

„Vernetzte und effiziente Entwicklungs- und  
Produktionsprozesse für Passagierkabinen“

## Abschlussbericht

zum Vorhaben

### „Additive Fertigung und alternative Bauweisen für Kabinensystem-Komponenten“

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für  
Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert.  
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

ZUWENDUNGSEMPFÄNGER Diehl Aviation Gilching GmbH  
Friedrichshafener Straße 5  
82205 Gilching

LAUFZEIT DES VORHABENS 01.04.2016 – 30.06.2019

DATUM 11.12.2019

PROJEKTLEITER Alexander Rosam



.....  
i.V. Dr. Jan Boris Philipp

11.12.2019

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums  
für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert.  
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.  
© Diehl Aviation Gilching GmbH

- 1 -

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
1	AUFGABENSTELLUNG ..... 6
2	VORAUSSETZUNGEN UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE ..... 7
3	PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS ..... 8
4	WISSENSCHAFTLICH TECHNISCHER STAND ZU VORHABENSBEGINN ..... 11
5	ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN ..... 12
6	VERWENDUNG DER ZUWENDUNG ..... 13
6.1	Zielsetzungen und Ergebnisse ..... 13
6.2	Einsatz Personal, Material, Fremdleistung ..... 15
7	AUSFÜHRLICHE DARSTELLUNG DER PROJEKTERGEBNISSE ..... 16
7.1	AP1.1 Prozesskette Rapid Engineering ..... 16
7.2	AP2.3 Anwendung Additive Fertigung ..... 23
7.3	AP3.1 Alternative Materialien ..... 27
7.4	Technologiebewertung ..... 52
7.5	Liste der erstellten Dokumente ..... 54
7.6	Verwendete Literatur ..... 54
8	VORAUSSICHTLICHE VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE ..... 55
8.1	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises ..... 55
8.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit ..... 55
8.3	Voraussichtlicher Nutzen und Verwendbarkeit der Ergebnisse (im Sinne des Verwertungsplans) ..... 55
9	WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG BEKANNT GEWORDENER FORTSCHRITT BEI ANDEREN STELLEN ..... 56
10	GEPLANTE ODER ERFOLGTE VERÖFFENTLICHUNGEN UND VORTRÄGE .. 56

## Verzeichnis der Bilder

Abbildung 3-1: Projektstrukturplan VERONIKA .....	8
Abbildung 3-2: DAG Projektstrukturplan .....	9
Abbildung 3-3: Zeitplan.....	10
Abbildung 7-1: FE-Modell Drainage-Bogen (Drain Elbow) .....	19
Abbildung 7-2: Spannungsanalyse des Drainagebogen (Drain Elbow) .....	19
Abbildung 7-3: Prozesskette Additive Fertigung .....	21
Abbildung 7-4: Designoptimierung und Datenaufbereitung.....	22
Abbildung 7-5: FDM-Fertigungsprozesse .....	22
Abbildung 7-6: Drainage-Bogen .....	23
Abbildung 7-7: Drainage Bogen nach Optimierung.....	24
Abbildung 7-8: Laufrad mit Pumpenaufbau für Pretests.....	24
Abbildung 7-9: Axiallaufrad mit Stützstrukturen .....	25
Abbildung 7-10: Axiallaufrad.....	26
Abbildung 7-11 Anschlussflansch für Drainagebogen.....	26
Abbildung 7-12: Ausgewählter Störsender „REFRAD X“ .....	28
Abbildung 7-13: Messaufbau zur Untersuchung der Schirmdämpfung .....	29
Abbildung 7-14: Abdichtung des Messfensters mit einer EMV-Flachdichtung (Hersteller-Hollandshielding).....	29
Abbildung 7-15: Prüfbox mit Adapterplatte für kleinformatige Prüfplatten .....	30
Abbildung 7-16: Exemplarischer Vergleich zweier Beschichtungen im Frequenzbereich von 200MHz bis 1.2GHz .....	30
Abbildung 7-17: Thermische Simulation eines Leistungselektronikgehäuses .....	31
Abbildung 7-18: Vermessung des Magnetventils mit geöffnetem Gehäusedeckel .....	32
Abbildung 7-19: Magnetventil mit Aluminium-Gehäuse und mit Kupferklebeband abgedichtetem Spalt.....	33
Abbildung 7-20: Illustration der einzelnen Schritte des SMC Prozesses [1] .....	34
Abbildung 7-21: Mechanische Bearbeitung der Probelplatten .....	35
Abbildung 7-22: Konzept zur Herstellung von SMC Bauteilen mit integriertem metallischem Vlies .....	36
Abbildung 7-23: Probelplatten mit Zn-Beschichtung .....	36
Abbildung 7-24: Probelplatten mit CuVA-Beschichtung.....	37
Abbildung 7-25: Probelplatten mit Cu-NiCr-Beschichtung .....	38
Abbildung 7-26: Unterschiedliche Beschichtungen auf Probelplatten mit Nuten .....	39
Abbildung 7-27: Fleckige Materialanhäufungen bei CuVA beschichteten Proben.....	39
Abbildung 7-28: Probelplatten im Klimaschrank .....	40
Abbildung 7-29: PC- und PC/ABS- Proben nach 12 Zyklen des Klimawechseltests .....	41

