: Unbestückte PCUC-Platine (Fertigungslos 2)

Eine erste Wiederholungsfertigung der Platinen in Eigenregie durch den Unterlieferanten führte leider nicht zur vollständigen Lösung des Problems. Erst aufgrund eines von ZFL vorgeschlagenen Verfahrens gelang es die von den anzuwendenden IPC Standards geforderten Toleranzen einzuhalten.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Problemlos verlief die Fertigung der Starr-Flex-Starr Platinen, die als Interface zwischen der PCUC und der ACU fungieren. In Abbildung 6-59 ist als Beispiel der Verbinder X99-0029.300.99-001 dargestellt. Dieser wird verwendet, um Sensorsignale (drei Phasenströme und die Zwischenkreisspannung) mit der ACU auszutauschen und um die 5VDC Versorgung für die PCUC bereitzustellen.

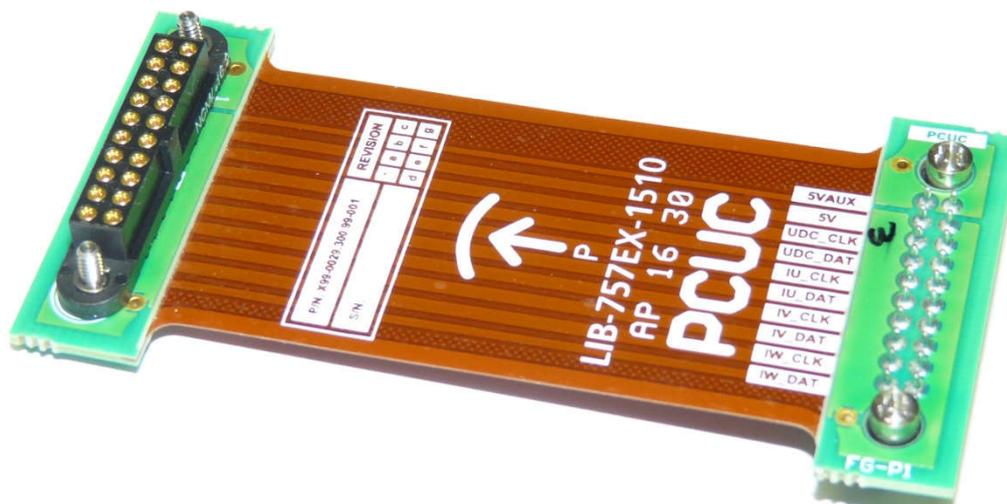


Abbildung 6-59: Starr-Flex-Platine X99-0029.300.99-001

Mit Zeichnungen im K20-Stand erfolgten Fertigungsanfragen für den APCU-Gehäuse-Grundkörper und den Kabelkanal PCU-EMA. Neben den großen Abmaßen (Durchmesser von ca. 1200 mm, siehe Abbildung 6-60) haben diese beiden Bauteile die Besonderheit, dass einige der Zeichnungsmerkmale US-Exportkontrollbeschränkungen unterliegen. Dies hat zur Folge, dass die Zeichnungen für die Anfragen bzgl. der betroffenen Merkmale bereinigt werden mussten. Fertigungstechnisch wurden die Bauteile extern soweit wie möglich vorgefertigt und hausintern dann nur noch die exportrechtlich beschränkten Merkmale nachgearbeitet.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-60: Auszug der Zeichnung des Bauteils APCU-Grundkörper X99-0029-300-01-01-001; Seite 1

Nachdem die (technischen) Probleme bei der Fertigung der unbestückten Leiterplatten gelöst waren, konnte die Fertigung für beide Baugruppen (PCUC und PSU) erfolgen, wobei der Fertiger jeweils einen NPI-Report (New Product Information) erstellte, der Fertigungsprozesse und Auffälligkeiten dokumentierte.

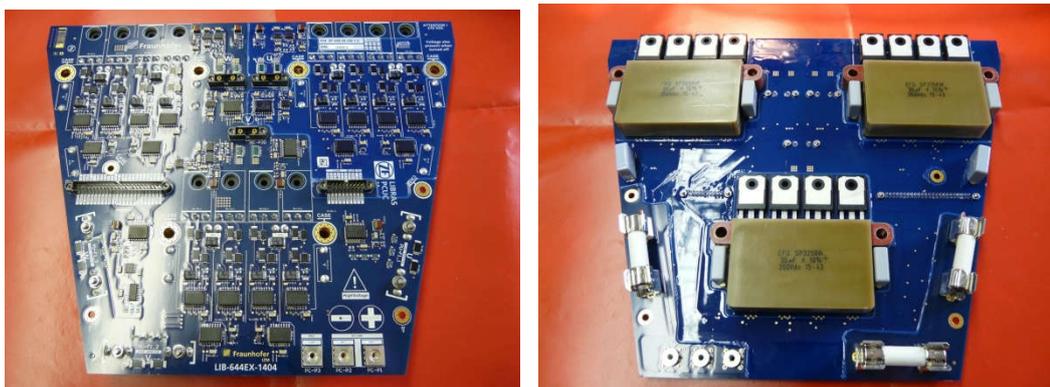


Abbildung 6-61: Qualifikationsmusters der PCUC

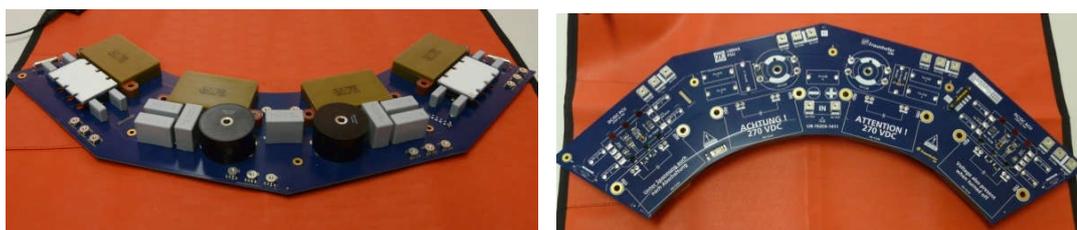


Abbildung 6-62: Qualifikationsmusters der PSU



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Die Ergebnisse der externen Fertigung des ersten Qualifikationsmusters für das APCU-Gehäuse zeigen Abbildung 6-63.



Abbildung 6-63: Bild aus der Fertigung des APCU-Gehäuse-Grundkörpers (Außen und Innen)

Nach Abschluss der externen Fertigung und Freigabe durch die Qualitätssicherung der ZFL erfolgte die interne Fertigung am APCU-Gehäuse-Grundkörper und am Kabelkanal PCU-EMA, bei der die den US-Exportkontrollbeschränkungen unterliegenden Zeichnungsmerkmale nachgearbeitet wurden.

Mit Verfügbarkeit der benötigten Bauteile wurden verschiedene mechanische Installationstests zur Absicherung der Fertigung der späteren Erprobungsmuster der APCU durchgeführt. So zeigt Abbildung 6-64 die Montage des Kabelkanals ACU-EMA. Sämtliche Installationstests verliefen erfolgreich und machten keine weitere Nachbearbeitung der komplexen mechanischen Komponenten notwendig.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

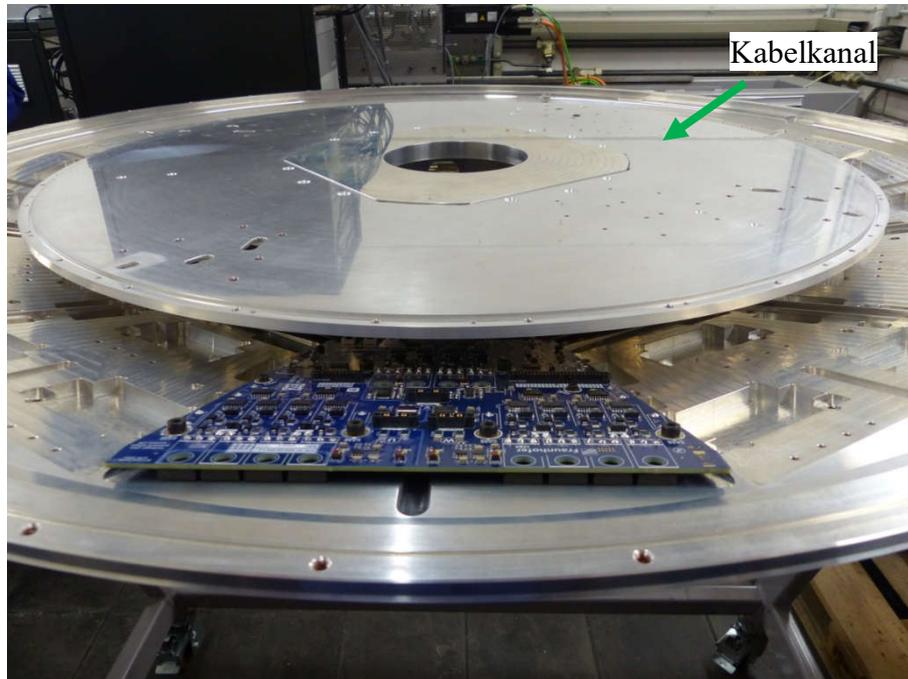


Abbildung 6-64: Installationstest von Kabelkanal ACU-EMA und APCU-Gehäuse Grundkörper

Mit Verfügbarkeit der ersten ACU Erprobungsmuster (vgl. Abschnitt 6.4.4) wurde die Integration der elektronischen Komponenten (PSU, PCUC und ACU) und der Aufbau der internen Verkabelung durchgeführt und somit der mechanische/elektrische Aufbau der ersten APCU abgeschlossen (s. Abbildung 6-65 und Abbildung 6-67).



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

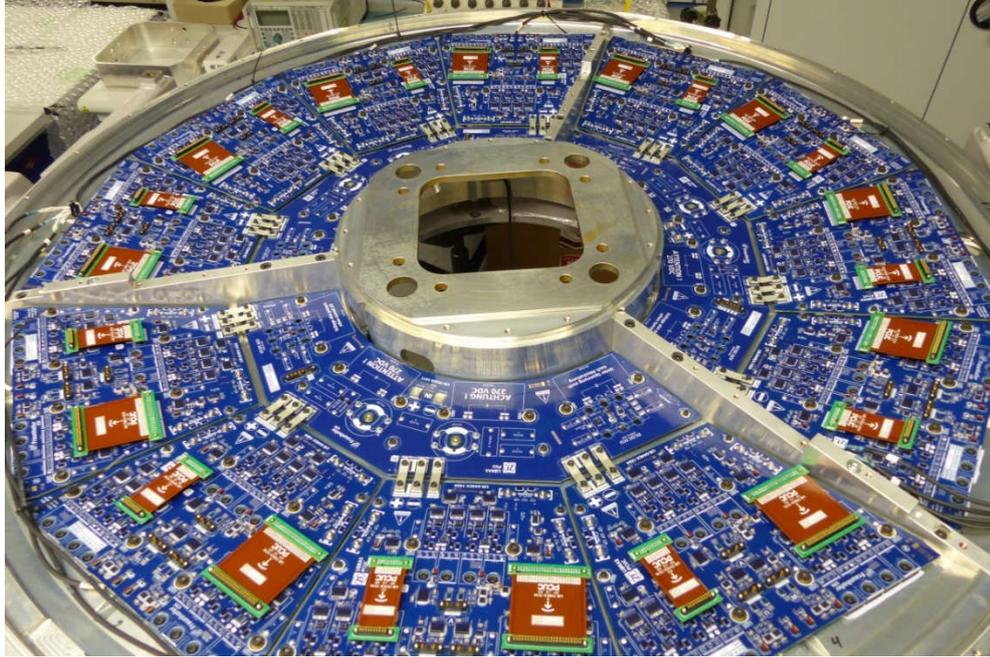


Abbildung 6-65: APCU Erstmontage – APCU Grundkörper nach Abschluss der Montage der PSUs und PCUCs

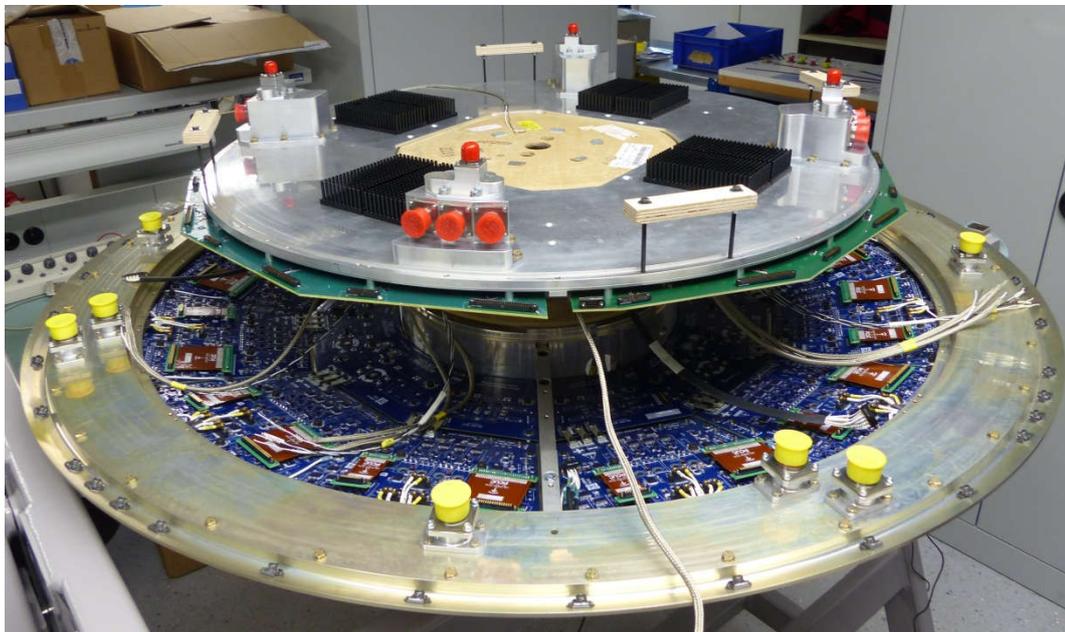


Abbildung 6-66: APCU Erstmontage – Aufbau der internen Verkabelung



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

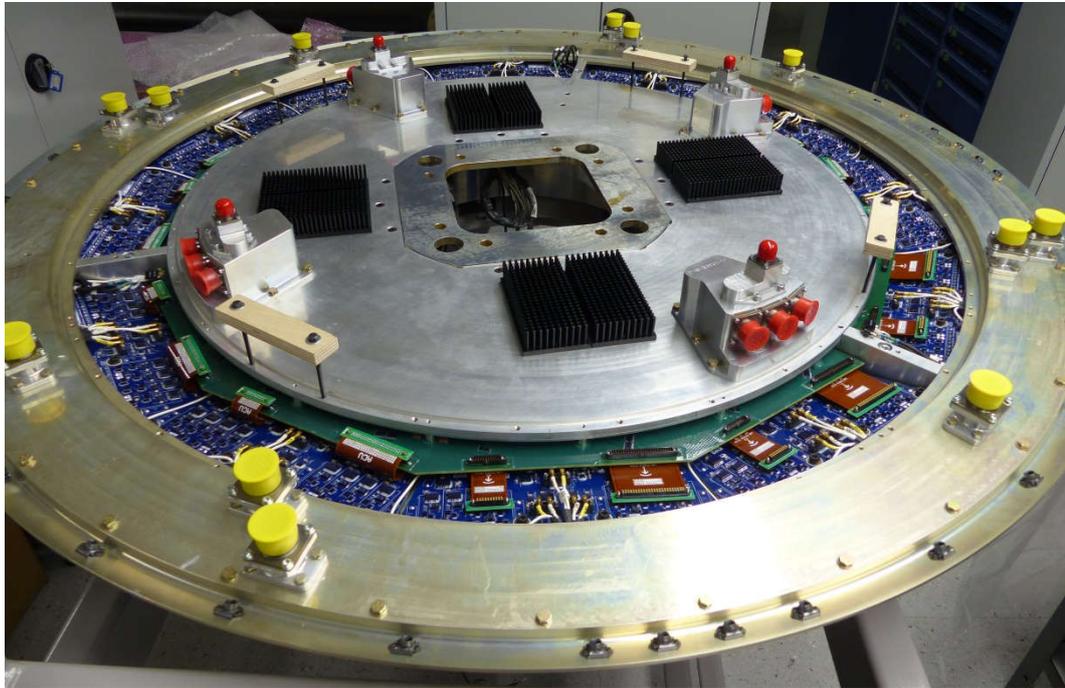


Abbildung 6-67: APCU Erstmontage – APCU Grundkörper nach
 Abschluss der Montage der ACUs, sowie der Signal- und
 Leistungsverteilung

Die Arbeiten zur Inbetriebnahme der ersten APCU sind inhaltlich sehr eng mit der Erprobung des Gesamtsystems im AP 630 verbunden. Die Dokumentation der Bearbeitung und die daraus resultierenden Ergebnisse sind im AP 630 enthalten. Das Arbeitspaket AP 360 wurde mit der Fertigung und Montage der ersten APCU als Qualifikationsmuster vollständig abgeschlossen.

6.3.3 AP 370 Qualifikationsversuche

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden mit der aus den Komponenten PSU und PCUC bestehenden Leistungselektronik anhand der zuvor erstellten Versuchsprogramme Qualifikationsversuche durchgeführt. Auf Grundlage der freigegebenen Testprogramme und mit Verfügbarkeit der Qualifikationsmuster von PSU und PCUC erfolgten die Versuche am IZM. Ein Beispiel für eine Test Konfiguration und den dazugehörigen Versuchsaufbau aus den Qualifikationsversuchen mit der PSU zeigen Abbildung 6-69 und Abbildung 6-69.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-68: Testkonfiguration für Power Supply Output Voltage Tests der PSU

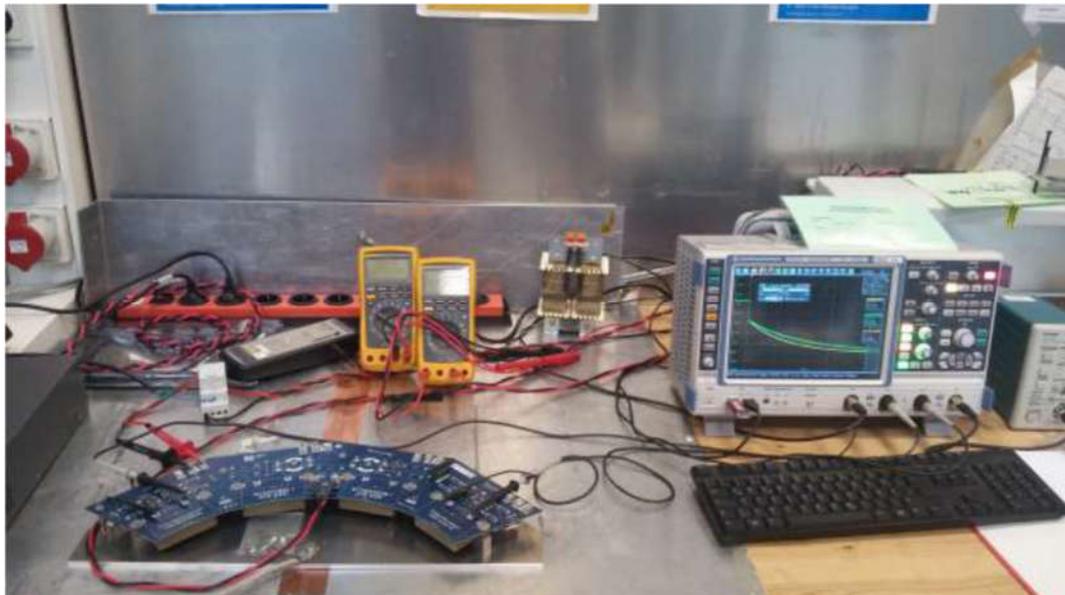


Abbildung 6-69: Versuchsaufbau für die Qualifikationsversuche mit der PSU am Fraunhofer IZM

Die Ergebnisse der Qualifikationsversuche wiesen keine wesentlichen Abweichungen gegenüber den spezifizierten Anforderungen auf. Damit bestand zunächst keine Notwendigkeit für ein Redesign. Das in den Qualifikationsversuchen erprobte Design der Qualifikationsmuster



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



wurde daher nach Review aller Daten und Ergebnisse für die Fertigung der Erprobungsmuster PSU im AP 380 übernommen.

Im Anschluss an die Qualifikationsversuche mit der PSU wurden die Qualifikationsversuche mit der PCUC durchgeführt. Auch diese Versuche erfolgten am Fraunhofer IZM. Ein Beispiel für eine Test Konfiguration und den dazugehörigen Versuchsaufbau aus den Qualifikationsversuchen mit der PCUC zeigen Abbildung 6-69 und Abbildung 6-71.

- **Abbildung für TIB-Version entfernt** -

Abbildung 6-70: PCUC power switch turn-off – power supply points and test points



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

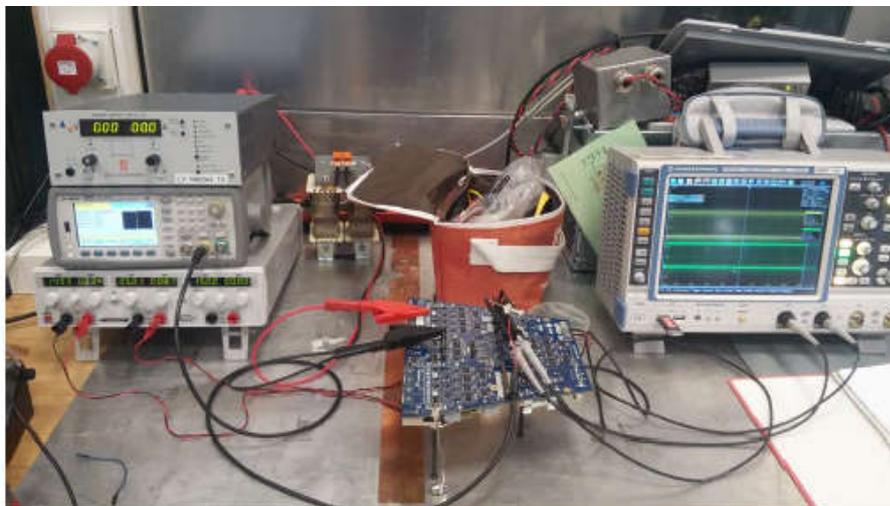


Abbildung 6-71: Versuchsaufbau für die Qualifikationsversuche mit der PCUC am Fraunhofer IZM

Aufgrund der Ergebnisse aus den Qualifikationsversuchen erfolgten Änderungen an der Bestückung der PCUC. Es wurden dabei zusätzliche Kondensatoren für die Überstromerkennung und für die Statuserkennung (durch die ACU) der eingebauten Sicherungen auf der PCUC ergänzt (siehe Abbildung 6-72).

- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-72: Modifikationen (roter Pfeil) an der Bestückung der PCUC als Ergebnis der Qualifikationsversuche

Zusätzlich wurde am Fraunhofer IZM ein Installationsversuch mit Beteiligung von embeX und ZFL durchgeführt, bei dem erstmalig die Qualifikationsmuster der PSU und PCUC zusammen mit dem Qualifikationsmuster der ACU betrieben wurden (siehe dazu Abschnitt 6.4.5). Bei diesem Integrationstest wurde zudem der von ZFL im AP 480 entwickelte TCC mit der ACU verbunden, so dass wichtige zwischen ACU und PCUC verteilte Funktionen wie die Strom- und Spannungsmessung überwacht und Messdaten aufgezeichnet werden konnten.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Das in den Qualifikationsversuchen erprobte Design der Qualifikationsmuster wurde daher nach Review aller Daten und Ergebnisse für die Fertigung der Erprobungsmuster PCUC im AP 380 übernommen.

Die Fortsetzung der Erprobung der APCU war dann Bestandteil der Inbetriebnahme der APCU und der Systemerprobung im Arbeitspaket AP 600 (s. Abschnitt 6.6.3). Die Ergebnisse aus der Erprobung im AP 600 führten im weiteren Verlauf des Vorhabens zu notwendigen Änderungen an der Bestückung der PCUC, um die Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit der APCU zu verbessern.

In Abstimmung mit dem Fraunhofer IZM wurden Teile des Qualifikationsversuches der PCUC mit einem auf den neuen Bauzustand umgerüsteten Erprobungsmuster wiederholt, um die erfolgten Änderungen entsprechend nach zu qualifizieren. Nach Review aller Daten und Ergebnisse aus der Inbetriebnahme der APCU und dem Qualifikationsversuch wurde das geänderte Design für die Erprobungsmuster PCUC übernommen und die Umrüstung der bereits gefertigten Erprobungsmuster auf den neuen Bauzustand freigegeben.

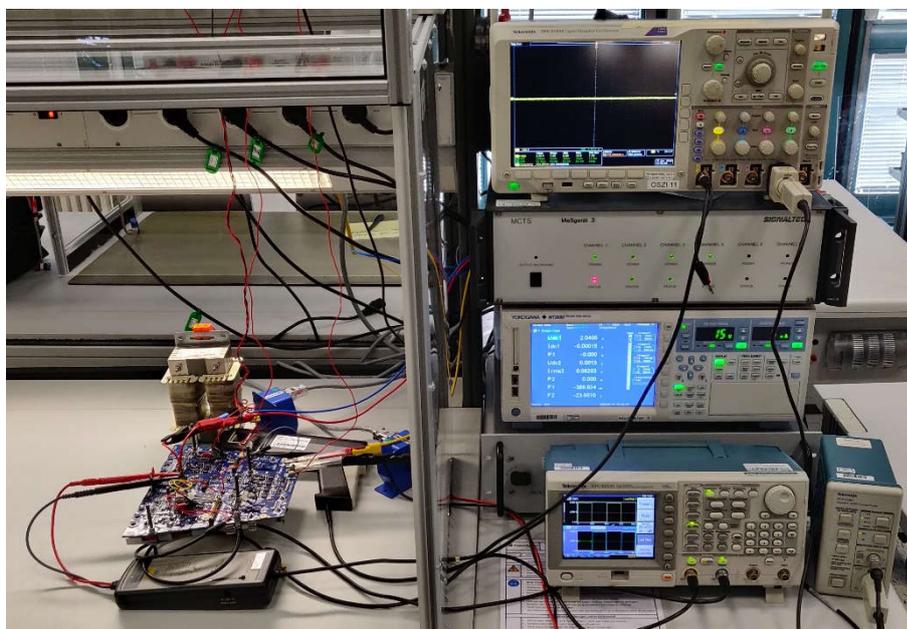


Abbildung 6-73: Versuchsaufbau für die (Nach-)Qualifikationsversuche mit der PCUC (aktualisierter Bauzustand) am Fraunhofer IZM



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



6.3.4 AP 380 Fertigung Erprobungsmuster (Windkanalmuster)

Mit dem Abschluss der Arbeiten im AP 370 wurde die Fertigung der ursprünglich für den Einsatz im Windkanal vorgesehenen Erprobungsmuster in diesem Arbeitspaket ermöglicht.

Nach einer Risikoabschätzung, Gesprächen mit den Lieferanten und in Abstimmung mit dem Fraunhofer IZM wurde seitens ZFL festgelegt, die elektronischen Bauteile für die Qualifikations- und Erprobungsmuster von PSU und die PCUC bereits zu einem frühen Zeitpunkt im Vorhaben in einer „Charge“ zu beschaffen. Das Risiko, dass nach Abschluss der Qualifikationsversuche im AP 370 größere Änderungen in den Stücklisten erfolgen würden, wurde im Vergleich zu den Kosten- und Terminrisiken zu dem damaligen Zeitpunkt als gering eingestuft.

Wie bereits weiter oben ausgeführt, wurden im Rahmen der Arbeiten im AP 630 die Ursachen für die bei der Inbetriebnahme der APCU aufgetretenen Probleme isoliert und verschiedene Lösungsansätze getestet (vgl. Abschnitt 6.6.3). Nach Finalisierung einer Umrüstungslösung (vgl. Abschnitt 6.3.3) wurden die bereits gefertigten PCUC Erprobungsträger bei ZFL anhand der aktualisierten Fertigungsunterlagen auf den neuen Bauzustand umgerüstet. Die umgerüsteten PCUCs wurden vor und nach der Montage in der zweiten APCU einem Funktionstest [109] unterzogen.

Im Rahmen des AP 380 wurden im Laufe des Vorhabens eine weitere APCU als Erprobungsmuster vollständig aufgebaut und im AP 600 in Betrieb genommen. Die erste als Qualifikationsmuster im AP 360 (vgl. Abschnitt 6.3.2) fertiggestellte APCU wurde für die Erprobung am SIL an SAC versandt, nachdem die Inbetriebnahmeversuche bei ZFL mit diesem Muster hinreichend abgeschlossen waren (s. Abschnitt 6.6.3).

Nach dem Versand der ersten APCU wurde das zweite APCU Erprobungsmuster für die Fortsetzung der Erprobung bei ZFL im weiteren Verlauf in verschiedenen Testkonfigurationen verwendet. Die Montage einer dritten APCU, die als Erprobungsmuster für die ursprüngliche geplante Erprobung im Windkanal vorgesehen war, wurde innerhalb der Laufzeit des Vorhabens aufgrund der geänderten Vorhabensziele (vgl. Abschnitt 3) nach der Teilmontage der beiden großen Baugruppen Signalverteilung und Leistungsverteilung abgebrochen. Weiterführende Erläuterungen zu dieser Entscheidung und der Nutzung der dritten APCU



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



nach Abschluss des Vorhabens finden sich im Erfolgskontrollbericht zu diesem Abschlussbericht.

- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-74: PCUC nach Umbau auf den aktualisierten Bauzustand

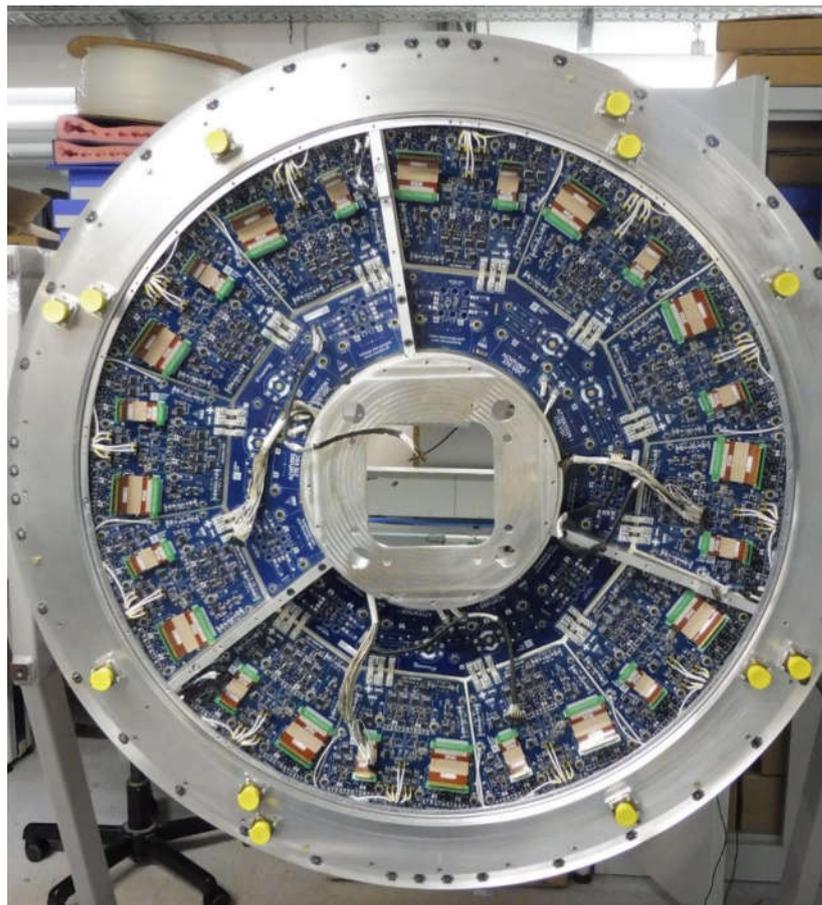


Abbildung 6-75: APCU mit montierter Signalverteilung
(PCUC mit aktualisiertem Bauzustand)



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



6.4 AP 400 Ansteuerung

Ansteuerungssoftware und -hardware aller betroffenen Systemkomponenten sind in der *Actuator Control Unit* (ACU) zusammengefasst. Während die Entwicklungs- und Designarbeiten hierzu im AP 400 durchgeführt wurden, erfolgte die Systemintegration der ACU Hardware in der APCU im AP 300, wie bereits zuvor ausgeführt (vgl. Abschnitt 6.3.1).

