

**Abschlussbericht gemäß Nr. 8.1 der
Nebenbestimmungen für Zuwendungen
auf Kostenbasis (NKBF 98)**

ZE: MT-Aerospace AG	Kennzeichen 50 RL 1630
Vorhabensbezeichnung: CaSSIS – Carbon Sub-Scaled IMC Demonstration System	
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2016 – 31.12.2019	
Berichtszeitraum: April 2016 – Dezember 2019	

Januar 2020

i.V. R. Hartmond, Project Manager

MT Aerospace AG
Franz-Josef-Strauß-Straße 5
86153 Augsburg

Inhaltsverzeichnis

1. Vorhabensbeschreibung	3
1.1 Einführung/Voraussetzungen für die Zuwendung	3
1.2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens	3
1.3 Stand der Wissenschaft und Technik	4
1.4 Bisherige Arbeiten des Antragstellers	4
1.5 Wissenschaftliche und/ oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	5
1.6 Referenzen	5
1.7 Abkürzungen	6
2. Beschreibung des Gesamtarbeitsplanes	7
2.1 Analyse (AP2200)	8
2.2 Konstruktion (AP2300)	8
2.3 Fertigungsentwicklung (AP2400)	9
2.4 Fertigung (AP3000)	9
2.5 Tests (AP4000)	9
3. Erzielte Ergebnisse	10
3.1 AP 2000: Entwicklung	10
3.1.1 Analyse	10
3.1.2 Konstruktion	14
3.1.3 Fertigungsentwicklung.....	16
3.2 AP 3000: Fertigung	17
3.2.1 Betriebsmittelkonstruktion und Beschaffung	17
3.2.2 Entwicklungsbauteile	19
3.2.3 Bauteilherstellung (SM-Modell).....	20
3.3 AP 4000: Test und Verifikation	27
3.3.1 Tests von/an Entwicklungsbauteilen	27
3.3.2 Strukturtest am SM.....	28
4. Ablauf des Vorhabens im Vergleich zur ursprünglichen Planung	33
5. Wirtschaftliche Erfolg nach Projektende	34
5.1 Verwertungsplan	34
5.1.1 Wissenschaftlicher Erfolg	34
5.1.2 Wirtschaftliche und/oder technische Erfolge	34
5.1.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	35
5.2 Arbeitsteilung / Zusammenarbeit mit Dritten	35
5.3 F&E Ergebnisse von dritter Seite	36
5.4 Erfindungen/ Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte	37

1. Vorhabensbeschreibung

1.1 Einführung/Voraussetzungen für die Zuwendung

Durch die zunehmende internationale Konkurrenz und den Kostendruck auf die Raumfahrtträgersysteme müssen neue Fähigkeiten zur effizienten Entwicklung, Produktion und zu produktionsbegleitenden Technologien entwickelt werden. Die MT Aerospace hat umfassende Kenntnisse und Erfahrungen im Bereich Entwicklung und Design von Struktur- und Motorgehäusen für Trägersysteme vorzuweisen und die vorhandenen Ressourcen und Produktionsanlagen sorgen seit Jahren für die Umsetzung des Know-hows in Raumfahrtprodukte.

Speziell in den letzten Jahren wurde die Entwicklung einer effizienten und kostenoptimierten Fertigungstechnologie für Motorgehäuse aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) bei der MT vorangetrieben. Diese bisher in Europa einzigartige neue Technologie soll in dem Vorhaben CaSSIS (Carbon Sub-Scaled Insulated Motor Case Demonstration System) am Beispiel des brasilianischen VLM (Veículo Lançador de Microsatélites, brasilianisches Trägerkonzept) Raketenmotors S50 realisiert werden, siehe auch [RD 1].

1.2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens

Mit dem Vorhaben CaSSIS soll die Entwicklung von CFK-Motorgehäusen bei der MT vorangetrieben werden. Ziel ist es die MT Fertigungstechnologie für CFK-Motorgehäuse anzuwenden und durch Prozesse für die innere thermische Isolation zu erweitern. Darüber hinaus soll die Skalierbarkeit hinsichtlich Größe des Gehäuses und Anwendung bei unterschiedlichen Anforderungen nachgewiesen werden. Hierzu soll ein CFK-Gehäuse die Leistungsfähigkeit der MT Fertigungstechnologie verifizieren.

Wissenschaftliches Ziel des Vorhabens CaSSIS ist es weitergehende Erkenntnisse über die Skalierbarkeit und damit die Übertragbarkeit der MT Fertigungstechnologie für CFK-Motorgehäuse auf kleinere Abmessungen zu bekommen. Darüber hinaus ist ein relevantes wissenschaftliches Ziel ein besseres Verständnis über das Verhalten des CFK-Motorgehäuses insbesondere inklusive der thermischen Isolierung zu erhalten.

Ursprünglich sollten in diesem Vorhaben nach dem statischen Test des Gehäuses, weitere Gehäuse zur Befüllung mit Treibstoff sowie für einen Brennversuch in Brasilien hergestellt werden. Damit sollte ein erheblicher Fortschritt der MTA Technologiereife (TRL) bis hin zur Flugfähigkeit demonstriert werden.

Durch den Wegfall der deutschen ARIANE 6 Booster-Produktionslinie aufgrund politischer Entscheidungen in 2017 sowie die Priorisierung beim Brasilianischen Partner IAE, war es für das Vorhaben CaSSIS jedoch nicht mehr sinnvoll, über den Nachweis der CFK-Technologie an einem ersten Gehäuse hinaus weitere Gehäuse zur Vorbereitung und Durchführung eines Brennversuches herzustellen. Die Ziele und Restarbeiten der Arbeitspakete 2200 (Analyse), 2400 (Fertigungsentwicklung), 3200 (Herstellung Entwicklungsbauteile), 3310 (Herstellung Qualifikationsmodell) und 4100 (Test Entwicklungsbauteile) wurden entsprechend angepasst. Die ursprünglich vorgesehenen Arbeitspakete 3320 (Herstellung Befülltestgehäuse), 3320 (Herstellung Brenntestgehäuse), 4200 (Qualifikationstest) sowie 4300 (Begleitung Brenntest) sind entfallen.

Ein weiteres Ziel ist es, die Möglichkeiten und Kompetenz von großer externer Lastaufbringung mittels Hydrauliksystemen in einem Strukturtest, gekoppelt mit einer Druckbelastung im Gehäuse, bei MT selber aus- und aufzubauen. Dies kann zum Beispiel bei laufenden und zukünftigen Entwicklungsprogrammen wie ARIANE6 oder einer CFK Oberstufe bei Struktur- und Tankqualifikationen zum Einsatz gebracht werden.

Mit der Anpassung der Arbeitshinhalte kann das Vorhaben CaSSIS trotzdem mit dem eigenständigen Ziel der Entwicklung und Fertigung eines S-50 repräsentativen IMCs zur Verifikation der Ausle-

gungsfähigkeiten sowie der Fertigungstechnologien für dickwandige, gewickelte CFK Großbauteile inkl. Strukturverklebung durchgeführt werden. Diese Technologie stellt ein Alleinstellungsmerkmal der MT Aerospace AG dar.

1.3 Stand der Wissenschaft und Technik

Stand der Technik zur Herstellung von CFK-Motorgehäuse sind in erster Linie die Nasswickel- und Prepregtechnologie.

Bei der Nasswickeltechnologie wird die Kohlefaser durch ein Harzbad gezogen, die Faser nimmt dabei Harz auf und wird dann auf den zu umwickelnden Körper aufgebracht. Nachteile dieser Fertigungstechnologie sind zum einen das Verwenden von offenem Harz, das die Umgebung der Wickelanlage, die Umgebung der Anlage verschmutzt sowie die Luft im Arbeitsbereich belastet. Des Weiteren ist es nur möglich das Bauteil „in einem Zuge“ zu fertigen was bei großen Bauteilen mit langen Verarbeitungszeiten Schwierigkeiten mit der Gelierung des Harzes und damit einer Verschlechterung in der Qualität des Verbundaufbaus mit sich bringt.

In der Prepregtechnologie werden mit Harz vorimprägnierter Kohlefaserhalbzeuge verwendet, die dann bei hohen Temperaturen ausgehärtet werden. Nachteil dieser Fertigungstechnologie ist ein merklicher Qualitätsverlust bei dicken Wandstärken. Dem kann nur durch Zwischenkomprimierung und Zwischenaushärtung entgegengewirkt werden was eine erhöhte Fertigungsdauer mit sich bringt. Weiterhin erfordert die Prepregtechnologie einen hohen Investitionsaufwand z. B. für Autoklaven, Legeroboter, gekühlte Lagerhaltung.

Eine Fertigungstechnologie, die bei der MT im Technologiematurationprogramm untersucht wird, ist lasergestütztes Legen bzw. Wickeln mit faserverstärkten Thermoplasten. Dabei werden sog. Tapes aus Thermoplast verwendet die durch einen automatisierten Legekopf drapiert werden. Die thermoplastischen Tapes und der Untergrund werden durch Laserstrahlung erwärmt und das aufgebrachte Tape wird mittels einer Andrückrolle mit dem Verbund komprimiert. Der Vorteil ist die Autoklav-freie Herstellung eines Faserverbundes. Diese Technologie wurde bei der MT in dem Projekt ComBo (Composite Booster) untersucht, ein Programm im Rahmen von BayernFIT zusammen mit Partnern vom LCC (Lehrstuhl für Carbon Composite der TU München), dem IFB (Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart), sowie dem DLR ZLP (Zentrum für Leichtbau- und Produktionstechnik) in Augsburg. Details zu diesem Projekt sind im nächsten Abschnitt zu finden.

Die von der MT Aerospace favorisierte neue Fertigungstechnologie für CFK-Motorgehäuse beinhaltet das Legen von trockenen Kohlefasern und die anschließende Infusionierung mit Harz und der abschließenden Aushärtung. Diese Technologie verspricht eine erhöhte Verbundqualität und damit reduziertem Prüfaufwand und wurde in dem Projekt FORC zum ersten Mal von der MT entwickelt und soll in dem Vorhaben CaSSIS weiter angewendet und an den brasilianischen S50-Motor adaptiert werden.

1.4 Bisherige Arbeiten des Antragstellers

Die wichtigsten für dieses Vorhaben relevanten Entwicklungs- und Technologieprogramme der MT Aerospace sind:

- Erfahrung in Konstruktion/Nachweis und dem damit verbundenen Aufbau von Systemwissen sowie den Bau der ARIANE 5 Feststoffmotorgehäuse in Metallbauweise seit den 80er Jahren
- Mehrere Technologieprogramme z.B. BoJo (Bolted Joints, ESA TRP AO/1-4975/05/NL/SFe in 2009) zur Auslegung und Optimierung von CFK-Verbindungstechniken
- 2012-2014: Entwicklung eines Feststoffmotorgehäuses mit Ø1,3 m und einer Länge von ca. 4 m in Thermoplastbauweise im Verbundprojekt ComBo (Composite Booster, Projekt im BayernFIT-Programm, Förderkennzeichen 13 40/892 51/16/2011), das mit einem erfolgreichen statischen Bersttest abgeschlossen wurde. (Erläuterung zur Herstellungsweise siehe vorheriges Kapitel)

- 2013-2017: die Entwicklung eines Feststoffmotorgehäuses in CFK-Infusionstechnik im Programm FORC (Fiber Reinforced Optimized Rocket Case). Hier wurde ein CFK-Motorgehäuse mit Ø3,5 m und einer Länge von ca. 6 m entwickelt, gebaut und getestet (Erläuterung zur Herstellungsweise siehe vorheriges Kapitel). Dieses Projekt bildet die Grundlage für die Entwicklung sowie die Produktion des CFK-Motorgehäuses im Rahmen von CaSSIS. In FORC wurde die Auslegungskompetenz für die Struktur von CFK-Motorgehäusen aufgebaut, die dann für das Vorhaben CaSSIS eingesetzt wird. Die in FORC aufgebaute Fertigungskompetenz, die gewonnen Erkenntnisse hinsichtlich Materialauswahl, Prozessauswahl und Prozessentwicklung sowie der Fertigung und Test von Breadboards werden für CaSSIS angewendet. Die Kenntnisse aus FORC aus der Fertigung des full-scale Gehäuses werden ebenfalls für CaSSIS eingesetzt und weiterentwickelt. Das FORC Gehäuse wurde Mitte 2017 in einem Struktur- und Bersttest erfolgreich verifiziert.