Abbildung 7-30: Optische Inspektion der Beschichtungen nach 20 Zyklen ..... 42  
 Abbildung 7-31: Optische Inspektion der Beschichtung: Auffälligkeiten nach 40 Zyklen ..... 43  
 Abbildung 7-32: Optische Inspektion der 3 untersuchten Beschichtungsverfahren auf PEEK, PEI und PPS Substraten nach 40 Zyklen im Klimawechseltest ..... 44  
 Abbildung 7-33: Prüfaufbau mit kleinem Messfenster für Kunststoffproben ..... 45  
 Abbildung 7-34: EMV-Messungen an PEI-Proben mit verschiedenen Beschichtungen ..... 46  
 Abbildung 7-35: Exemplarische Auswahl von Dichtungsmaterialien ..... 47  
 Abbildung 7-36: Metallische Prüfplatten zum Testen von EMV-Dichtungen ..... 47  
 Abbildung 7-37: Im 3D-Druck gefertigtes Konstruktionsmuster ..... 48  
 Abbildung 7-38: Umgesetzte Dichtungskonzepte ..... 48  
 Abbildung 7-39: Spritzgegossene Mustergehäuse ..... 49  
 Abbildung 7-40: Beschichtete Gehäuse ..... 49  
 Abbildung 7-41: Versuchsaufbau für Verifikation ..... 50  
 Abbildung 7-42: Deutliches Eindringen von Feuchtigkeit bei Cu-Ni-Cr Beschichtung ..... 51  
 Abbildung 7-43: Trockene Gehäusen mit CuVA Beschichtung ..... 51

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 6-1: Gegenüberstellung der Zielsetzungen und Ergebnisse ..... 14  
 Tabelle 7-1: Bauteil-Vorauswahl ..... 18  
 Tabelle 7-2: Zusammenfassende Bewertung der Beschichtungen ..... 53

## Abkürzungen

AKF	ARBURG Kunststoff Freiformer
AM	Additive Manufacturing
AOA	Apparatebau Gauting GmbH
DAC	Diehl Aircabin GmbH
DAG	Diehl Aviation Gilching GmbH
DAL	Diehl Aviation Laupheim GmbH
EMI	Electromagnetic Interference
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
FDM	Fused Deposition Modelling
SLS	Selektives Lasersintern
SMC	Sheet Mould Compounding
TRL	Technology Readiness Level (Technologiereifegrad)
WWS	Wasser-/ Abwassersysteme

## 1 AUFGABENSTELLUNG

Im Verbundvorhaben VERONIKA leistete die Diehl Aviation Gilching GmbH mit 3 Teilarbeitspaketen einen Beitrag zur Zielsetzung „Leistungsfähige und effiziente Luftfahrt“. Im Vorhaben sollten innovative Fertigungsverfahren und die dafür erforderlichen Entwicklungswerkzeuge angewendet und anhand von Funktionsmustern validiert werden.

Im TAP1.1.1 Designprozesse und Bauweisenentscheid sollten Teilprozesse in der Produktentwicklung erarbeitet werden, die additive bzw. generative Fertigungsverfahren (Additive Manufacturing AM) berücksichtigen. Hierfür sollten Teilprozesse und Methoden definiert werden, die die frühzeitige Auswahl des ökonomisch passendsten Herstellverfahrens und der entsprechenden Bauweise, sowie die Identifikation geeigneter Materialien ermöglichen. In Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern und dem assoziierten Partner Boeing als OEM sollte eine ganzheitliche Beschreibung der Prozesskette zur Additiven Fertigung entstehen, die der Nachweisführung einer Luftfahrtzulassung von generativ gefertigten Bauteilen genügt.

Geplant war die Definition von Entscheidungskriterien zum Bauweisenentscheid sowie eine Analyse von Gerätebauteilen aus dem Produktportfolio um Leistungskennzahlen zur Produktherstellung wie z.B. Werkzeugkosten, Materialkosten Verhältnis Rohmaterial/Werkstück, Montageaufwand, usw. zu vergleichen. Da additive Fertigungsverfahren einerseits weitgehende Konstruktionsfreiheiten in der Festlegung der Geometrie erlauben, andererseits fertigungs- und gerätebedingte Restriktionen berücksichtigt werden müssen, sollten Designrichtlinien generiert werden.

Das TAP2.3.1 Produktionsbezogene additive Fertigungsprozesse diente der generativen Herstellung von Demonstratoren ausgewählter Komponenten von Lüftern wie Laufrad und Gehäuseteile. Als Materialien sollten geeignete formfeste Polymere zur Anwendung kommen. Dabei sollten wissenschaftliche und methodische Grundlagen der additiven Fertigungsverfahren (Designvorgaben, Randbedingungen), sowie die dafür verfügbaren Materialien der Produktentwicklung zugänglich gemacht werden. Bei dem generativen Fertigungsverfahren lag der Fokus auf der Prozesssicherheit, um den qualitativen Anforderungen für eine Luftfahrtzertifizierung zu genügen. Der exemplarische Durchlauf einer gesamten Prozesskette eines additiven Fertigungsverfahrens sollte die Etablierung dieser Fertigungstechnologie bei der Diehl Aviation Gilching GmbH vorbereiten sowie die Chancen und Risiken bezogen auf das Produktspektrum aufzeigen.