6.4.1 AP 470 Entwicklung DO-178 Software

Ausgehend von der hohen generellen Forderung nach DO-178 DAL A für sicherheitsrelevante Softwarekomponenten, wird im AP 470 die für die Ansteuerung der LIBRAS-Aktuatorik erforderliche Software speziell konzipiert und entwickelt. Hierbei führte ZFL zusammen mit embeX die in LIBRAS (1) begonnenen Aktivitäten weiter.

Die Entwicklung der Software der ACU erfolgte nach angepassten DO-178B Vorgaben, um später eine sichere Erprobung im Windkanal zu gewährleisten. Diese Anpassung der in der DO-178 definierten Schritte für die Softwareentwicklung sind im *Development Plan* [148] und im *Verification Plan* [160] dokumentiert. Unter Anwendung dieser beiden Pläne wurde eine Software-Architektur aufgestellt und die Software-Design Description erstellt.

Im Anschluss daran wurde im Entwicklungsprozess das im *Development Plan* vorgesehene Software Review unter Beteiligung der ZFL durchgeführt. Im Zuge der weiteren Softwareentwicklung fand ein kombiniertes PDR/CDR-Review statt, in dessen Rahmen das Design von SW- und FPGA-Anteilen der ACU anhand der projekt- und ACU-spezifischen Review-Checklisten geprüft und so die Vollständigkeit und Konformität zu den festgelegten Prozessen und die Erfüllung der spezifizierten Funktion (anhand der wichtigsten Funktionselemente) verifiziert wurde (s. dazu Abbildung 6-76).



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Development Plan and Verification Plan Review Checklist				Project	LIBRAS-2	
Item under Review	ACU (S/W, FPGA)				Date:	Input
#	Document/ Point to be assessed	Point discussed	Accepted	Action Sheet Identify No.		
Software Design						
7	Design	High Level Requirements	Stable	Y/N/N-A	Y/N	
8	Entrance	Development Plan	configured	Y/N/N-A	Y/N	
9	Criteria	Software Design Standard	configured	Y/N/N-A	Y/N	
10		Requirements Standard	configured	Y/N/N-A	Y/N	
11	Design Process	Software Architecture and Low Level Requirements are developed	[DO-178B] 5.2.1a	Y/N/N-A	Y/N	
12	Objectives	Derived Low Level Requirements are defined and justified	[DO-178B] 5.2.1b	Y/N/N-A	Y/N	
13		Software Architecture is verified via an independent Review	[DO-178B] 6.3.3a-d	Y/N/N-A	Y/N	
14		Software Design is verified via an independent Review	[DO-178B] 6.3.2a,f,g	Y/N/N-A	Y/N	
15	Verification	High Level Requirement	approved	Y/N/N-A	Y/N	
16	Entrance	Development Plan	approved	Y/N/N-A	Y/N	
17	Criteria	Verification Plan	approved	Y/N/N-A	Y/N	
18		Software Design Standard	approved	Y/N/N-A	Y/N	
19		Software Architecture Review Template	approved	Y/N/N-A	Y/N	
20		Software Design Review Template	approved	Y/N/N-A	Y/N	
21		Software Design (including Traceability)	configured	Y/N/N-A	Y/N	
22		Software Architecture (including Traceability)	configured	Y/N/N-A	Y/N	
23	Verification	The Detail of the SW Design is sufficient to initiate coding.		Y/N/N-A	Y/N	
24	Process Objective	The Software Architecture and the Design comply with the Software High Level Requirements.		Y/N/N-A	Y/N	
25		Traceability between the Design items and the High Level Requirements is achieved.		Y/N/N-A	Y/N	
26		Software architecture is compatible with high-level requirements.	[DO-178B] 6.3.3a	Y/N/N-A	Y/N	

Abbildung 6-76: Auszug aus der Development Plan und Verification Plan Checkliste zum Review des SW-Designs der ACU

Der Verlauf des Reviews, die im Rahmen des Reviews erhobenen Aktionen und die Gesamtbewertung des Reviews sind im Review Report [48] dokumentiert. Mit der abschließenden Bearbeitung und Schließung aller erhobenen Aktionen aus dem Review und dem damit verbundenen Erreichen aller im Development Plan vorgesehenen Entwicklungs-Gates wurde die Software-Entwicklungsphase und damit das Arbeitspaket AP 470 erfolgreich abgeschlossen.

6.4.2 AP 475 Entwicklung DO-254 Hardware

Die zur Ansteuerung verwendete Hardware wurde ausgehend von dem in LIBRAS (1) entwickelten Funktionsmuster der ACU in diesem Arbeitspaket weiterentwickelt. Die ACU wird zusammen mit den Komponenten der Leistungselektronik in der APCU integriert (vgl. Abschnitt 6.3). Die Entwicklung der ACU unterlag aufgrund der geplanten Windkanalerprobung erhöhten Anforderungen, in Anlehnung an die DO-254 DAL A. Um die komplexen funktionalen Anforderungen an die ACU erfüllen zu können, war eine inhaltlich enge Verknüpfung der Entwicklungsarbeiten



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalproben einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelnsteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



notwendig. ZFL hatte um möglichst viele Synergien aus der Softwareentwicklung im AP 470 mitzunehmen, die Entwicklung der ACU Hardware in diesem Arbeitspaket in Zusammenarbeit mit embeX durchgeführt.

Wie im vorherigen Absatz bereits angeführt, erfolgte die Entwicklung der Hardware der ACU nach angepassten DO-254-Vorgaben, um die (ursprünglich geplante) Erprobung im Windkanal im Rahmen des AP 700 sicher durchführen zu können. Diese Anpassung der in der DO-254 definierten Entwicklungsschritte für die Hardwareentwicklung ist ebenso im ACU-spezifischen *Development Plan* und im *Verification Plan* dokumentiert (vgl. Abschnitt 6.4.1). Im Zuge des Entwicklungsprozesses der ACU-Hardware erfolgte ebenfalls ein kombiniertes *Preliminary und Detailed Design Review* [49]. Äquivalent zum SW- und zum FPGA-Design basierte das Review auf hierfür erstellen projekt- und ACU-spezifischen Checklisten. Die nachfolgende Abbildung 6-77 zeigt exemplarisch einen Auszug daraus.

Development Plan and Verification Plan Review Checklist				Project	LIBRAS-2	
Item under Review	ACU (H/W)				Date:	Input
#	Document/	Point to be assessed		Point discussed	Accepted	Action Sheet Identify No.
19	Verification Process Objective	Hardware Derived Low Level Requirements are verified via an independent Review.	[DO-254] 6.1.1(1+3), 6.2.1(1)	Y/N/N-A	Y/N	
20		Hardware Detailed Design is verified via an independent Review.	[DO-254] 6.1.1(1+3), 6.2.1(1)	Y/N/N-A	Y/N	
21		Hardware Schematics are verified via an independent Review.	[DO-254] 6.1.1(1+3), 6.2.1(1)	Y/N/N-A	Y/N	
22		Hardware Layout is verified via an independent Review.	[DO-254] 6.1.1(1+3), 6.2.1(1)	Y/N/N-A	Y/N	
23		Hardware Traceability is verified via an independent Review	[DO-254] 6.2.1(2)	Y/N/N-A	Y/N	
24		Verification that HW Design has been developed according the requirements.	[DO-254] 6.2.1(1)	Y/N/N-A	Y/N	
25		Verification that HW Derived requirements are correct and complete.	[DO-254] 6.1.1(1)	Y/N/N-A	Y/N	
26		Verification that HW Defects found are documented and evaluated.	[DO-254] 6.1.1 (3), 6.2.1 (4)	Y/N/N-A	Y/N	
27	Exit Criteria	HW Derived Low Level Requirements	approved	Y/N/N-A	Y/N	
28		HW Derived Low Level Requirements Review Report	approved	Y/N/N-A	Y/N	
29		HW Detailed Design	approved	Y/N/N-A	Y/N	
30		HW Detailed Design Review Report	approved	Y/N/N-A	Y/N	

Abbildung 6-77: Auszug aus der Development Plan und Verification Plan Checkliste zum Review des HW-Designs der ACU



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Wesentliche Daten/Unterlagen, die für das Review der obigen Checkpunkte herangezogen wurden, sind u.a.:

- *ACU Hardware Design Description*
- *ACU Low Level Requirements*
- *ACU Schematics*
- *BOM ACU*
- *HW HDD <-> Schematics Mapping ACU*
- *HW HLR <-> Schematics Mapping*

Die beiden letzten Dokumente der obigen Aufzählung stellen die „Traceability“ Daten dar, welche die High Level Requirements mit den Designelementen verknüpfen. In den Zeilen sind alle HLR mit Bezug zur HW der ACU gelistet und jede einzelne Spalte stellt ein Schaltplan-Modul dar. Über diese Daten ist eine klare Zuordnung von Schaltplaninhalten und zugehörigen HLRs vorhanden (s. Abbildung 6-78). Die zweite Traceability-Matrix stellt nun noch den Zusammenhang der Schaltplananteile zur Hardware Design Description dar. Damit ist eine durchgängige Traceability von den Anforderungen bis zum Detailed Design, wie in den Entwicklungsplänen gefordert, gegeben. Die entsprechenden Daten wurden sowohl zur Überprüfung der Vollständigkeit des Designs aber auch zur Korrektheit von einzelnen Designelementen herangezogen.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

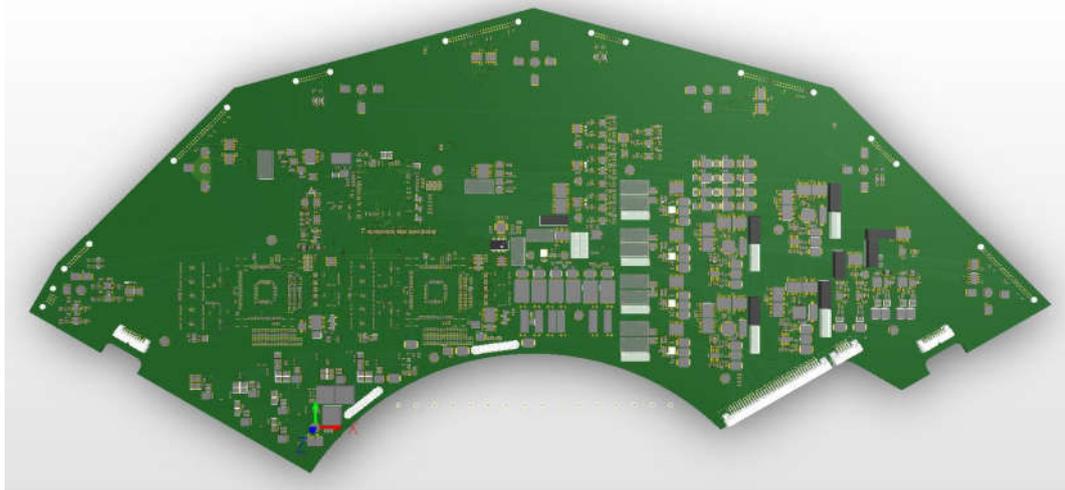


Abbildung 6-79: ACU-Platine – Finale Bauteilplatzierung (Oberseite)

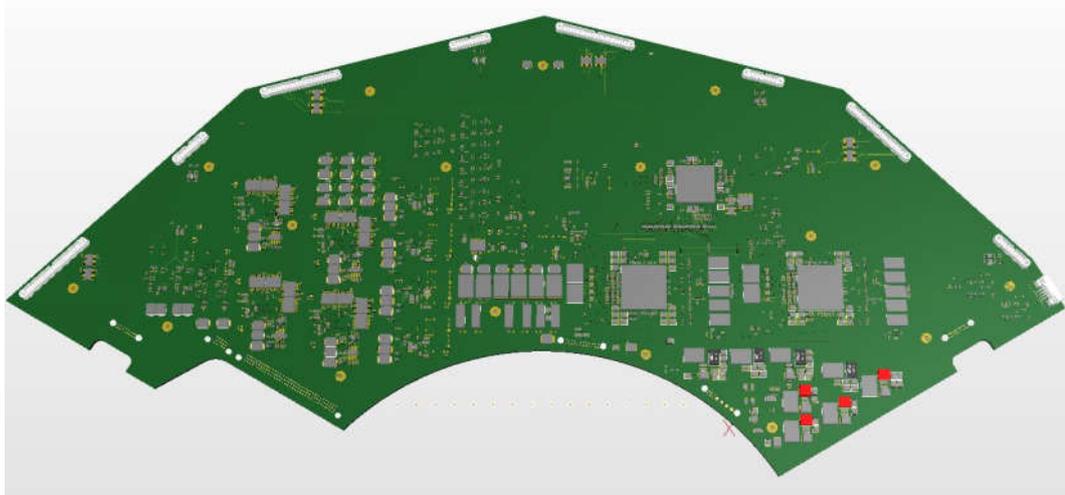


Abbildung 6-80: ACU-Platine – Finale Bauteilplatzierung (Unterseite)

Die entsprechenden „Rooms“ wurden nah an den FPGA verschoben, damit die single ended Leitungsanteile möglichst kurz sind und die längeren Strecken auf der Platine der ACU mit den weniger störanfälligen differenziellen Leitungsanteilen realisiert werden konnten. Die beiden vorherigen Abbildungen zeigen die Bauteilplatzierung mit den durchgeführten Änderungen.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen das Ergebnis des Layoutprozess für die ACU-Hardware in einer zweidimensionalen Ansicht. In der Abbildung 6-81 sind sämtliche Layoutanteile (Kupfer) aller Layer in einem Bild dargestellt. Die unterschiedlichen Farben stellen Kupferbereiche auf



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



unterschiedlichen Lagen dar. Wie in vorherigen Zwischenberichten schon erläutert, wurde die Platine mit einem 18-lagigen Aufbau realisiert.

- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-81: ACU-Platine – Grafische Darstellung des Layouts aller Layer der Platinen

In der Abbildung 6-81 stellen blaue bzw. rote Bereiche Kupfer auf den beiden äußeren Lagen (Top bzw. Bottom) dar. Alle anderen Farben stellen die Kupferbereiche von inneren Lagen dar. Im Bereich der Prozessoren (und auch des FPGA) ist gut zu erkennen, dass zum Layouten eine große Anzahl von Lagen verwendet werden musste (siehe auch Ausschnitt in Abbildung 6-82)

- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-82: ACU-Platine – Grafische Darstellung des Layouts im Bereich eines Prozessors



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Exemplarisch sind in den nachfolgenden zwei Bildern nochmals die Kupferanteile des Top-Layers und des Internal Layer 1 dargestellt. Zwischen diesen beiden Layern liegt noch eine Plane, welche hier nicht dargestellt wird. Sehr ähnlich sehen die weiteren nicht dargestellten Lagen/Layer aus.

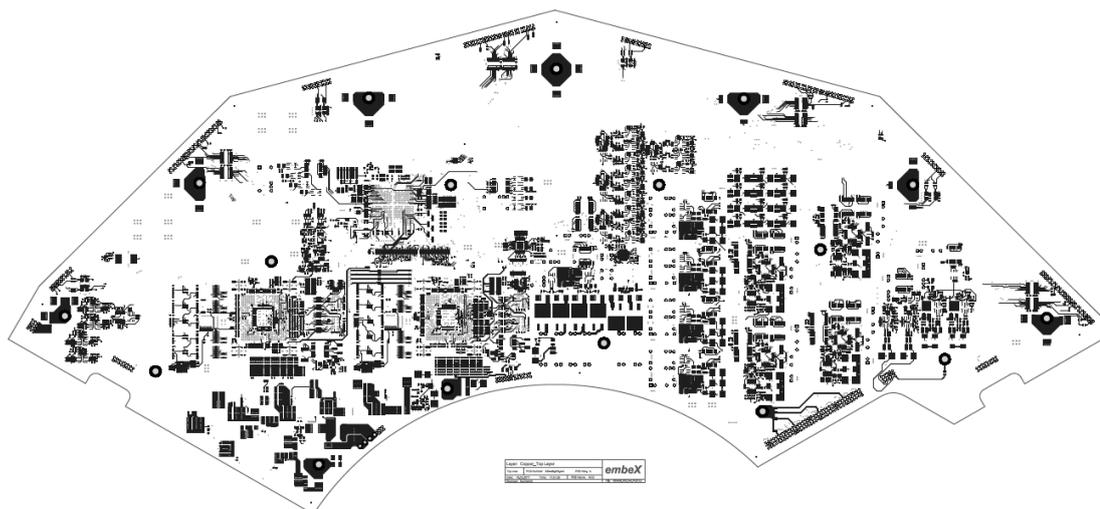


Abbildung 6-83: ACU-Platine – Kupfer des Top Layers

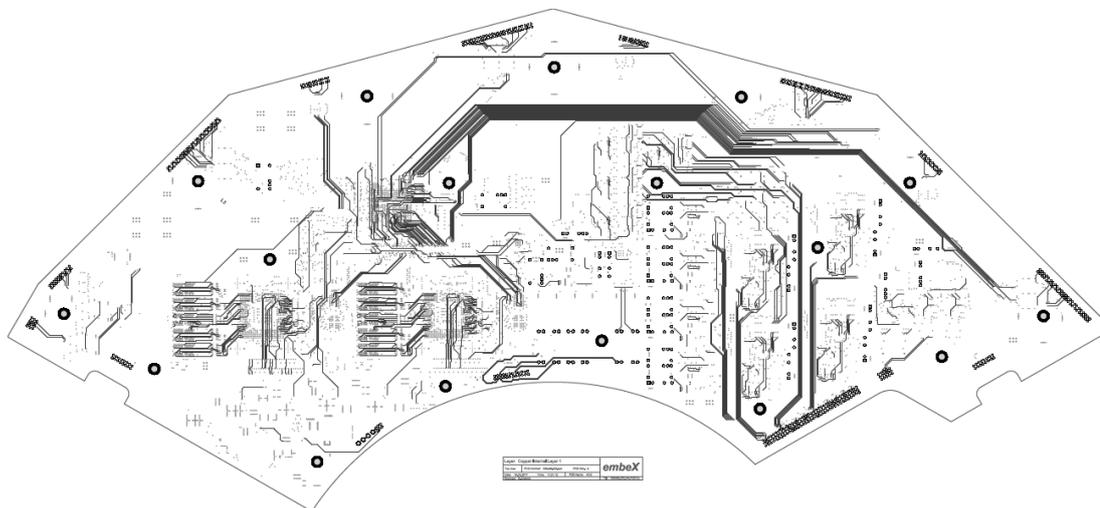


Abbildung 6-84: ACU-Platine – Kupfer der Internal Layers 1

Mit dem Abschluss der im Entwicklungsprozess vorgesehenen Reviews und den Ergebnissen des Layoutprozesses für die ACU-Hardware wurden die Arbeiten im AP 475 vollständig abgeschlossen.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelssteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



6.4.3 AP 480 Entwicklung TCC

Der in diesem Arbeitspaket zu entwickelnde Test Control Computer (TCC) obliegt nicht der hohen DAL-A-Anforderung. Daher wird auf Basis von COTS-Komponenten ein Mess- und Steuersystem entwickelt, welches über zu erstellende Kommunikationsprotokolle die Daten des LIBRAS®-Systems permanent aufzeichnet und visualisiert, im Maintenance-Mode die Konfiguration der APCUs, beziehungsweise im Test-Mode einen erweiterten Testbetrieb ermöglicht.

Für den Betrieb des LIBRAS®-Systems sind vier unterschiedliche Modi vorgesehen: *Flight Mode*, *Test Mode*, *Maintenance Mode* und *Software Update Mode*. Entsprechend wird auf dem TCC für jeden Modus eine dedizierte Software ausgeführt, wobei eine Reihe von Funktionen in mehreren Modi identisch ist. So wird beispielsweise in allen Modi ein Kommunikationsinterface zu den ACUs benötigt. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurde ein übergeordnetes Softwaremodul eingeführt, welches die gemeinsamen Funktionen bereitstellt und von dem aus die Softwaremodule der einzelnen Betriebsmodi aufgerufen werden können. Mit dem Start der TCC Software Applikation wird die in Abbildung 6-85 gezeigte Benutzeroberfläche geöffnet, von der aus der Benutzer in die einzelnen Modi wechseln kann. Die der Bedienoberfläche unterliegenden Funktionen werden dann parallel zu den Prozessen des entsprechenden Modus ausgeführt.

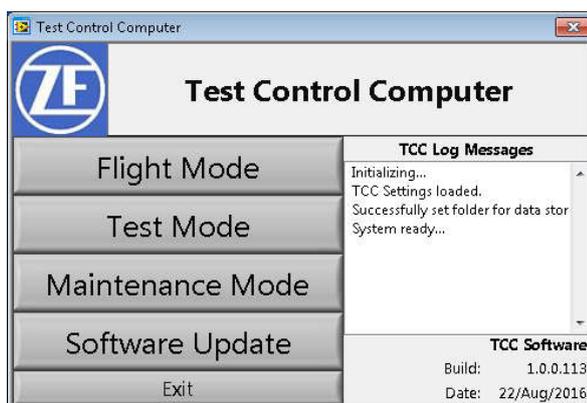


Abbildung 6-85: Initiale Benutzeroberfläche der TCC Software zur Auswahl des Modus



LIBRAS-2

Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)

Schlussbericht

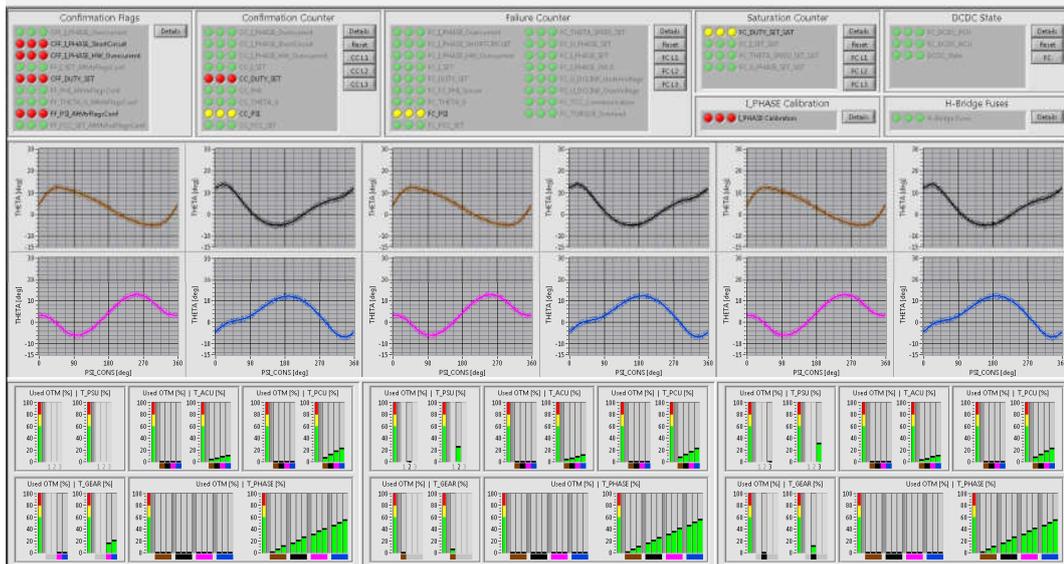


Abbildung 6-87: Benutzeroberfläche (zusätzlicher Systemmonitor)

In den Softwaremodulen *Test Mode* bzw. *Maintenance Mode* kann der Anwender über eine Menüleiste auf dem zusätzlichen Systemmonitor eine Reihe von Befehlen (*Commands*) zur Interaktion mit den ACUs nutzen, während im *Flight Mode* gemäß Spezifikation die APCU sämtliche Nachrichten seitens des TCCs ignoriert.

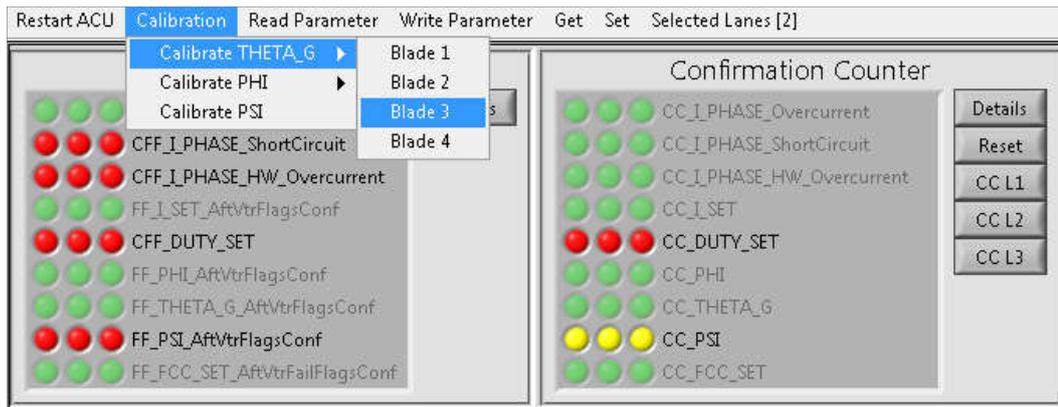


Abbildung 6-88: TCC Menüleiste - Kalibrierung THETA_G Sensor für den EMA von Blade 3

Abbildung 6-88 zeigt exemplarisch die Menüleiste im *Maintenance Mode* und die hier ausgewählte implementierte Funktion zum Aufruf des Befehls zur Kalibrierung des Einstellwinkelsensors am Getriebeausgang (THETA_G) des EMA von Blade 3. Die Befehle vom TCC bzw. die Ant-



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



worten der ACU werden gemäß dem beschriebenen Kommunikationsprotokoll über die Ethernet-Schnittstellen zu den ACUs bzw. zum TCC gesendet.

Der TCC ermöglicht die Überwachung des LIBRAS-Systemzustandes anhand einer Reihe von Messgrößen und Signalen. Um dem Anwender die Überwachungsaufgabe zu vereinfachen, werden alle für den sicheren Betrieb kritischen Informationen in wenigen LEDs zusammengeführt. Der Review-Prozess zeigte den Bedarf für eine zusätzliche Berücksichtigung des Regelfehlers (Blatteinstellwinkel) auf. Aus diesem Grund wurde ein entsprechender Auswerteprozess sowie die zugehörigen LEDs (lane-weiser Worst Case und globaler Worst Case) implementiert.

Weiterhin wurde erkannt, dass die Anzeige physikalischer Daten (z.B. Temperatur in °C oder Drehmoment in Nm) in den Bardigrammen für eine schnelle Erfassung des Systemzustandes während der Versuche nicht optimal geeignet ist. Eine geeignetere Alternative hierzu ist die Verwendung einer prozentualen Darstellung bezogen auf den jeweiligen DNE Wert der physikalischen Größe (Normierung). Bei gleichzeitiger Verwendung identischer Schwellwerte für die Fehlerdetektion (hier: Failure @ 80% DNE und Warning @ 60% DNE) ergeben sich optisch sehr ähnliche Graphen, wobei die Schwellwerte benachbarter Bardigramme auf gleichem Niveau liegen. Damit erhält man schnell eine Indikation des Systemzustandes im Hinblick auf die Betriebssicherheit.

Neben der Systemüberwachung anhand der von den ACUs empfangenen Daten erfolgt auf dem TCC eine Überwachung des eigenen Zustandes. Die Auswertung und Anzeige der von den ACUs empfangenen Daten erfolgt eventbasiert nach dem Erhalt eines neuen Datenpaketes über die Ethernet-Schnittstellen. Um mögliche Kommunikationsfehler zu erkennen, wird die Datenübertragungsrate der Ethernet-Schnittstellen ausgewertet und mit der erwarteten (die ACU sendet Pakete mit einer konstanten Frequenz) verglichen. Abweichungen oberhalb eines Schwellwertes werden mittels einer LED je Lane angezeigt. Fehler bei der Ausführung der TCC-Software werden mit Hilfe eines rotierenden Zeigerinstruments überwacht (Darstellung auf dem primären Systemmonitor).

Eine zusätzliche Funktion des TCC ist die Aufzeichnung der von der APCU auf drei unabhängigen Leitungen übertragenen Messdaten und



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Signale. Der Prozess der Datenerfassung wird parallel zur Systemüberwachung und Darstellung ausgeführt und beinhaltet das automatisierte Anlegen einer Ordnerstruktur sowie eine eindeutige, fortlaufende Dateinamenvergabe. Für das Post-Processing der damit auf dem TCC aufgezeichneten Daten wurde zusätzlich zur Datenerfassung ein Prozess zur Datenkonvertierung vom LabVIEW TDMS Format nach MATLAB implementiert. Dies ermöglicht es bereits vorhandene Auswertewerkzeuge weiterzuverwenden und die entstandene Datenbasis über Standardanwendungen weiteren Benutzern unabhängig von einer kostenintensiven LabVIEW-Lizenz zur Verfügung zu stellen.

Im Hinblick auf die Betriebssicherheit mechanischer Bauteile und Baugruppen sind einerseits die maximalen Betriebslasten (*Limit Load*) und andererseits die Ermüdungslasten (*Fatigue Loads*) entscheidend. Durch das geplante Einsatzspektrum der elektromechanischen Aktuatoren (EMA) im Rahmen der Erprobung ergibt sich aufgrund der Kombination aus kollektiven und zyklischen Steuereingaben eine Belastungsform bestehend aus einer nahezu konstanten Grundlast (variables Niveau je nach Flugzustand) und einer dieser Grundlast überlagerten Wechsellast mit unterschiedlichen Frequenzanteilen und Amplituden. Die Überwachung dieser beiden Größen erfolgt auf dem TCC anhand des von der ACU gemessenen Getriebeabtriebsmoments. Für die Überwachung der EMA *Limit Load* wird ein Balkendiagramm verwendet (vergl. Abbildung 6-89). Dargestellt ist hierin das gemessene Moment bezogen auf den zugehörigen DNE-Wert. Als DNE-Wert wird die nachgewiesene *Limit Load* verwendet, die entsprechenden Schwellwerte für die Zustandsüberwachung liegen dann bei 60% (*Warning*) bzw. 80% (*Failure*) der *Limit Load*.

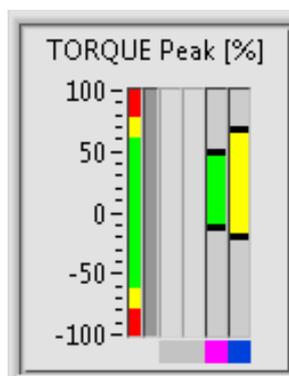


Abbildung 6-89: Balkendiagramm zur Überwachung der EMA *Limit Load* auf dem Systemmonitor des TCC (Werte einer Lane)



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-90: Flussdiagramm der EMA *Fatigue Monitoring* Funktion

Die eigentliche Implementierung der Zustandsüberwachung auf dem TCC ist schematisch in der Abbildung 6-90 wiedergegeben. Die Schadensgewichtungsmatrix für den EMA kann aus den zugehörigen Bauteil-Wöhlerlinien (vergl. Abbildung 6-91 bzgl. eines exemplarischen Verlaufs) abgeleitet werden.

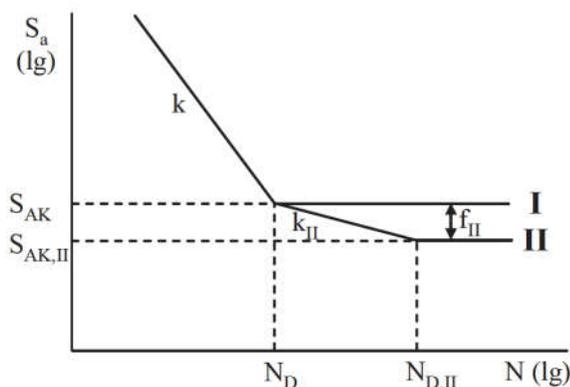


Abbildung 6-91: Exemplarische Wöhlerlinien (Typ I und Typ II)

Die Gesamtschädigung eines EMAs ergibt sich dann aus den kumulierten Schädigungssummen aller ertragenen Belastungskollektive während seiner gesamten Betriebszeit und wird auf dem primären Systemmonitor des TCC für jeden EMA angezeigt (vergl. Abbildung 6-92).