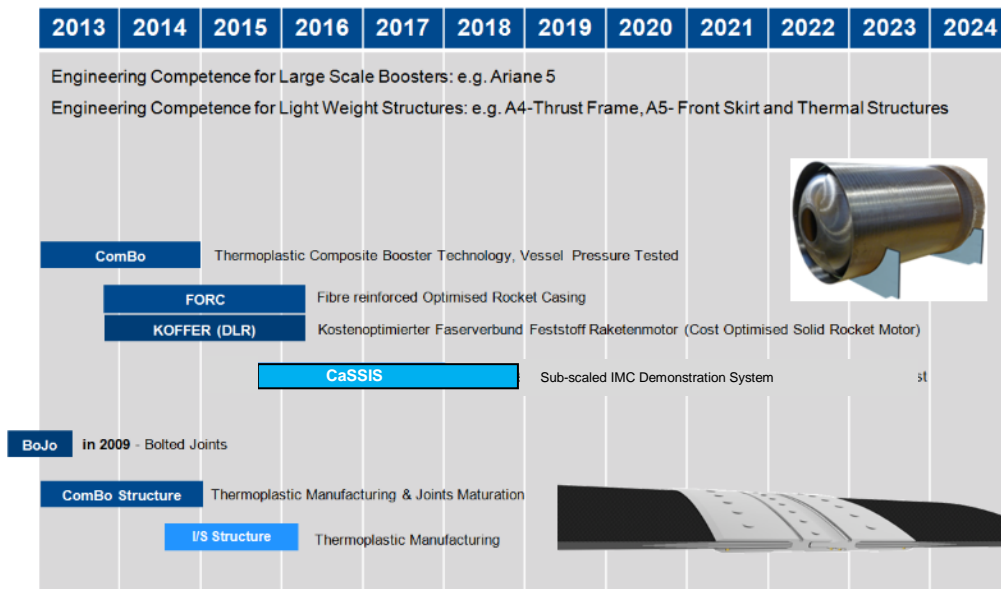


Abbildung 1-1: MT CFK Strukturen & Motorgehäuse - Technologiematurationsplan

1.5 Wissenschaftliche und/ oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die Entwicklung und Herstellung von CFK-Motorgehäusen gehören zu den strategischen Zielen der MT. Im Rahmen des CaSSIS-Projektes gilt es, bestehende Entwicklungsfertigkeiten und Erfahrungen auf ein konkretes Motorgehäuse anzuwenden.

In CaSSIS wird die bei MT entwickelte Fertigungstechnologie für ein isoliertes Motorgehäuse angewendet. Hier gilt es im Wesentlichen die Interaktionen von innerer Isolation und dem Herstellungsprozess für das Gehäuse zu bestätigen. Durch den folgenden Test und dessen Auswertung soll die Fähigkeit der MT-Technologie auch für diese Lasten nachgewiesen werden.

Die Erfolgsaussichten des Vorhabens CaSSIS basieren auf den in FORC durchgeführten Arbeiten und den dabei gewonnenen Erkenntnissen hinsichtlich Auslegung und Fertigung sowie den Ergebnissen aus dem Struktur- und Bersttest. Die MT-Fertigungstechnologie die in FORC maturiert wird, wird für CaSSIS als anwendbar angesehen.

1.6 Referenzen

- [RD 1] Vorhabenbeschreibung CaSSIS – Carbon Sub-scaled IMC Demonstration System (21.12.2015) mit Änderungsbescheid vom 31.10.2018

[RD 2]	CaSS-ST-1000000-X-0001-MTA	Technical Specification
[RD 3]	CaSS-DID-1000000-X-0001-MTA	Product definition File
[RD 4]	CaSS-DJ-1000000-0001-MTA	Justification File
[RD 5]	CaSS-DVP-1000000-X-0001-MTA	Development and Verification Plan
[RD 6]	CaSS-NT-1000000-X-00001-MTA	Structural Analysis Report
[RD 7]	CaSS-NT-1000000-X-00002-MTA	SM Prediction
[RD 8]	CaSS-PE-1000000-X-0001-MTA	ITP Bonding Characterization Test Plan and Report
[RD 9]	CaSS-PEQ-1000000-X-0001-MTA	Qualification Test Plan
[RD 10]	CaSS-REQ-1000000-X-0001-MTA	SM Test Report
[RD 11]	CaSSIS-20181210-gromar02	SM acceptance meeting
[RD 12]	PCT-20190408-RH01	SM Test readiness meeting

1.7 Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
AG	Auftraggeber
AP	Arbeitspaket
A6	Ariane 6
CDR	Critical Design Review
CFK	Kohlenstofffaser Verstärkter Kunststoff
DFW	Dry Fibre Winding (Trockenwickeln)
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EPDM	Ethylene Propylene Diene Monomer (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk)
EPS	Etage à Propergols Stockables
ESA	European Space Agency
FLPP	Future Launcher Preparatory Program
F&E	Forschung & Entwicklung
ICD	Interface Control Document
IMC	Insulated Motor Case
ITP	Internal Thermal Insulation
LVA	Launch Vehicle Adapter
MEOP	Maximum Expected Operating Pressure
NDI	Non-Destructive Investigation
SRM	Solid Rocket Motor (Feststoffraketenmotor)
TRL	Technology Readiness Level
VLM	Veículo Lançador de Microsatélites

2. Beschreibung des Gesamtarbeitsplanes

Die in bisherigen Entwicklungsprogrammen stattgefundenen Verifikationstests liefern wertvolle Ergebnisse und die Grundlage für die konsequente Fortsetzung der CFK-Motorgehäuseentwicklung. In dem Projekt FORC wurde die Auslegung und Herstellung eines CFK-Motorgehäuses fokussiert und der logische nächste Schritt, der mit dem Vorhaben CaSSIS realisiert werden soll ist die Herstellung und Test von Insulated Motor Cases (IMC), CFK-Motorgehäusen mit thermischer Innenisolation (im weiteren EPDM genannt).

Für die Verifikation ist es hinreichend ein kleines repräsentatives Modell zu nutzen. Dafür bietet sich das S50-Motorgehäuse des brasilianischen VLM Trägerkonzeptes an. Das Designkonzept von FORC soll hierbei direkt durch Skalierung übertragen werden.

Dazu wird ein S50-repräsentatives Motorgehäuse von MT entwickelt und anschließend hergestellt und getestet.

Auf Basis der in FORC vorentwickelten CFK-Technologie sind im Rahmen dieses Vorhabens folgende Arbeiten geplant:

- Definition eines S50-kompatiblen Motorgehäuses, d.h. in erster Linie material- und prozessspezifischen Eigenschaften auf den Lagenaufbau übertragen – im Jan. 2018 abgeschlossen durch das erfolgreiche tCDR
- Festigkeitsnachweis (aufbauend auf die vorhandenen Analysen und Vorgehensweisen sowie der Interfaceanforderungen) für den neuen Lagenaufbau erbringen – im Jan. 2018 abgeschlossen durch das erfolgreiche tCDR
- Fertigung von einem S50-kompatiblen Motorgehäusen in MT Fertigungstechnologie (SM) – derzeit kurz vor der Finalisierung – mit einem abschließenden Strukturtest.

Hierzu werden die im Folgenden kurz skizzierten Hauptproduktionsschritte der MT-Technologie verwendet:

- Flansche für Zünder und Düse (inkl. des vorausgehärteten EPDM der Dombereiche) auf den Wickelkern aufbringen
- EPDM Aufbringen auf den zylindrischen Bereich des Wickelkerns und Aushärten
- Trockenwickeln auf EPDM und Infusion des Druckbehälters
- Trockenlegen und Infusion der Schürzen
- Verbinden der Schürzen mit den metallischen Interfacestrukturen
- Verkleben von Schürzen und Druckbehälter

Die Entwicklungslogik ist im Folgenden dargestellt. Dabei stellt der mittlere Pfad die Hauptentwicklungslinie dar. Diese beinhaltet die Strukturauslegung, die Konstruktion sowie die Fertigungsentwicklung des S50-IMC-Designs. Parallel dazu erfolgen die für die Gehäuseentwicklung und Fertigung notwendigen begleitenden Entwicklungstests, als auch die Beschaffung der benötigten Betriebsmittel. Auf allen drei Pfaden aufbauend erfolgt die Fertigung des Qualifikations-Modells (SM).

Ein detaillierter Entwicklungsplan wurde im Vorhabensablauf erstellt, siehe [RD 4].

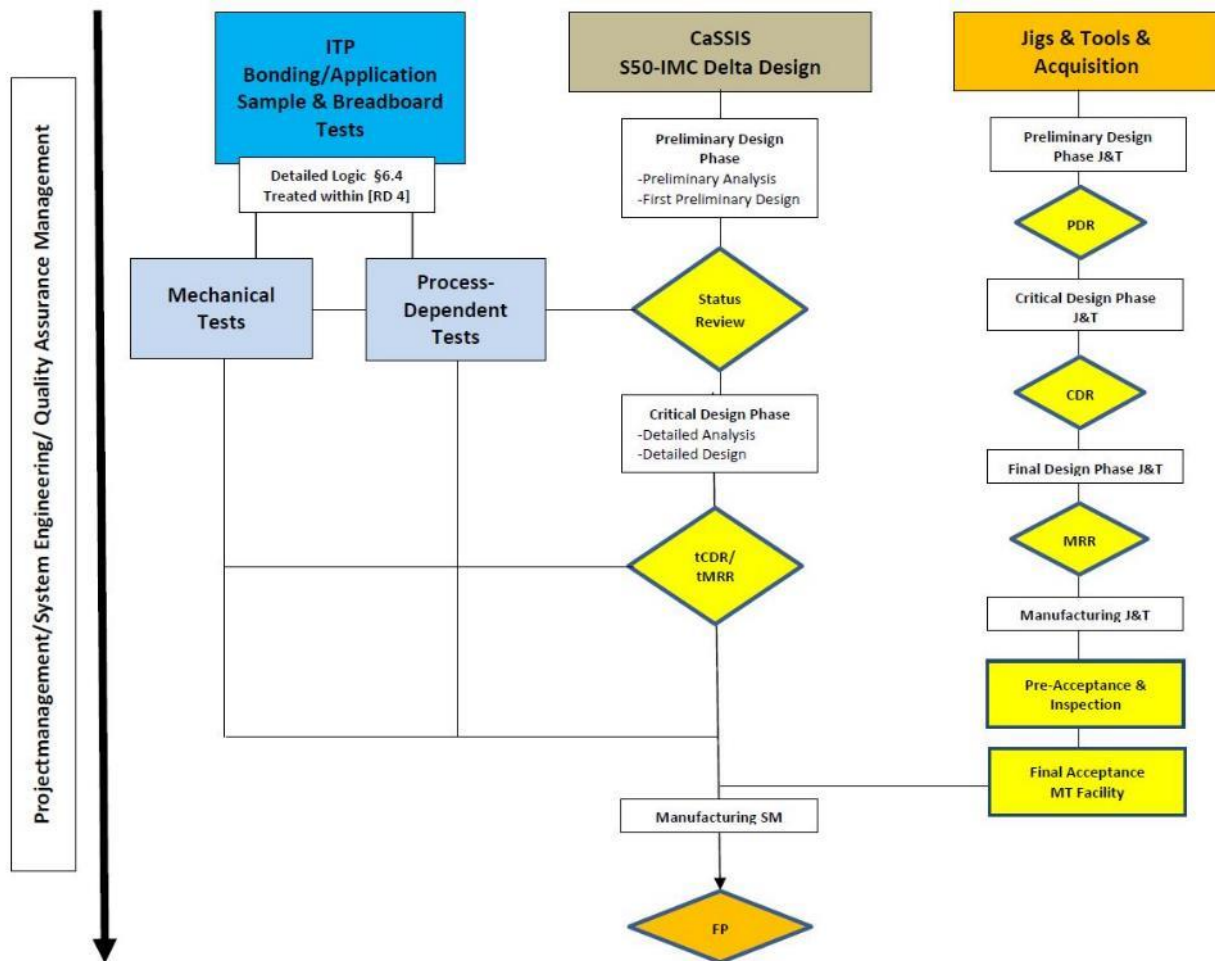


Abbildung 2-1: CaSSIS Entwicklungslogik

Im Folgenden erfolgt eine Kurzübersicht der Arbeitspakete

2.1 Analyse (AP2200)

Im Rahmen der Entwicklungstätigkeiten für CaSSIS, basierend auf der brasilianischen S50-IMC-Spezifikation und dem dafür bestehenden Design, erfolgt eine Anpassung aufgrund der MT eigenen Materialien und Prozesse. Hierzu fand die Auslegung entsprechend der S50 Lasten unter Berücksichtigung der Verformungsanforderungen statt.

Konkret beinhaltet dies eine Anpassung des Wickelmusters, welches speziell auf die von MT verwendeten Materialien/Prozesse und insbesondere auf die dadurch einhergehenden Fertigungsparameter zugeschnitten ist. Um sicherzustellen, dass das tatsächliche Wickelmuster im Bauteil dem der Auslegung entspricht, wird dieses neben der Kontrolle und Protokollierung des Wickelprogramms durch Ablagetests vor der Fertigung des Qualifikationsmotorgehäuses verifiziert.

Zum Strukturtest wurden die Auslegungsrechnungen mit den real hergestellten Bauteildaten für die Testvorhersage angewendet.