Neben der Validierung des definierten Designprozesses lag ein weiterer Schwerpunkt auf einer ausführlichen Verifikation der generativ erzeugten Bauteile hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften wie statische und dynamische Festigkeit, dauerhafte Dimensionsstabilität und Materialverträglichkeit.

Im TAP3.1.1 Polymer-Elektronikgehäuse sollten neue Materialien auf Basis von thermoplastischen oder duromeren Werkstoffen für Elektronikgehäuse identifiziert und geeignete Fertigungsverfahren ausgewählt werden. Bisher werden vollmetallische Gehäuse insbesondere aus Aluminium eingesetzt. Durch die Verwendung von Polymerwerkstoffen für die Herstellung von Elektronikgehäusen sollten sowohl das Gewicht als auch die Fertigungskosten erheblich reduziert werden. Neben der Erfüllung der erforderlichen mechanischen Anforderungen waren weitere spezifische Herausforderungen dabei, zum einen die Sicherstellung einer ausreichenden Wärmeableitung und zum anderen die Einhaltung der Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), durch eine ausreichende Abschirmung. Des Weiteren waren die speziellen Luftfahrtanforderungen zu Brandschutz (Entflammbarkeit, Rauchentwicklung, Rauchgiftigkeit) und Materialbeständigkeit zu berücksichtigen.

11.12.2019	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH	- 6 -
------------	--	-------

## **2 VORAUSSETZUNGEN UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE**

Die Diehl Aviation Gilching GmbH (DAG) ist langjähriger Systemlieferant und Tier-1-Supplier in der Luftfahrtindustrie unter anderem für Wasser-/ Abwassersysteme (WWS) und Klimaunterstützungssysteme in der Luftfahrtindustrie. Mit detaillierten Kenntnissen in der Auslegung von WWS sowie in der aerodynamischen und mechanischen Auslegung von Hochleistungslüftern nimmt DAG eine weltweite Führungsrolle ein. Ebenso verfügt die DAG über langjährige Erfahrung in der Entwicklung und Fertigung elektronischer Komponenten bis hin zur hausinternen Bestückung von Leiterplatten.

Im Bereich der Fertigungstechnologien verfügt DAG über ein breites Know-How und modernste Anlagen auf dem Gebiet der zerspanenden Fertigungstechnologie. Der sehr aussichtsreiche Bereich der additiven Fertigungstechnologien ist bei DAG bisher weder in der Konstruktion noch in der Fertigung etabliert. Praktische Erfahrungen mit den Eigenschaften neuer Materialien im Bereich der additiven Fertigung, Konstruktionsmethoden oder Richtlinien für eine fertigungsgerechte Gestaltung sind noch nicht vorhanden.

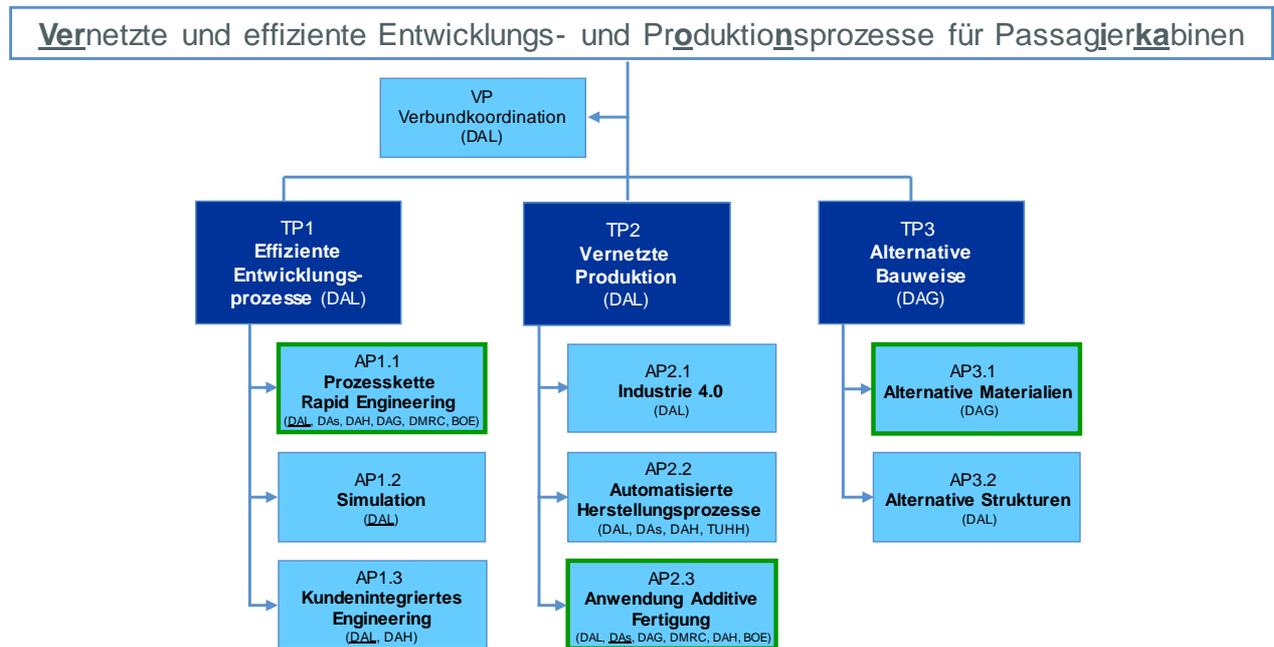
Für den Themenkomplex der neuen Materialien für Elektronikgehäuse konnte bei DAG auf Erfahrungen mit Leichtbauwerkstoffen aus früheren Forschungsprojekten zurückgegriffen werden. So wurden im LuFoIV-3-Projekt PROTEG-A Kunststoffe für den Einsatz in Vakuumtoiletten und im Projekt STELLA Motorgehäuse aus Magnesium untersucht. Im LuFoV-1-Projekt SYLVIA wurden Wassertanks in Thermoplastbauweise hergestellt.