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

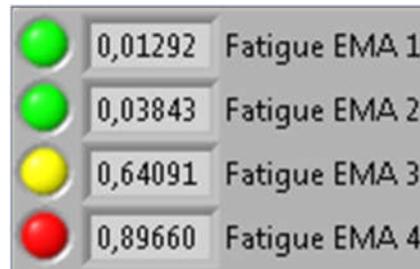


Abbildung 6-92: Anzeigeelemente der *EMA Fatigue Monitoring Funktion* auf dem primären Systemmonitor des TCC

Die im AP 480 auf dem TCC implementierten Funktionen wurden im Rahmen der Integrationstests, der Inbetriebnahme der APCU und der Erprobung am ZFL Systemprüfstand und am SIL bei SAC erfolgreich eingesetzt. Damit konnten die Arbeitsinhalte im AP 480 vollständig erreicht werden.

6.4.4 AP 485 Beschaffung und Fertigung (B-Muster)

Die Aktivitäten zur Beschaffung und Fertigung der Ansteuerungskomponenten, die in der ACU zusammengefasst und in der APCU zusammen mit den Komponenten der Leistungselektronik integriert sind (vgl. Abschnitt 6.3.1) wurden in diesem Arbeitspaket gebündelt. Unter Berücksichtigung der Anforderungen, die sich aus der Anwendung ergaben, erfolgte die Fertigung des ACU-Anteils außerhalb der ZFL bei einem EN9100 zertifizierten Lieferanten, der zudem technisch qualifiziert war, die komplexe und große ACU zu bestücken. Abbildung 6-93 zeigt eines von drei gefertigten Qualifikationsmustern der ACU. Mit dem Abschluss der Fertigung der Qualifikationsmuster wurden die Arbeiten im AP 485 vollständig abgeschlossen.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

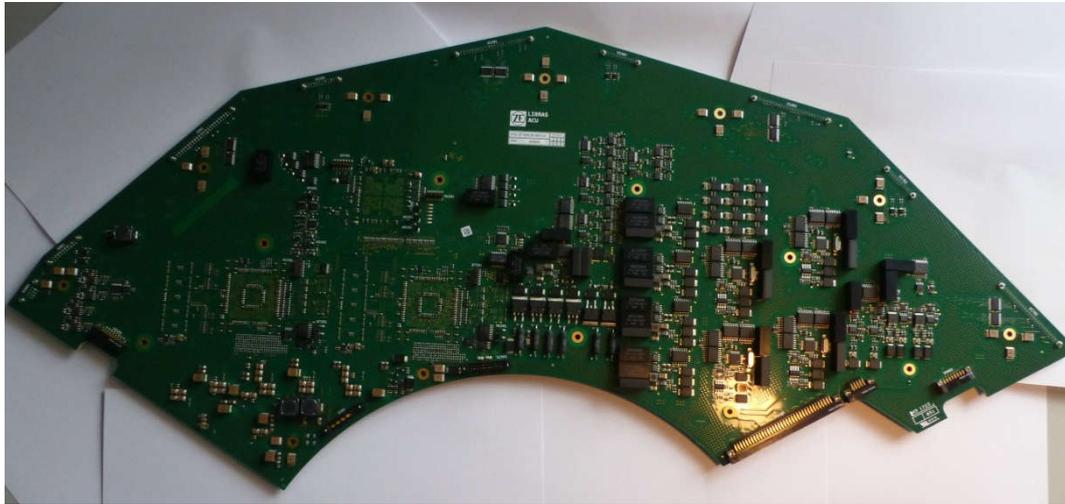


Abbildung 6-93: Bestückte ACU SN002 für die im AP 490 durchgeführten Qualifikationsversuche

6.4.5 AP 490 Verifikations- & Qualifikationsversuche

Entsprechend den hohen Anforderungen an den Entwicklungsprozess, der sich aus der generellen DAL-A-Einstufung ergibt, werden die umfangreichen Verifikationsaktivitäten und Versuche zur Hardware/Software-Qualifikation der Ansteuerungselektronik in diesem Arbeitspaket zusammengefasst. Die Verifikation der Hard- und Softwareentwicklung der ACU erfolgt nach angepassten DO-178/DO-254 Vorgaben, um eine sichere spätere Erprobung im Windkanal zu gewährleisten. Diese Anpassung der in der DO-178/DO-254 definierten Verifikationsschritte ist im *Verification Plan* (vgl. Abschnitte 6.4.1 und 6.4.2) dokumentiert.

Einen wichtigen Teilpunkt der Verifikation stellt das anforderungsbasierte Testen der High-Level-Requirements der ACU auf der finalen HW-Plattform im Hardware Software Integration Test (HSIT) dar. Im Laufe des Vorhabens wurde das zunächst vorentworfene Konzept der HSIT-Durchführung von einem rein manuellen Prozess auf eine weitestgehend automatisierte Testdurchführung umgestellt. Hintergrund dieser Entscheidung war die Komplexität der in der ACU zusammengefassten Funktionen und der damit verbundene Aufwand bei der Sicherstellung der Testabdeckung. Der Aufbau der automatisierten HSIT-Testumgebung ist in Abbildung 6-94 schematisch dargestellt.



LIBRAS-2

Entwicklung und Windkanalproben einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelnsteuerung (Phase 2)

Schlussbericht

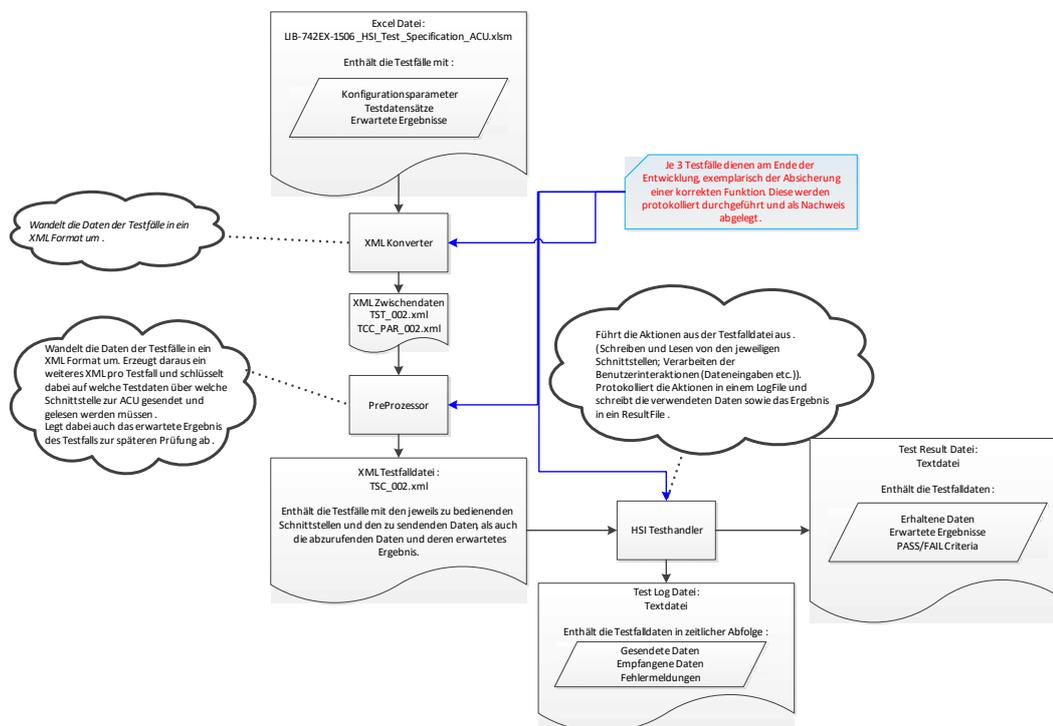


Abbildung 6-94: SW-Aufbau der automatisierten HSIT-Testumgebung.

Es ist zu erkennen, dass der HSIT-Tester im Wesentlichen aus drei Softwareteilen besteht. Diese sind der XML-Konverter, der Preprozessor und der Testhandler. Der XML-Konverter liest die in einer Exceldatei spezifizierten Testfallanweisungen ein und wandelt diese in ein XML-Format. In der Testspezifikation sind hierfür u.a. Konfigurationsparameter, Testdatensätze aber auch die erwarteten Testergebnisse bzw. Erfüllungskriterien definiert. Der Preprozessor erstellt nachfolgend für jeden einzelnen Testfall eine spezifische XML-Datei und schlüsselt dabei auf, welche Testdaten über welche Schnittstelle zur ACU gesendet bzw. gelesen werden müssen. Ebenso wird das dem Test zugeordnete erwartete Ergebnis und damit das Erfüllungskriterium in der Testfall-spezifischen Datei abgelegt. Der Testhandler führt nun den eigentlichen Test aus. Hierzu führt er die in der Testfalldatei spezifizierten Aktionen aus (z.B. Schreiben und Lesen der jeweiligen Schnittstellen, Verarbeiten von Benutzerinteraktionen etc.), protokolliert diese in einem Logfile und schreibt alle verwendeten Daten sowie das Ergebnis des Tests in eine Ergebnisdatei. In dieser Ergebnisdatei wird auch das automatisch bewertete Pass/Fail Kriterium dokumentiert.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Die korrekte Funktion des HSIT-Testers wurde anhand von ausgewählten Schritten definierter Testfälle der HSIT-Testspezifikation [164] überprüft. Hierzu wurden die Outputs der verschiedenen SW-Module manuell auf Plausibilität bzw. Korrektheit überprüft. Im Zuge dieser Überprüfung erfolgte die (elektrische) Inbetriebnahme der HSIT-Testumgebung (s. Abbildung 6-95) unter Verwendung eines der im AP 485 gefertigten Qualifikationsmuster der ACU.

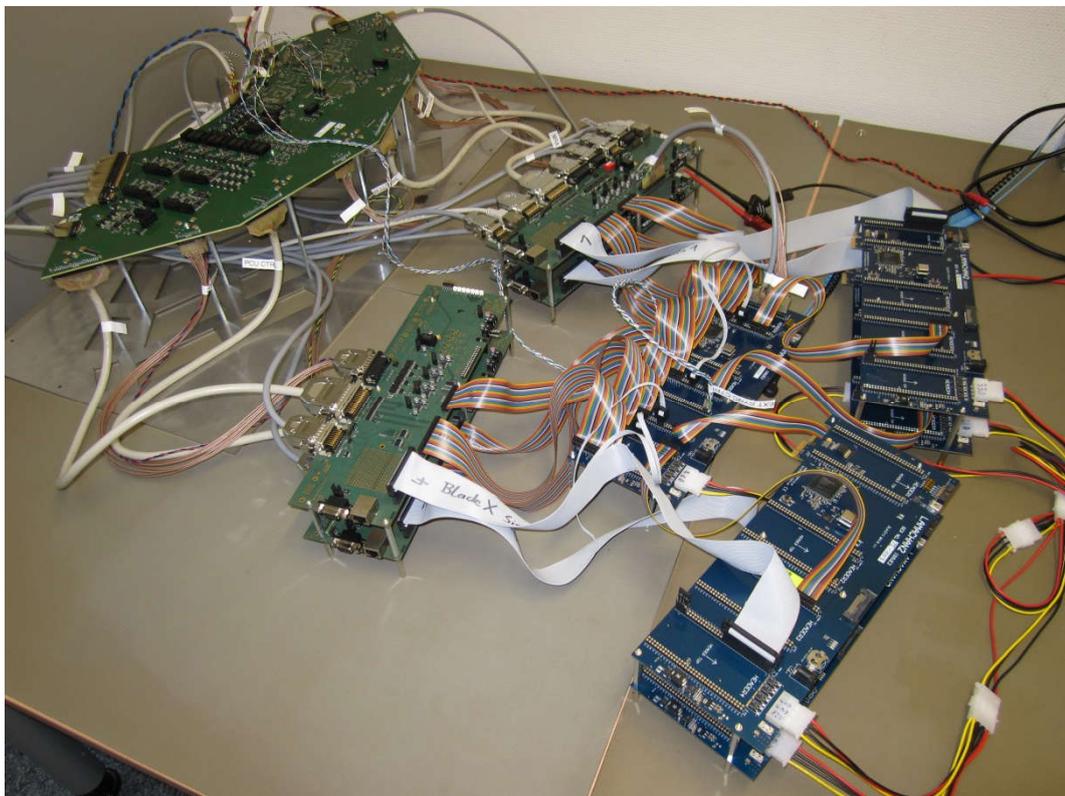


Abbildung 6-95: Erster Integrationstest in der HSIT Testumgebung mit einem der von ZFL beigestellten B-Muster der ACU

Noch vor Aufnahme der formalen Verifikations- und Qualifikationsversuche in der in Abbildung 6-95 dargestellten HSIT-Umgebung konnten wichtige Fortschritte bei der Entwicklung der ACU-Software erzielt werden. So führten in Q3/2018 embeX und ZFL nach dem ersten Integrationstest am Fraunhofer IZM (vgl. Abschnitt 6.3.3) einen weiteren Integrationstest bei embeX durch. In diesem Integrationstest wurden erstmalig alle späteren Systemkomponenten in Betrieb genommen. Die Versuche erfolgten in der Konfiguration für den 1-Lane Betrieb mit einem EMA Er-



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelnsteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



probungsmuster, das im Verbund mit einem PSU und PCUC Erprobungsmuster betrieben wurde. Die Aufgabe der Positionskontrolle wurde von dem ACU Qualifikationsmuster mit dem aktuellen Entwicklungsstand der ACU-Software übernommen. Die Ansteuerung der Systemkomponenten erfolgte über den im AP 630 für den TCC entwickelten FCC-Emulator (vgl. Abschnitt 6.6.3). Über den TCC wurde erfolgreich die ACU-Software parametrisiert, z.B. bezüglich der Regler-Einstellungen der kaskadierten Positionsregelung, sowie die von der ACU übertragenden Messdaten und Systemgrößen dargestellt und aufgezeichnet (vgl. Abschnitt 6.4.3). Abbildung 6-96 bis Abbildung 6-98 zeigen den Versuchsaufbau im Elektronik-Labor bei embeX.



Abbildung 6-96: Integrationstest aller Systemkomponenten – Versuchsaufbau mit allen Systemkomponenten, externer Energieversorgung und Rotorazimut-Emulator



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelnsteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

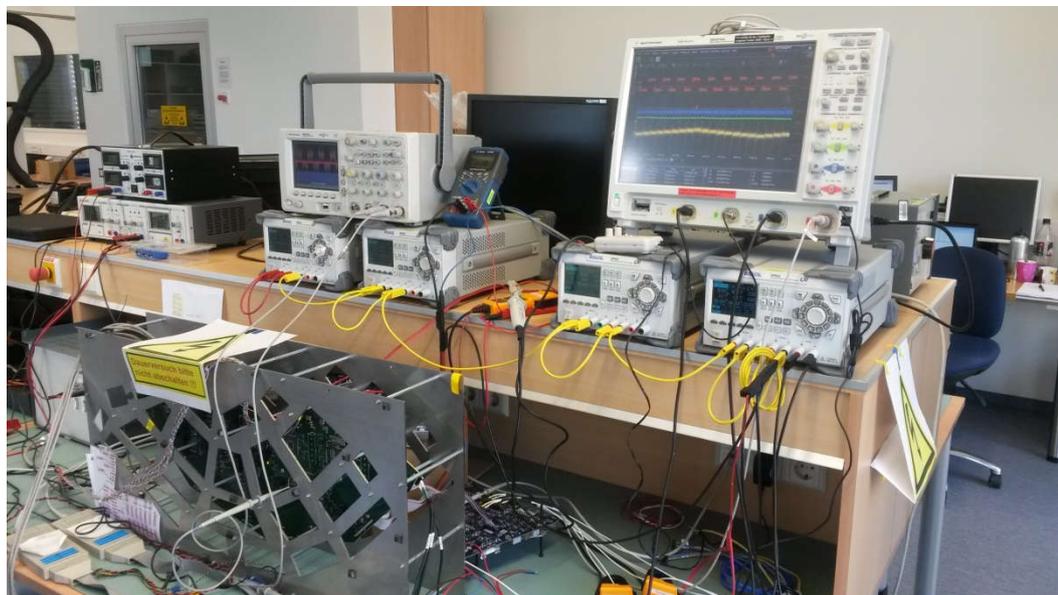


Abbildung 6-97: Integrationstest aller Systemkomponenten – APCU Komponenten (ACU, PSU und PCUC) mit externer Energieversorgung und Monitorvorrichtungen



Abbildung 6-98: Integrationstest aller Systemkomponenten – EMA Erprobungsmuster, bei dem aus Sicherheitsgründen der Abtriebshebel demontiert wurde

Mit dem zuvor beschriebenen Versuchsaufbau wurden erfolgreich verschiedene Systemfunktionen im Verbund getestet. Die folgenden Abbildungen (Abbildung 6-99 bis Abbildung 6-102) zeigen beispielhaft Messwerte, die im Zuge des geregelten Betriebs des EMA Erprobungsmusters von der ACU zum TCC geschickt und dort gespeichert wurden. Es ist zu



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelnsteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



erkennen, dass die Systemkomponenten im Verbund die Kernfunktion des LIBRAS[®]-Systems, das positionsgeregelte Verstellen des Blatteinstellwinkels, erfüllen.

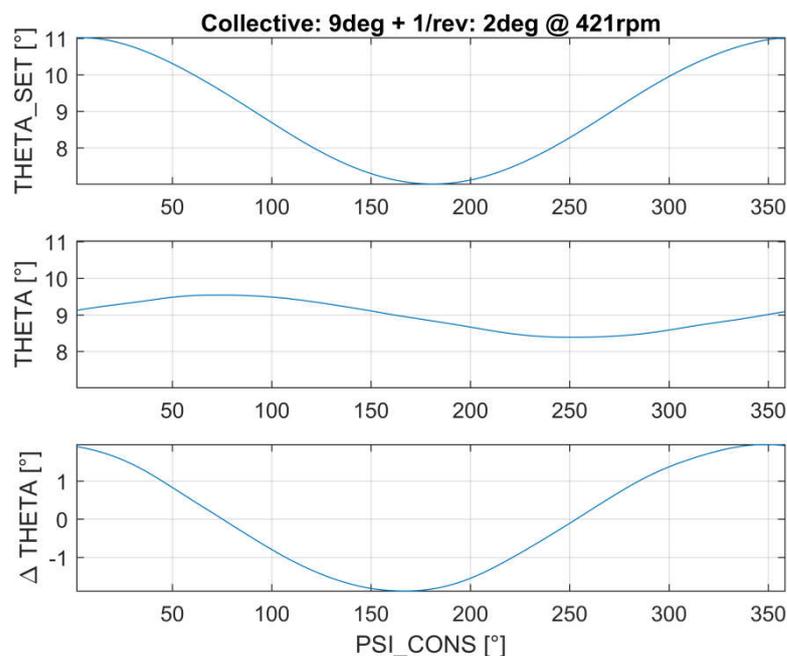


Abbildung 6-99: Integrationstest aller Systemkomponenten – Gegenüberstellung von Sollwert (THETA_SET) und Istwert (THETA) für eine Einsteuerung von 9° Kollektiv und 2° Zyklisch über eine Rotorumdrehung bei einer auf dem Rotorazimut-Emulator eingestellten Rotordrehzahl von 421rpm



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalproben einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelnsteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

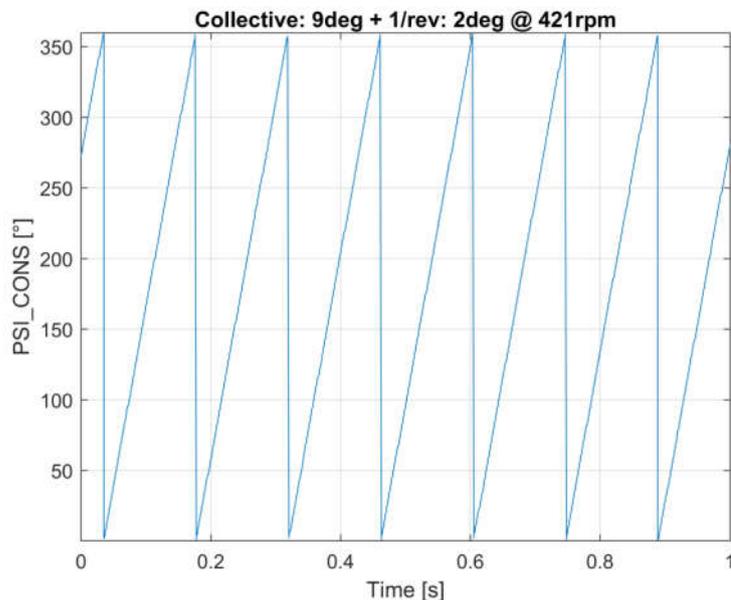


Abbildung 6-100: Integrationstest aller Systemkomponenten – Konsolidiertes Messsignal PSI_CONS für den Rotorazimut über 1s bei einer auf dem Rotorazimut-Emulator eingestellten Rotordrehzahl von 421rpm

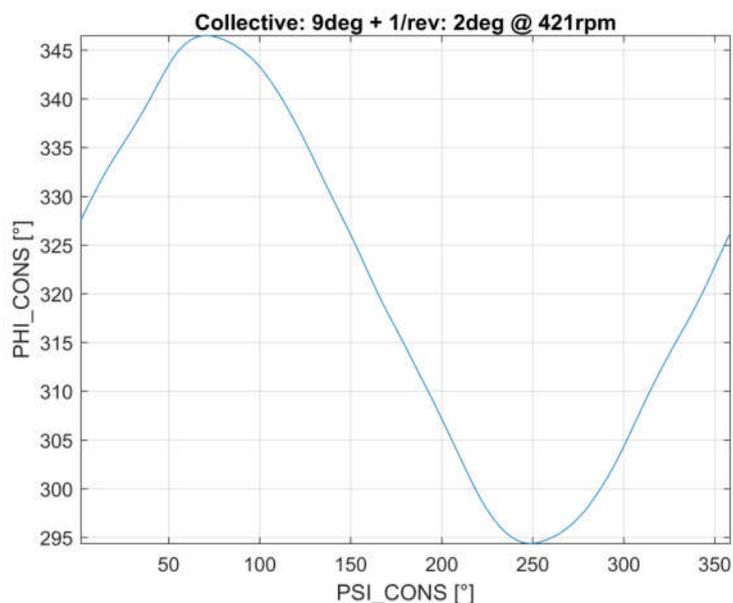


Abbildung 6-101: Integrationstest aller Systemkomponenten – Konsolidiertes Positionssignal PHI auf der schnell drehenden Seite (Motorwelle) des EMA über eine Rotorumdrehung (Rotorazimut PSI_CONS)



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelnsteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

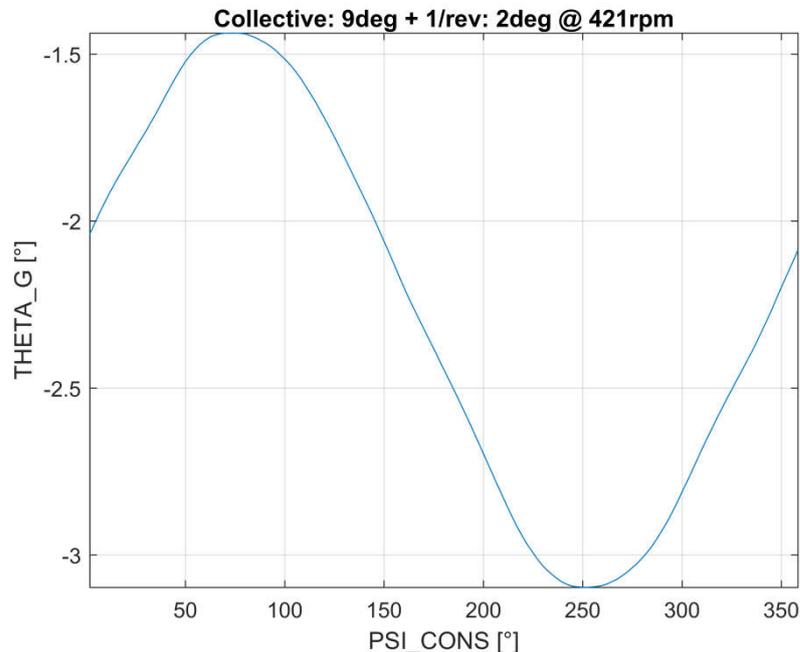


Abbildung 6-102: Integrationstest aller Systemkomponenten – Positionssignal THETA_G auf der langsam drehenden Seite (Getriebeabtrieb) des EMA über eine Rotorumdrehung (Rotorazimut PSI_CONS)

Zu Beginn von Q4/2019 wurde dann mit der formalen Durchführung der Verifikations- und Qualifikationsversuche auf Grundlage des von embeX erstellten und freigegebenen Testprogrammes begonnen. Die Ergebnisse zu den jeweiligen Test Cases sind in dem von embeX erstellten Test Report dokumentiert und bewertet. Von den insgesamt 111 in im Versuchsprogramm definierten und durchgeführten Testfällen wurden:

- 84 Testfälle mit dem Testergebnis „SUCCESS“
- 24 Testfälle mit dem Testergebnis „FAILURE“
- 3 Testfälle mit dem Testergebnis „DELAY_FAILURE“

absolviert. Die insgesamt 27 Testfälle, in denen das Testergebnis nicht „SUCCESS“ lautet, wurden im Nachgang durch embeX analysiert und bewertet. Auf Grundlage dieser Bewertung waren aus Sicht von embeX keine Wiederholungen einzelner Testfälle oder Änderungen an der getesteten ACU Software notwendig.

Nach Review des Test Reports durch ZFL sowie aufgrund von erkannten Fehlverhalten des Systems im Rahmen der Inbetriebnahme der APCU im AP 630 (vgl. Abschnitt 6.6.3) musste die ACU-Software stellenweise



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



angepasst werden. Für die Verifikation dieser Anpassung wurden einzelne relevante Testfälle wiederholt. Die Festlegung der zu wiederholenden Testfälle wurde dabei über Analyseberichte dokumentiert, so dass die Anforderungen aus dem *Development Plan* [148] und dem *Verification Plan* [160] weiterhin erfüllt waren. Aufgrund der zum Jahresbeginn 2020 entstandenen Einschränkungen wegen der COVID-19 Pandemie konnten die Verifikations- und Qualifikationsversuche im AP 490 formal nicht abgeschlossen werden. Für die Erprobung am ZFL Systemprüfstand und am SIL bei SAC entstanden aufgrund der umfangreichen Versuche und Ergebnisse im Zusammenhang mit der APCU Inbetriebnahme daraus keine Nachteile. Das Arbeitspaket AP 490 konnte trotz dieser formalen Einschränkung erfolgreich abgeschlossen werden, zumal mit Hinblick auf die spätere Verwertung der Vorhabensergebnisse ZFL mit embeX bis zur formalen Freigabe des HSI Test Reports weiter zusammenarbeitete.

6.4.6 AP 495 Fertigung Erprobungsmuster (Windkanalmuster)

Auf Grundlage der Ergebnisse aus der Verifikation und Qualifikation der im AP 470 und AP 475 erfolgte im AP 495 die Fertigung der Erprobungsmuster der ACU für die Erprobung im AP 600 und die ursprünglich geplante Windkanalerprobung im AP 700. Die Fertigung von insgesamt 13 ACUs als Erprobungsmuster erfolgte dabei in mehreren Losen. Mit der Freigabe für die Bestückung des dritten und damit letzten Loses des ACU Erprobungsmusters und der Auslieferung dieser ACU Erprobungsmuster zu Beginn von Q2/2019 wurde das Arbeitspaket AP 495 abgeschlossen.

6.5 AP 500 Signal- und Leistungsübertragung

Die Komponenten der Signal- und Leistungsübertragung vom stehenden in das drehende System und deren Verteilung am Rotorkopf sollten innerhalb des Arbeitspakets AP 500 entworfen und gefertigt werden. Aus der Abstimmung zwischen ZFL und SAC zu Beginn des Vorhabens ergab sich folgende Aufgabenverteilung. Während ZFL im Rahmen des AP 500 für das Design und die Fertigung der Komponenten zur Signal- und Leistungsübertragung zwischen der APCU und den vier EMAs des LIBRAS[®]-Systems auf dem Rotorkopf verantwortlich zeichnete, wurde von SAC in enger Abstimmung mit ZFL das Design und die Fertigung



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



der Komponenten der Signal- und Leistungsübertragung vom stehenden in das drehende System übernommen.

Bei der Entwicklung des Schleifrings für den Systemprüfstand (vgl. Abschnitte 6.6.1 und 6.6.2) konnten ZFL und SAC Synergieeffekte nutzen, da sowohl am ZFL Prüfstand als auch SIL Prüfstand bei SAC (und im Windkanal) für die Drehübertragung eine identische Technologie und ein gemeinsamer Lieferant genutzt wurden.

6.5.1 AP 560 Design von Qualifikations- und Gesamtverkabelung

Im AP 560 wurden die Signal- und Leistungskabel des LIBRAS[®]-Systems ausgelegt und gefertigt. Im Designprozess erfolgte dazu die Auswahl geeigneter Verbindungselemente, die den hohen Anforderungen des Einsatzes im drehenden System des Rotors (hohe Flieh- und Luftkräfte) entsprachen.

Die Arbeiten im AP 560 konzentrierten sich auf die Auswahl und Definition von Verbindungslösungen für die internen und externen Schnittstellen des LIBRAS[®]-Systems und die Aktualisierung von bestehenden *Interface Control Dokumenten* (ICD). Inhaltlich waren diese eng vernetzt mit den Arbeiten zum Design des EMAs (vgl. Abschnitt 6.2.1) und der APCU (vgl. Abschnitt 6.3.1).

Zu den im Laufe des Vorhabens definierten und im Design der Systemkomponenten berücksichtigten externen Schnittstellen zählen:

- die Schnittstelle zwischen APCU und *Flight Control Computer* (FCC)
- die Schnittstelle zwischen APCU und TCC
- die Schnittstelle zwischen APCU und dem Rotorazimut-Sensor
- die Schnittstelle zwischen APCU und der Energieversorgung aus dem stehenden System (Anschluss an den drehenden Teil des von SAC beigestellten Schleifrings)
- die Schnittstelle zwischen der APCU und dem EMA für die Sensorsignale
- die Schnittstelle zwischen der APCU und dem EMA für die Leistungssignale.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Zu den im Laufe des Vorhabens definierten und im Design der Systemintegration von ACU, PSU und PCUC in der APCU berücksichtigten (vgl. Abschnitt 6.3.1) internen Schnittstellen zählen dagegen:

- die Schnittstelle zwischen PSU und ACU für die (Niedervolt-) Energieversorgung der ACU
- die Schnittstelle zwischen ACU und PCU für die (Niedervolt-) Energieversorgung der Logikbausteine der PCUC
- die Schnittstelle zwischen ACU und PCUC für die Status- und Steuersignale
- die Schnittstellen zwischen PSU und PCUC (Zwischenkreis).

Abbildung 6-103 zeigt in der Übersicht die (externe) Verkabelung des LIBRAS[®]-Systems, die die vier EMAs an die APCU anbindet. Über diese Anbindung werden Energie- und Sensorsignale übertragen.

- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-103: Auszug aus Zeichnung X99-0029.098 –
Übersicht Verkabelung Gesamtsystem (externe Kabel)



LIBRAS-2

Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)

Schlussbericht



Ein Beispiel für die im Vorhaben entstandenen Kabeldesigns ist das Sensorkabel EMA (s. Abbildung 6-104 - Abbildung 6-106). Aufgrund der konstruktiven Ausführung des EMAs ist eine Lane-individuelle Ausführung (A, B und C) der Anbindung der im EMA integrierten Sensorik notwendig.