2.2 Konstruktion (AP2300)

Auf Basis der S50-IMC Anforderungen und Schnittstellen, dem bestehenden S50-IMC Design, sowie den Anforderungen, die sich durch die Verwendung der MT eigenen Materialien und Prozesse

ergeben wird in enger Zusammenarbeit mit der Analyse und Fertigung-/Fertigungsentwicklung ein IMC Design in Infiltrationstechnik entwickelt.

2.3 Fertigungsentwicklung (AP2400)

Die maßgebliche Aufgabe der Fertigungsentwicklung im Projekt ist die Anpassung des MT Fertigungskonzeptes und -prozesses für das S50-IMC Design in Infiltrationstechnik. Hierzu gehören auch die Auswahl geeigneter Maschinen (intern und extern) und Vorrichtungen für die Bauteilherstellung, die Auswahl/Anpassung geeigneter Fertigungsmaterialien und Fertigungshilfsstoffe und deren rechtzeitige Beschaffung. Ein Schwerpunkt im Rahmen des CaSSIS Projektes ist die Übertragung der brasilianischen EPDM-Prozesse auf den Fertigungsprozess bei MT.

2.4 Fertigung (AP3000)

Im Rahmen der Arbeitspakete AP3310 (SM) wird ein S50-IMC in MT Infiltrationstechnik hergestellt, und im AP4200 (SM) getestet werden. Der gesamte Fertigungsablauf wird entwickelt und dokumentiert.

2.5 Tests (AP4000)

Ziel des Arbeitspaketes AP4200 ist es, eine Testprozedur für den Qualifikationstest abzuleiten, diesen Test erfolgreich durchzuführen und damit aufzuzeigen, dass das entwickelte CaSSIS Design, die zugrundeliegenden Annahmen und Nachweisführung der Strukturberechnung als auch die MT-Fertigungsprozesse in der Lage sind allen Anforderungen der IMC Spezifikation zu erfüllen.

Hierzu werden die notwendigen Testeinrichtungen konstruiert und beschafft.

3. Erzielte Ergebnisse

In diesem Kapitel wird auf die Hauptarbeitspakete, wie sie im Arbeitsstrukturplan dargestellt sind, eingegangen und die entsprechenden Ergebnisse dargestellt.

3.1 AP 2000: Entwicklung

3.1.1 Analyse

Im Rahmen der Entwicklungstätigkeiten für CaSSIS erfolgte, basierend auf der brasilianischen S50-IMC-Spezifikation und dem dafür bestehenden Design, welche in eine Bauteilspezifische Spezifikation überführt wurde, siehe [RD 2], eine Anpassung aufgrund der MT eigenen Materialien und Prozesse. Konkret beinhaltete dies eine Anpassung des Wickelmusters, welches speziell auf die von MT verwendeten Materialien/Prozesse und insbesondere auf die dadurch einhergehenden Fertigungsparameter zugeschnitten ist. Um sicherzustellen, dass das tatsächliche Wickelmuster im Bauteil dem der Auslegung entspricht, wurde dieses neben der Kontrolle und Protokollierung des Wickelprogramms durch Ablagetests vor der Fertigung der Qualifikationsmotorgehäuse verifiziert. Diese Sicherstellung des applizierten Wickelmusters stellt eine entscheidende Grundlage für den Qualifikationsnachweis dar.

Im Rahmen des Tragfähigkeitsnachweises muss das neue S50-IMC-Design (CaSSIS) in Infiltrationstechnik dabei den geometrischen Randbedingungen (Interfaces), den mechanischen sowie thermischen Lasten der IMC-Spezifikation Rechnung tragen.

Im Folgenden werden die Haupttätigkeiten der Analyse genannt:

- Überprüfung der für S50 ausgewählten dimensionierenden Lastfälle (Plausibilitätscheck)
- Layout/Adaption des Wickelmusters unter Berücksichtigung der MT eigenen Materialien und Prozesse
- Numerischer Tragfähigkeitsnachweis des S50-IMC Designs (inklusive aller Interfaces) entsprechend den ausgewählten dimensionierenden Lastfällen, siehe [RD 6].

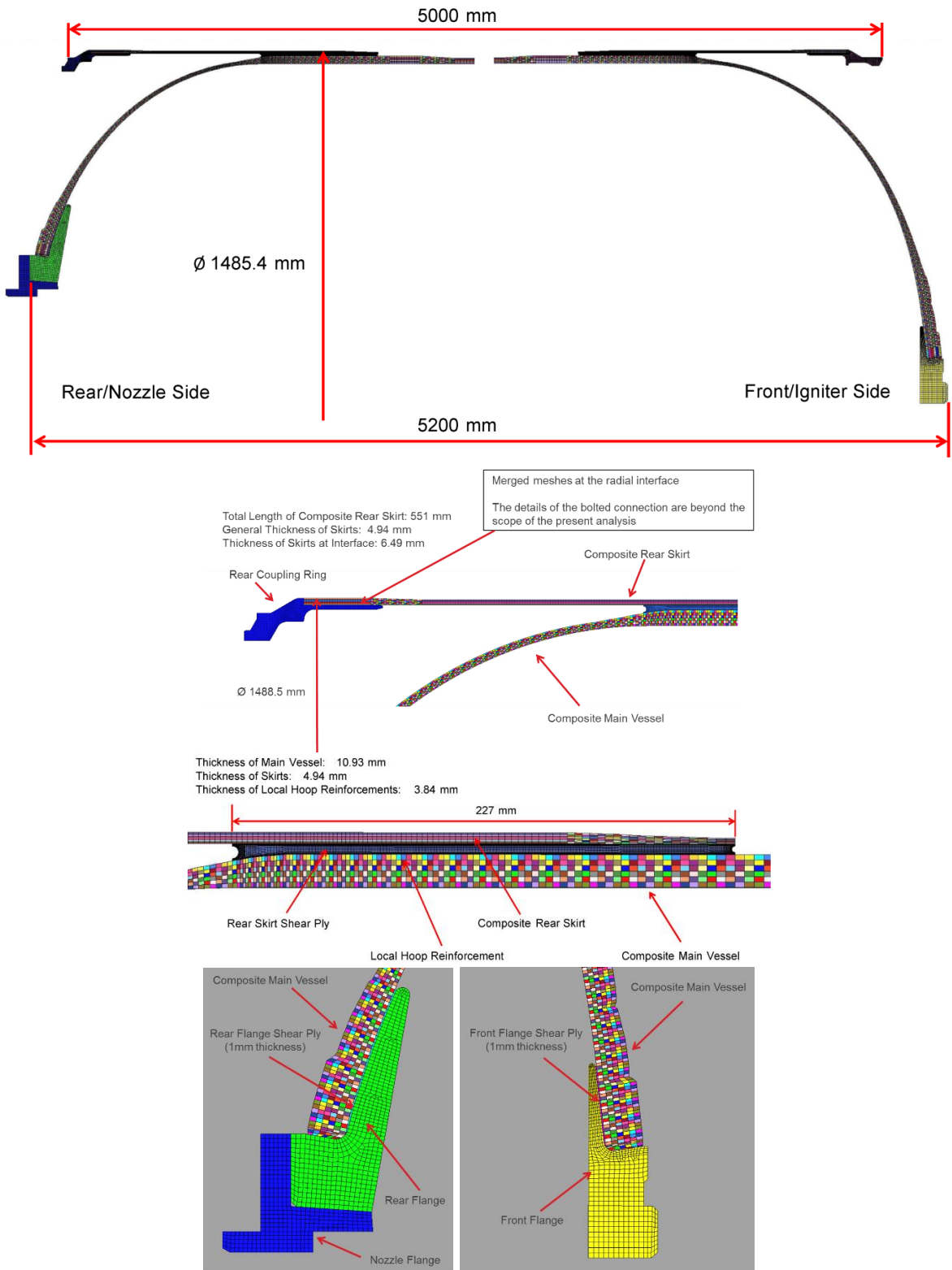


Abbildung 3-1: 2D FEM Model (CDR-status)

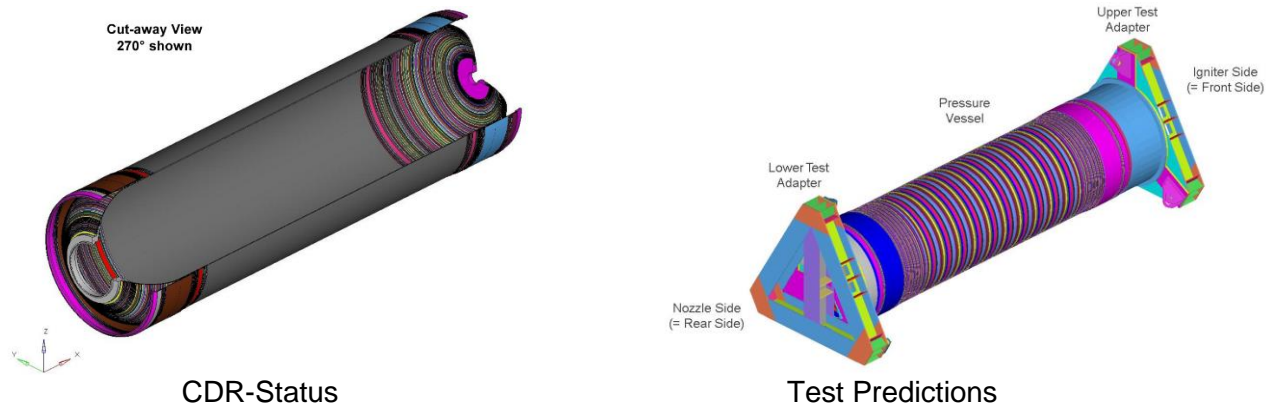


Abbildung 3-2: 3D FEM Model

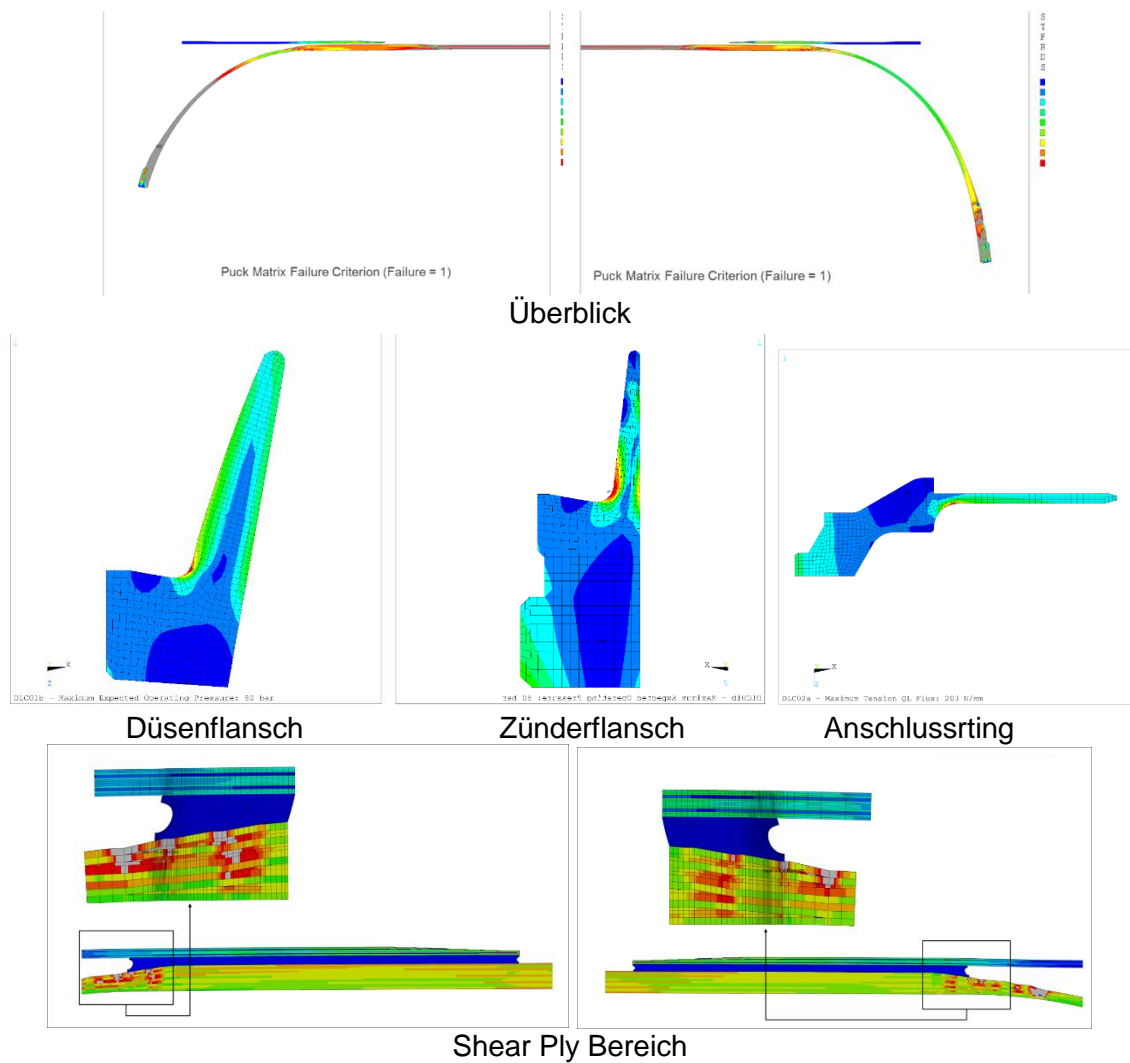


Abbildung 3-3: Exemplarische Ergebnisdarstellung

	DLC01a	DLC01b DLC01c		DLC02a	DLC02b	DLC03a	DLC03b
	Proof Pressure	MEOP Yield	MBP Ultimate	203 N/mm	-383 N/mm	Proof + 162 N/mm	Proof + -306 N/mm
MoS							
Rear Flange	"redundant"	23.7 % (MEOP)	33.3 % (Ultimate)	"no load"			
Front Flange		-6.3 % (Yield)	7.9 % (Ultimate)				
Rear Coupling Ring				91.1 %	2.2 %		
Front Coupling Ring				221 %	62.2 %		
Composite IFF				44 %	64 %		
Composite FF	64.2 %	55.3 %	47.3 %	479 %	105 %	65.5 %	62.7 %
Rear Composite Interface IFF + Skirts	16.8 %			≥ 44 %	≥ 64 %	≥ 12.4 %	≥ 12.4 %
Front Composite Interface IFF + Skirts	17.5 %			≥ 44 %	≥ 64 %	≥ 12.4 %	≥ 12.4 %
Rear Skirt Shear Ply				134 %	24 %	66.9 %	4.85 %
Front Skirt Shear Ply				135 %	24 %	76 %	-9.5 %