11.12.2019	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH	- 7 -
------------	--	-------

### 3 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS

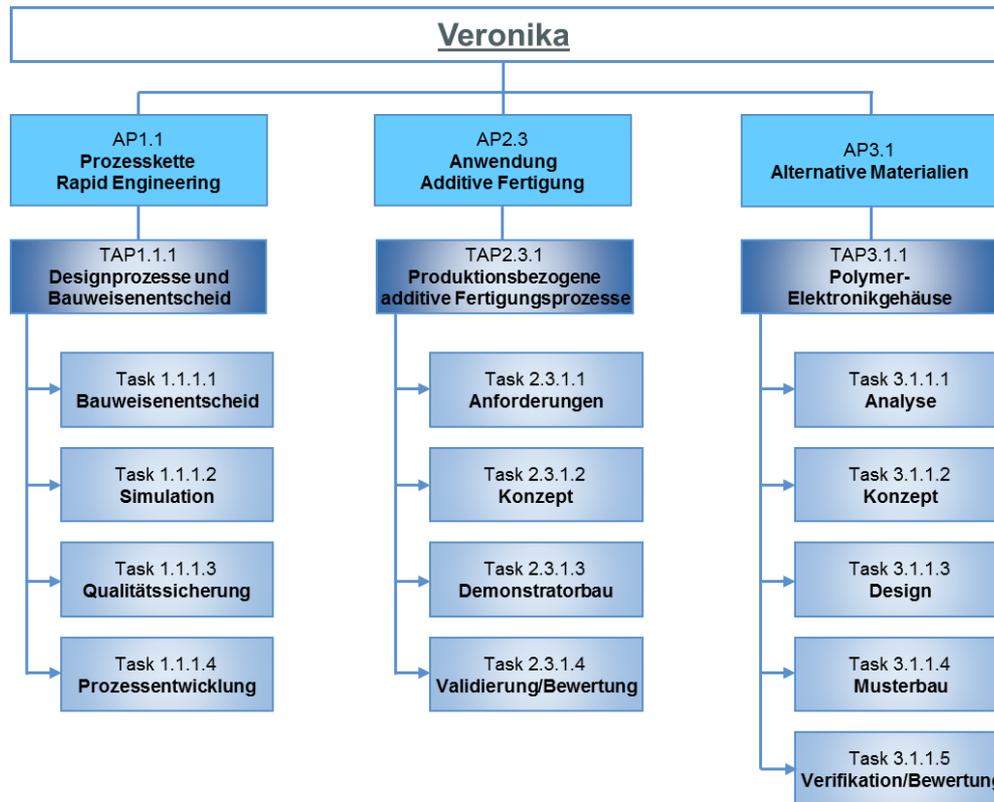
Das vorliegende Projekt war in das von ehemals Diehl Aircabin GmbH (DAc), jetzt Diehl Aviation Laupheim GmbH geführte Verbundvorhaben „Vernetzte und effiziente Entwicklungs- und Produktionsprozesse für Passagierkabinen“ (VERONIKA) des Luftfahrtforschungsprogramms LuFo V-2 integriert. Abbildung 3-1 zeigt den Projektstrukturplan des Verbundvorhabens, das in folgende drei Teilprojekte aufgeteilt war:

- TP1 Effiziente Entwicklungsprozesse
- TP2 Vernetzte Produktion
- TP3 Alternative Bauweise



**Abbildung 3-1: Projektstrukturplan VERONIKA**

Diehl Aviation Gilching GmbH (DAG), vorher Apparatebau Gauting GmbH (AOA), war an den Arbeitspaketen AP1.1 Prozesskette Rapid Engineering, AP2.3 Anwendung Additive Fertigung und AP3.1 Alternative Materialien beteiligt (im Projektstrukturplan grün gekennzeichnet) und leitete das TP3 Alternative Bauweisen. Den genannten Arbeitspaketen waren wiederum Teilarbeitspakete zuordnet, dargestellt in Abbildung 3-2. Wie in vorausgegangenen Technologieprojekten bewährt, waren die Teilvorhaben TAP2.3.1 und TAP3.1.1 der DAG in aufeinander folgende Phasen / Tasks unterteilt: Anforderungen – Konzepte – Spezifikation/Design –Musterbau –Verifikation.