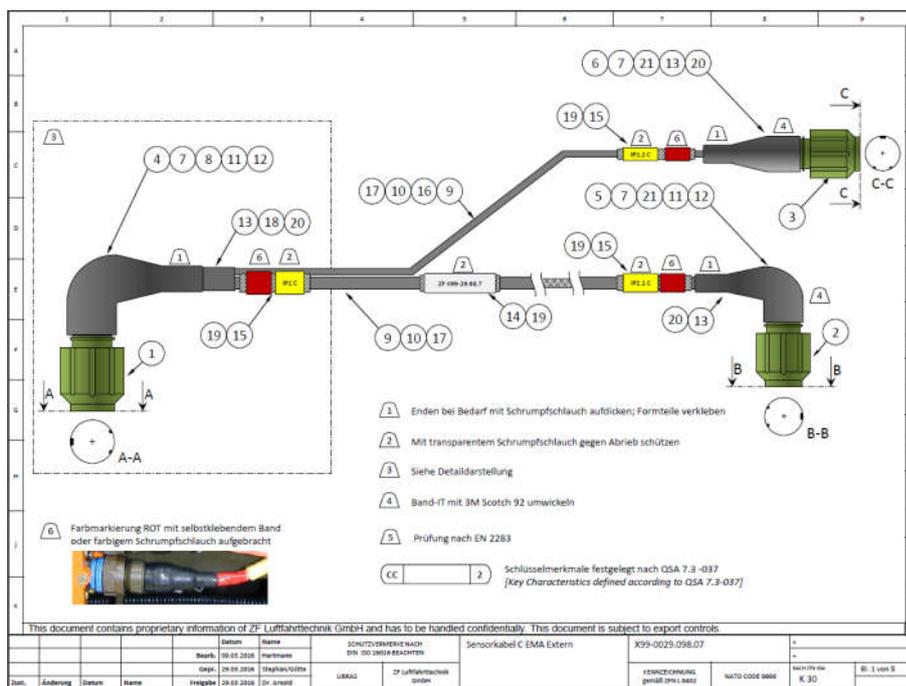


Abbildung 6-104: Übersichtsblatt der Zeichnung X99-0029.098.07 – Sensorkabel C EMA Extern



LIBRAS-2 Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2) Schlussbericht

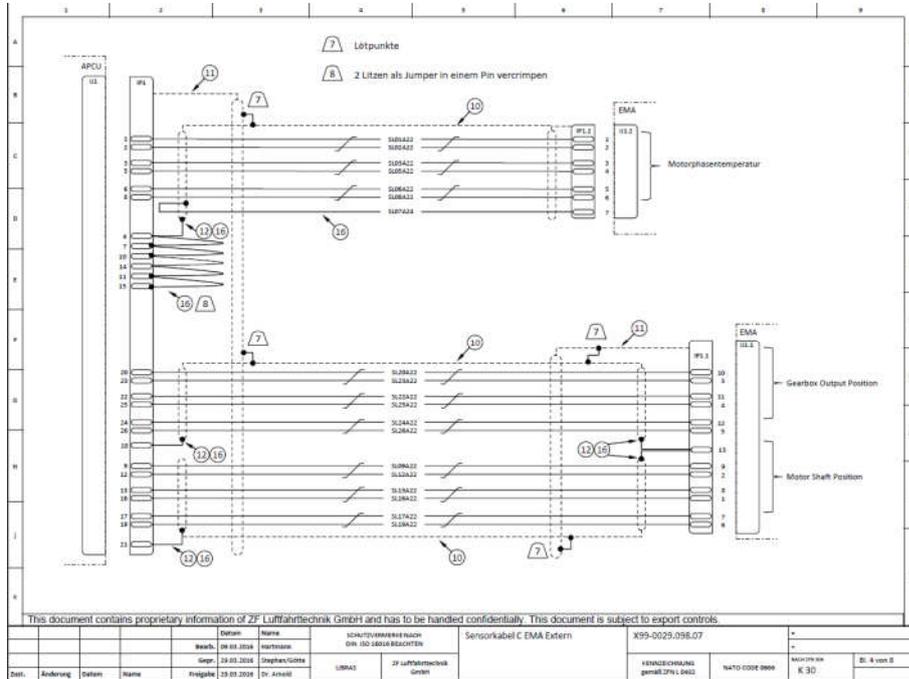


Abbildung 6-105: Verkabelungsplan der Zeichnung X99-0029.098.07 – Sensorlabel C EMA Extern

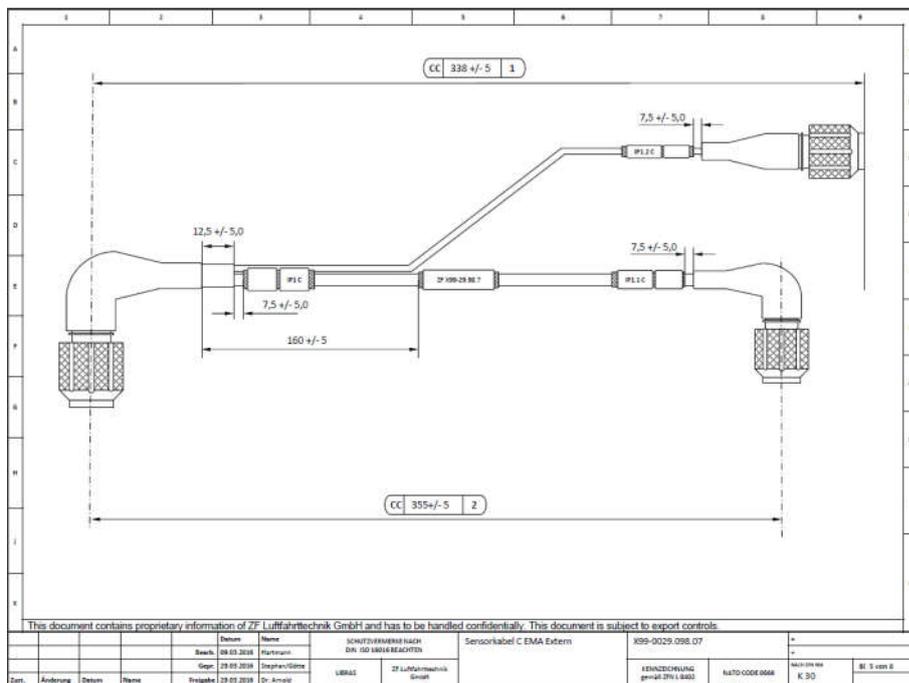


Abbildung 6-106: Mechanische Abmaße in Zeichnung X99-0029.098.07 – Sensorlabel C EMA Extern



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Die vorentworfenen Kabelzeichnungen der externen Kabelverbindungen (außerhalb der Subsysteme EMA, APCU) wurden einem Prüf- und Freigabedurchlauf unterzogen und nach Einarbeitung erkannter und notwendiger Änderungen in den K30-Stand überführt.

Neben den Arbeiten an der externen Verkabelung wurde im AP 560 das Design der internen Verkabelungen innerhalb des EMA bzw. innerhalb der APCU bearbeitet. Abbildung 6-109 zeigt eine vereinfachte 3D-Abbildung des EMA mit Kennzeichnung der drei unterschiedlichen im EMA verbauten Kabel. Für das Kabel 2, welches die interne Verkabelung der verschiedenen Positionssensoren herstellt, sind Auszüge aus der Kabelzeichnung in Abbildung 6-108 (Übersicht) und Abbildung 6-109 (Verdrahtungsplan) dargestellt.

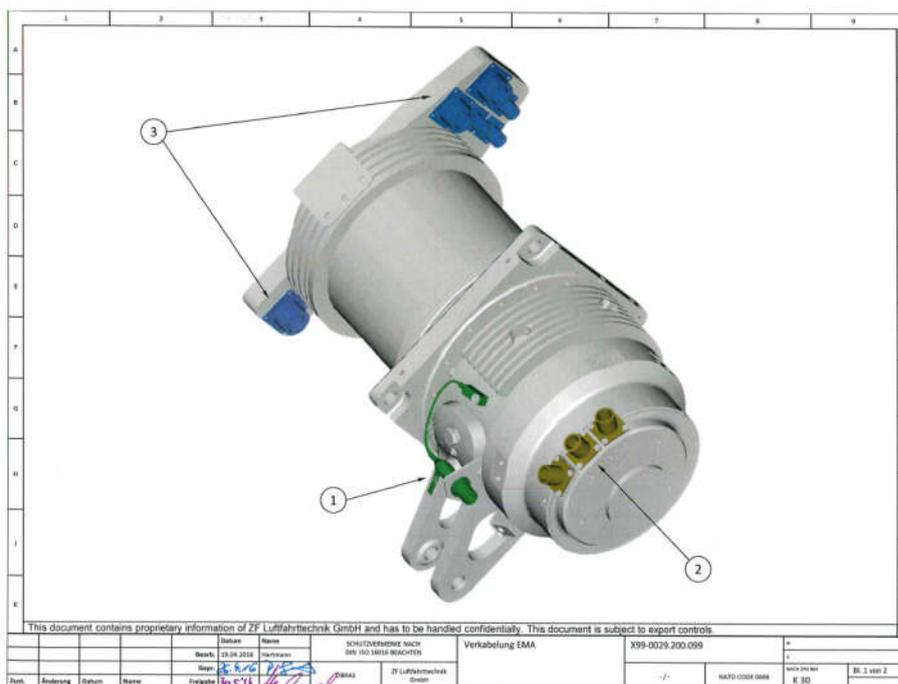


Abbildung 6-107: Kennzeichnung der intern im EMA verbauten Kabel



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

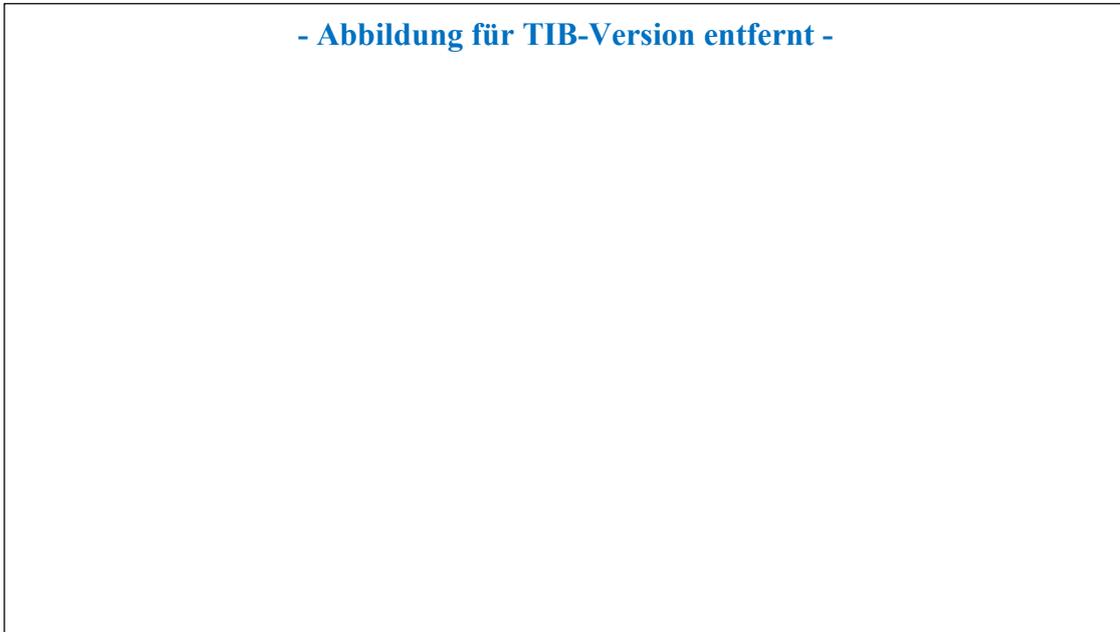


Abbildung 6-108: Übersichtsblatt der Zeichnung 99-0029.200.99.02 – Sensorkabel EMA (Position)

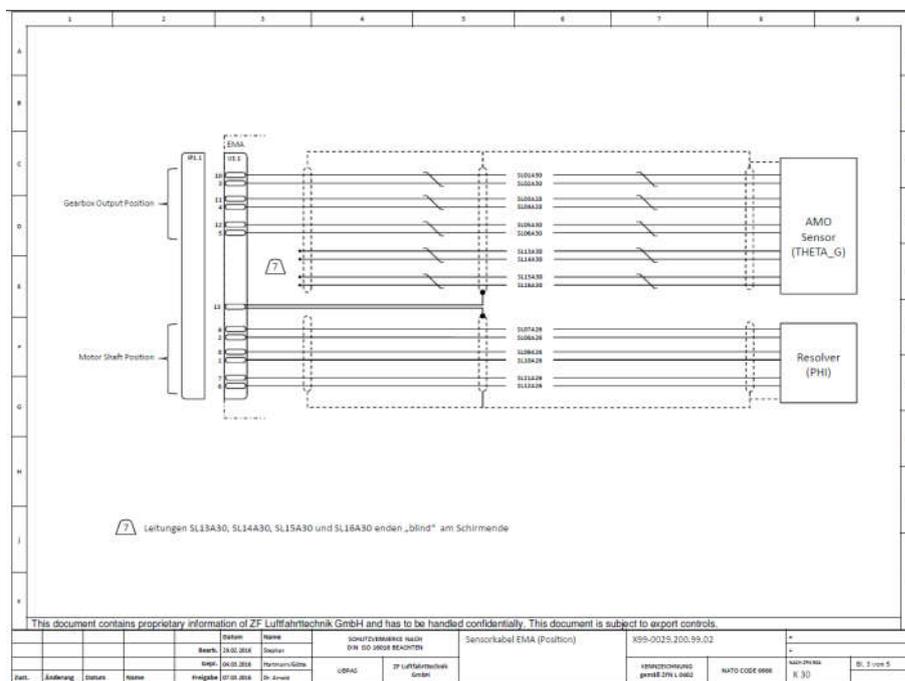


Abbildung 6-109: Verdrahtungsplan der Zeichnung X99-0029.200.99.02 – Sensorkabel EMA (Position)



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Für die Verkabelung innerhalb der APCU wurden entsprechende Verkabelungspläne fertiggestellt. Abbildung 6-110 zeigt als exemplarisches Beispiel die Verkabelungsübersicht der Lane 1. Analog zum Vorgehen bezüglich der internen Verkabelung des EMAs wurden für die internen Verkabelungen der APCU entsprechende Kabelzeichnungen erstellt. Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft das Signalkabel der ACU.

- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-110: Verkabelungsübersicht – Verkabelung APCU intern,
Lane 1



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

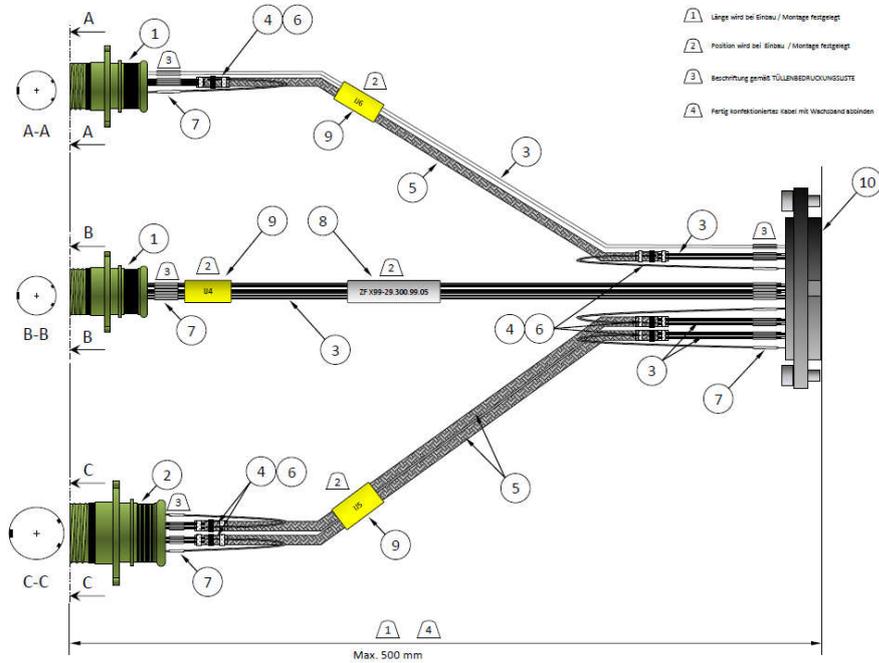


Abbildung 6-111: Übersicht des Kabels X99-0029.300.99.05 – Signalkabel ACU

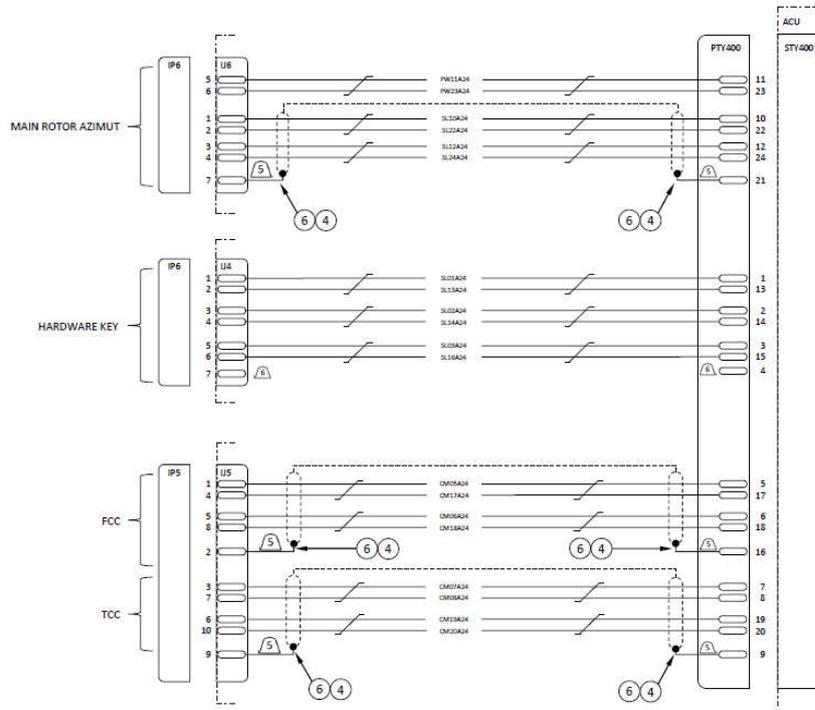


Abbildung 6-112: Verdrahtungsplan des Kabels X99-0029.300.99.05 – Signalkabel ACU



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Die Kabelzeichnungen der internen Kabelverbindungen (innerhalb der Systemkomponenten EMA und APCU) wurden einem Prüf- und Freigabedurchlauf unterzogen und nach Einarbeitung erkannter und notwendiger Änderungen in den K30-Stand überführt.

Mit Erreichung des K30 Stands (im Rahmen des System CDRs) für alle externen und internen Kabelverbindungen wurde der Designprozess erfolgreich abgeschlossen. Der damit verbundene Abschluss des Arbeitspakets AP 560 stellt den Übergang in den Fertigungsprozess im Arbeitspaket AP 570 dar.

6.5.2 AP 570 Beschaffung und Fertigung

Die Beschaffung der Einzelkomponenten und die anschließende Fertigung und Montage, sowie die Qualifikation der Verkabelung wurden im AP 570 durchgeführt. Bei der Beschaffung wurde im Hinblick auf die ursprünglich geplante Windkanalerprobung und den damit verbundenen Anforderungen auf vorschriftenkonformes Material geachtet und entsprechend qualifizierte Lieferanten zurückgegriffen.

Zunächst wurde ein kompletter externer Kabelsatz (mit Kabellängen aus dem CAD Modell bestimmt) für einen Installationstest (s. den folgenden Absatz sowie Abbildung 6-113) mit Systemkomponenten gefertigt.

Der Installationstest wurde mit den wesentlichen Komponenten der APCU (APCU-Gehäuse-Grundkörper, Kabelkanal PCU-EMA und Kabelkanal ACU-EMA) und einem kompletten Qualifikationsmuster des EMAs auf dem im AP 600 gefertigten Rotorkopf des Systemprüfstands durchgeführt. In der nachfolgenden Abbildung 6-113 ist die Verlegung der Sensor- und Leistungskabel zwischen dem EMA und der APCU dargestellt. Es ergaben sich keine Änderungen an Kabellängen oder Verlegung, obwohl die Abbildungen den eingeschränkten Bauraum für die Installation der einzelnen Kabel belegen.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

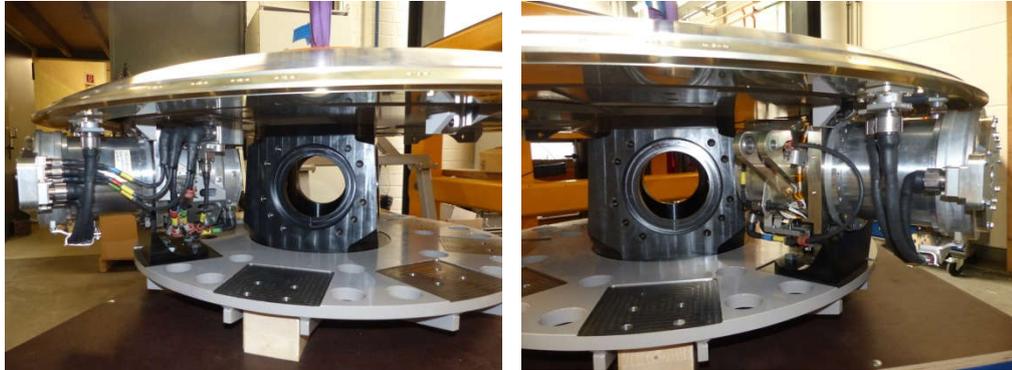


Abbildung 6-113: Verlegung der Sensor- und Leistungskabel zwischen
EMA und APCU

Nach dem positiven Abschluss des Integrationstests wurde seitens ZFL dem Lieferanten die Freigabe zur Fertigung der restlichen Lose durch erteilt. Beispiele für die gefertigten externen Verbindungskabel zwischen APCU und EMA finden sich in Abbildung 6-114 bis Abbildung 6-116.

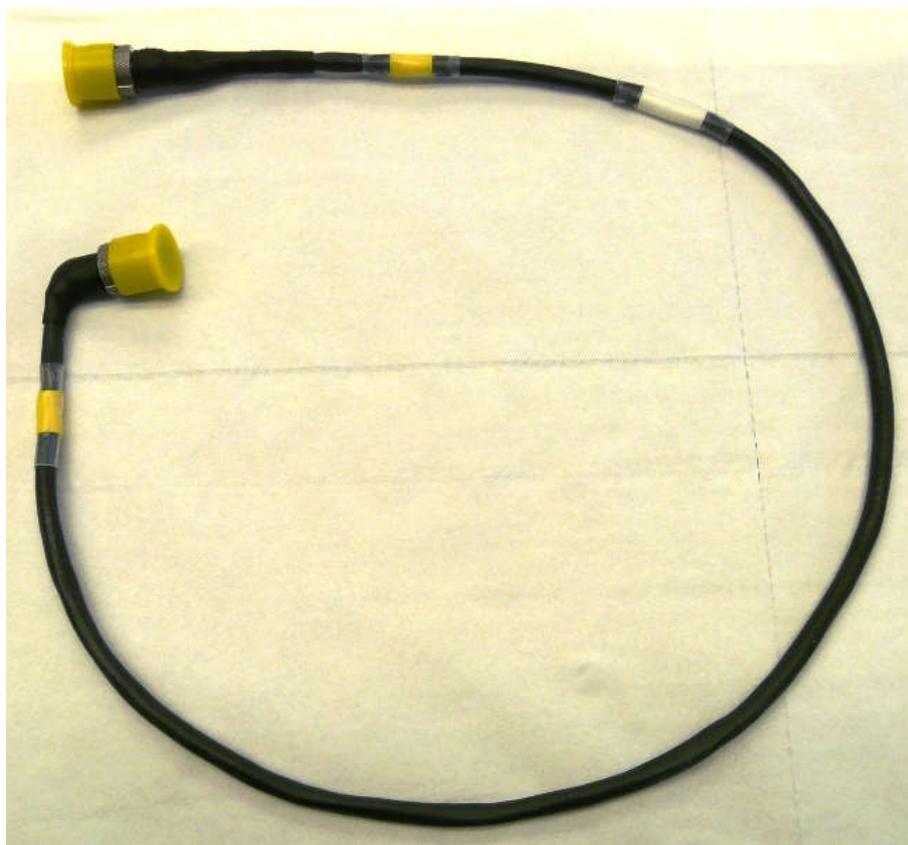


Abbildung 6-114: Sensorkabel Getriebe Extern, X99-0029.98.01



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Abbildung 6-115: Leistungskabel Extern, X99-0029.98.03

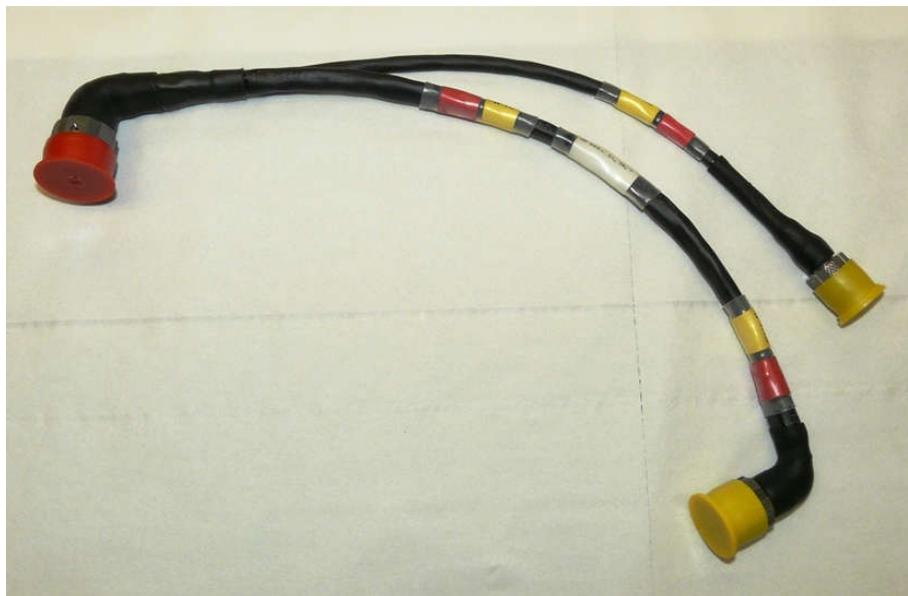


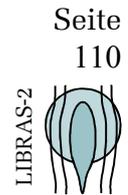
Abbildung 6-116: Sensorkabel C EMA Extern, X99-0029.98.07

Im Gegensatz dazu wurden die Anteile der Verkabelungen, die innerhalb von Systemkomponenten wie dem EMA und APCU zu realisieren waren weitestgehend intern bei ZFL gefertigt, da aufgrund der Einbausituation Anpassungen bei der Montage erfolgen mussten und die Fertigstellung teils nur im Rahmen der Integration möglich war. Eine Ausnahme hiervon bilden die im AP 300 von ZFL konstruierten Flex-Verbinde (vgl. Abschnitt 6.3.1)

Mit der Fertigung aller externen Kabelsätze für die Erprobungsträger des EMA (vgl. Abschnitt 6.2.5) und der Fertigung aller internen Kabelsätze (Signal- und Leistungsverteilung) für das Qualifikationsmuster (vgl. Abschnitt 6.3.2) und die beiden Erprobungsmuster (vgl. Abschnitt 6.3.4) der APCU wurden die Arbeiten im Arbeitspaket AP 570 vollständig abgeschlossen.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



6.6 AP 600 Integration und Erprobung (drehender Prüfstand)

Vor der Erprobung der Gesamtsteuerung im Windkanal wurde die Integration und Erprobung des Systems in einem dafür konzipierten Prüfstand durchgeführt. Ergänzend fanden Versuche mit dem Gesamtsystem im System-Integration-Laboratory Tests (SIL) bei SAC statt. In deren Verlauf konnte erstmals das LIBRAS[®]-System mit dem von SAC entwickelten und einem auf einer kommerziellen Hardware Plattform umgesetzten Flight Control Computer (FCC) betrieben werden. Die in Vorbereitung der Windkanalerprobung zunächst zusätzlich geplanten Versuche am SAC Whirl-Tower wurden jedoch im Verlauf des Vorhabens nach Abstimmung zwischen SAC und ZFL ersatzlos fallen gelassen. Nach dem Safety Assessment und aufgrund vorliegender Versuchsergebnisse waren beide Parteien sich darin einig, dass der Versuch am Whirl Tower keine zusätzlichen neuen Erkenntnisse hinsichtlich einer späteren Windkanalerprobung liefern kann und damit auch die Zulassung des LIBRAS[®]-Systems zur Erprobung durch den Windkanalbetreiber nicht in Frage gestellt wird.

6.6.1 AP 610 Konstruktion/Fertigung/Adaption Prüfstand

Im AP 610 wurde die innerhalb von LIBRAS (1) begonnene Konstruktion eines drehenden Prüfstandes, des Systemprüfstands, abgeschlossen. Die ausgeführte Konstruktion dieses Prüfstands erlaubt es, das LIBRAS[®]-System vollständig entsprechend der späteren Anwendung zu betreiben. In enger Abstimmung mit SAC wurden dabei die Schnittstellen des Prüfstands zu den Systemkomponenten so ausgeführt, dass die Kompatibilität zwischen dem Systemprüfstand bei ZFL, dem SIL bei SAC und dem Windkanal gegeben war.

Den konstruktiven Arbeiten am Systemprüfstand ging die Prüfung bezüglich der Verwendbarkeit von Komponenten des bei ZFL aus anderen Entwicklungsprogrammen vorhandenen Rotorkopfprüfstands voraus. Dieser Prüfstand musste jedoch für die drehende Erprobung des LIBRAS[®]-Systems von 6 auf 4 Rotorblätter umgerüstet werden. Hierzu wurde ein vereinfachter Rotorkopf zur Aufnahme der APCU und der EMAs für den Systemprüfstand konstruiert, der zusammen mit dem vollständig eingerüsteten LIBRAS[®]-System für die Erprobung auf dem Systemprüfstand in Abbildung 6-117 gezeigt ist.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

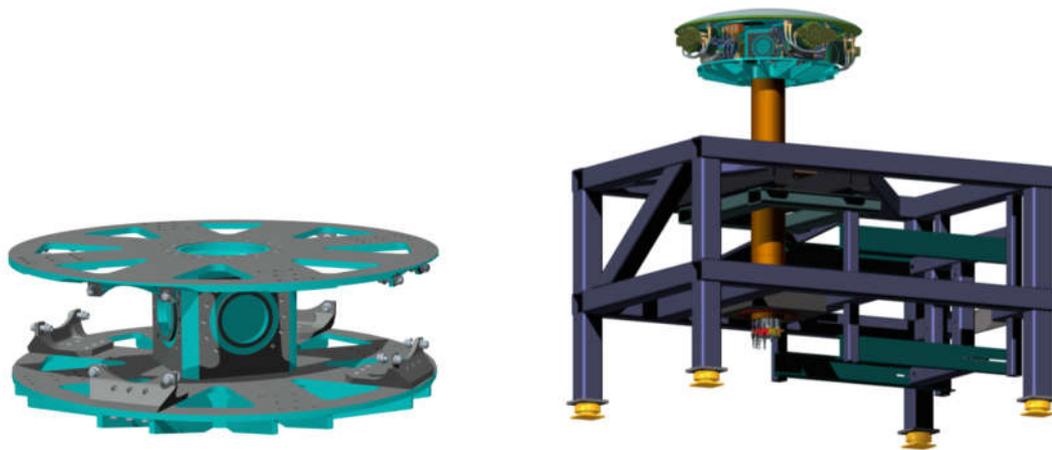


Abbildung 6-117: Rotorkopf zur Montage und auf Systemprüfstand
 eingerüstetes LIBRAS[®]-Systems

Zunächst war geplant am Systemprüfstand eine baugleiche Ausführung des SAC Schleifrings (für SIL und Windkanalerprobung) zu bestellen. Aus exportrechtlichen Gründen war dies aber nicht zu realisieren. Für den Zukauf des Schleifrings, der Energie und Signale vom LIBRAS[®]-System aus dem drehenden in das stehende System überträgt, wurde eine eigene Spezifikation erstellt und zusammen mit **dem Lieferanten** die Entwicklung des Schleifrings auf Basis einer bestehenden Industrielösung durchgeführt. Nach einem Review der Fertigungsunterlagen des Schleifrings durch ZFL wurde dann die Fertigung freigegeben (s. folgender Abschnitt 6.6.2).