Abbildung 3-4: Overview of MoS Evaluations (CDR-status)

Die relevanten Steifigkeitsanforderungen konnten numerisch und auch anschließend im Test eingehalten werden:

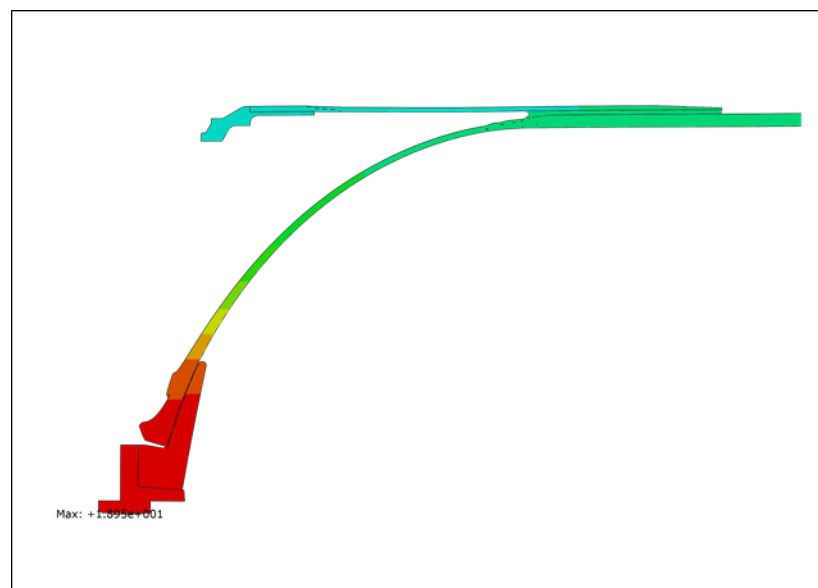


Abbildung 3-5: Total deformations of the rear part

	Anforderung	Vorhersage	Test
Zylinder Radail	5,5	5,3	5,0
Zylinder Axial	11,0	11,0	11,5

Die statische Festigkeit des Gehäuses wird dabei mit Hilfe des Versagenskriteriums nach Puck nachgewiesen, welches zwischen den Versagensmoden Faserbruch und Zwischenfaserbruch unterscheidet.

Der Festigkeitsnachweis der Bolzenverbindungen an der vorderen und hinteren Schnittstelle zwischen CFK-Schürze und metallischen Schürzenring erfolgte analytisch nach HSB.

Der Stabilitätsnachweis des Gehäuses erfolgte durch eine lineare Beulanalyse, welche die globale Beulmode mit dem kleinsten Eigenwert vorhersagt. Der Einfluss von Imperfektionen wurde dabei durch die Anwendung des Knock-Down-Faktor Ansatzes nach NASA SP8007 und VDI2014 berücksichtigt.

- Numerische Testvorhersage des statischen Strukturtests und dessen Auswertung, siehe [RD 7].

Diese Arbeiten wurden bis zum CDR abgeschlossen. Die Testvorhersage, basierend auf der realen Testkonfiguration wurde zum TRR vorgelegt.

Entgegen der ursprünglichen Vorhabensplanung ergaben sich für dieses Arbeitspaket aufgrund von neuen Anforderungen aus Brasilien zusätzlichen Arbeiten für die Auslegung und Bewertung der strukturellen Anbindung der Schürzen an den Druckbehälter. Insbesondere die nachträglich durch den brasilianischen Partner eingeführten thermischen Anforderungen für den Flugfall als auch bereits während der Treibstoffbeladung machten einen zweiten Analyseloop notwendig für den zusätzliche Materialuntersuchungen und –charakterisierungen notwendig wurden.

3.1.2 Konstruktion

Auf Basis der S50-IMC Anforderungen und Schnittstellen, dem bestehenden S50-IMC Design, sowie den Anforderungen, welche sich durch die Verwendung der MT eigenen Materialien und Prozesse ergaben wurde in enger Zusammenarbeit mit der Analyse und Fertigung-/Fertigungsentwicklung ein IMC Design in Infiltrationstechnik entwickelt. Ein spezieller Fokus lag hierbei auf der Bewertung der in der Spezifikation bzw. im bestehenden Design geforderten Schnittstellen (mit zugehörigen Toleranzen).

Der Entwicklungsprozess erforderte eine kontinuierliche Abstimmung mit dem Projektteam bezüglich Anforderungen, eventuellen Designänderungen und Fertigungsaspekten. Neben der Unterstützung der Festigkeitsanalyse mit Skizzen und dreidimensionalen CAD Modellen, welche die oben genannten Punkte berücksichtigen, wurden davon abgeleitet alle projektrelevanten Definitionszeichnungen und Stücklisten für die Fertigung erstellt. Auch die Erstellung und kontinuierliche Aktualisierung des Massenstatus zählte zu den Aufgaben. Ferner ist es Aufgabe der Konstruktion an der Definition von Probekörper und Entwicklungsbauteilen in Form von CAD Modellen, Skizzen und Zeichnungen mitzuwirken.

Für das Motorgehäuse wurde eine dedizierte Bauteilakte erstellt, siehe [RD 3].

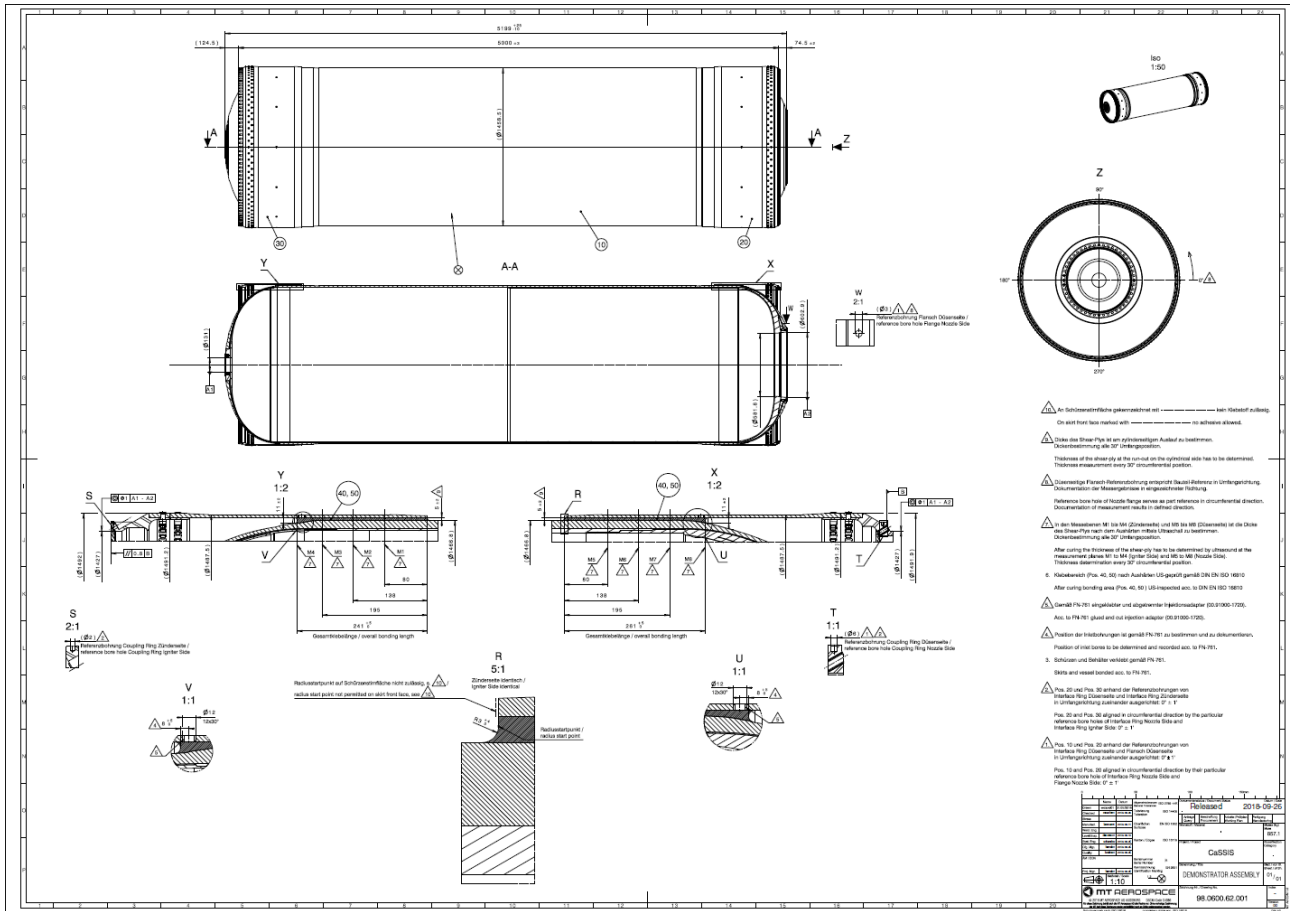


Abbildung 3-6: CaSSIS Definitionszeichnung

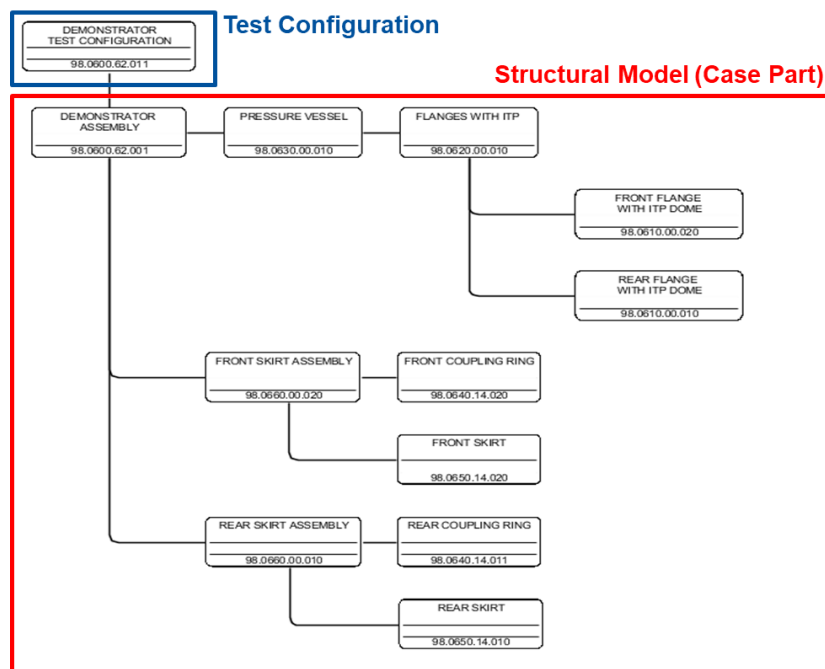


Abbildung 3-7: CaSSIS Zeichnungsbaum

Hierbei konnte ein massenoptimiertes Design, mit einer Nominalmasse von nur 853kg, entworfen werden. Auch wenn es hier keine Anforderung gab, so ist diese Masse weit unterhalb der erzielbaren mit herkömmlichen Technologien.