**Abbildung 3-2: DAG Projektstrukturplan**

Die Arbeits- und Zeitplanung wurden kontinuierlich mit den Verbundpartnern abgestimmt und falls notwendig aktualisiert.

Eine Gesamtübersicht der zeitlichen Planung und der Arbeitspakete des Teilvorhabens bei DAG zeigt Abbildung 3-3. Die ursprüngliche Planung zu Vorhabensbeginn (Basisplan) ist lila liniert dargestellt.

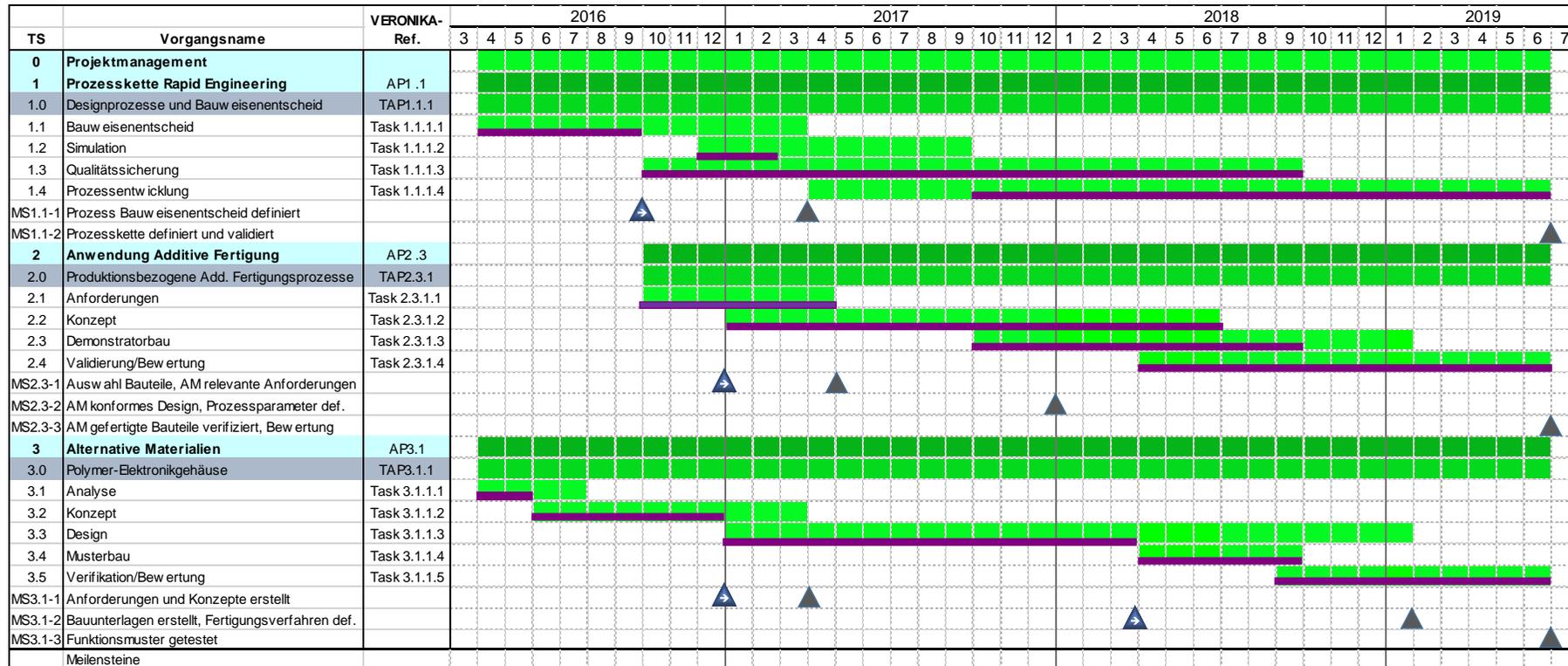


Abbildung 3-3: Zeitplan

**4 WISSENSCHAFTLICH TECHNISCHER STAND ZU VORHABENSBEGINN**

Additive Fertigung

Baugruppen von Lüftern wie das Gehäuse und Laufräder werden aus Aluminium-Feinguss hergestellt. Dabei ist das Design dieser Bauteile unter anderem durch die Herstellbarkeit limitiert (design to build). Die Feingusswerkzeuge sind mit hohen Kosten verbunden, sowohl während der Entwicklungsphase als auch in der Produktion. Meist ist eine zerspanende Nachbearbeitung der Gussteile zur Einhaltung sehr geringer Bauteiltoleranzen z.B. an Funktionsflächen des Laufrades erforderlich. Neben Aluminiumfeingussteilen werden Werkstücke auch zerspanend aus einem Rohling mit einem hohen Zerspanungsgrad hergestellt, was hohe Material- und Bearbeitungskosten zur Folge hat. In den Lüftern kommen multifunktionale Gehäuseteile (Stabilität, Temperaturableitung, EMV-Schutz) zum Einsatz, außerdem Laufräder, die mit bis zu 30.000 U/min betrieben werden. Die rotierenden Bauteile haben damit besonders hohe mechanische Anforderungen bezüglich Festigkeit und Formstabilität zu erfüllen.