Im Zuge der Fertigung des Schleifrings erfolgten weitere Detailabstimmungen zur elektrischen Signal- und Leistungsverteilung mit dem Lieferanten sowie Änderungen aufgrund von Herstellungsproblemen. Die konstruktiven Unterlagen zum Schleifring wurden dem entsprechend mehrfach aktualisiert.

Die erweiterbare Konstruktion des Systemprüfstands ermöglicht es, zusätzliche Funktionalitäten bei Bedarf zu ergänzen. Im Laufe des Vorhabens wurde der Systemprüfstand um einen Rotorblattsimulator (4-fach ausgeführt) erweitert. Die Konstruktion des Rotorblattsimulators erfolgte basierend auf Informationen von SAC zur Dynamik des X2 Rotorblatt.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Die ausgeführte Konstruktion entspricht in ihrem Aufbau und den dynamischen Eigenschaften dem von SAC gefertigten Rotorblattsimulator, der für die Erprobung am SIL vorgesehen ist.

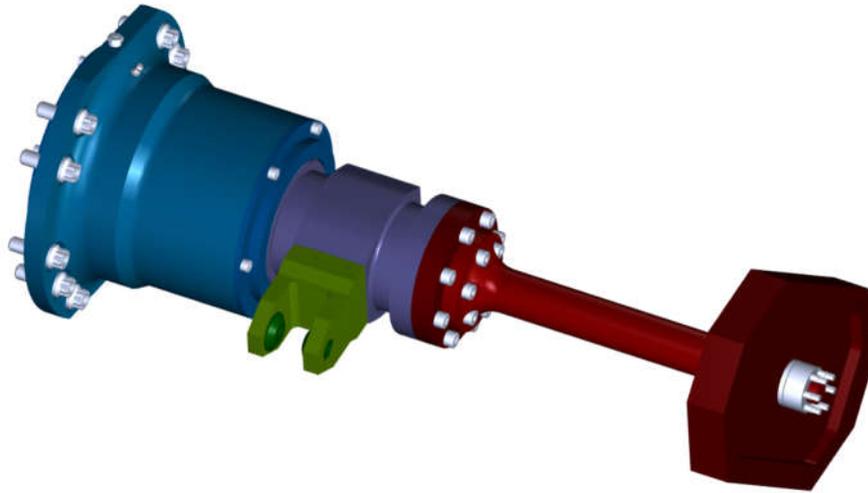


Abbildung 6-118: CAD-Entwurfsmodell für den Rotorblattsimulator

Abbildung 6-118 zeigt das CAD-Modell für den Rotorblattsimulator. Die wesentlichen Komponenten des Rotorblattsimulators (von links nach rechts) sind der Blattanschluss (blau) und die Welle (lila) mit dem Blatthebel (grün). Das eigentliche Blattersatzmodell besteht aus einem Torsions- und Biegestab (rot) und einer daran montierten Masse (dunkelrot). Die Integration der vier Rotorblattsimulatoren auf dem Rotorkopf des Systemprüfstands zeigt Abbildung 6-119.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

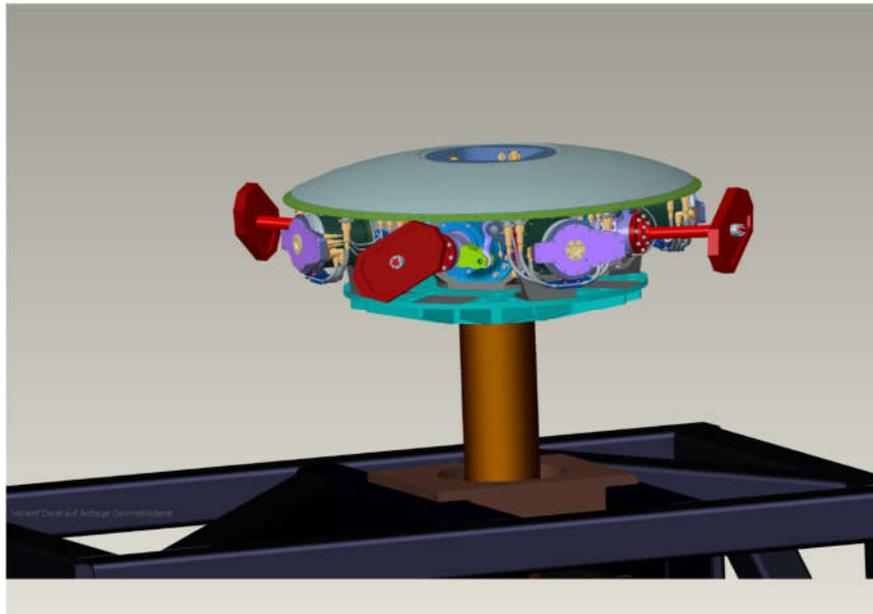


Abbildung 6-119: CAD-Modell zur Integration von vier Rotorblattsimulatoren und dem LIBRAS[®]-System auf dem Rotorkopf des Systemprüfstands

Für die Rotorblattsimulatoren wurden Berechnungen zur Festigkeit der Komponenten durchgeführt. Diese bestätigten, dass sowohl die Schraubverbindungen als auch die Passstifte, die die auf die Verbindung zwischen dem Hebel/Blattlagerwelle wirkende Querkraft aufnehmen, eine für den Versuchsbetrieb bis zu einer maximalen Rotordrehzahl von 513rpm ausreichende Sicherheit aufweisen. Die in diesem Zusammenhang ebenfalls durchgeführte numerische Modalanalyse anhand des CAD-Modells (s. Abbildung 6-120) ergab, dass die Eigenfrequenzen des Blattsimulators einen ausreichenden Abstand zu den Anregungsfrequenzen aus dem Betrieb des Systemprüfstands und des LIBRAS[®]-Systems haben. Des Weiteren bestätigte die Modalanalyse die charakteristischen Eigenschaften des von SAC für den SIL entworfenen Rotorblattsimulators, womit die Vergleichbarkeit von Ergebnissen an beiden Prüfständen bei Versuchen mit den Rotorblattsimulatoren abgesichert war.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

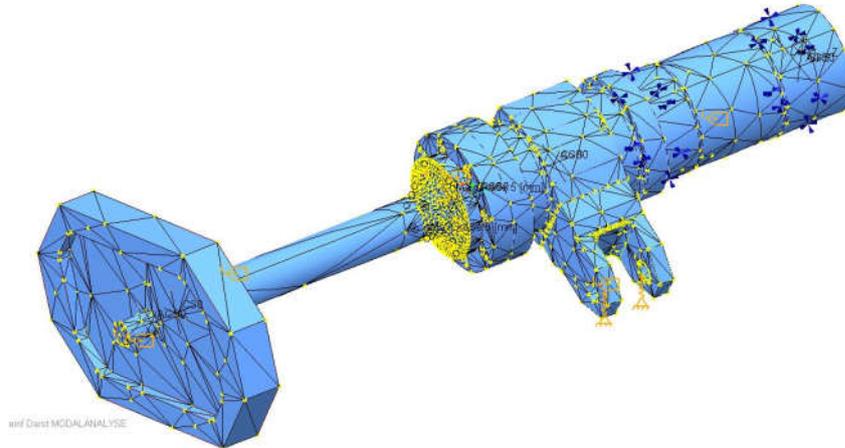


Abbildung 6-120: CAD-Modell des Rotorblattsimulators für die numerische Ermittlung der Eigenfrequenzen und -formen.

6.6.2 AP 620 Beschaffung und Fertigung Prüfstand

In diesem Arbeitspaket wurden sämtliche zum Aufbau des Systemprüfstands notwendigen Bauteile beschafft, gefertigt und montiert.

Nach entwicklungsbegleitender Betreuung und Abstimmung mit **dem Lieferanten** erfolgte die Freigabe zur Schleifringfertigung, die ebenfalls von ZFL begleitet wurde. Die gefertigten mechanischen Komponenten des Schleifrings und die Haltevorrichtung zeigt Abbildung 6-121.



Abbildung 6-121: Mechanische Komponenten und Schleifring in der Haltevorrichtung

Abbildung 6-122 zeigt den getesteten und anschlussfertigen Schleifring bei Anlieferung, komplett mit Anschlüssen zur Energieversorgung, zum TCC und zum LIBRAS®-System auf dem Rotorkopf. Die Integration des Schleifrings am Systemprüfstand zeigt die nachfolgende Abbildung 6-123.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Abbildung 6-122: Schleifring X99-0029-970-006 für den Einbau in den Systemprüfstand X99-0029.970 bei Anlieferung



Abbildung 6-123: Integration des Schleifrings am Systemprüfstand

Abbildung 6-124 und Abbildung 6-125 zeigen den Rotorblattsimulator nach dem Zusammenbau und die Integration auf dem Rotorkopf des Systemprüfstands.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Abbildung 6-124: Zusammenbau des Rotorblattsimulators am Systemprüfstand

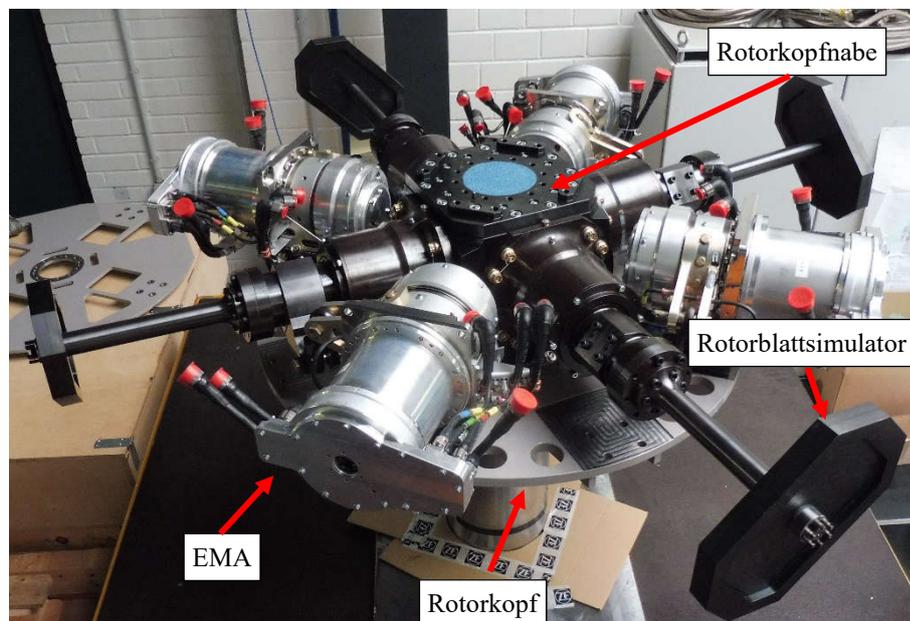


Abbildung 6-125: Rotorkopf am Systemprüfstand nach Montage der EMAs und der Rotorblattsimulatoren



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelnsteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



6.6.3 AP 630 Erprobung Gesamtsystem bei ZFL

Innerhalb des AP 630 wurden die LIBRAS[®]-Systemkomponenten in verschiedene Prüfaufbauten integriert und erprobt. Neben der in diesem Arbeitspaket bereits bei Beantragung geplanten Integration und Erprobung auf dem Systemprüfstand erfolgten zusätzlich umfangreiche Erprobungsversuche im Rahmen der Inbetriebnahme der APCU z.B. aufgrund von Fehlerereignissen beim Betrieb an der nominalen 270VDC Versorgungsspannung, zum anderen aber auch im Zusammenhang mit der Optimierung der Parameter für die kaskadierte Positionsregelung des EMAs.

Die 270VDC Energieversorgung für die Versuche zur Inbetriebnahme der APCU wurden vom E-Rack (vgl. Abschnitt 6.2.3) bereitgestellt. Die APCU wurde für diese Versuche zum Großteil mit einem EMA verbunden und mit 1, 2 oder 3 aktiven Lanes betrieben. Ansichten zum Versuchsaufbau und der Steuerung des Versuchsbetriebs, die auf der Ansteuerung für den Fatigue- und Funktionsprüfstand (vgl. Abschnitt 6.2.3) basierte, zeigen Abbildung 6-126 und Abbildung 6-127.

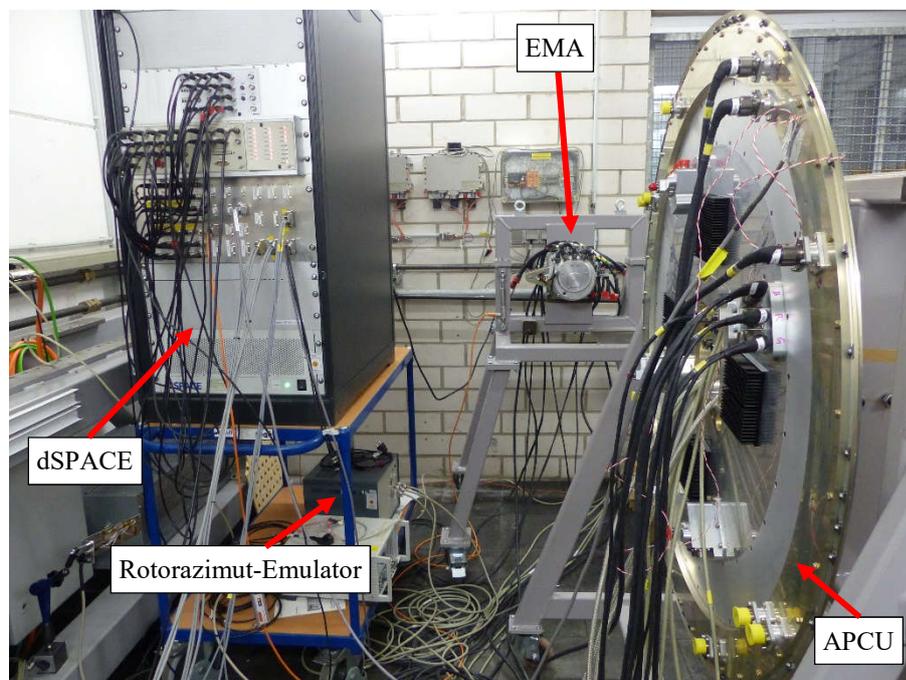


Abbildung 6-126: Aufbau zur Inbetriebnahme der ersten APCU im Verbund mit einem EMA im ZFL Prüfstandzentrum



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Abbildung 6-127: Versuchssteuerung - Ansteuerung und Monitoring der APCU mit dem TCC inkl. FCC Emulator (links) und dSPACE-System zur Freigabe und Steuerung der Energieversorgung über das E-Rack (rechts)

Im Zuge der schrittweisen Inbetriebnahme konnten zunächst erfolgreich verschiedene Funktionen der APCU in den folgenden Bereichen demonstriert werden:

- Power-Up mit 270VDC Energieversorgung
- Kommunikation mit TCC
- Kommunikation mit FCC

Im Zuge der notwendigen Schritte bei der Kalibrierung der im EMA integrierten Sensorik zeigten sich Probleme in Form von häufigen automatischen Abschaltungen der APCU aufgrund von überhöhten Phasenströmen, deren Ursache zunächst nicht eindeutig geklärt werden konnte.

Zur Untersuchung wurde im ZFL Prüfstandzentrum ein zusätzlicher zweiter reduzierter Testaufbau, bestehend aus einer PSU, einer PCUC und einer ACU, vorbereitet. Dieser in Abbildung 6-128 gezeigte Testaufbau ermöglichte es das System in einer 1 Lane – 1 Blatt Konfiguration mit einem EMA zu betreiben. Aufgrund der guten Zugänglichkeit war es in diesem Testaufbau auch möglich Steuersignale der Treiberbausteine mit Hilfe externer Messmittel im Betrieb zu erfassen, die nicht durch die ACU an den TCC übermittelt werden. Des Weiteren konnte in diesem Aufbau auch die PSU überbrückt werden, so dass auch Versuche mit einer niedrigeren Zwischenkreisspannung als den nominellen 270VDC möglich waren.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

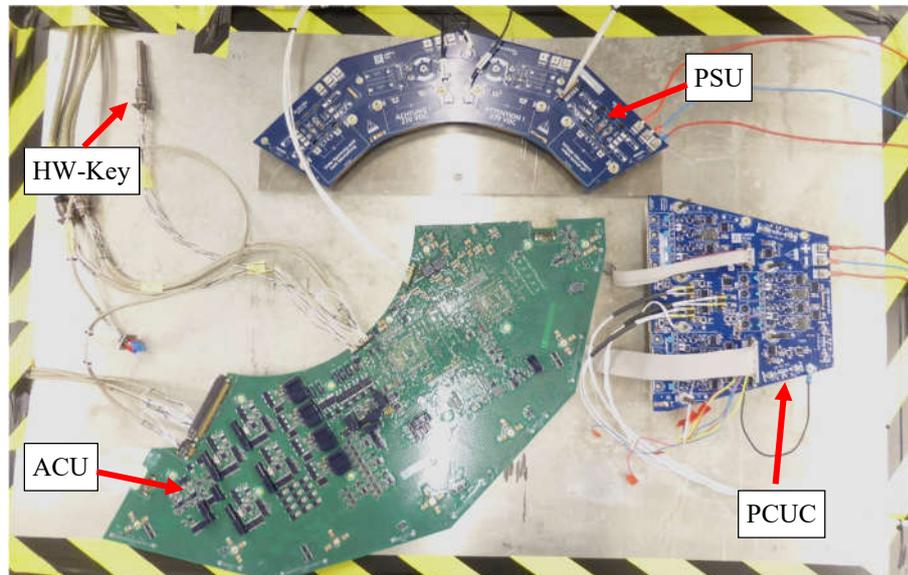


Abbildung 6-128: Testaufbau zur Untersuchung der Ursache für Überstromabschaltung

Bei den Versuchen mit einer niedrigen Versuchsspannung von 30VDC konnten an diesem Aufbau zunächst weitere Funktionen der APCU demonstriert werden, die jedoch mit 270VDC erneut durch automatische Abschaltungen aufgrund überhöhter Phasenströme unterbrochen wurden.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurden in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IZM erste Modifikationen an einem PCUC Erprobungsmuster vorgenommen und im Versuch am Fraunhofer IZM (unter ZFL-Beteiligung) und im Anschluss daran sowohl am ZFL Testaufbau (s. Abbildung 6-128) als auch nach Integration in die APCU (s. Abbildung 6-126) bei ZFL experimentell verifiziert. Die Versuche bei ZFL bestätigten zunächst die Wirksamkeit der am Fraunhofer IZM zuvor ermittelten und bereits getesteten Modifikation zur Erhöhung der EMV-Verträglichkeit, aber im Testbetrieb mit 270VDC kam es zu einer Häufung von Ausfällen der für die Ansteuerung der Leistungshalbleiter (MOSFET - Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) notwendigen Treiberbausteine.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Zur Lösung wurde nach Diskussion mit dem Fraunhofer IZM und Experten aus dem ZF-Konzern zusätzlich als weitere Modifikation eine Absicherung der Treiberbausteine mit Dioden auf dem verwendeten PCUC Erprobungsmuster durch ZFL integriert und am ZFL-Testaufbau erprobt.

Leider zeigten sich in der Erprobung erneut Ausfälle der Treiberbausteine. Nach weiteren Diskussionen und Analysen der Versuchsergebnisse wurden in der nächsten Modifikationsstufe die MOSFET Bausteine durch IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) Bausteine ersetzt, was einen stabilen Betrieb mit einem geregelten EMA ohne Überstromabschaltungen und ohne Ausfälle von Treiberbausteinen ermöglichte. Aufgrund dieser positiven Ergebnisse wurden die verbliebenen, funktionstüchtigen PCUCs im AP 300 auf den neuen Bauzustand umgerüstet und zunächst die zweite APCU mit diesen ausgestattet (vgl. Abschnitt 6.3), mit der weitere Erprobungsversuche durchgeführt wurden. Die APCU wurde in einer leicht veränderten (Zusammen-)Bauform (s. Abbildung 6-129) im Versuch eingesetzt. Diese ermöglichte es, im Betrieb direkte Messungen der (Klein-)Signale zwischen PCUC und ACU zu machen. In dieser Konfiguration gelang nach umfangreichen Versuchen, das LIBRAS[®]-System in der beschriebenen Hardware-Konfiguration so zu betreiben, dass wesentliche Funktionen auch in der Erprobung nachweisbar waren und ein sicherer Erprobungsbetrieb am SIL bei SAC in den ermittelten Betriebsgrenzen (u.a. eine auf 200VDC reduzierte Zwischenkreisspannung) gewährleistet werden konnte. Letzteres wurde durch die problemlose Inbetriebnahme und die Ergebnisse aus der Erprobung im Arbeitspaket AP 640 nachdrücklich belegt.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Abbildung 6-129: Zweite APCU während der Erprobung und Inbetriebnahme mit PCUC in neuer Revision

Die in den Versuchen erfassten Messdaten wurden ausgewertet und archiviert. Exemplarische Ergebnisse der Auswertung aus der Erprobung finden sich im Arbeitspaket AP 650 (s. Abschnitt 6.6.5).

Am Systemprüfstand wurden die Versuche mit der ersten APCU unternommen (s. Abbildung 6-130), bevor diese für die Erprobung im Arbeitspaket AP 640 am SIL bei SAC zusammen mit 5 EMAs in die USA versendet wurde. Vor Aufnahme der Erprobung wurde erst die Inbetriebnahme des Systemprüfstands für die Erprobung mit der ersten APCU schrittweise vollzogen:

1. Drehend ohne Rotorkopf
2. Drehend mit Rotorkopf
3. Drehend mit Rotorkopf und vier EMAs
4. Drehend mit Rotorkopf, APCU und vier EMAs.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelsansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Im Betrieb zeigten sich in keinem der Schritte Effekte aufgrund einer wirksamen Unwucht des Aufbaus. Mit diesen Ergebnissen konnte der Systemprüfstand für die weitere Erprobung freigegeben werden.

Im Rahmen dieser Versuche konnte die Funktion des Systemprüfstands und des gefertigten Schleifrings für Drehzahlen bis zu der für das LIBRAS[®]-System spezifizierten (DNE) Rotordrehzahl von 513rpm nachgewiesen werden.



Abbildung 6-130: Systemprüfstand mit eingerüstetem LIBRAS[®]-System
 Die folgende Abbildung 6-131 zeigt Messdaten für den Rotorazimut PSI und die Rotorgeschwindigkeit PSI_SPEED, die von der APCU im 3-Lane Betrieb gemessen und über den Schleifring und die zusätzliche Prüfstandsverkabelung an den TCC übermittelt und von diesem aufgezeichnet wurde. Bei den Messwerten gilt zu beachten, dass diese von dem im stehenden System befindlichen Rotorazimut-Emulator stammen und nicht der realen Drehzahl des Systemprüfstands entsprechen. In dem exemplarisch gezeigten Versuchspunkt drehte der Rotorazimut Emulator mit einer Drehzahl von 301rpm, während der Systemprüfstand mit einer Drehzahl von 300rpm betrieben wurde.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

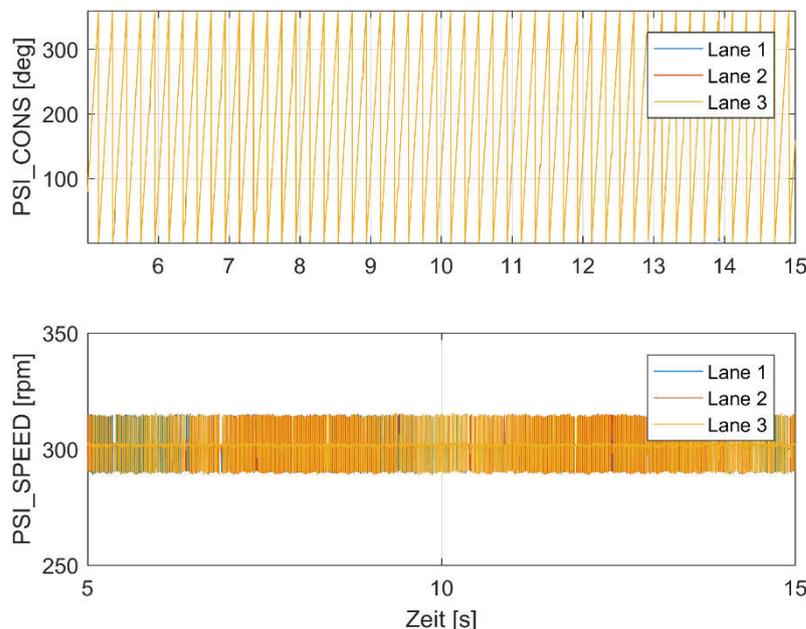


Abbildung 6-131: PSI und PSI Speed am Systemprüfstand

Begleitend zur Erprobung im Rahmen der Inbetriebnahme der APCU und in Vorbereitung auf die Erprobung am Systemprüfstand erfolgten in diesem Arbeitspaket Arbeiten zur Implementierung eines FCC-Emulators und der Aufbau einer unabhängigen zweiten Energieversorgung. Der FCC-Emulator, der bei den Versuchen zur Inbetriebnahme der APCU, am Fatigue- und Funktionsprüfstand und am Systemprüfstand zum Einsatz kam, wurde auf dem TCC (Abbildung 6-132) implementiert.

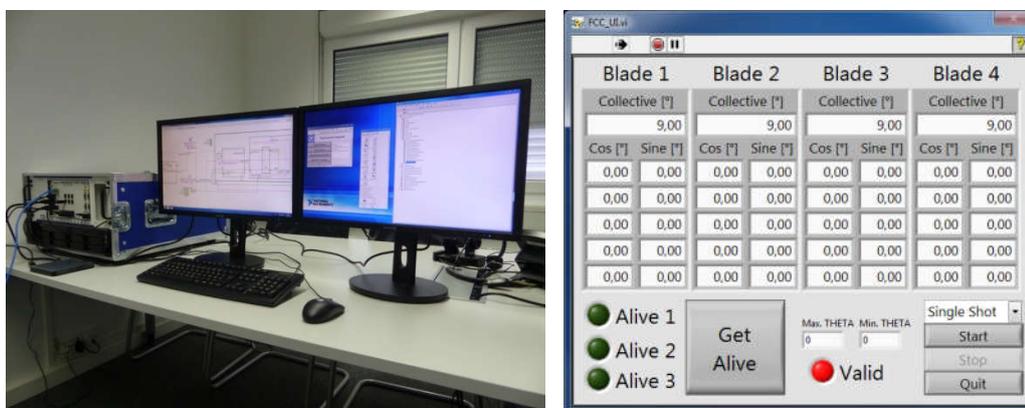


Abbildung 6-132: Erweiterter TCC für die Versuche am Systemprüfstand mit der zusätzlichen Funktion eines FCC-Emulators



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Abbildung 6-132 zeigt die mit LabVIEW erstellte Benutzeroberfläche des FCC-Emulators auf dem TCC, über die der Anwender blattindividuell die Steuervorgaben (Kollektiv, Zyklisch + IBC 1/rev – 5/rev) eingeben kann. Die Eingaben werden vor der Übertragung an die APCU auf ihren gültigen Wertebereich überprüft, wonach eine schrittweise Überblendung zu den neuen Steuervorgaben erfolgt.

Der Aufbau einer zusätzlichen, zweiten 270VDC-Energieversorgung am Systemprüfstand war erforderlich, weil die vorhandene Energieversorgung (E-Rack) durch den Einsatz am Fatigue- und Funktionsprüfstand für einen parallelen Versuchsbetrieb am Systemprüfstand zeitweise nicht zur Verfügung stand. Ein weiterer Vorteil ergab sich im Laufe der Inbetriebnahme der APCU. Mit Hilfe der zweiten alternativen Energieversorgung konnten Untersuchungen zur Abhängigkeit von auftretenden Fehlern der Versorgungsquelle für die Zwischenkreisspannung experimentell durchgeführt werden.

Für dieses Vorhaben wurden mit Unterstützung von MACCON der Trafo und der dreifach ausgeführte und damit zur Systemarchitektur kompatible 270VDC-Gleichrichter aus den Vorhaben InHuS und ELBA einer Funktions- und Sicherheitsprüfung unterzogen, die ohne negativen Befund blieb.

6.6.4 AP 640 SIL-Versuche bei SAC

Die Integration des LIBRAS®-Systems mit den von SAC bereitgestellten Komponenten (FCC, Schleifring, Power Supply etc.) erfolgte erstmals in einer sogenannten System-Integration-Laboratory Umgebung bei Sikorsky in Stratford. Hierzu wurden von SAC alle Komponenten in den X2-Rotorkopf integriert und mit den übrigen Systemkomponenten des Prüfstands zusammengeführt. In den folgenden Versuchen wurde alle system- und insbesondere sicherheitsrelevanten Funktionen erprobt. Diese Versuche bilden nach Änderungen an der Zielsetzung des Vorhabens (vgl. Abschnitt 3) den notwendigen Meilenstein zum erfolgreichen Abschluss des Vorhabens.

Nach Lieferung wurde das LIBRAS®-System bei SAC auf dem SIL-Prüfstand eingerüstet (s. Abbildung 6-133 - Abbildung 6-135). Bei der Einrüstung der vier EMAs und der APCU traten keine mechanischen



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Probleme auf – ein Beleg für die sehr gute Abstimmung zwischen ZFL und SAC während der Konstruktionsphase.

- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-133: Rotorkopf mit dem LIBRAS[®]-System vor der Einrüstung im SIL-Prüfstand bei SAC

Auf Abbildung 6-134 und Abbildung 6-135 sind links und rechts von dem Rotorkopf mit dem LIBRAS[®]-System eine den Prüfstand umschließende Kevlar-Plane zu sehen, die das Umfeld gegen wegfliegende Teile sichern soll.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-134: Einrüstung des Rotorkopf mit dem LIBRAS[®]-System
im SIL-Prüfstand bei SAC

- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-135: LIBRAS[®]-System im SIL-Prüfstand bei SAC

ZFL unterstützte SAC beim Aufbau und bei der Inbetriebnahme des LIBRAS[®]-Systems, der Bedienung des Test Control Computer und notwendigen Modifikationen von Parametern, die der Steuerung des Systems dienen. Aufgrund der in 2020 herrschende COVID-19 Pandemie



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



konnte die Betreuung durch ZFL nicht direkt vor Ort erfolgen. Stattdessen betreute und steuerte ZFL die Funktionen des LIBRAS[®]-Systems über einen Internet-basierten Dienst, der Audio und Video Daten aus dem SIL mit geringen Latenzzeiten nach Deutschland übertrug. Die Steuerung des Prüfstands, die Vorgabe der Steuervorgaben des FCC und etwaige Einstellungen am TCC respektive an der Konfiguration des LIBRAS[®]-Systems erfolgten aus dem Kontrollraum (s. Abbildung 6-136).

- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-136: SIL Test Control Room bei SAC

Die in den Versuchen erfassten Messdaten wurden dann im direkten Anschluss an den jeweiligen Versuchstag elektronisch an ZFL übermittelt und ausgewertet. Am SIL wurden die im AP 630 bei ZFL in der Erprobung nachgewiesenen Funktionen des LIBRAS[®]-Systems in allen wesentlichen Eigenschaften bestätigt. Ein exemplarische Darstellung der Ergebnisse findet sich dazu in dem folgenden Abschnitt 6.6.5.

6.6.5 AP 650 Auswertung und Dokumentation

Die in den beidem vorherigen Arbeitspaketen AP 630 und AP 640 erfassten Messdaten wurden im AP 650 analysiert. Die Ergebnisse der Auswer-



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



tung sind in den folgenden Abbildungen dokumentiert und belegen anhand von ausgesuchten Messgrößen exemplarisch wesentliche Funktionen des LIBRAS[®]-Systems:

- THETA: Position Blatteinstellwinkel
- THETA_SPEED: Geschwindigkeit Blatteinstellwinkel
- PHI: Position Motorwelle
- PHI_SPEED: Geschwindigkeit Motorwelle
- PSI: Position Rotorazimut
- PSI_SPEED: Geschwindigkeit Rotorazimut
- I_PHASE: Phasenströme U, V, W.