Die Massenbilanz wurde am hergestellten Gehäuse bestätigt:

Item	Weighed Mass	As-built CAD Mass	Nominal Mass	Source
	[kg]	[kg]	[kg]	
Demonstrator Assembly	868	846,3	853,5	Weighed at MTA
Pressure Vessel	766*	743,9	754,5	Weighed mounted on mandrel
Tank Shell		427,1	439,8	Combined applied fiber and resin mass
Rear Flange		75,4	75,6	
Front Flange		8,9	8,9	
ITP		232,5	230,2	
Front Skirt Assembly	41,2	41,4	41,1	Weighed at MTA
Front Skirt		21,6	21,3	
Front Coupling Ring		17,6	17,6	
IF Bolt Connection		2,2	2,2	
Rear Skirt Assembly	43,5	43,7	43,4	Weighed at MTA
Rear Skirt		23,1	22,8	
Rear Coupling Ring		18,4	18,4	
IF Bolt Connection		2,2	2,2	
Shear Ply	-	17,3**	14,5	

*Revaluated mass with slight uncertainty due to consideration of theoretical shear ply mass

Abbildung 3-8: CaSSIS Massenbilanz

Auch die geforderten Bauteiltoleranzen wurden eingehalten:

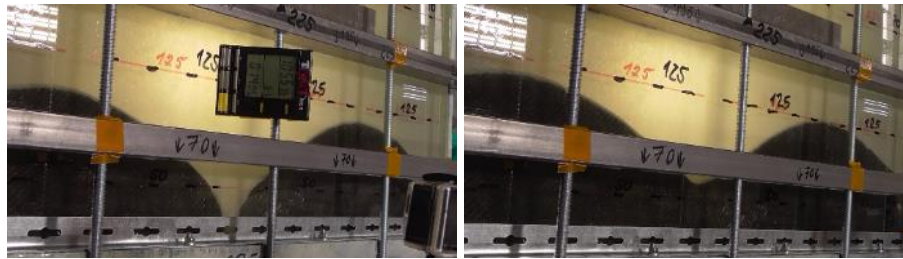
- Rear Flange to Front Flange: **5196.0 mm ✓** (Requ. 5199.0 +25/-10)
- Rear Coupling Ring to Front Coupling Ring: **5005.8 mm ✓** (Requ. 5000.0 +/-3)
- Rear Flange to Rear Coupling Ring: **75.5 mm ✓** (Requ. 74.5 +/-2)
- Orientation of Rear Coupling Ring to Rear Flange: **+0.1°/+1.3 mm ✓** (Requ. ±0.0167°/ ± 0.21mm ref. Ø 1460mm)
- Orientation of Rear Coupling to Front Coupling Ring: **-0.9°/-11.5 mm ✓** (Requ. ±0.0167°/ ± 0.21mm ref. Ø 1460mm)

3.1.3 Fertigungsentwicklung

Die maßgebliche Aufgabe der Fertigungsentwicklung im Projekt war die Anpassung des MT Fertigungskonzeptes und -prozesses für das S50-IMC Design in Infiltrationstechnik. Hierzu gehörte auch die Auswahl geeigneter Maschinen (intern und extern) und Vorrichtungen für die Bauteilherstellung, die Auswahl/Anpassung geeigneter Fertigungsmaterialien und Fertigungshilfsstoffe und deren rechtzeitige Beschaffung. Ein Schwerpunkt im Rahmen des CaSSIS Projektes war die Übertragung der brasilianischen EPDM-Prozesse auf den Fertigungsprozess bei MT, siehe [RD 8].

Die Fertigungsentwicklung erstellte in enger Zusammenarbeit mit der Analyse und Konstruktion das Wickelprogramm für das Strukturmodell. Außerdem wurden die Fertigungszeichnungen für die Bauteile freigegeben und die Bauteilherstellung, gemeinsam mit den unterbeauftragten Fertigungsstätten betreut. Die Fertigungsentwicklung wirkte auch an der Herstellung von Proben, deren Tests (z.B. Anbindung von CFK an die thermische Isolation) und deren Auswertung mit. Begleitend werden Fertigungsdokumente als Zuarbeit für die Qualitätssicherung erstellt.

Zur finalen Auswahl des Materials und des Prozesses zur Verklebung von Schürze und Druckbehälter wurden zusätzliche Vorversuche notwendig und durchgeführt, um eine gesicherte Verklebung der Gehäuse sicherzustellen.



Start des Materialzusammenflusses Ausgleich der Fließfront

Abbildung 3-9: Vorversuches für den Verklebe-Prozess mit zwei Angüssen

Gemeinsam mit dem Hersteller des Shear Ply Materials wurde eine leicht Modifizierung des Materials (MTA06) mit längeren Topfzeiten bei möglichst unveränderten mechanischen Eigenschaften erzielt. Die mechanischen Eigenschaften wurden mittels Probestests nachgewiesen. Der Prozessverlauf konnte an einer Demonstratorverklebung final verifiziert werden.

Im Rahmen der vom Brasilianischen Partner, fehlerhaft angelieferten EPDM-Domkappen, wurden über die in der ursprünglichen Vorhabensplanung hinausgehenden Prozessuntersuchungen für die Aufbringung des EPDMs auf den Wickelkern, eine zusätzliche Definition eines Reparaturprozesses notwendig. Erst nach Verifikation und exzessiver Abstimmung mit IAE konnte diese Reparatur auch erfolgreich auf das erste Produkt angewendet werden.



Einschneiden

Aufbringen auf den Kern

Auffüllen des Fehlmaterials

Abbildung 3-10: Reparaturprozesses der EPDM Dome

Ein Prozess zum Einschrumpfen der metallischen IF ringe in die CFK Schürzen wurde entwickelt um die hohen geometrischen Toleranz Anforderungen zu realisieren.

3.2 AP 3000: Fertigung

3.2.1 Betriebsmittelkonstruktion und Beschaffung

Aufgabe der Betriebsmittelkonstruktion war die Bereitstellung aller notwendigen Vorrichtungen zur Herstellung und Test der Gehäuse.

Des Weiteren wurden alle Hilfsmittel für die Handhabung des Gerätes, bis hin zu notwendigen Transporteinhausung, entworfen und zur Verfügung gestellt.

Eine Hauptaufgabe war die Definition und Beschaffung des Wickeltools und der dazu notwendigen Handhabungseinrichtungen:

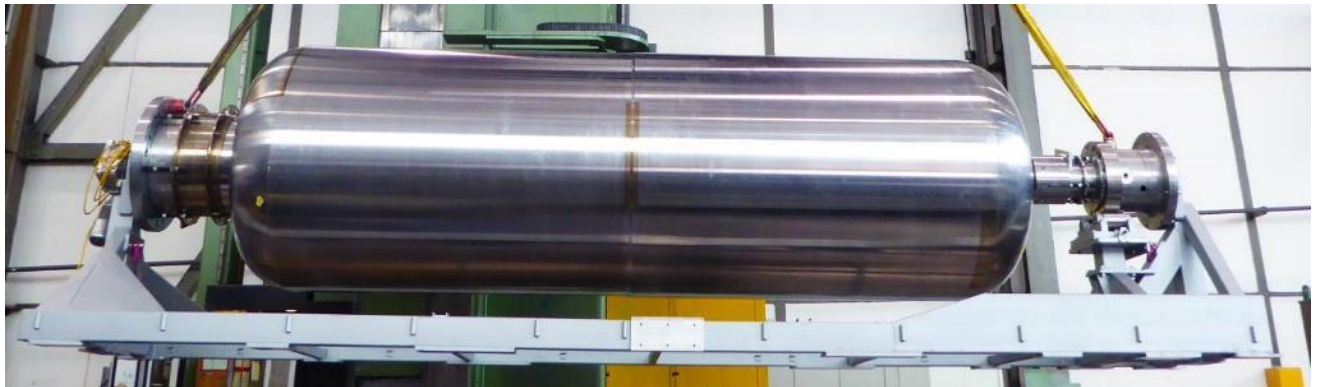


Abbildung 3-11: Wickelkern und Drehgestell



Abbildung 3-12: Bandförderer und Demontageeinheit



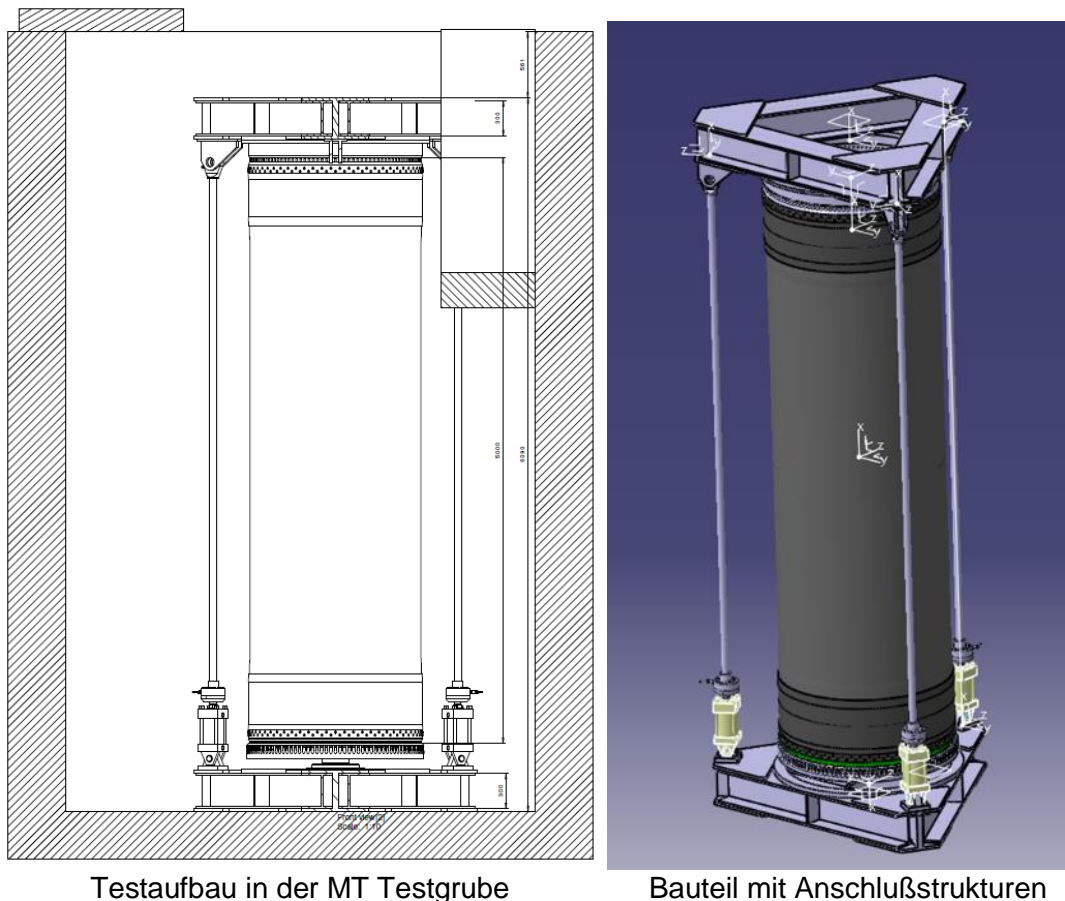
- Abbildung 3-13: Schürzentool

Für den Strukturtest war zu Beginn des Vorhabens angedacht, eine existierende Testumgebung bei der Materialprüfungsanstalt MPA in Stuttgart umzukonstruieren. Diese Arbeiten wurden nahezu abgeschlossen, jedoch ohne die mögliche Berücksichtigung der, von Brasilien als Beistellung vorgesehener Hydrauliksystemen. Da diese Beistellung sich alsein für die Vorhabensziele zu großes zeitliches und finanzielles Risiko darstellte, wurde eine angepasste Konstruktion einer Testumgebung inklusive Hydrauliksystem notwendig.

Hierzu wurde der Test in einer bei MT vorhanden Testgrube integriert. Ein angepasstes Testgerüst mit entsprechenden Hydraulikaktuatoren wurde detailliert und beschafft.

Der Test Aufbau wurde signifikant erweitert um alle flugrelevanten mechanischen Lasten applizieren zu können. Die Hydraulik Zylinder ermöglichten ein Abtesten der schürzen und Booster Zylinder hinsichtlich axialen Zug- und Druckkräften als auch Biegemomente.

Der prinzipielle Aufbau ist in der folgenden Skizze ersichtlich:



Testaufbau in der MT Testgrube

Bauteil mit Anschlußstrukturen

Abbildung 3-14: Testgrube und Laststruktur für den Strukturtest

3.2.2 Entwicklungsbauteile

In AP3200 wurden die Probekörper und Entwicklungsbauteile, die im Arbeitspaket AP4100 getestet werden, hergestellt.