Additive Fertigungsverfahren gehören im Gegensatz zu spanenden Herstellverfahren zu den jüngsten Fertigungstechnologien für Serienbauteile. Für die generative Herstellung aus Kunststoff gibt es drei Verfahren:

- Selektives Lasersintern (SLS): Schichtaufbau im Kunststoff-Pulverbett mittels eines Laserstrahls
- Fused Deposition Modelling (FDM): Schichtaufbau durch Aufschmelzen eines zugeführten Kunststoffdrahtes (Filament) durch einen beweglichen Düsenkopf
- ARBURG Kunststoff Freiformer (AKF): Schichtaufbau durch Aufschmelzen von Tröpfchen aus einem Kunststoffgranulat mittels einem starren Düsenkopfes

Die Eigenschaften der generativ hergestellten Bauteile hängen im Wesentlichen vom Fertigungsverfahren, dem gewählten Material und den Prozessparametern des Fertigungsverganges ab. Die Verfügbarkeit von Luftfahrt-zugelassenen Kunststoffmaterialien, die auch für generative Herstellverfahren geeignet sind, beschränkt sich auf Polyamid 12, Polycarbonat, ULTEM9085 und PEEK.

In der Vergangenheit ließ DAG erste Funktionsmuster von Gehäusen im Lasersinter-Verfahren während der Entwicklung herstellen (Rapid Prototyping).

Elektronikgehäuse

Elektronikgehäuse vieler elektrischer DAG-Geräte wie Pumpen, Ventile, etc. werden aus Aluminium hergestellt, um einerseits einen guten Wärmeabtransport, andererseits eine ausreichende elektromagnetische Verträglichkeit unter Berücksichtigung der Brandschutzvorschriften und Materialbeständigkeit sicher zu stellen. Weitere Anforderungen werden an die elektrische Leitfähigkeit der Gehäuse gestellt, um aus Sicherheitsgründen entweder eine ausreichende Erdung oder eine hinreichende elektrische Isolation sicherzustellen. Auch diese Forderung wird durch metallische Gehäuse erfüllt. Allerdings führt der Einsatz metallischer Gehäuse häufig zu einem hohen Gewicht und hohen Herstellkosten.

Eine Alternative stellen Gehäuse aus Kunststoffen dar. Normale Kunststoffe sind gute elektrische Isolatoren, allerdings ist auch ihre Wärmeleitfähigkeit deutlich eingeschränkt. Eine gute elektromagnetische Abschirmung erfordert ebenfalls eine geschlossene, elektrisch leitende Fläche. Diese kann durch einen hohen Anteil elektrisch leitender Füllstoffe im Kunststoff erzielt werden.

Solche hochgefüllten Kunststoffe mit elektrisch leitenden Partikeln oder Fasern führen zwar Wärme effektiver ab und ermöglichen zu einem gewissen Grad eine Abschirmung elektromagnetischer

11.12.2019	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH	- 11 -
------------	--	--------

Strahlung, allerdings führen die Füllstoffe unter Umständen auch dazu, dass die Oberfläche keine ausreichende Isolationswirkung mehr aufweist. Neben dem Einsatz von Füllstoffen können elektrisch leitfähige Beschichtungen auf Kunststoffgehäusen (Innenseite) aufgebracht werden, um das EMV Verhalten zu verbessern. Durch die Applikation auf der innenliegenden Oberfläche bleiben die isolierenden Eigenschaften des Kunststoffs auf der Außenseite erhalten.

Trotz der genannten Schwierigkeiten in Bezug auf Kunststoffgehäuse sind in anderen Industriebranchen Elektronikgehäuse aus verschiedenen Kunststoffen Standard. Gängige Materialien für Gehäuse ohne besondere Anforderungen sind Polycarbonat und ABS, die aber wegen Mängeln bei Brandschutz und thermischer Stabilität nicht in der Luftfahrt eingesetzt werden können. Auch die Anforderungen in Bezug auf EMV sind in der Luftfahrt deutlich strikter. Duroplaste werden wegen der guten thermischen Stabilität, der guten Dimensionsstabilität und der hohen elektrischen Isolation im Bereich der Eingießgehäuse und Elektroinstallation verwendet.

## **5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN**

EOS GmbH unterstütze bei der Komponentenauswahl, Teile Design und dem Druck von Teilen.

GE Additive Germany GmbH unterstütze bei einem Workshop zur Komponentenauswahl in den Arbeitspaketen zur additiven Fertigung und dem Druck von Teilen.

11.12.2019	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH	- 12 -
------------	--	--------

**6 VERWENDUNG DER ZUWENDUNG**

**6.1 Zielsetzungen und Ergebnisse**

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen des Vorhabens erfolgt in Tabelle 6-1. Die ausführliche Darstellung der erzielten Ergebnisse ist Inhalt des Kapitels 7.