Der im Folgenden in einzelnen Abbildungen zu erkennende (Rest-)Regelfehler für den Blatteinstellwinkel THETA zwischen dem Soll- und dem Ist-Wert ist für den Nachweis der Systemfunktionen vernachlässigbar. Grund für diesen Regelfehler ist die konservative Parametrisierung der kaskadierten Reglerstruktur in der Positionsregelung zugunsten des funktionalen Nachweises in der Erprobung. Dies stellt jedoch kein systembedingtes Problem dar, da schon im Vorhaben InHuS anhand von Versuchsergebnissen belegt werden konnte, dass mit der Reglerstruktur des LIBRAS[®]-Systems bei korrekter Parametrisierung die Anforderungen an die Regelgenauigkeit, wie sie für eine Flugsteuerung gelten, erfüllt werden können.

Die folgenden Abbildungen (Abbildung 6-137 - Abbildung 6-138) zeigen Ergebnisse für ein Blatt aus einem Versuchspunkt am Prüfstand bei ZFL. Im Versuch wurde bei 360rpm (emuliert) eine 1/rev Einsteuerung mit der maximalen Amplitude von 12° bei einer Kollektiveinsteuerung von 9° eingesteuert.



LIBRAS-2

Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)

Schlussbericht

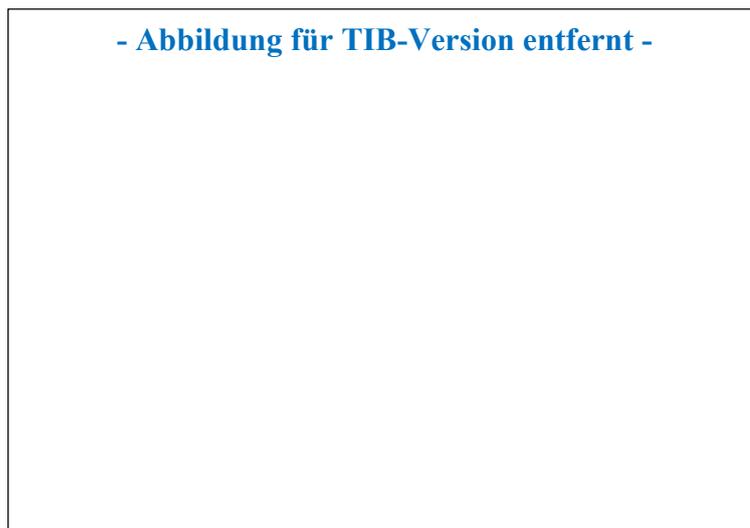
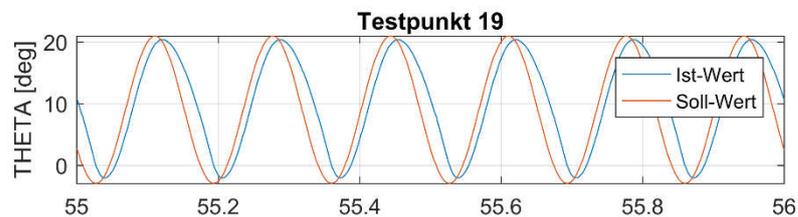


Abbildung 6-137: Einsteuerung 1/rev mit 12° bei 360rpm (1)

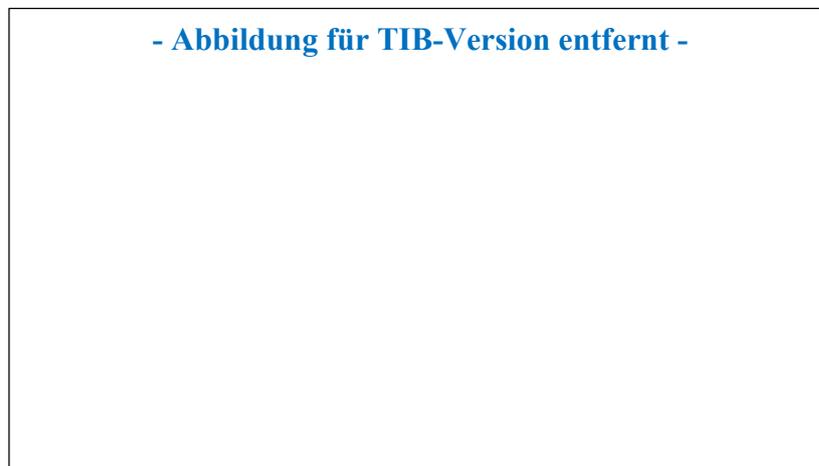
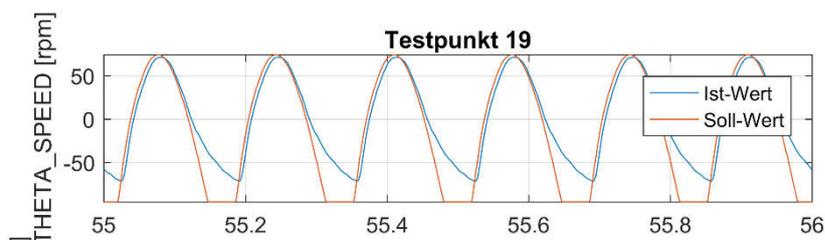


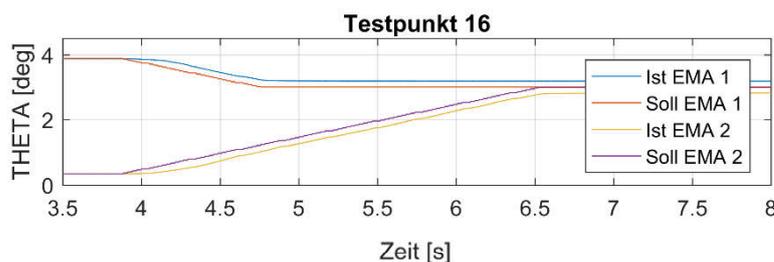
Abbildung 6-138: Einsteuerung 1/rev mit 12° bei 360rpm (2)



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Die folgende Abbildung 6-139 zeigt Ergebnisse für Blatt 1 und Blatt 2 aus einem Versuchspunkt am SIL bei SAC. Im Versuch wurde die Kollektiveinsteuerung auf 3° für beide Blätter geändert, wobei Blatt 1 und Blatt 2 unterschiedliche Ausgangspositionen hatten.



- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-139: Ein- Ausblenden Kollektivsteuer

Die folgenden Abbildungen (Abbildung 6-140 - Abbildung 6-145) zeigen Ergebnisse für Blatt 1 und Blatt 2 aus einem Versuchspunkt am SIL bei SAC. Im Versuch wurde bei 360rpm (emuliert) eine 1/rev Einsteuerung mit 4° bei einer Kollektiveinsteuerung von 9° auf Blatt 1 konstant eingesteuert, während auf Blatt 2 die 1/rev Einsteuerung von 4° ein- und ausgesteuert wurde.



LIBRAS-2

Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)

Schlussbericht

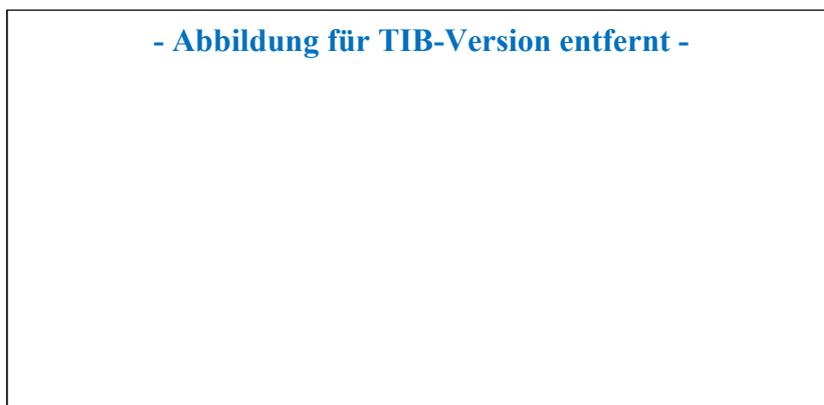
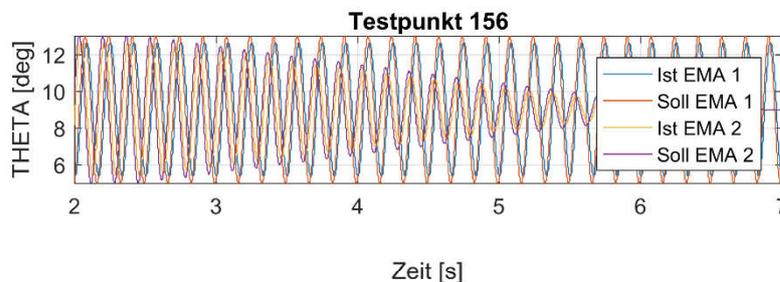


Abbildung 6-140: Blatt 1 und 2 – beim Ausblenden 1/rev – Blatt 2

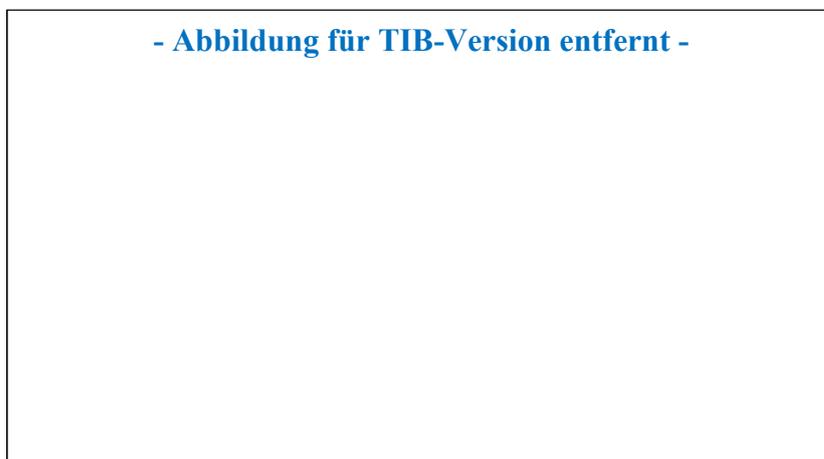
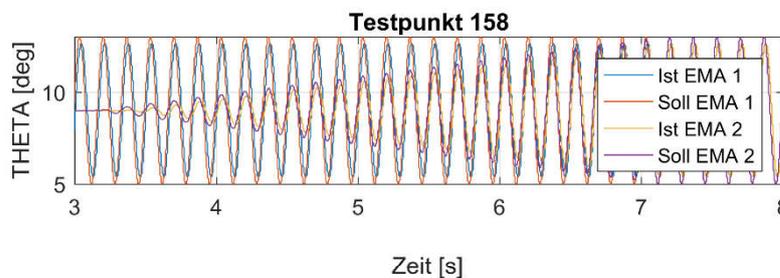


Abbildung 6-141: Blatt 1 und 2 – beim Einblenden 1/rev – Blatt 2



LIBRAS-2

Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)

Schlussbericht

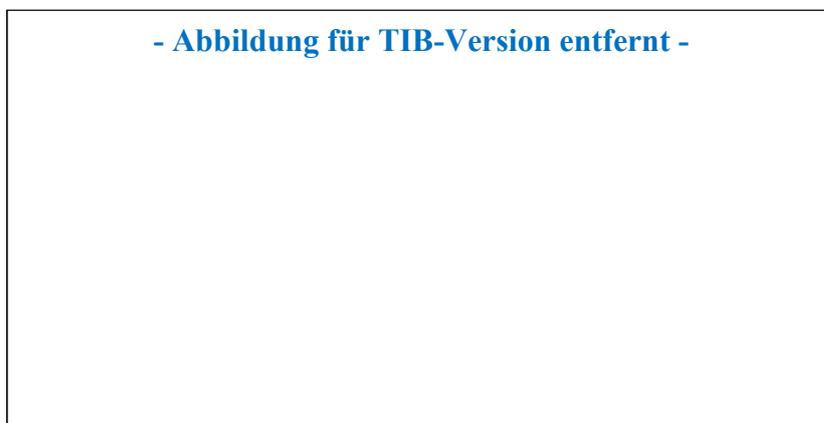
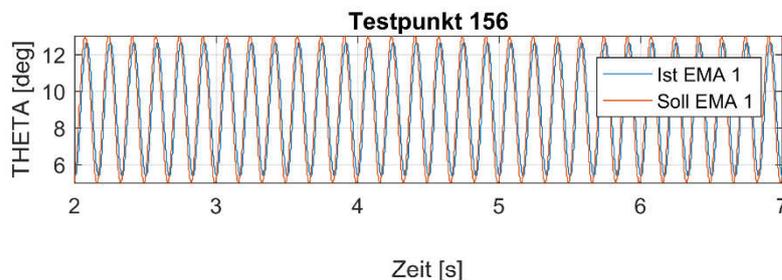


Abbildung 6-142: Blatt 1 – beim Ausblenden 1/rev – Blatt 2

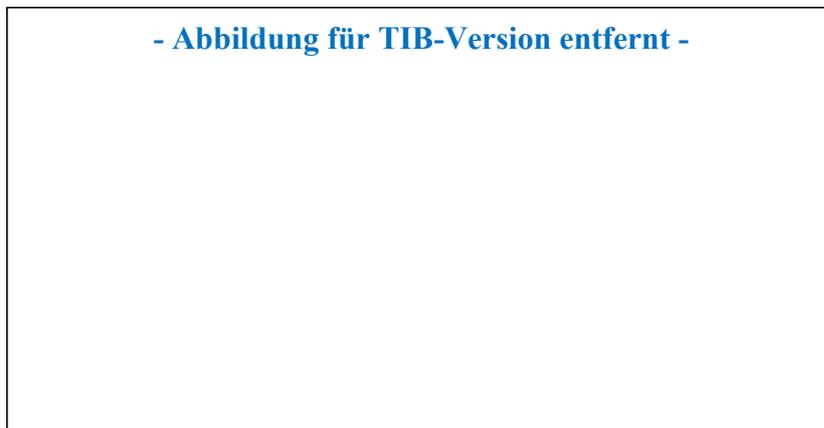
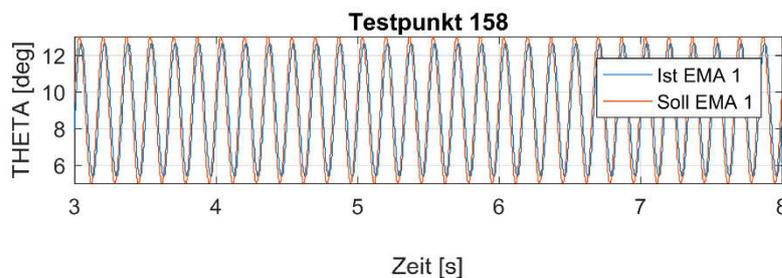


Abbildung 6-143: Blatt 1 – beim Einblenden 1/rev – Blatt 2



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

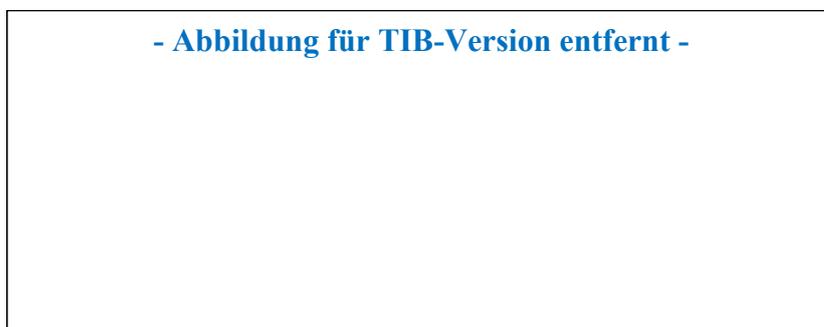
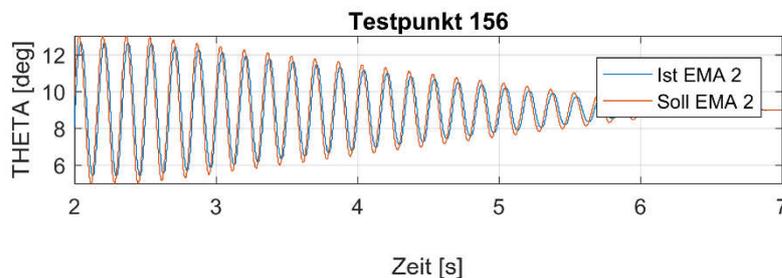


Abbildung 6-144: : Blatt 2 – beim Ausblenden 1/rev – Blatt 2

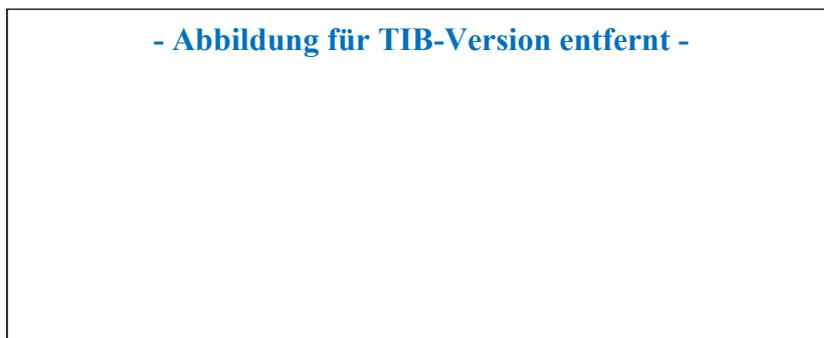
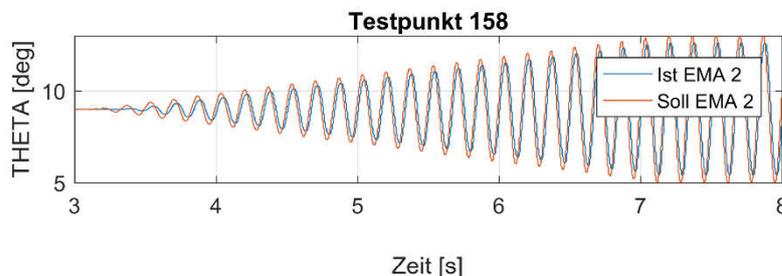


Abbildung 6-145: Blatt 2 – beim Einblenden 1/rev – Blatt 2

Die folgenden Abbildungen (Abbildung 6-146 - Abbildung 6-149) zeigen Ergebnisse für Blatt 1 aus einem Versuchspunkt am SIL bei SAC. Im Versuch wurde die Rotordrehzahl von 0rpm bei 360rpm (emuliert) ein- und



LIBRAS-2

Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)

Schlussbericht



ausgeblendet. Abbildung 6-147 stellt dabei einen besonderen Versuchspunkt dar, in dem der Ausfall des Rotorazimutsensors im laufenden Betrieb simuliert wurde.

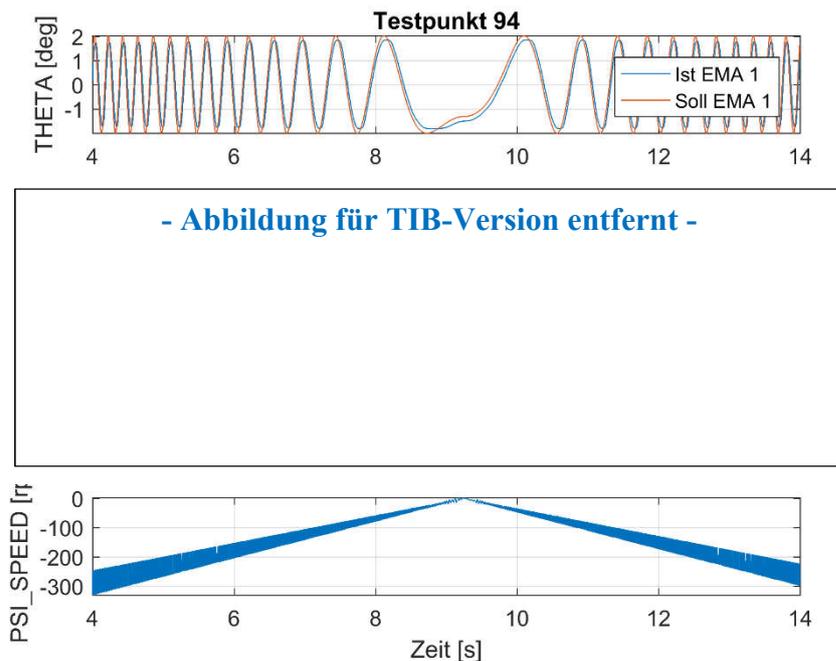


Abbildung 6-146: Ein- und Ausblenden PSI_SPEED

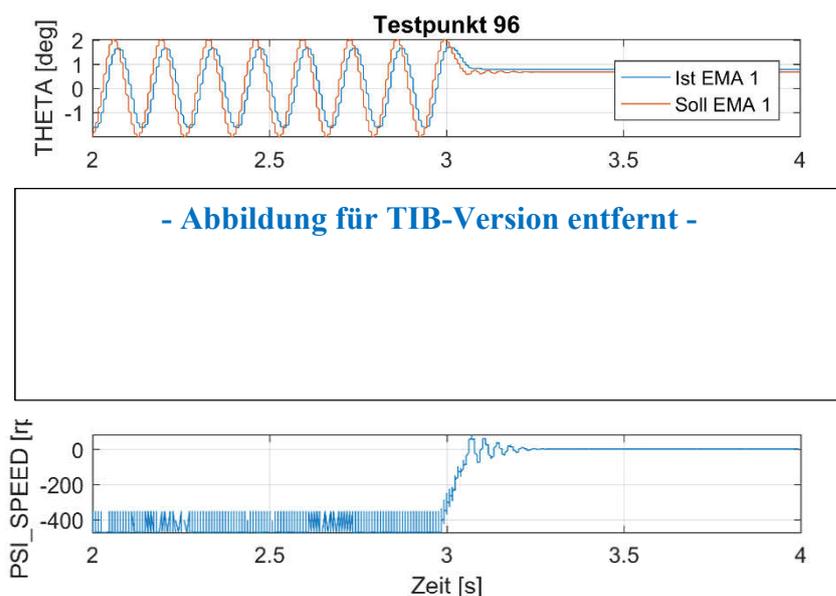


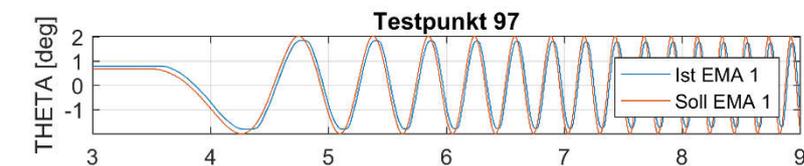
Abbildung 6-147: Schnelles Ausblenden PSI_SPEED (Ausfall Sensor)



LIBRAS-2

Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)

Schlussbericht



- Abbildung für TIB-Version entfernt -

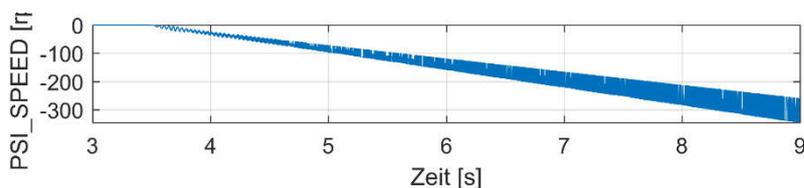
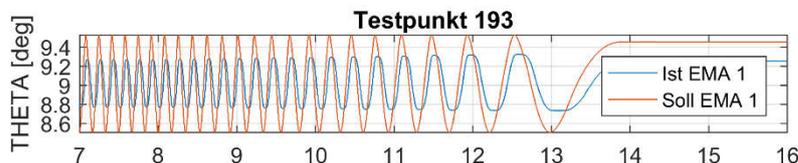


Abbildung 6-148: Einblenden PSI_SPEED



- Abbildung für TIB-Version entfernt -

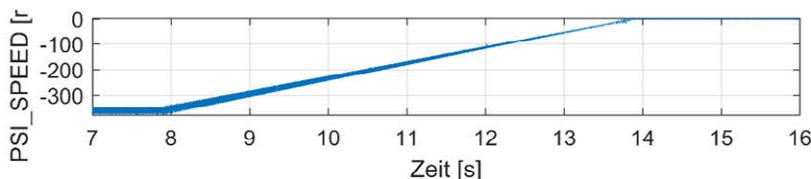


Abbildung 6-149: Ausblenden PSI_SPEED

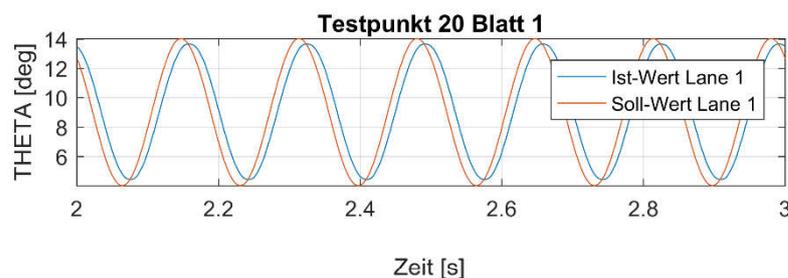
Die folgenden Abbildungen (Abbildung 6-150 - Abbildung 6-152) zeigen Ergebnisse für Blatt 1 und alle 3 Lanes aus einem Versuchspunkt am SIL



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



bei SAC. Das LIBRAS-System operierte als Triplex-System für die Signale und als Simplex-System für die aktiven Lanes der EMAs. Im Versuch wurde bei 360rpm (emuliert) eine 1/rev Einsteuerung mit 3° bei einer Kollektiveinsteuerung von 9° eingesteuert.



- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-150: 3-Lane Betrieb SIL – Lane 1 - Blade 1



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

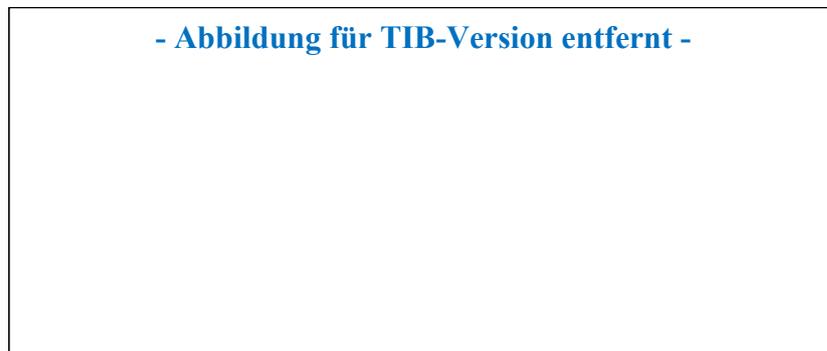
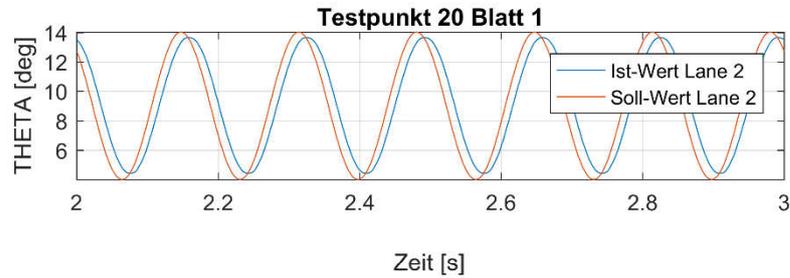


Abbildung 6-151: 3-Lane Betrieb SIL (3-Lane Sensorik / 1-Lane Power) – Lane 2 - Blade 1

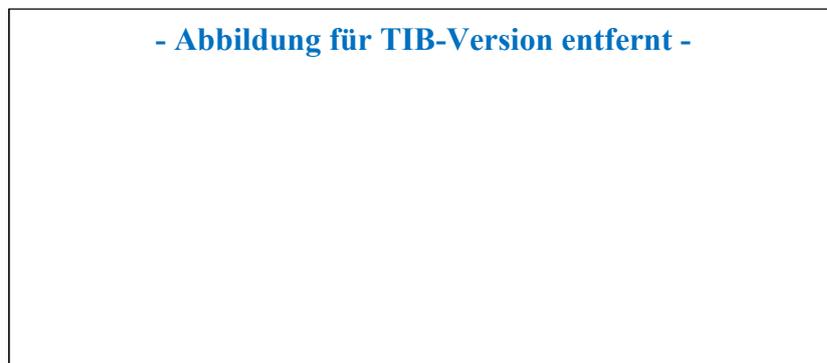
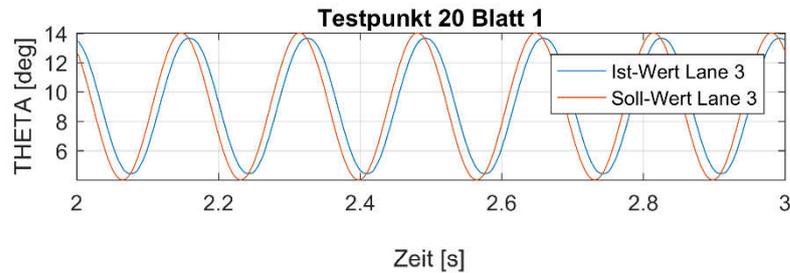


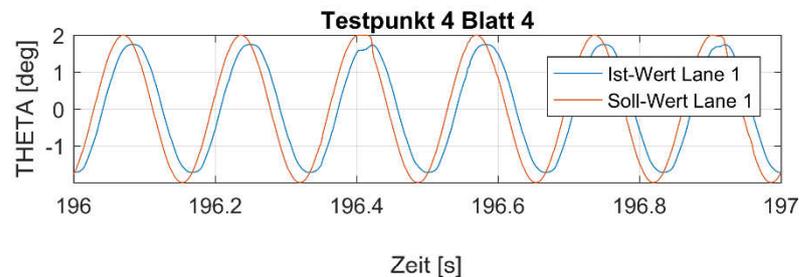
Abbildung 6-152: 3-Lane Betrieb SIL (3-Lane Sensorik / 1-Lane Power) – Lane 3 - Blade 1



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Die folgenden Abbildungen (Abbildung 6-153 - Abbildung 6-154) zeigen (Lane 1) Ergebnisse für Blatt 3 und Blatt 4 aus einem Versuchspunkt am Fatigue- und Funktionsprüfstand bei ZFL. Das LIBRAS-System operierte als Triplex-System für die Signale und als Simplex-System für die aktiven Lanes der EMAs. Im Versuch wurde bei 360rpm (emuliert) eine 1/rev Einstuerung mit 2° bei einer Kollektiveinstuerung von 0° eingesteuert.

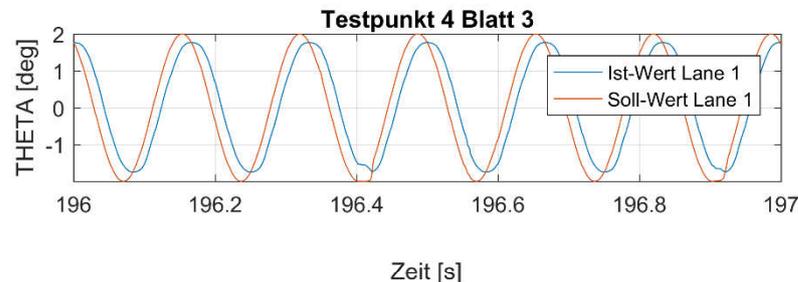


- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-153: 3-Lane Betrieb ZFL (3-Lane Sensorik / 1-Lane Power)



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-154: 3-Lane Betrieb ZFL (3-Lane Sensorik / 1-Lane Power)

Die folgenden Abbildungen (Abbildung 6-155 - Abbildung 6-157) zeigen Ergebnisse für Blatt 1 und Blatt 2 aus einem Versuchspunkt am SIL bei SAC. Das LIBRAS-System operierte als Triplex-System für die Signale und als Simplex-System für die aktiven Lanes der EMAs. Im Versuch wurde bei 360rpm (emuliert) eine kombinierte 2/rev und 3/rev Einsteuerung bei einer Kollektiveinsteuerung von 9° eingesteuert.