Die Herstellung der Probekörper für die jeweiligen Tests (siehe AP 3200 und 4100) erfolgte nach den jeweils gültigen Normen. Hierzu mussten auf Grundlage der Fertigungszeichnungen die notwendigen Arbeitspläne und Fertigungsaufträge erstellt werden. Der Fertigungsablauf der Probekörper wurde dokumentiert.

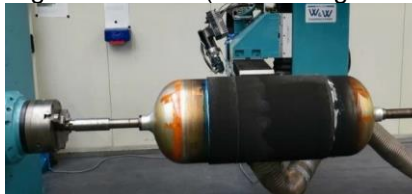
Zusätzlichen Arbeiten bezüglich der Herstellung von Probekörpern für die Vervollständigung der Materialcharakterisierung von CFK sowie dem Shear-Ply Material wurden im Vorhabensverlauf notwendig und umgesetzt. Dies war in erster Linie für die Nachweise bezüglich zusätzlicher Temperaturanforderungen begründet.

Parallel wurden folgende Entwicklungsbauteile zur weiteren Verifikation der Auslegungs- und Herstellungsschritte gefertigt:

- Multibolt Breadboard (Eigenschaften des Laminates)



- ITP bonding bread board (Verklebungsnachweis)



- NDI samples zur Verifikation der NDI Testmethodik

3.2.3 Bauteilherstellung (SM-Modell)

Im Rahmen des Arbeitspaketes AP3310 (SM-Modell) wurde ein S50-IMC in MT Infiltrationstechnik hergestellt.

Die für die Fertigung notwendigen Wickelprogramme wurden dabei von der Arbeitsvorbereitung bereitgestellt. Daneben mussten im Rahmen des Arbeitspaketes AP3310 auch die Maschinenprogramme für die Herstellung der metallischen Komponenten programmiert und der Herstell- und Prüfablauf für das S50-IMC Design sowie die Arbeitspläne erstellt bzw. angepasst werden. Des Weiteren erfolgte die Erstellung der Fertigungsaufträge und die Steuerung der Bauteile. Im Falle der Beauftragung der Unterauftragnehmer mussten dieser betreut und koordiniert werden. Der gesamte Fertigungsablauf und etwaige Abweichungen vom nominalen Herstellungsprozess wurden dokumentiert und ausgewertet.

Im Folgenden wird die Herstellung des Gehäuses anhand der unterschiedlichen Prozessschritte aufgezeigt. Die einzelnen Schritte wurden Qualitätsgesichert durch Fertigungsfreigaben und Abnahme der Fertigstellungsdokumentation begleitet.

Aufbringen des EPDM für die Innenisolation:



Vorgefertigte Dome von IAE



Dom fixiert auf Wickelkörper



EPDM Bewicklung auf dem Zylinderbereich



Vakuumaufbau zur Aushärtung

Abbildung 3-15: Herstellung der Innenisolation



Aushärtung im Autoclave



Entfernen des Vakuumaufbaus



Ausgehärtetes EPDM



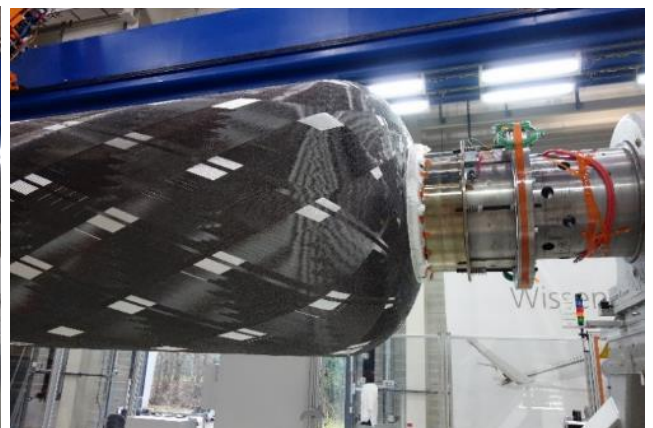
Mechanisch bearbeitetes EPDM

Abbildung 3-16: Finalisierung der Innenisolation

Herstellung des Druckbehälters im Trockenwickelprozess beim DLR-ZLP Augsburg:



Legen der erste Lage



Erste Kreuzlage



Weitere Lagen



Wickelkopf

Abbildung 3-17: Herstellung des Druckbehälters durch Trockenfaserwickeln

Anschließend wurde der Verbundaufbau des Druckbehälters infusioniert.



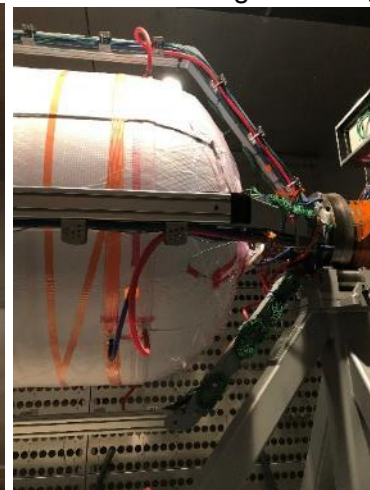
Infusionsaufbau



Matrixbefüllung der Anlage



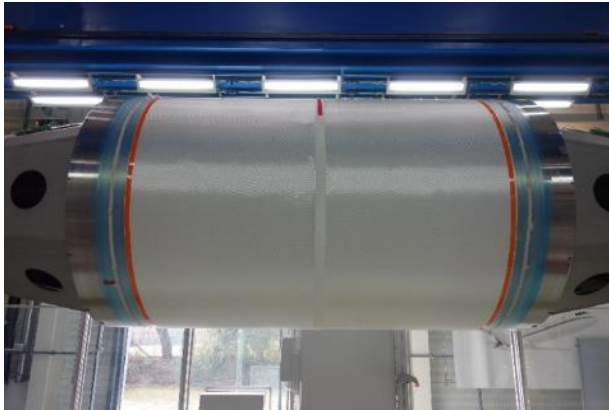
Infusion im Ofen



Drehdurchführung

Abbildung 3-18: Infusion der trockenen Verbunde mit Matrix-Werkstoff

Zur Herstellung der Schürze wurde ein Verbundaufbau für beide schürzen in einem Prozess durch Trockenablage hergestellt, die nach der Infusion getrennt wurden:



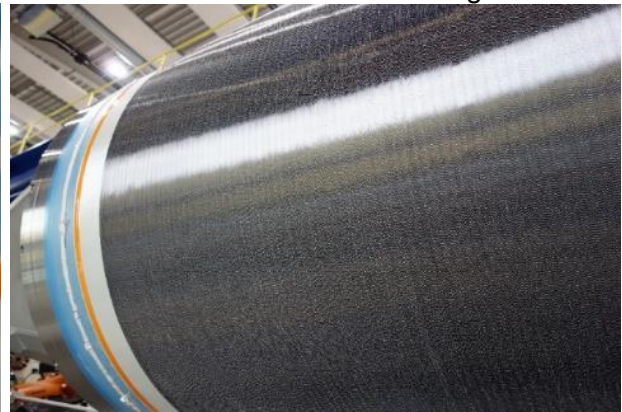
Skirttool



Erste Bandablage



Lagenschichtung



finale Kompaktierungslage



Infusionsaufbau



Infusion im Ofen

Abbildung 3-19: Herstellung der Schürze durch Faserablage



Druckbehälter



Schürze mit Verbindungsring

Abbildung 3-20: Fertiggestellter Druckbehälter und Schürze

Nach dem einschrumpfen der Interfaceringe wurden diese vernietet. Die Nieten wurden dabei nass gesetzt um Korrosionsprozesse zu vermeiden.



Außen



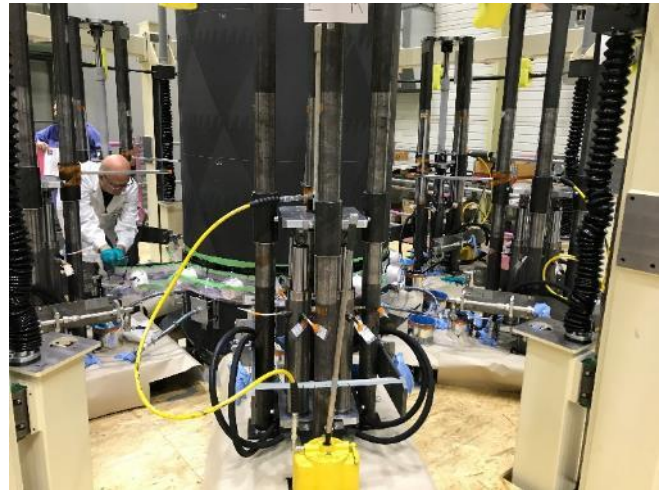
Innen

Abbildung 3-1: Schürzen-Ringe vernietet

Anschließend wurde der Druckbehälter sowie die Schürzen miteinander verklebt. Hierzu wurde eine existierende Ausrichtvorrichtung auf die geometrischen Verhältnisse des Gehäuses angepasst und der in FORC entwickelt Klebstoffinjektionsprozess adaptiert.



Bauteil in Klebevorrichtung



Injektionsanlagen

Abbildung 3-2: Verkleben der Bauteile

Letzter Schritt war die komplette Geometrie- und NDI-Kontrolle nachdem der Kern ausgebaut wurde.



Entnahmeschlitten



Kern Innenansicht

Abbildung 3-3: Demontage des Kerns



Abbildung 3-4: Wiedermontage des Kerns zur Einlagerung



Abbildung 3-5: Finalisiertes Bauteil

Entsprechend der finalen Definitionunterlage wurde das finalisierte Testbauteil SM abgenommen und die Entsprechenden Vermessungen durchgeführt und ausgewertet. Damit wurde das Bauteil für die Testvorbereitung freigegeben.

3.3 AP 4000: Test und Verifikation

3.3.1 Tests von/an Entwicklungsbauteilen

Mechanische Tests

Es wurden mechanische Tests auf Probekörper-Level durchgeführt, um die Anbindung des EPDM an das CFK zu bestimmen. Diese Tests wurden nach standardisierten und geprüften Testmethoden durchgeführt. Die einzelnen Tests sind nachstehend aufgeführt. Die detaillierte Planung und Testdurchführung erfolgt im Rahmen des Arbeitspaketes AP 4100.

Dies sind für EPDM/CFK:

- Single Lap Shear
- Roller Peel Tests
- Flatwise Tensile Tests

Prozessabhängige Tests

Die Verifikation des Vulkanisierungsprozesses (z.B. mittels DSC/TGA) stellte sicher, dass der Vulkanisierungsprozess vollständig abgeschlossen ist. Dadurch wurde prozessseitig eine bestmöglich Anbindung zwischen dem vollständig vulkanisierten EPDM und CFK gewährleistet. Diese Tests wurden nach standardisierten und geprüften Testmethoden durchgeführt.

Sukzessive Wickeltests in Originalgröße zur Verifikation der Wickelprogramme während der Herstellung des ersten Modelles (SM) wurden durchgeführt. Dies diente der Sicherstellung, dass das tatsächliche Wickelmuster im späteren Bauteil dem der Auslegung entspricht. Diese Sicherstellung des applizierten Wickelmusters stellte eine entscheidende Grundlage für den Qualifikationsnachweis dar.

Vorversuche zur Montage der Radax-Interfacering in die CFK Schürzen durch Einschrumpfen mittels Stickstoffkühlung wurde erfolgreich an einem Testbauteil durchgeführt.

3.3.2 Strukturtest am SM

Aufgrund der geänderten Situation des Projektes CaSSIS wurde die Durchführung des Strukturtests bei MT Aerospace aufgelegt.

Der Testaufbau wurde den Beschränkungen der Testgrube von MT angepasst. Dabei wurde die Realisierung aller Testlasten, wie im Workshop „Struktur/Bersttest“ zwischen IAE und MT (2017) definiert, weiterhin umgesetzt. Diese umfassen

- Axiale Druckkraft
- Biegung
- Innendruck
- und deren Kombinationen (mit und ohne Innendruck).

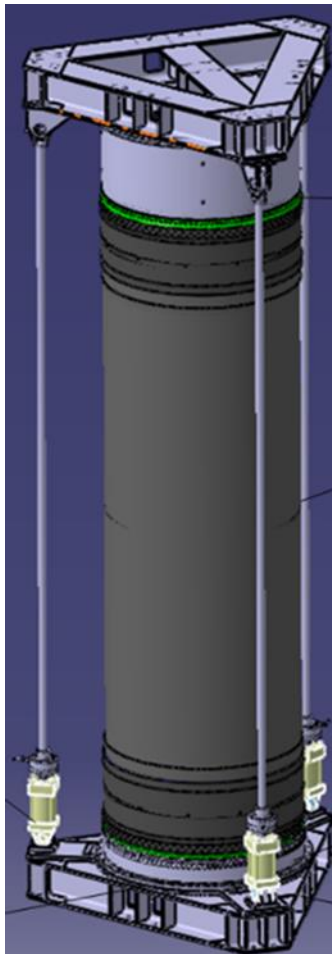
Ein ausführlicher Testplan wurde erstellt, siehe [RD 9].