Zielsetzung lt. Vorhabensantrag	Ergebnisse des Vorhabens
<b>AP1.1. Prozesskette Rapid Engineering</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Charakterisierung von vorausgewählten Bauteilen zur Bewertung und Bauweisenentscheid</li> <li>• Konzepte zum standardisierten Bauweisenentscheid</li> <li>• Kostenanalyse alternativer Fertigungsverfahren zum Bauweisenentscheid</li> <li>• Erstellung von FE-Modellen für Bauteile</li> <li>• Analyse von Zertifizierungsanforderungen und Übertragung für Metallbauteile</li> <li>• Detaillierung der Prozesskette für additive Fertigungsverfahren (Schwerpunkt Pre-Prozesse)</li> <li>• Beiträge zur Erstellung einer Prozessbeschreibung und Fertigungsanweisung im Verbund</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prozesskette analysiert und Einflussparameter abgeleitet</li> <li>• Bauweisenentscheid in Form von Tool dargestellt und standardisiert</li> <li>• Bauteilportfolio hinsichtlich geeigneter Bauteile für die additive Fertigung gesichtet</li> <li>• Auswahl geeigneter Bauteile</li> <li>• FE-Simulation dieser Bauteile hinsichtlich struktureller Optimierung</li> <li>• Kostenanalyse alternativer Fertigungsverfahren zum Bauweisenentscheid</li> <li>• Analyse der Qualifikationsanforderungen für additiv gefertigte Bauteile</li> <li>• Zertifizierung des Serienprozesses im Kunststoffdruck für Diehl Aviation</li> <li>• Analyse der Anforderung in Hinblick auf die Übertragung auf Metallbauteile</li> </ul>
<b>AP2.3. Anwendung additive Fertigung</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erstellung von Anforderungen für selektierte Bauteile zur additiven Fertigung</li> <li>• Erste Konzepte zur Bauteiloptimierung</li> <li>• Schulung der angegebenen Parteien</li> <li>• Iterative, Simulations-basierte Topologieoptimierung von Bauteilen</li> <li>• Untersuchung der Bauteile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimierung der selektierten Bauteile hinsichtlich Gewicht, mechanischen Eigenschaften und Kosten</li> <li>• Weiterbildung im Bereich additiver Konstruktion und Fertigung</li> <li>• Entwicklung eines Schulungskonzeptes und Überführung in den internen Schulungskatalog</li> <li>• Additive Fertigung der selektierten Bauteile</li> <li>• Analyse der Bauteile auf Kosten, Maßhaltigkeit und Funktionalität</li> <li>• Identifikation kritischer Design- und Prozessparameter</li> </ul>

<b>AP3.1 Alternative Materialien</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erfahrungen sammeln mit alternativen Materialien für Elektronikgehäuse um folgende Ergebnisziele für zukünftige Entwicklungsprojekte von Geräten zu sammeln:               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Senkung der Herstellkosten</li> <li>○ Reduzierung von Gewicht</li> </ul> </li> <li>• Analyse und Auswahl geeigneter Geräteklassen für die Anwendung von Elektronikgehäusen aus Kunststoff</li> <li>• Identifikation geeigneter Kunststoffmaterialien</li> <li>• Untersuchung verschiedener Methoden/Materialien zur Abschirmung elektromagnetischer Strahlung in Elektronikgehäusen</li> <li>• Verifikation des Kunststoffgehäusekonzeptes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ein Erfahrungsaufbau mit der neuen Technologie konnte erfolgreich durchgeführt werden. Die Kunststoffgehäuse versprechen eine deutlichere Herstellkostensenkung. Auch eine moderate Senkung des Bauteilgewichts konnte erreicht werden.</li> <li>• Es konnten Gehäuse verschiedener Geräteklassen analysiert werden. Als limitierenden Faktor für den Einsatz von Kunststoffgehäusen bei Leistungselektronik zeigte sich die begrenzte Wärmeleitfähigkeit.</li> <li>• Es konnten verschiedene Kunststoffe wie PEI, PEEK, PPS, die im Spritzgussverfahren verarbeitet werden können, als geeignet identifiziert werden.</li> <li>• Die Beschichtung der Gehäuseinnenseite mit elektrisch leitfähigen Materialien wurde als vielversprechendste Methode identifiziert. Es konnten verschiedene Beschichtungen identifiziert werden, die nach EMV Gesichtspunkten geeignet sind.</li> <li>• Anhand von Mustergehäusen konnte das gewählte Konzept mit einer CuVA Beschichtung verifiziert werden.</li> </ul>

**Tabelle 6-1: Gegenüberstellung der Zielsetzungen und Ergebnisse**

## 6.2 Einsatz Personal, Material, Fremdleistung

Der zahlenmäßige Nachweis der Projektkosten liegt dem Projektträger bereits vor.