Der zu erkennende (Rest-)Regelfehler für den Blatteinstellwinkel THETA zwischen dem Soll- und dem Ist-Wert ist für den Nachweis der Systemfunktionen vernachlässigbar. Wie eingangs des Abschnittes 6.6.5 bereits ausgeführt wurde, ist der Grund für diesen Regelfehler die konservative Parametrisierung der kaskadierten Reglerstruktur. Grundsätzlich lassen sich aber mit der Reglerstruktur des LIBRAS®-Systems bei korrekter Parametrisierung die Anforderungen an die Regelgenauigkeit, wie sie für eine Flugsteuerung gelten, erfüllen.



LIBRAS-2

Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)

Schlussbericht

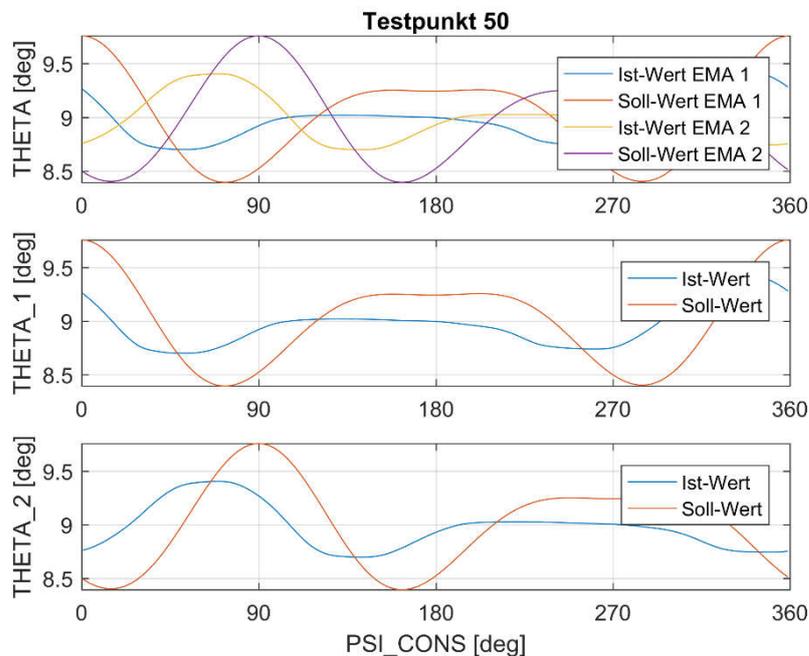


Abbildung 6-155: kombinierte 2/rev und 3/rev (1)

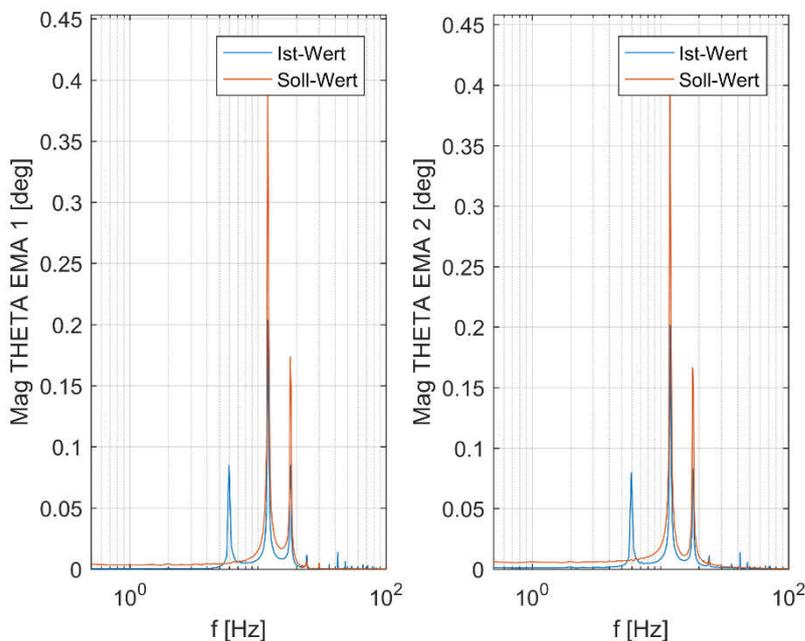


Abbildung 6-156: kombinierte 2/rev und 3/rev (2)



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht

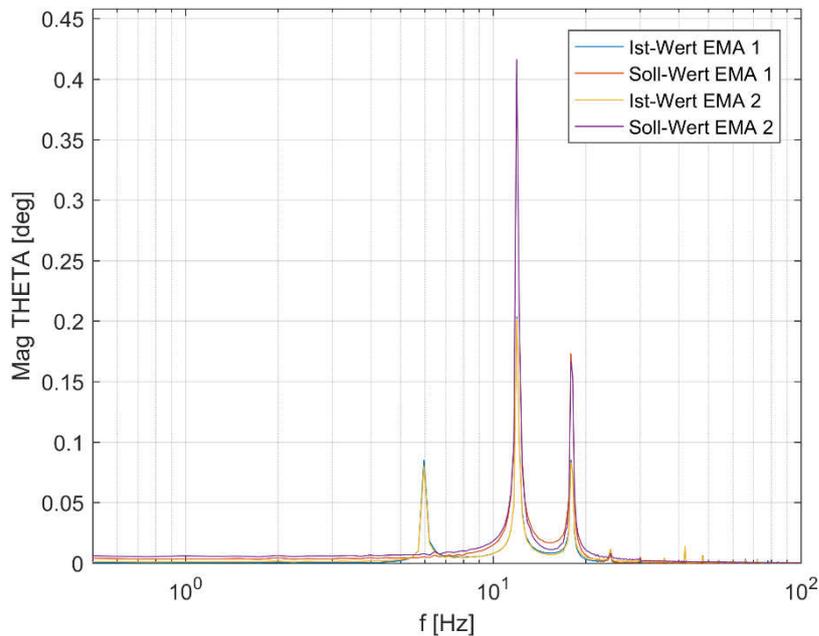


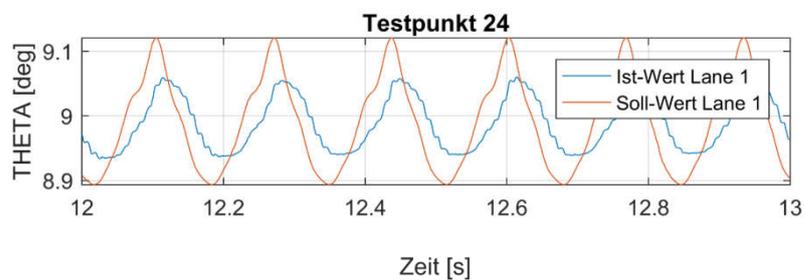
Abbildung 6-157: kombinierte 2/rev und 3/rev (3)

Die folgenden Abbildungen (Abbildung 6-158 - Abbildung 6-160) zeigen Ergebnisse für Lane 1, Lane 2 und Lane 3 aus einem Versuchspunkt, bei dem das LIBRAS-System im normalen, fehlerfreien Betriebsmodus als Triplex-System arbeitet, d.h. APCU und EMA waren auf allen drei Lanes (Signal und Energie) aktiv. Im Versuch wurde bei 360rpm (emuliert) eine 1/rev Einsteuerung mit 1° Amplitude bei einer Kollektiveinsteuerung von 9° eingesteuert.

Der zu erkennende (Rest-)Regelfehler für den Blatteinstellwinkel THETA zwischen dem Soll- und dem Ist-Wert ist für den Nachweis der Systemfunktionen auch in diesem Fall vernachlässigbar. Grundsätzlich lassen sich aber mit der Reglerstruktur des LIBRAS[®]-Systems bei korrekter Parametrisierung die Anforderungen an die Regelgenauigkeit, wie sie für eine Flugsteuerung gelten, erfüllen (vgl. Ausführungen zu Beginn des Abschnittes 6.6.5).

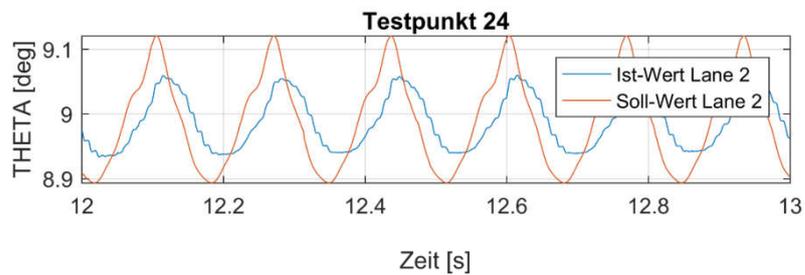


LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-158: 3-Lane Betrieb – Lane 1

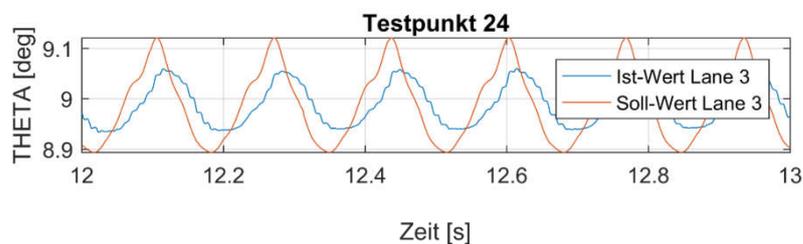


- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-159: 3-Lane Betrieb – Lane 2



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



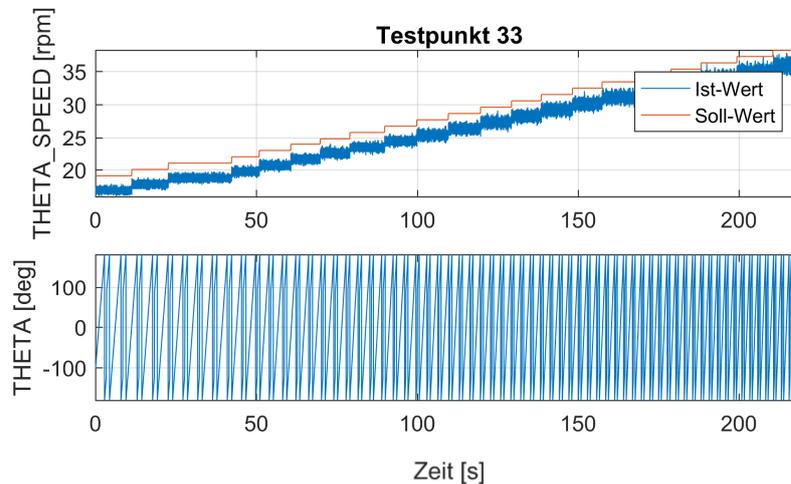
- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-160: 3-Lane Betrieb – Lane 3

Im Zuge der Inbetriebnahme der APCU wurden in Zusammenarbeit mit embeX spezielle Versionen der ACU Software entwickelt und eingesetzt. Zur Untersuchung der Überstromereignisse (vgl. Abschnitt 6.3) und Optimierung der Parametrisierung der Regelparameter der kaskadierten Positionsregelung wurde eine Softwareversion eingesetzt, die es ermöglichte, anstelle einer Sollposition eine Sollgeschwindigkeit vorzugeben. Die folgende Abbildung 6-161 zeigt exemplarisch die Ergebnisse mit dieser Softwareversion aus einem Versuch, bei dem die Sollgeschwindigkeit schrittweise erhöht wurde.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-161: Regelverhalten bei schrittweiser Erhöhung
der Sollgeschwindigkeit

Zur Untersuchung der Überstromereignisse (vgl. Abschnitt 6.3) wurde auch eine Software eingesetzt, die Messdaten im ACU-internen 20kHz automatisch bei Überschreitung einer konfigurierten Grenze für die Phasenströme U,V,W für 1s aufzeichnete. Anstelle der automatischen Messung kann die Messung mit dieser Software auch über den TCC manuell ausgelöst werden.

Der Vorteil dieser Software ist die bessere zeitliche Auflösung der Messdaten, da der TCC die Messdaten nur mit 1kHz aufzeichnet, was für das Monitoring des LIBRAS[®]-Systems im normalen Betrieb ausreichend ist. Der Nachteil dieser Software ist jedoch, dass die Messdaten nur durch einen gesonderten Befehl von der APCU auf den TCC heruntergeladen werden können und dazu der Versuch unterbrochen werden muss, bevor eine neue Messung erfolgen kann.

Abbildung 6-162 und Abbildung 6-163 zeigen Beispiele für jeweils eine automatische und eine manuelle Messung im Rahmen eines Versuches, bei dem die Steuereingaben für die 1/rev schrittweise bei einer konstanten Rotordrehzahl von 360rpm (emuliert) erhöht wurden. Die Messdaten



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



aus dem 20kHz Takt wurden für die Analyse mit den 1kHz TCC Daten betrachtet.

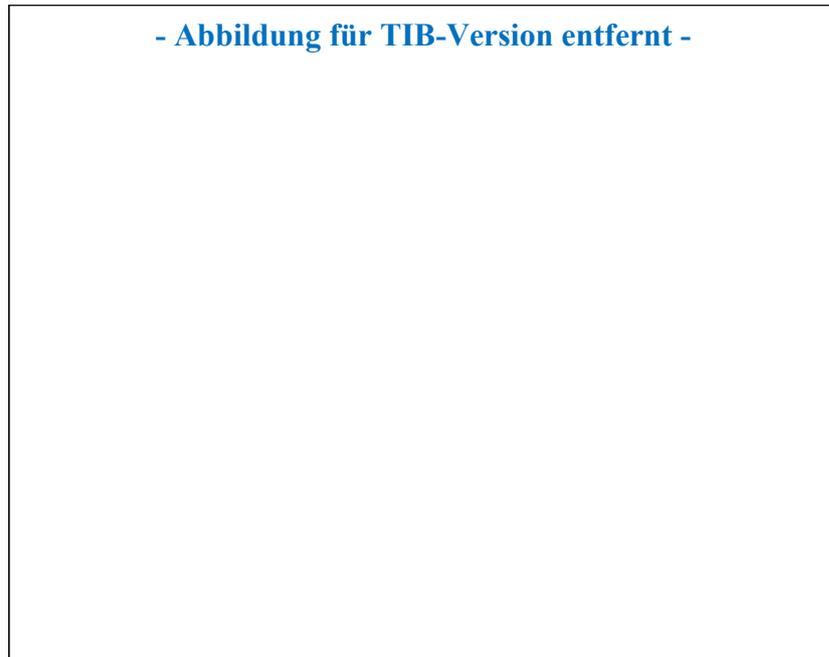


Abbildung 6-162: Automatische Messung bei einem Überstromereignis von APCU Daten im 20kHz-Takt



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



- Abbildung für TIB-Version entfernt -

Abbildung 6-163: Manuelle Messung ohne Überstromereignis
von APCU Daten im 20kHz-Takt

6.7 AP 700 Erprobung Windkanal

Die Erprobung des LIBRAS[®]-Systems im Windkanal unter realitätsnahen Bedingungen sollte nach der ursprünglichen Planung den Abschluss des Vorhabens bilden. Nach Änderung der Zielsetzung des Vorhabens sind die Unterarbeitspakete im AP 700 nicht im ursprünglich geplanten Umfang bearbeitet worden.

6.7.1 AP 710 Adaptionkonstruktion und Beschaffung

Nach Abschluss der wesentlichen Konstruktions- und Fertigungsarbeitspunkte in den Arbeitspaketen AP 200, AP 300 und AP 400 wurde ersichtlich, dass aufgrund der sehr guten Abstimmung zwischen ZFL und SAC die Kompatibilität des LIBRAS-Systems für alle geplanten und später genutzten Testumgebungen ohne zusätzliche Adaptionen gegeben war, wie beispielsweise die problemlose Einrüstung des Systems am SIL belegte.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



6.7.2 AP 720 Einrüstung, Inbetriebnahme, Funktionsvalidierung am Whirl-Tower

Im AP 720 wurden die Einrüstung des LIBRAS[®]-Systems, die Inbetriebnahme aller Komponenten und die anschließende Funktionsvalidierung am Whirl-Tower zusammengefasst. Insbesondere bei der Inbetriebnahme und Funktionsvalidierung sollte dem Umstand Rechnung getragen werden, dass das LIBRAS[®]-System erstmals reale Rotorblätter ansteuert. Der Whirl-Tower ermöglicht es, kollektive Verstellungen und somit unterschiedliche Schubzustände des Rotors nachzubilden. Auf Basis ausgewerteter Daten und erstellter Versuchsberichte sollte eine Freigabe der nächsten Erprobungsschritte im Windkanal erfolgen.

Im Verlauf des Vorhabens wurde in Absprache mit SAC entschieden, auf die Whirl-Tower Versuche zu verzichten. Zudem wurde nach der Änderung der Zielsetzung des Vorhabens dieses Arbeitspaket nicht im geplanten Umfang bearbeitet.

6.7.3 AP 730 Einrüstung, Inbetriebnahme, Funktionsvalidierung im Windkanal

Nach der Ausrüstung am Whirl-Tower und dem Versand nach Ames, Kalifornien, zum National Full-Scale Aerodynamics Complex (NFAC), wird die LIBRAS[®]-Anlage in den vorgesehenen Rotor Test Apparatus (RTA) des Windkanals eingerüstet. Diese Arbeiten und die anschließende Inbetriebnahme mit Funktionsvalidierung erfolgt zunächst außerhalb der Testsektion des eigentlichen Windkanals, um andere Versuchsaktivitäten innerhalb des Kanals nicht zu behindern.

Nach Änderung zur Zielsetzung des Vorhabens ist dieses Arbeitspaket nicht im geplanten Umfang bearbeitet worden. Jedoch wurden innerhalb dieses Arbeitspakets eine geeignete Versandlösung für das LIBRAS-System und die Erstellung des Betriebs- und Wartungshandbuches verfolgt. Diese Arbeiten unterstützten auch die Erprobung des LIBRAS-Systems am SIL-Prüfstand.

6.7.4 AP 740 Windkanalversuche

Innerhalb des Arbeitspaketes AP 740 soll die Betreuung und Durchführung der Windkanalversuche des LIBRAS[®]-Systems mit dem X2-Rotor



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelnsteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



erfolgen. Zunächst wird die Flugzustandsenveloppe schrittweise erweitert. Hierbei wird das LIBRAS[®]-System nur den Primärsteuerungsanteil bereitstellen. Anschließend wird sukzessive die zusätzliche Einsteuerung von IBC-Anteilen erprobt.

Nach Änderung zur Zielsetzung des Vorhabens ist dieses Arbeitspaket nicht im geplanten Umfang bearbeitet worden. In Vorbereitung auf die späteren Windkanalversuche wurde mit der Implementierung einer zusätzlichen Datenschnittstelle auf dem TCC begonnen. In Abstimmung mit SAC sollten über diese bidirektionale Schnittstelle Betriebsdaten der APCU über den TCC an den FCC übermittelt werden. In der Gegenrichtung sollten ebenfalls Betriebsdaten an den TCC übermittelt werden (s. Abbildung 6-164). Einzelheiten zu der Hardware- und Softwareseitigen Implementierung sind in der von ZFL erstellten Schnittstellenbeschreibung zusammengefasst.

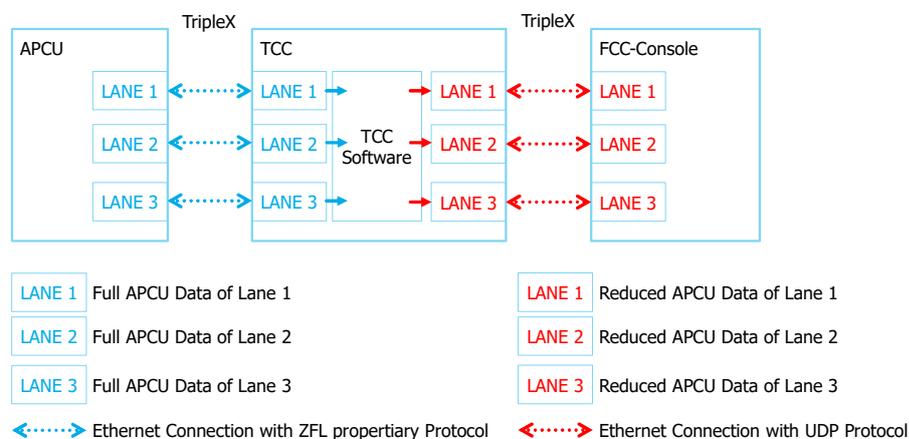


Abbildung 6-164: Konzept für eine dreifach redundante Implementierung der Datenschnittstelle zwischen dem TCC und dem FCC

6.7.5 AP 750 Bewertung und Vergleich mit einer konventionellen Steuerung

Die umfangreiche Datenbasis, die zum Ende der Windkanalversuche zur Verfügung steht, soll im AP 750 detailliert ausgewertet werden. Insbesondere der Vergleich mit einer konventionellen Steuerung soll es ermöglichen, die Vor- und Nachteile eines LIBRAS[®]-Systems zu quantifizieren.

Nach Änderung zur Zielsetzung des Vorhabens ist dieses Arbeitspaket nicht im geplanten Umfang bearbeitet worden.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



6.8 AP 900 Alternative Aktuatorintegration

Ziel des AP 900 war die Untersuchung der Integration der hochredundanten elektrischen Drehantriebe statt an der Blattwurzel an der Taumelscheibe. Aufgrund der geänderten Ausrichtung im Verlauf des Vorhabens (vgl. Abschnitt 3) sind in den Unterarbeitspaketen des AP 900 keine wesentlichen hier zu dokumentierenden Ergebnisse entstanden. Die Beschreibung der ursprünglich vorgesehenen Arbeitsinhalte (Abschnitt 6.8.1 – Abschnitt 6.8.8) erfolgt in diesem Abschlussbericht nur aus Gründen der Vollständigkeit.

6.8.1 AP 910 Spezifikation zur alternativen Integrationsvariante

Unter Berücksichtigung eines Ziel-Hubschraubers und in Zusammenarbeit mit dem Hubschrauberhersteller AgustaWestland sollten Kernanforderungen an ein entsprechendes Stellsystem erfasst und im Rahmen einer Spezifikation dokumentiert werden. Gemeinsam mit den Unterauftragnehmern sollten Subsystem-Spezifikationen erstellt werden, die eine unabhängige Auslegung von Teilkomponenten ermöglichen.

6.8.2 AP 920 Anpassung Redundanzarchitektur

Die im Rahmen von LIBRAS (1) erstellte und in LIBRAS-2 verfeinerte Systemarchitektur wird innerhalb dieses Arbeitspaketes bezüglich ihrer Redundanzeigenschaften auf ein elektrisches Steuersystem zur Taumelscheibenverstellung übertragen. Auch hier werden die besonderen Vorgaben des Hubschrauberherstellers berücksichtigt und weitere Konzepte bzgl. Redundanz, Diversität und räumlicher Aufteilung der Komponenten ausgearbeitet werden. Die verschiedenen Architekturen sollen abschließend verglichen und bewertet werden. Darauf basierend wird ein Konzept für die weitere Ausarbeitung ausgewählt.

6.8.3 AP 930 Alternative EMA-Auslegung

Die innerhalb des Arbeitspaketes AP 920 erarbeiteten Architekturen sind im Rahmen von AP 930 auf die Kernkomponente EMA zu übertragen. Hierbei wird zum einen die elektrische Maschine mit Hinblick auf die spezifizierten Anforderungen von Momenten und Drehzahlen ausgelegt, wofür wieder mit dem Unterauftragnehmer Maccon GmbH zusammengearbeitet werden soll. Des Weiteren muss die Sensorik an die veränder-



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



ten Forderungen angepasst und geeignete mechanische Übertragungselemente (Hebel, Getriebe) entsprechend den geänderten Anbaubedingungen integriert werden.

6.8.4 AP 940 Mechanische Aktuator-Integration

Auf Basis der im Rahmen des LuFo-Programmes ETauS konzipierten und patentierten kinematischen Lösungen, wird eine auf den Ziel-Hubschrauber angepasste und optimierte Integration aller Komponenten erarbeitet. Dabei sind alle vorhandenen oder vorzusehenden Schnittstellen zum Basishubschrauber zu berücksichtigen. Auf Basis der vom Hubschrauberhersteller schon übermittelten Lastannahmen werden alle kritischen Bauteile dimensioniert und die erforderlichen Kaufkomponenten (z.B. Lager) ausgewählt. Parallel werden mit Hilfe eines zu erstellenden CAD-Modells alle Bewegungsabläufe simuliert, die kinematische Kompatibilität und Kollisionsfreiheit geprüft und eine detaillierte Analyse der verschiedenen Lastpfade durchgeführt. Diese Ergebnisse fließen in die entsprechenden Testprogramme des Arbeitspaketes AP 980 ein.

6.8.5 AP 950 Adaption Leistungselektronik

In diesem Arbeitspaket werden die Erkenntnisse des APs 300 auf die alternative Anwendung mit elektrischer Taumelscheibe übertragen. Hierbei werden insbesondere auch die Ergebnisse der alternativen EMA-Auslegung (AP 930) und die geänderten Randbedingungen, wie z.B. höherer Redundanzgrad oder abweichende thermische Anbindung der Bauteile, berücksichtigt. Die Arbeiten erfolgen in Zusammenarbeit mit dem aus LIBRAS (1) bekannten Unterauftragnehmer Fraunhofer IZM. Output dieses Arbeitspaketes sollen konkrete Vorgaben zur Struktur und Dimensionierung einer angepassten Leistungselektronik sein.

6.8.6 AP 960 Adaption Ansteuerung

Im Arbeitspaket AP 960 werden die Ergebnisse der Soft- und Hardwareauslegung zur Ansteuerung der Blattwurzelaektorik mit den teilweise abweichenden Anforderungen der Taumelscheibenintegration abgeglichen und erforderliche Anpassungen definiert. Gemeinsam mit dem Unterauftragnehmer embeX wird eine angepasste Struktur für die Hard- und Software der Actuator Control Unit erarbeitet, wobei untersucht



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



wird, in welchen Bereichen sich durch die geringere Bandbreitenanforderungen Vereinfachungen ergeben könnten.

6.8.7 AP 970 Aufbau Mechanik-Test-Rig und Prüfling

Für die Vorerprobung von kritischen Funktionseigenschaften (Spielfreiheit, Selbsthemmung, Ausbrechmomente, Klemmfreiheit) in Verbindung mit den relevanten Strukturbauteilen (z.B. Taumelscheibenlager, Gelenklager an den Aktuatorhebeln) wird eine geeignete Prüfvorrichtung konstruiert und gefertigt bzw. Adaptionen an bestehenden Prüfeinrichtungen der ZFL umgesetzt. Da unterschiedliche Fragestellungen innerhalb der Versuche beantwortet werden müssen (Festigkeitsthemen, Kinematik, thermische Leistungsfähigkeit der elektrischen Maschine, etc.), wird ein Prüfstand mit speziell angepasster Lasteinheit benötigt. Zur Ansteuerung der elektrischen Maschine des EMAs kann voraussichtlich auf bereits vorhandene Komponenten aus dem Projekt ETauS zurückgegriffen werden.

Ebenfalls in diesem Arbeitspaket sollen alle fertigungsbezogenen Arbeiten zum Prüfling durchgeführt werden. Anschließend werden die gefertigten Teile montiert und für die Erprobung bereitgestellt. Die Beschaffung aller strukturmechanischen Komponenten erfolgt durch ZFL, die Fertigungsbetreuung der elektrischen Maschine (Stator und Rotor) soll durch Fa. Maccon erfolgen.

6.8.8 AP 980 Versuche zur Risikominimierung der mechanischen Integration

Die Erprobung des Prüflings erfolgt im letzten Arbeitspaket. Die Versuche werden die oben genannten Themengebiete betreffen und sollen im Detail auf die von AgustaWestland aufgeworfenen Fragestellungen ausgerichtet werden. Sie sollen im Sinne einer Risikobegrenzung eine belastbare Bewertung der Eigenschaften und Zuverlässigkeiten dieser Anordnung ermöglichen. Abschließend wird eine Dokumentation der durchgeführten Versuche erstellt.

6.9 AP 800 Projektleitung und -koordination

Im Rahmen der Projektleitungstätigkeiten erfolgten allgemeine Arbeiten zur Koordination des Vorhabens inkl. der Beteiligung der Unterauftragnehmer. Des Weiteren zählten zu den Arbeitsinhalten im Rahmen der



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Projektleitungstätigkeiten die Erstellung von Zwischenberichten [1] bis [12] und die Durchführung von Besprechungen und Treffen.

7. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Basierend auf den Ergebnissen aus dem unmittelbaren Vorgängervorhaben LIBRAS (1) und aus den früheren Vorhaben InHuS und ELBA wurden in LIBRAS-2 die Arbeiten zur Entwicklung und Erprobung einer elektrischen Blattwurzelersteuerung von ZFL mit Unterstützung von dem Systemhersteller Sikorsky fortgeführt. Im Vorhaben LIBRAS-2 erfolgte dabei die Realisierung und Integration eines Gesamtsystems nach der in LIBRAS (1) entwickelten Systemarchitektur für den Rotorkopf des Technologydemonstrators X2. Das aus den im LuFo (InHuS, ELBA und LIBRAS) entwickelten Technologien für die elektrische Blattwurzelersteuerung aufgebaute Gesamtsystem sollte in LIBRAS-2 erstmals im Windkanal erprobt werden. Da dies im Vorhabenszeitraum nicht mehr realisiert werden konnte, begleitet ZFL die noch andauernde Prüfstandserprobung im SIL bei Sikorsky. Die Entscheidung, ob Windkanalversuche folgen sollen, hängt einerseits von den Erprobungsergebnissen und andererseits vom F&T-Budget auf Seiten von Sikorsky ab.

Mit Systemhersteller Sikorsky arbeitet ZFL auf dem Gebiet der Anwendung von IBC seit mehreren Jahren zusammen (vgl. auch LuFo-Vorhaben NABIS). Die mit Systemhersteller Sikorsky im Programm LIBRAS-2 geplante Windkanalerprobung untermauert das starke Interesse von Seiten Sikorskys an der Nutzung von elektrischen Antrieben als Ersatz für hydraulische Stellsysteme (wie noch verwendet bei den gemeinsamen Windkanal-Versuchen mit der NASA). Auch andere Systemhersteller haben deutliches Interesse an den Arbeiten und Ergebnissen der ZFL zu diesem Thema gezeigt.

Allgemein sind aktive Rotorsteuerungen Kompetenzschwerpunkt in Deutschland. Durch die vorgesehene Doppelnutzung der Aktuatorik für Primärsteuerung und IBC wird der Systemaufwand erheblich reduziert und die Marktchancen verbessert. Das Potenzial von individuellen Blattwurzelersteuerungen zur Einsparung von Betriebs- und Wartungskosten sowie zur Erhöhung von Sicherheit und Komfort wird so optimal ausgenutzt. Die konsequente Einführung eines solchen Systems wird weiterhin von ZFL betrieben und trifft wie beschrieben auf positive Resonanz.



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Die entwickelten Technologien sollen nach der erfolgreichen Erprobung im Vorhaben LIBRAS-2 Systemherstellern weltweit angeboten werden.

8. Bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Auf dem Gebiet der innovativen Hubschraubersteuerungen gibt es gegenüber der Darstellung in [211] weiterhin nur wenige konkurrierende Ansätze. Einige Systemhersteller arbeiten an einer Integration von elektrischen Blattklappensteuerungen. Diese sind aber funktionsbedingt nur für eine höherharmonische Steuerung mit sehr eingeschränkter Amplitude effektiv einsetzbar. Für die Verwendung als **Primärsteuerung** sind diese nicht geeignet. Auch die Ansätze einer „aktiven“ Steuerstange, die die konventionelle Steuerstange ersetzt, sind hinsichtlich der Realisierung einer Primärsteuerung ungeeignet, da diese Systeme bezüglich der Stellautorität und Stellgeschwindigkeit beschränkt sind. Der Haupteinsatzzweck für diese Systeme liegt in der Kompensation von Trackingfehlern wie beispielsweise beim von ZFL entwickelten und sich derzeit in der Zulassung befindlichen *In Flight Tuning* (IFT) System für den Sikorsky CH-53G Hubschrauber.