Die Testvorhersage für den Struktur/Bersttest wurde durch ISATEC durchgeführt auf Grundlage der Ist-Bauteildaten. Das Ergebnis lag rechtzeitig vor Testbeginn vor.

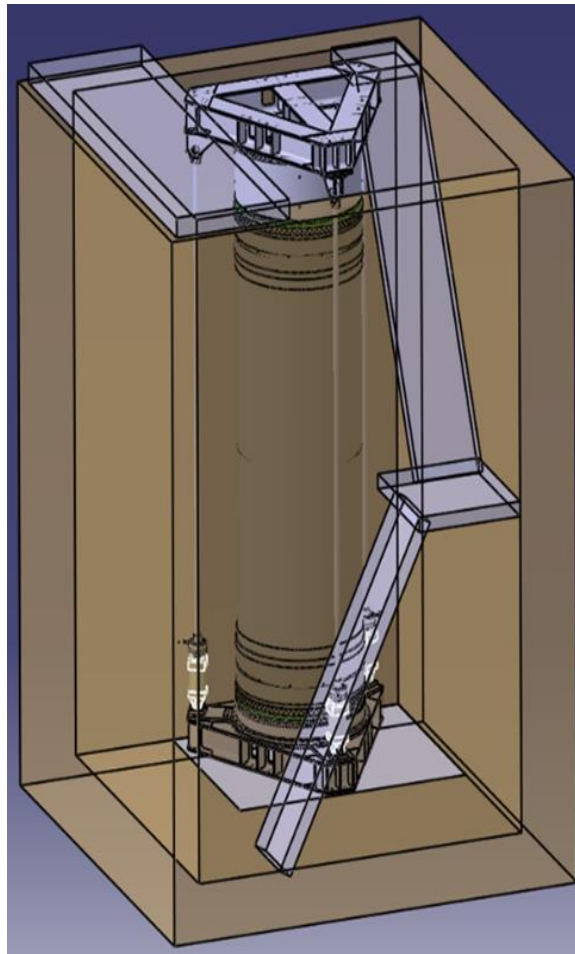
Für den Testaufbau wurden die entsprechenden Anschlussstrukturen, Düsen-Ring, Zünder-Cover sowie die Schürzen-Ringe konstruktiv fixiert und beauftragt.

Eine Dichtblase zur Sicherstellung der Dichtigkeit, vor allem in Hinblick auf die reparierte Thermalisation, die diese Funktion nicht sicher gewährleistet kann, wurde konstruiert, beschafft und eingebaut.

Gemeinsam mit der Testabteilung wurde der detaillierte Montageablauf festgelegt und das Bauteil für den Test vorbereitet.



Testteil SM im Lastgestell



Testaufbau in der Testgrube

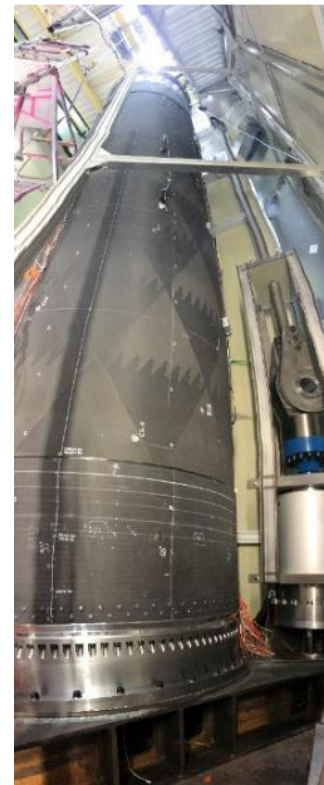
Abbildung 3-6: Testgrube

Die notwendige Hydraulikanlage zur Lasteinbringung wurde von MT definiert und beschafft.

Das Bauteil wurde mit den Dehnmessstreifen bestückt und, vorbereitet für die Verformungs- und Accoustic-Emissions-Sensoren, in der Testgrube installiert.



Vorbereitete Testgrube



Eingebautes Bauteil
mit Hydraulikaktuator

Abbildung 3-7: Testaufbau

Mit dem Test Readiness Meeting wurde die Testdurchführung gemeinsam mit dem DLR und IAE gestartet. Sukzessive wurden folgende Testzyklen nach Testplan erfolgreich gefahren:

- Pre and Lecktest:
- TLC1 - Proof Test: Reiner Innendruck (1,1 * MEOP)
- TLC02/03/04: Innendruck mit Strukturlasten
- TLC05/06/07: Nur Strukturlasten
- TLC08: Reiner Innerdruck bis zum Versagen

Test Sequence Overview

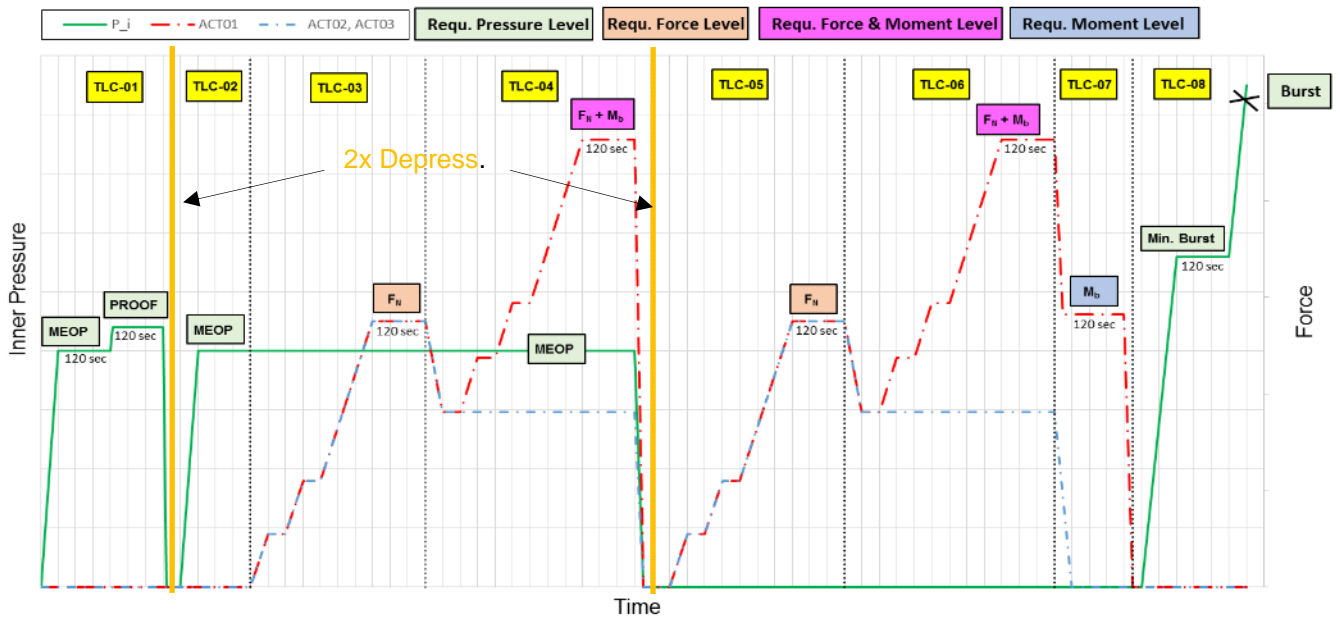
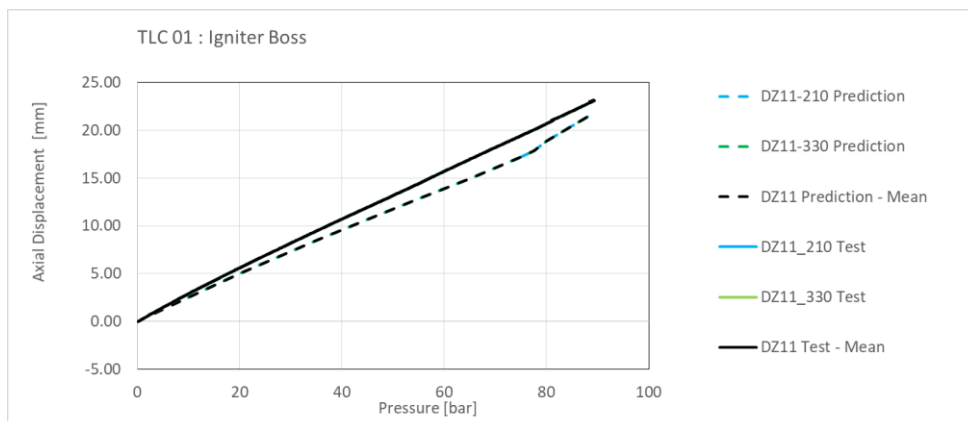
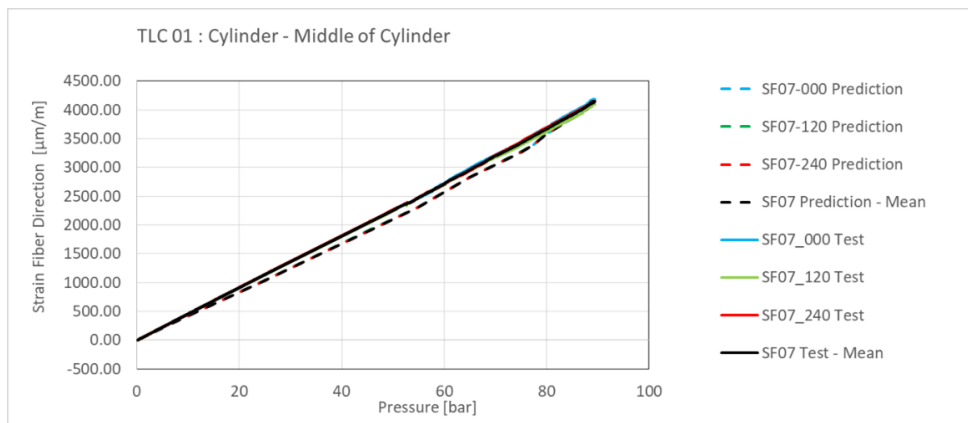
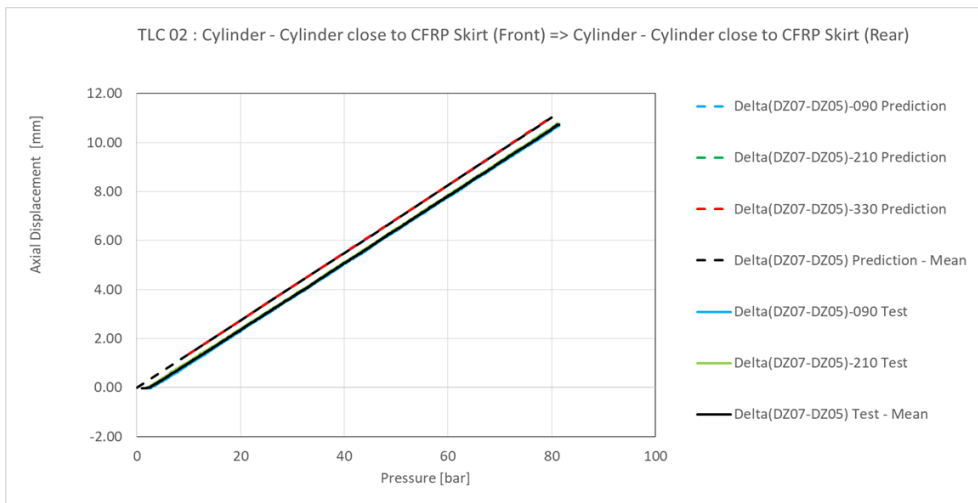
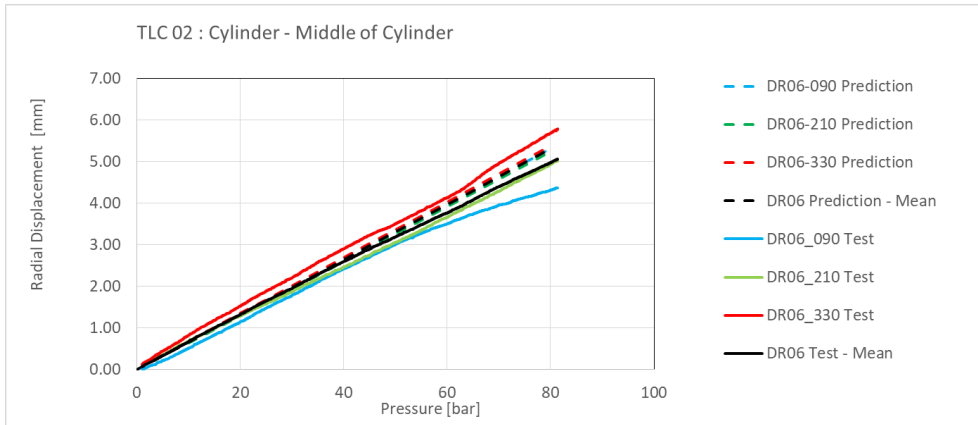


Abbildung 3-8: Testzyklen

Während allen Testzyklen wurden die gesetzten Ziele nach Testplan und Vorhersagen erreicht:

- Die axialen und radialen Verformungen entsprach den Steifigkeitsanforderungen, siehe §3.1.1.
- Die Testvorhersagen wurden Eingehalten, siehe folgende Beispiele





- Es wurden keine Leckagen während der Testphase festgestellt.

Das finale Versagen im letzten Zyklus erfolgte bei 181 bar durch das Versagen des Zünderdeckels. Dies entsprach der Vorhersage.







Abbildung 3-9: Versagen am Zünderdeckel

Nach dem Ausbau wurde das Bauteil hinsichtlich seines Materialverhaltens (speziell die EPDM Anbindung) sowie der Versagensbewertung weiter untersucht.

Ergebnisse sind im Testreport detailliert, siehe [RD 10].

4. Ablauf des Vorhabens im Vergleich zur ursprünglichen Planung

# MST	Name	Plantermin	Ist-Termin	Status
1	Kick-Off	01.04.2016	14.04.2016	
2	1. Zwischenbericht	11.08.2016	11.08.2016	
3	Status Review	07.11.2016	07.11.2016	
4	2. Zwischenbericht	11.02.2017	11.02.2017	
5	tCDR / tMRR	24.02.2017	06.02.2017	
6	3. Zwischenbericht	11.08.2017	11.08.2017	
7	4. Zwischenbericht	11.02.2018	11.02.2018	
8	5. Zwischenbericht	11.08.2018	31.07.18	
9	TRR (SM)	1.4.2019	8.04.2019	
10	QR (SM)	30.6.2019	2.05.2019	
11	6. Zwischenbericht	11.02.2019	20.02.2019	
12	7. Zwischenbericht	30.8.2019	7.10.2019	
12	Schlussbericht	12.10.2019	31.01.2020	

5. Wirtschaftliche Erfolg nach Projektende

Die in CaSSIS durchgeführten Arbeiten wurden für einen Einsatz im S50-Raketenmotor ausgerichtet. Darüber hinaus können die erzielten Ergebnisse hinsichtlich des angewandten Herstellungsprozesses von CFK-Motorgehäusen für eine Bandbreite von Feststoffmotoren unterschiedlicher Größe Anwendung finden. Der daraus abgeleitete Technologie- und Kostenvorteil kann später für diverse IMC-Produktlinien in der nationalen sowie internationalen Raumfahrt Anwendungen finden.

5.1 Verwertungsplan

5.1.1 Wissenschaftlicher Erfolg

MT hat im Rahmen der in CaSSIS ausgebauten Auslegungskompetenz sowie der Fertigungstechnologie die Voraussetzung geschaffen, diese Kompetenzen skalierbar für weitere, nationale wie auch internationale, Programme, anwendbar zu machen.

Mit der von MT eingesetzten Fertigungstechnologie kann durch einen hohen Automatisierungsgrad, einer hohen Verbundqualität sowie des getrennten Einkaufs von Faser und Harzen, verbunden mit einer hohen internen Wertschöpfung während des Prozesses, langfristig ein kostengünstiges Produkt angeboten werden. Durch die hohe Verbundqualität konnte ein Gehäuse mit minimalster Masse definiert werden, was ein wesentlicher Wettbewerbsvorteil bedeutet.

MT und die an dem CaSSIS Projekt beteiligten Unternehmen/Organisationen haben die Möglichkeit die Grundlage für eine weitere technologische und wirtschaftliche Zusammenarbeit mit der BRICS Nation Brasilien zu schaffen um daraus weitere Marktsegmente in der Raumfahrt für zukünftige Programme zu erschließen, zu entwickeln und auszubauen und sich dadurch von europäischen Wettbewerbern im Rahmen der Technologie- und Preisführerschaft abzugrenzen.

Das wissenschaftliche Ziel des Vorhabens CaSSIS, weitergehende Erkenntnisse über die Skalierbarkeit und damit die Übertragbarkeit der MT Fertigungstechnologie für CFK-Motorgehäuse auf kleinere Abmessungen zu bekommen, sowie ein besseres Verständnis über die relevanten Prozessparameter in der Fertigung sowie Optimierungspotential im Design und in der Fertigung zu erhalten, konnte erzielt werden.

Gegenüber dem Projekt FORC stellt das Vorhaben CaSSIS einen relevanten Mehrwert dar, da in FORC der Fokus auf der Herstellung eines dickwandigen Entwicklungsbauteiles mit nicht-repräsentativer Innenisolation lag. In CaSSIS wurde ein CFK Gehäuse mit optimiertem Lageraufbau entwickelt und gefertigt und auf eine Innenisolation mit flug-repräsentativer Wandstärkenverteilung und Originalmaterial aufgebracht. Die Anbindung zwischen Innenisolation und CFK wurde den hohen Anforderungen gerecht.

Darüber hinaus wurde das relevante wissenschaftliche Ziel eines besseren Verständnisses über das Verhalten des CFK-Motorgehäuses unter den statischen Belastungen eines Strukturtests, der alle Fluglastfälle abdeckt, erfolgreich abgetestet und nachgewiesen.

5.1.2 Wirtschaftliche und/oder technische Erfolge

Die Entwicklung und Herstellung von dickwandigen, gewickelten Großbauteile inkl. Strukturverklebung stellt eine bedeutsame Kompetenz im Portfolio der MT dar. Im Rahmen des CaSSIS-Projektes wurde eine bestehende Entwicklungsfertigkeiten und -erfahrungen auf ein konkretes Motorgehäuse angewendet. Damit ist die MT befähigt die angewendeten Auslegungs- und Fertigungskompetenzen weiter auszubauen und zu optimieren um sie auch für andere Anwendungsfelder übertragbar zu machen.

In CaSSIS wurde die bei MT entwickelte Fertigungstechnologie für ein isoliertes Motorgehäuse angewendet. Im Wesentlichen wurde die Interaktionen von innerer Isolation und dem Herstellungspro-

zess für das Gehäuse bestätigt. Dies wurde zum einen durch die Fertigung und ausgiebige Tests von Entwicklungsbauteilen (EPDM Breadboards) ermöglicht, zum anderen in der Herstellung des SM Gehäuses mit flug-repräsentativer Wandstärkenverteilung der Innenisolation sowie der dafür definierten Vulkanisationsparameter, das mit dem abschließenden Struktur- und Bersttest seine Leistungsfähigkeit demonstrierte.

Die Erfolgsaussichten des Vorhabens CaSSIS basiert auf den in FORC durchgeführten Arbeiten und den dabei gewonnenen Erkenntnissen hinsichtlich Auslegung, Fertigung und Ergebnissen aus dem Struktur- und Bersttest. Diese Erkenntnisse wurden innerhalb des Vorhabens CaSSIS weiterentwickelt, optimiert und wo nötig, durch bessere und einfachere Lösungsansätze ersetzt. Dies bedeutet dass die in CaSSIS durchgeführten Arbeiten einen bedeutenden Schritt von einem Vorentwicklungsprojekt hin zu einem Projekt mit der Opportunität zum Technologietransfer darstellt.

5.1.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die in CaSSIS durchgeführten Arbeiten sind ein relevanter Schritt um die Möglichkeit für einen Einsatz der MT-Fertigungstechnologie im S50-Raketenmotor zu eröffnen. Durch die Anpassung des Vorhabensziel sind bis zu einem tatsächlichen Einsatz noch einige Nachweise zu erbringen, allerdings stellt der in CaSSIS umgesetzte Arbeitsumfang, speziell die finale Bestätigung der Bauteilqualität im Strukturtest, eine solide Ausgangsbasis dar.

Darüber hinaus könnten die erzielten Ergebnisse hinsichtlich des angewandten Auslegungs- und Herstellungsprozesses von CFK-Motorgehäusen auch für eine Bandbreite von Feststoffmotoren unterschiedlicher Größe Anwendung finden. Der daraus abgeleitete Technologie- und Kostenvorteil kann später für diverse IMC-Produktlinien in der nationalen sowie internationalen Raumfahrt Anwendungen finden.

Die innerhalb des Vorhabens CaSSIS weiterentwickelte Optimierung der Auslegungs- sowie der Fertigungskompetenzen ermöglichen eine eminente Verbesserung der MT-Fertigungstechnologie die ein Alleinstellungsmerkmal darstellt. Durch das Alleinstellungsmerkmal der MT für Infusion von dickwandigen, gewickelten Großbauteile inkl. Strukturverklebung werden in Zukunft die Kosten- und Qualitätsvorteile der Technologie und das Anwendungspotential auch für andere Produkte in sehr vielen Branchen wie z.B. Energiesektor, Luftfahrt, Militär etc. erwartet. Aus heutiger Sicht wird eine Übertragbarkeit der anzuwendenden Fertigungstechnologie auf Booster-ähnliche, attraktive Produkte z.B. in folgenden Bereichen erwartet:

- Große Drucktanks
- Antriebswellen
- U-Boot Strukturen
- Mini Launcher Strukturen
- Schwungräder

5.2 **Arbeitsteilung / Zusammenarbeit mit Dritten**

Antragsteller für das Vorhaben war die MT-Aerospace AG mit Sitz in Augsburg. Internationaler Partner im geplanten Vorhaben war IAE (Instituto de Aeronáutica e Espaço, Brazilian Aerospace Technology and Science Department). Um die Vorhabensziele zu erreichen war eine Zusammenarbeit mit IAE, Brasilien unerlässlich. Basis der Zusammenarbeit war die Interessensbekundung zwischen DLR Raumfahrtmanagement und AEB vom 27.04.2015 sowie im Vorfeld geführte Gespräche zwischen DLR Raumfahrtmanagement MT und IAE vom 24.06.2015.

Das gemeinsame Vorhaben startete im April 2016. Auch trotz der engen Begleitung durch u.a. wöchentliche Telefonate mit den brasilianischen Partnern und einem shadow-Engineering in vielen

Bereichen, die nicht in die eigene Zuständigkeit fielen, wurde das Vorhaben massiv durch die schwierige Kooperation mit Brasilien bestimmt. Auch zeigte sich das VS-50 / VLM Projekt als vielschichtiger und durch deutlich mehr Parteien bestimmt, so dass Entscheidungen auf brasilianischer Seite nur nach langwierigen Prozessen zu erreichen waren. Aufgrund fehlender Erfahrungen in Kooperationen mit dem Land Brasilien wurde dieser, leider das Projekt dominierender Faktor deutlich unterschätzt.

Vor dem Start des Vorhabens wurde die Arbeitsanteile wie folgt zwischen MTA und IA aufgeteilt:

- Spezifikationen / Anforderungen an das Gehäuse werden zu Projektstart von IAE zur Verfügung gestellt und eingefroren:
 - o Geometrie
 - o Lasten (mechanisch/thermisch)
 - o Schnittstellendefinitionen (speziell auch die EPDM Wanddickendefinition)
- MTA konstruiert das Gehäuse und legt es gemeinsam mit dem Unterauftragnehmer ISATEC aus.
- Wickelkern wird im Rahmen der Zuwendung beschafft.
- EPDM Material, Materialeigenschaften und die hierzu notwendigen vollständigen Prozessdaten werden seitens Brasilien rechtzeitig zur Verfügung gestellt und gemäß Incoterms 2010: DDP nach Augsburg, Deutschland geliefert.
- CFK Materialauswahl, speziell Kohlefaser- und Infusionsharz werden analog zu den MTA Fertigungsprozessen übernommen und im Rahmen des Vorhabens beschafft.
- Beschaffung und Herstellung der Interfaceringe wird im Rahmen des Vorhabens von MTA übernommen.
- Beistellung der Hydraulikaktuatoren für den Strukturtest erfolgt durch IAE.
- MTA stellt drei Gehäuse her.
- MTA führt den Strukturtest mit dem ersten Gehäuse durch
- IAE organisiert mit dem zweiten Gehäuse einen Befülltest mit Festtreibstoff
- IAE führt einen Brennversuch mit dem dritten Gehäuse durch.

Durch den Wegfall der deutschen ARIANE 6 Booster-Produktionslinie aufgrund politischer Entscheidungen in 2017 sowie die Priorisierung beim Brasilianischen Partner IAE wurden mit dem Änderungsbescheid vom 31.10.2018, [RD 1], die Ziel wie folgt angepasst:

- Es wird nur noch ein Gehäuse für den Strukturtest hergestellt.
- MTA übernimmt die Beschaffung der Hydraulikaktuatoren und der entsprechenden Testumgebung für den Strukturtest.
- Befülltest und Brennversuch durch IAE werden nicht weiter verfolgt.

5.3 F&E Ergebnisse von dritter Seite

Es liegen keine F&E-Ergebnisse von dritter Seite vor.

5.4 Erfindungen/ Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Erfindungen und erteilte Schutzrechte sind nicht erfolgt.