Patente wie das der Fa. Karem Aircraft Inc., *Swashplateless Rotorcraft with Fault tolerant linear Electric Actuator* (Patent US8235667) oder das der Fa. Boeing *Swashplateless Helicopter Blade Actuation System* (Patent US 2011/0164976A1) betreffen nur die Ausführung von Teilkomponenten des LIBRAS[®]-Systems. In beiden Patenten konzentriert man sich auf alternative Ansätze für die Aktuatorik einer elektrischen Blattwurzelersteuerung. Allerdings ist keinem der Patente ein Konzept für die Integration der Aktuatorik in das Gesamtsystem zu entnehmen. Bezüglich einer Realisierung und Erprobung der in den Patenten beschriebenen Technologien an einem Originalrotor liegen ZFL keine Informationen vor.

Unter US 2014/0314563A1 hat der Projektpartner Sikorsky ein bestimmtes Ansteuerungskonzept zum Patent angemeldet. Da es sich nur auf eine bestimmte Konfiguration bezieht, behindert es die Verwendung der Grundidee von LIBRAS nicht.

In US 2014/031473A1 wurde ebenfalls durch Sikorsky die für die Integration in den X2-Versuchsträger gewählte Aktuatoranordnung zum



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



Patent angemeldet. ZFL hat Sikorsky über die Konzern-Patentabteilung darauf hinweisen lassen, dass eine der Anordnungen schon Teil einer ZFL-Veröffentlichung war. Da die Beweislage eindeutig ist, wurde darauf verzichtet, formalen Einspruch einzulegen. Durch den von ZFL zuvor dokumentierten Stand der Technik ist sichergestellt, dass eine von Sikorsky ggf. unabhängige Verwertung nicht behindert werden kann. Somit stellen die in InHuS und ELBA entwickelten Technologien, die in LIBRAS (1) für ein Gesamtsystem entwickelte Systemarchitektur und das in LIBRAS-2 qualifizierte und erprobte Gesamtsystem für den X2-Rotor als Versuchsträger weiterhin die einzig bekannte Blattwurzelersteuerung dieser Art und in diesem Reifegrad dar.

9. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Im Laufe des Vorhabens sind folgende Veröffentlichungen zu den Arbeiten dieses Vorhabens erfolgt:

- Arnold et al., Exploring the Power Balance of Main Rotor Primary Control, 73th AHS Forum 2017, LIB-2641-1703
- Arnold, Auspitzer, Fuerst, Sutton, Bates, Preparation for a Wind Tunnel Demonstration of a Pure-Electric, Swashplateless Individual Blade Control System for a High Speed Rotor, AIAA SciTech Forum 2019, LIB-3004-1901
- Arnold, Auspitzer, Haar, Sutton, Bates, ELECTRIC, Swashplateless Individual Blade Control System to be wind tunnel tested in full-scale, 45th European Rotorcraft Forum 2019, LIB-3152-1909

Die im Rahmen des Fördervorhabens erstellten Berichte sind untenstehend aufgelistet, beginnend mit den Zwischenberichten:

- [1] Fürst, Auspitzer, 1. Zwischenbericht (I/2014) zu LuFo V.1 LIBRAS, LIB-2232-1406
- [2] Fürst, Auspitzer, 2. Zwischenbericht (II/2014) zu LuFo V.1 LIBRAS, LIB-2280-1501
- [3] Fürst, Auspitzer, 3. Zwischenbericht (I/2015) zu LuFo V.1 LIBRAS, LIB-2360-1507
- [4] Fürst, Auspitzer, 4. Zwischenbericht (II/2015) zu LuFo V.1 LIBRAS, LIB-2424-1601
- [5] Fürst, 5. Zwischenbericht (I/2016) zu LuFo V.1 LIBRAS, LIB-2506-1607



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



- [6] Fürst, 6. Zwischenbericht (II/2016) zu LuFo V.1 LIBRAS, LIB-2609-1701
- [7] Auspitzer, 7. Zwischenbericht (I/2017) zu LuFo V.1 LIBRAS, LIB-2698-1706
- [8] Auspitzer, 8. Zwischenbericht (II/2017) zu LuFo V.1 LIBRAS, LIB-2835-1801
- [9] Auspitzer, 9. Zwischenbericht (I/2018) zu LuFo V.1 LIBRAS, LIB-2912-1806
- [10] Auspitzer, 10. Zwischenbericht (II/2018) zu LuFo V.1 LIBRAS, LIB-2982-1812
- [11] Auspitzer, 11. Zwischenbericht (I/2019) zu LuFo V.1 LIBRAS, LIB-3089-1907
- [12] Auspitzer, 12. Zwischenbericht (II/2019) zu LuFo V.1 LIBRAS, LIB-3182-2001
- [13] Stephan, System Level Requirements of the EBRCs, LIB-2059-1306
- [14] Stephan, System Level Requirements allocated to the EBRCs Wiring, LIB-2074-1307
- [15] Stephan, Versuchsplan **XXX-Sensor**, LIB-2197-1404
- [16] Stephan, Testsignale für EMA-Überlasterkennung, LIB-2207-1405
- [17] Auspitzer, Projektphasenmatrix LIBRAS-2, LIB-2212-1405
- [18] Stephan, LIBRAS-2: High Level Requirements of the Slipping, LIB-2222-1406
- [19] Pflüger, System Design & Development Plan, LIB-2223-1406
- [20] Pflüger, PDR LIBRAS Review Presentation, LIB-2236-1406
- [21] Stephan, Definitions at the LIBRAS System, LIB-2237-1407
- [22] Hausberg, Electrical Performance of the APCU, LIB-2238-1407
- [23] Stephan, Calibration procedure of the EMA, LIB-2243-1408
- [24] Hartmann, Überlegungen zur Temp. Messung Motorphasen, LIB-2244-1408
- [25] Stephan/Hausberg, Spezifikation Chopper-Module, LIB-2246-1409
- [26] Schröder, Qualitätsmanagementplan, LIB-2247-1409
- [27] Pflüger, System PDR Summary Report, LIB-2265-1411
- [28] Pflüger, LIBRAS System FMEA on Functional Block / Assembly Level, LIB-2277-1412
- [29] Hausberg, Beschreibung des Prüf- / Messaufbaus X99-0029.950.10, LIB-2278-1501
- [30] Hartmann, Gain, Offset und Kalibrierverfahren, LIB-2284-1501
- [31] Hausberg, Auslegungsinformationen für E-Maschine, LIB-2285-1501
- [32] Pflüger, Klassifikation von Bauteilen und Fehlermodi, LIB-2302-1503



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



- [33] Haar, Ergänzende Untersuchungen zum Konzept der Elektrischen Taumelscheibe (ETauS), LIB-2319-1504
- [34] Stephan, LIBRAS-2: Inbetriebnahme IRS cRIO-Resolver-Simulation, LIB-2321-1504
- [35] Stephan, Inbetriebnahme E-Rack X99-0029.960.01, LIB-2325-1505
- [36] Pflüger, Berücksichtigung von Lagern im Safety Assessment, LIB-2336-1506
- [37] Götte, Acceptance test procedure (ATP) Fine-Cyclo-Getriebe X99-0029.200.02-006, LIB-2345-1506
- [38] Fürst, PSU (Power Supply Unit) PDR/CDR Summary Report, LIB-2346-1506
- [39] Stephan, Inbetriebnahme 4-fach Rotorazimutgeber X99-0029.940, LIB-2369-1507
- [40] Fürst, PCUC (Power Control Unit Converter) PDR/CDR Summary Report, LIB-2390-1510
- [41] Stephan, DMS-Messstelle – Aufbau und Applikation, LIB-2394-1510
- [42] Kiebel, Festigkeitsbetrachtung EMA X99-0029.200, LIB-2399-1511
- [43] Fürst, Fertigungsprüfumfang von LIBRAS-2 Komponenten, LIB-2415-1512
- [44] Schröder, EMA PDR/CDR Summary Report, LIB-2431-1602
- [45] Haar, TCC Software Manual, LIB-2438-1603
- [46] Götte, K30-Zeichnungsfreigabe EMA, LIB-2440-1603
- [47] Pflüger, LIBRAS Fault Tree Analysis Report, LIB-2462-1604
- [48] Hartmann, ACU SW&FPGA PDR/CDR Summary Report, LIB-2472-1605
- [49] Fürst, ACU HW PDR/CDR Summary Report, LIB-2507-1607
- [50] Auspitzer, LIBRAS: Acceptance Test Procedure EMA X99-0029.200, LIB-2628-1702
- [51] Pflüger, Konzept der Festigkeitsnachweise im Projekt LIBRAS, LIB-2678-1706
- [52] Pflüger, LIBRAS System CDR Presentation, LIB-2708-1707
- [53] Pflüger, LIBRAS: System CDR Summary Report, LIB-2750-1708
- [54] Haar, LIBRAS: ACU TRR Summary Report, LIB-2751-1708
- [55] Pflüger, LIBRAS: Acceptance Test Procedure E-Motor X99-0029.200.01, LIB-2752-1708
- [56] Pflüger, LIBRAS: Test Program Performance Test E-Motor X99-0029.200.01, LIB-2753-1708
- [57] Auspitzer, LIBRAS: Acceptance Test Procedure APCU X99-0029.300, LIB-2754-1708



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



- [58] Auspitzer, LIBRAS: Test Program Operational Test EMA X99-0029.200 and APCU X99-0029.300, LIB-2755-1708
- [59] Auspitzer, LIBRAS: Test Program Performance Test EMA X99-0029.200, LIB-2756-1708
- [60] Auspitzer, LIBRAS: Test Program Fatigue Test EMA X99-0029.200, LIB-2757-1708
- [61] Auspitzer, LIBRAS: Test Program Ultimate Load Test EMA X99-0029.200, LIB-2758-1708
- [62] Müller, LIBRAS: Test Program Performance Test System X99-0029.000, LIB-2759-1708
- [63] Müller, LIBRAS: Test Program Endurance Test System X99-0029.000, LIB-2760-1708
- [64] Pflüger, LIBRAS: Operating and Maintenance Manual , LIB-2763-1708
- [65] Wintjen, LIBRAS: Arbeits- und Prüfplan Montage EMA X99-0029.200, LIB-2764-1708
- [66] Wintjen, LIBRAS: Arbeits- und Prüfplan Montage APCU X99-0029.300, LIB-2765-1708
- [67] Haar, LIBRAS-2: Prüfstandsbuch Motorprüfstand X99-0029.950, LIB-2769-1708
- [68] Pflüger, LIBRAS-2: Prüfstandsbuch Fatigue- und Funktionsprüfstand X99-0029.960.10, LIB-2770-1708
- [69] Pflüger, LIBRAS-2: Prüfstandsbuch Systemprüfstand X99-0029.970, LIB-2771-1708
- [70] Haar, LIBRAS: Test Program Integration Test ACU / PCU, LIB-2781-1709
- [71] Haar, LIBRAS: Test Report Integration Test ACU / PCU, LIB-2782-1709
- [72] Haar, LIBRAS: Test Program Integration TCC - ACU , LIB-2812-1711
- [73] Wintjen, LIBRAS: Arbeits- und Prüfplan Montage Elektrische Maschine X99-0029.200.01, LIB-2813-1711
- [74] Wintjen, LIBRAS: Arbeits- und Prüfplan Montage Stelltrieb X99-0029.200.02, LIB-2818-1711
- [75] Haar, LIBRAS: Test Report Integration TCC - ACU, LIB-2819-1711
- [76] Pflüger, Kalibrierung DMS-Messstelle, LIB-2821-1711
- [77] Wintjen, LIBRAS: Arbeits- und Prüfplan Montage Leistungsverteilung X99-0029.300.02, LIB-2836-1801
- [78] Wintjen, LIBRAS: Arbeits- und Prüfplan Montage Signalverteilung X99-0029.300.03, LIB-2837-1801
- [79] Kiebel, Strength of APCU, LIB-2841-1801
- [80] Müller, LIBRAS: Acceptance Test Procedure LIBRAS System X99-0029.000, LIB-2861-1802



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



- [81] Haar, LIBRAS: ICD Data Exchange Interface TCC - FCC, LIB-2862-1802
- [82] Wintjen, Zeichnungsbaum LIBRAS-2, Stand 2018-03-20, LIB-2880-1803
- [83] Auspitzer, LIBRAS: ATP Motorprüfstand X99-0029.950.10,
LIB-2895-1804
- [84] Auspitzer, LIBRAS: ATP Fatigue- und Funktionsprüfstand X99-0029.960,
LIB-2896-1804
- [85] Auspitzer, LIBRAS: ATP Systemprüfstand X99-0029.970, LIB-2897-1804
- [86] Haar, LIBRAS: Test Report Performance Test E-Motor X99-0029.200.01,
LIB-2911-1806
- [87] Auspitzer, LIBRAS: Untersuchung von Auffälligkeiten im Versuchsbetrieb
an der elektrischen Maschine X99-0029.200.01, LIB-2916-1806
- [88] Wintjen, LIBRAS: Festigkeitsbetrachtung Blattsimulator, LIB-2919-1807
- [89] Wintjen, LIBRAS: Festigkeitsbetrachtung Rotorkopf Systemprüfstand,
LIB-2920-1807
- [90] Pflüger, Sicherheitsbetrachtungen für die LIBRAS Prüfstandsversuche,
LIB-2922-1808
- [91] Haar, LIBRAS: Test Report – Dauerversuch SAC **XXX**-Sensor,
LIB-2926-1808
- [92] Auspitzer, LIBRAS: Untersuchung zur Funktion der Verdrehsicherung für
das innere Lager der elektrischen Maschine X99-0029.200.01,
LIB-2932-1808
- [93] Wintjen, LIBRAS: EMA X99-0029.200 - Auswiegen und Schwerpunktbe-
stimmung, LIB-2952-1808
- [94] Haar, LIBRAS: Software Update Procedure APCU X99-0029-300,
LIB-2953-1808
- [95] Wintjen, LIBRAS: Festigkeitsbetrachtung Blattsimulator, LIB-2954-1809
- [96] Wintjen, LIBRAS: Festigkeitsbetrachtung Rotorkopf Systemprüfstand,
LIB-2955-1809
- [97] Pflüger, Test Programm Ermittlung Kollisionsparameter, LIB-2962-1809
- [98] Pflüger, LIBRAS: APCU Parameterliste, LIB-2963-1809
- [99] Wintjen, Momentübertragung Motorwelle / Motoradapter, LIB-2972-1811
- [100] Haar, LIBRAS: APCU Parameter Loading Procedure, LIB-2974-1811
- [101] Pflüger, LIBRAS: Prüfstandsbuch SIL-Prüfstand, LIB-2975-1811
- [102] Pflüger, LIBRAS: Prüfstandsbuch Windkanal-Prüfstand, LIB-2976-1811
- [103] Wintjen, Einbauuntersuchung PCUC, LIB-3007-1901
- [104] Wintjen, Einbauuntersuchung ACU, LIB-3009-1901
- [105] Müller, Measurement of the EMA Magnetic Field, LIB-3014-1902
- [106] Wintjen, Festigkeit Fatigue Prüfstand für Ultimate Load Test,



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



- LIB-3023-1902
- [107] Wintjen, Lastannahmen Systemprüfstand, LIB-3031-1903
 - [108] Auspitzer, LIBRAS: Arbeits- und Prüfplan Umrüstung PCUC X99-0029.300.01-002 rev. none -> rev. a, LIB-3161-1911
 - [109] Auspitzer, LIBRAS: Funktionstest PCUC X99-0029.300.01-002 rev. a, LIB-3162-1911
 - [110] Witte, Bedienung Komponentenprüfstand, LIB-3253-2008
 - [111] Horn, LIBRAS: Modifikation und Zeichnung Schaltplan GR Versorgung, LIB-3279-2010
 - [112] Fraunhofer IZM / embeX, Test Programm Funktionsmuster Integration ACU - PCU, LIB-661EX-1408
 - [113] Fraunhofer IZM / embeX, Test Report Funktionsmuster Integration ACU - PCU, LIB-662EX-1408
 - [114] Fraunhofer IZM, PCUC Bill of Materials, LIB-700EX-1411
 - [115] Fraunhofer IZM, PSU Schematics, LIB-701EX-1411
 - [116] Fraunhofer IZM, PSU Layout, LIB-702EX-1411
 - [117] Fraunhofer IZM, PSU Bill of Materials, LIB-703EX-1411
 - [118] Fraunhofer IZM, Schaltplan Bremschopper, LIB-708EX-1501
 - [119] Fraunhofer IZM, Test Programm Qualifikationsmuster Integration ACU - PCU, LIB-721EX-1504
 - [120] Fraunhofer IZM, Test Report Qualifikationsmuster Integration ACU - PCU, LIB-722EX-1504
 - [121] Fraunhofer IZM, Hardware Design Data Chopper Module, LIB-724EX-1504
 - [122] Fraunhofer IZM, Chopper Test Report, LIB-726EX-1505
 - [123] Fraunhofer IZM, Hardware Requirements and Traceability Data PCUC/PSU, LIB-727EX-1505
 - [124] Fraunhofer IZM, Hardware Test Program PCUC Qualification Sample, LIB-728EX-1505
 - [125] Fraunhofer IZM, Hardware Test Report PCUC Qualification Sample, LIB-729EX-1505
 - [126] Fraunhofer IZM, Hardware Test Program PSU Qualification Sample, LIB-730EX-1505
 - [127] Fraunhofer IZM, Hardware Test Report PSU Qualification Sample, LIB-731EX-1505
 - [128] Fraunhofer IZM, ATP PCUC, LIB-734EX-1505
 - [129] Fraunhofer IZM, ATP PSU, LIB-735EX-1505
 - [130] Fraunhofer IZM, Fabrication Data and Procedures PCUC, LIB-736EX-1505



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



- [131] Fraunhofer IZM, Fabrication Data and Procedures PSU, LIB-737EX-1505
- [132] Fraunhofer IZM, FMEA PCUC, LIB-756EX-1510
- [133] Fraunhofer IZM, Design Data of the Rigid Flex Connector PCUC Measurement Signals, LIB-757EX-1510
- [134] Fraunhofer IZM, Design Data of the Rigid Flex Connector PCUC Gate Drive Signals, LIB-758EX-1510
- [135] Fraunhofer IZM, LIBRAS: Hardware Test Report PCUC Qualification Sample (X99-0029-300.1-002 rev. a), LIB-1013EX-2002
- [136] Fraunhofer IZM / embeX, Test Programm Funktionsmuster Integration ACU - PCU, LIB-661EX-1408
- [137] Fraunhofer IZM / embeX, Test Report Funktionsmuster Integration ACU - PCU, LIB-662EX-1408
- [138] embeX GmbH, Testadapter: Product Requirements Specification, LIB-647EX-1404
- [139] embeX GmbH, Testadapter: Test Report, LIB-648EX-1404
- [140] embeX GmbH, Testadapter: Designunterlagen -Schematics/Layout/BoM, LIB-649EX-1404
- [141] embeX GmbH, Hardware Design Description, LIB-650EX-1405
- [142] embeX GmbH, Hardware Test Specification, LIB-652EX-1406
- [143] embeX GmbH, Design Verification Test Report, LIB-653EX-1406
- [144] embeX GmbH, TCC Emulator Requirements, LIB-654EX-1406
- [145] embeX GmbH, TCC Emulator Software Architecture Document, LIB-655EX-1406
- [146] embeX GmbH, TCC Emulator User Manual, LIB-656EX-1406
- [147] embeX GmbH, TCC Emulator Test, LIB-657EX-1406
- [148] embeX GmbH, LIBRAS-2: Development Plan Actuator Control Unit (ACU), LIB-660EX-1408
- [149] embeX GmbH, Lightning Protection Concept, LIB-664EX-1410
- [150] embeX GmbH, X-COM Interface Control Document, LIB-666EX-1410
- [151] embeX GmbH, HSIT Testumgebung, LIB-669EX-1411
- [152] embeX GmbH, Software Design Standard, LIB-705EX-1501
- [153] embeX GmbH, Verfahrensanweisung Versionskontrollsystem, LIB-706EX-1501
- [154] embeX GmbH, ICD IRS cRIO-Resolver-Simulation, LIB-707EX-1412
- [155] embeX GmbH, Data Dictionary ACU, LIB-709EX-1503
- [156] embeX GmbH, Software Architecture Description ACU, LIB-710EX-1503
- [157] embeX GmbH, Software Low Level Requirements ACU, LIB-711EX-1503
- [158] embeX GmbH, Interface Control Document FPGA - uC1, LIB-714EX-1503



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelersteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



- [159] embeX GmbH, Interface Control Document FPGA - uC2, LIB-715EX-1503
- [160] embeX GmbH, LIBRAS-2: Verification Plan Actuator Control Unit (ACU), LIB-716EX-1503
- [161] embeX GmbH, FPGA Firmware Architecture ACU, LIB-719EX-1504
- [162] embeX GmbH, High Level Requirements Analysis Report ACU, LIB-720EX-1504
- [163] embeX GmbH, VHDL Coding Standard BU1, LIB-738EX-1505
- [164] embeX GmbH, HSI Test Specification ACU, LIB-742EX-1506
- [165] embeX GmbH, HSI Test Report ACU, LIB-743EX-1506
- [166] embeX GmbH, VHDL Source Code Files ACU, LIB-744EX-1507
- [167] embeX GmbH, HW Low Level Requirements ACU, LIB-745EX-1507
- [168] embeX GmbH, HW HLR<->Schematics Mapping ACU, LIB-746EX-1507
- [169] embeX GmbH, SW Loading Procedure ACU, LIB-747EX-1507
- [170] embeX GmbH, ICD HSIT FPGA Models ACU, LIB-748EX-1507
- [171] embeX GmbH, SW Source Code ACU (Release), LIB-749EX-1507
- [172] embeX GmbH, Compiler and Linker Logfile ACU, LIB-750EX-1509
- [173] embeX GmbH, SW Configuration Index ACU, LIB-751EX-1509
- [174] embeX GmbH, HW Layout Data ACU, LIB-752EX-1509
- [175] embeX GmbH, Hardware Configuration Index ACU, LIB-753EX-1509
- [176] embeX GmbH, HW HDD<->Schematics Mapping ACU, LIB-754EX-1509
- [177] embeX GmbH, Firmware configuration index ACU, LIB-755EX-1509
- [178] embeX GmbH, Hardware Design Guide ACU, LIB-759EX-1511
- [179] embeX GmbH, Fabrication Data and Procedures ACU, LIB-760EX-1511
- [180] embeX GmbH, ATP ACU, LIB-761EX-1511
- [181] embeX GmbH, Overview Cables Testsystem, LIB-765EX-1512
- [182] embeX GmbH, Hardware Design Guideline ACU, LIB-766EX-1512
- [183] embeX GmbH, Review Report Software Design ACU, LIB-769EX-1604
- [184] embeX GmbH, Review Checklist / Report Software Architecture ACU, LIB-770EX-1604
- [185] embeX GmbH, HSIT Tester Nachweis und SW, LIB-772EX-1604
- [186] embeX GmbH, CWT Checklists ACU, LIB-773EX-1604
- [187] embeX GmbH, Review Checklist / Report Firmware Architecture ACU, LIB-789EX-1610
- [188] embeX GmbH, Engineering Change Order QS0001 ACU, LIB-806EX-1703
- [189] embeX GmbH, Engineering Change Order QS0002 ACU, LIB-807EX-1703
- [190] embeX GmbH, ACU Design Verification Report, LIB-813EX-1708
- [191] embeX GmbH, Engineering Change Order QS0003 ACU, LIB-859EX-1802
- [192] embeX GmbH, Engineering Change Order QS0004 ACU, LIB-860EX-1802



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



- [193] embeX GmbH, ACU RampUp with PSU Test Report, LIB-861EX-1802
- [194] embeX GmbH, Engineering Change Order QS0005 ACU, LIB-863EX-1803
- [195] embeX GmbH, Software Loading Procedure, LIB-881EX-1804
- [196] embeX GmbH, Engineering Change Order QS0006 ACU, LIB-901EX-1808
- [197] embeX GmbH, ACU X99-0029-300.03-003 - SW Release (Executables), LIB-905EX-1808
- [198] embeX GmbH, CWT Protocol SW Version 17186 (Release SW vor HSIT), LIB-996EX-1909
- [199] embeX GmbH, CWT Protocol SW Version 17853 (Release SW - HSIT), LIB-999EX-1911
- [200] embeX GmbH, Analysis Report: FCC_SET Changes, LIB-1020EX-2004
- [201] embeX GmbH, Analysis Report: Fuse Changes, LIB-1021EX-2005
- [202] embeX GmbH, Analysis Report: THETA_SPEED/THETA_ALT_SPEED Changes, LIB-1022EX-2005
- [203] embeX GmbH, LIBRAS: Accomplishment Summary, LIB-1033EX-2003
- [204] embeX GmbH, Analysis Bug Fix Report: Theta Speed and ID 0, LIB-1037EX-2007
- [205] embeX GmbH, Analysis Report: HW Phase Overcurrent Confirmed Failure-Flag, LIB-1038EX-2008
- [206] Maccon, User acceptance testing non-segmented stator design, LIB-658EX-1407
- [207] Maccon, Auslegungsbericht und Motordatenblatt der elektrischen Maschine, LIB-763EX-1512
- [208] Maccon, Strukturmechanische/festigkeitsmechanische Analyse der elektrischen Maschine, LIB-764EX-1512
- [209] FST - TU Hamburg Harburg, Erprobung des Messsystems **XXX-Sensor** (Abschlussbericht), LIB-659EX-1407

Weitere in diesem Bericht referenzierte Quellen:

- [210] Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelsteuerung (eLectrical Individual Blade Root Actuation System), Abschlussbericht LIB-2193-1403
- [211] Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelsteuerung (Phase 2) (eLectrical Individual Blade Root Actuation System – LIBRAS-2), Vorhabenbeschreibung der ZF Luftfahrttechnik GmbH, Geschäftszeichen: LUFOV1-549-141, 27.03.2013
- [212] Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelsteuerung (Phase 2) (eLectrical Individual Blade Root Actuation System – LIBRAS-2), Förderkennzeichen 20H1310, Zuwendungsbescheid vom 09.12.2013



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelsteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



- [213] Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelsteuerung (Phase 2) (eLectrical Individual Blade Root Actuation System – LIBRAS-2), Förderkennzeichen 20H1310, Zuwendungs-, Aufstockungs- und Änderungsbescheid 1 vom 08.12.2014.
- [214] Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelsteuerung (Phase 2) (eLectrical Individual Blade Root Actuation System – LIBRAS-2), Förderkennzeichen 20H1310, Änderungsbescheid 3 vom 18.04.2016.
- [215] Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelsteuerung (Phase 2) (eLectrical Individual Blade Root Actuation System – LIBRAS-2), Förderkennzeichen 20H1310, Änderungsbescheid 4 vom 22.11.2016.
- [216] Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelsteuerung (Phase 2) (eLectrical Individual Blade Root Actuation System – LIBRAS-2) Antrag auf Aufstockung des laufenden Vorhabens LIBRAS-2, 12.05.2014
- [217] Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelsteuerung (Phase 2) (eLectrical Individual Blade Root Actuation System – LIBRAS-2) Antrag auf Verlängerung des Bewilligungszeitraums des laufenden Vorhabens LIBRAS-2, 30.01.2018
- [218] Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelsteuerung (Phase 2) (eLectrical Individual Blade Root Actuation System – LIBRAS-2), Förderkennzeichen 20H1310, Änderungsbescheid 7 vom 06.03.2018.
- [219] Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelsteuerung (Phase 2) (eLectrical Individual Blade Root Actuation System – LIBRAS-2) Antrag auf Aufstockung des laufenden Vorhabens LIBRAS-2, 07.02.2018
- [220] Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelsteuerung (Phase 2) (eLectrical Individual Blade Root Actuation System – LIBRAS-2), Förderkennzeichen 20H1310, Änderungsbescheid 8 vom 30.05.2018.
- [221] Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelsteuerung (Phase 2) (eLectrical Individual Blade Root Actuation System – LIBRAS-2) Antrag auf Aufstockung des laufenden Vorhabens LIBRAS-2, 08.08.2019
- [222] Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelsteuerung (Phase 2) (eLectrical Individual Blade Root Actuation System – LIBRAS-2) Antrag auf Verlängerung des Bewilligungszeitraums des laufenden Vorhabens LIBRAS-2, 11.09.2019



LIBRAS-2
Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen
taumelscheibenlosen Blattwurzelsteuerung (Phase 2)
Schlussbericht



- [223] Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelsteuerung (Phase 2) (eLectrical Individual Blade Root Actuation System – LIBRAS-2), Förderkennzeichen 20H1310, Änderungsbescheid 10 vom 01.10.2019.
- [224] Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelsteuerung (Phase 2) (eLectrical Individual Blade Root Actuation System – LIBRAS-2), Förderkennzeichen 20H1310, Änderungsbescheid 11 vom 25.03.2020.
- [225] Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelsteuerung (Phase 2) (eLectrical Individual Blade Root Actuation System – LIBRAS-2), Förderkennzeichen 20H1310, Änderungsbescheid 12 vom 25.08.2020.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Entwicklung und Windkanalerprobung einer elektrischen taumelscheibenlosen Blattwurzelansteuerung für Hubschrauber (Phase 2)		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Auspitzer, Thomas	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.2020	
	6. Veröffentlichungsdatum 23.12.2020	
	7. Form der Publikation	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) ZF Luftfahrttechnik GmbH Flugplatzstraße 34379 Calden	9. Ber. Nr. Durchführende Institution LIB-3233-2006	
	10. Förderkennzeichen 20H1310	
	11. Seitenzahl 164	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 225	
	14. Tabellen 2	
	15. Abbildungen 164	
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Für künftige Hubschraubergenerationen wurde von ZF Luftfahrttechnik GmbH (ZFL) eine innovative Hubschraubersteuerung konzipiert. Im Forschungsvorhaben LIBRAS (1) wiederum war es gelungen, die bisher im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms untersuchten Einzeltechnologien in einer Architektur für ein Gesamtsystem (LIBRAS®-System) zu integrieren, die den Anforderungen einer Windkanalerprobung entspricht. Dabei konnten wesentliche Fragen zur Integration der Komponenten auf dem Rotorkopf und der Konzeption einer zuverlässigen und sicheren Ansteuerung beantwortet werden. Das Vorhaben LIBRAS-2 setzte inhaltlich die Arbeiten aus dem Vorhaben LIBRAS (1) nahtlos fort. Auf Basis der in LIBRAS (1) entwickelten Systemarchitektur und aufgebauten Funktionsmuster für wichtige Systemkomponenten wie den Elektro-Mechanischen Aktuator (EMA) wurde im Vorhaben LIBRAS-2 ein komplettes LIBRAS®-System für den Rotor eines Technologiedemonstrators für eine Erprobung im Windkanal konzipiert, konstruiert, gefertigt, qualifiziert und in Betrieb genommen.		
19. Schlagwörter Hubschrauber, Primäre Flugsteuerung, taumelscheibenlos, elektrisch, Einzelblattsteuerung, IBC		
20. Verlag	21. Preis	

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report	
3. title Development and Windtunnel Test of an electrical Individual Blade Root Actuation System (Phase 2)		
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Auspitzer, Thomas	5. end of project 30.06.2020	6. publication date 23.12.2020
	7. form of publication	
	8. performing organization(s) (name, address) ZF Luftfahrttechnik GmbH Flugplatzstraße 34379 Calden	
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	9. originator's report no. LIB-3233-2006	10. reference no. 20H1310
	11. no. of pages 164	
	13. no. of references 225	14. no. of tables 2
15. no. of figures 164		
16. supplementary notes		
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract For the application to future helicopters, ZF Luftfahrttechnik GmbH (ZFL) has developed an innovative helicopter control system. Within the research project LIBRAS (1) different proven technologies were integrated into such a system (LIBRAS®-System) that fulfills the requirements for a future windtunnel test. In LIBRAS (1) the important questions regarding the integration of such a system on a rotor and the reliable and safe control of the rotor blades were answered. This work was continued in the research project LIBRAS-2. Within LIBRAS-2 a complete LIBRAS®-System aimed for a windtunnel test with a rotor technology demonstrator was designed, manufactured, qualified, and tested.		
19. keywords Helicopter, Primary Flight Control, swashplateless, electrical, IBC		
20. publisher	21. price	