86 % der Projektkosten wurden als Personalkosten für die im vorherigen Abschnitt aufgeführten Tätigkeiten verwendet. Der Bedarf an Personal erhöhte sich aufgrund gesteigener, eigener Leistungen, da die im Antrag vorgesehene Beauftragung des FhG-Institutes für Chemische Technologie entfallen ist und die Arbeiten im Wesentlichen intern geleistet wurden.

Die Fremdleistungskosten für die EOS GmbH und Bayerisches Laserzentrum GmbH sind entfallen. Die EOS GmbH hat nur Beratung und den Teiledruck berechnet, die als Dienstleistungen verbucht wurden. An Stelle der Bayerisches Laserzentrum GmbH wurde des Weiteren mit GE Additive Germany GmbH zusammengearbeitet, die ebenfalls nur den Teiledruck und einen Workshop berechneten, was als Dienstleistung verbucht wurde.

Die Materialkosten konnten deutlich gesenkt werden, da die Beschaffungskosten für die Materialproben des Elektronikgehäuses durch den Einsatz von speziellen Prototypenwerkzeugen geringer waren als ursprünglich geplant. Des Weiteren waren die Kosten für die im Spritzgussverfahren hergestellten Demonstrationsgehäuse der E-Box im Vergleich zu den beantragten Kosten geringer, weil eine kleinere E-Box ausgewählt wurde als ursprünglich geplant.

11.12.2019	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH	- 15 -
------------	--	--------

**7 AUSFÜHRLICHE DARSTELLUNG DER PROJEKTERGEBNISSE**

**7.1 AP1.1 Prozesskette Rapid Engineering**

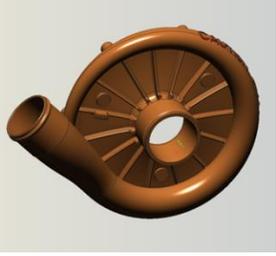
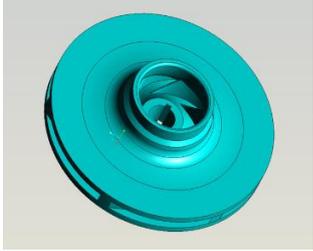
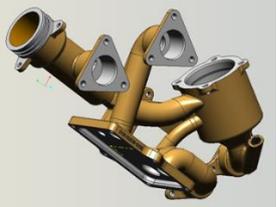
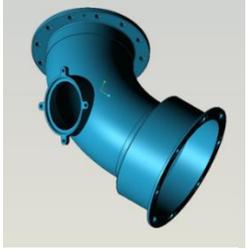
In diesem Arbeitspaket wurde im Verbund ein Konzept für die Prozesskette additiver Fertigungsverfahren in der Produktentstehung erarbeitet. Dieses beinhaltet einen Designprozess mit generellen Methoden zum Bauweisenentscheid und zur Konstruktion, Validierung der Konstruktions-/ Fertigungsdaten und den Bauprozess. Die gesamte Prozesskette wird gegen die Anforderungen der Nachweisführung für eine Luftfahrtzulassung validiert.

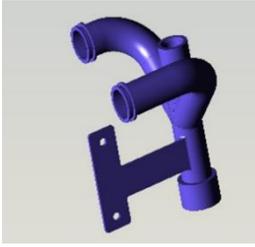
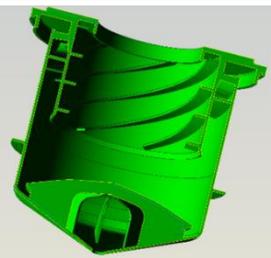
Task 1.1.1.1 Bauweisenentscheid

Um einen Bauweisenentscheid in diesem Task ermöglichen zu können, wurden zu Beginn des Projektes die Parameter zur Bauteilcharakterisierung definiert. Hieraus sollte eine Eignung der Bauteile für die additive Fertigung bewertet werden aus dem sich der Bauweisenentscheid ableiten lässt. Folgende Parameter wurden identifiziert:

- Bauteilgröße
- Materialvolumen
- Material / Alternativmaterial
- Komplexität der Form/Struktur
- Potential der Gewichtsreduktion
- Innere Strukturen
- Stückzahlen
- Zerspanungsgrad (Buy/Fly-Ratio)
- Anzahl angrenzender und integrierbarer Teile
- Aufwand der konventionellen Bearbeitung
- Produktionszeit pro Bauteil
- Einkaufskosten / Herstellkosten
- Anforderungen an den Temperaturbereich
- Festigkeitsanforderungen (statische und dynamische Lasten)

Bauteile die bei der Bewertung aus den oben genannten Kriterien hervorgegangen sind, finden sich in Tabelle 7-1.

3D-Modell	Bezeichnung	Material	Gerät
	Laufradumhüllung (Impeller Cover)	Aluminiumfeinguss	Vakuum-genera- tor
	Laufrad (Wasser) (Impeller)	Edelstahl	Wasserpumpe
	Strömungsknoten (Flow Distributor)	Aluminiumfeinguss	Kühlgerät
	Drainage-Bogen (Drain Elbow)	Edelstahl	Abwasserrohr
	Spiralgehäuse (Spiral Housing)	Edelstahl	Wasserpumpe
	Motorgehäuse (Motor Housing)	Aluminiumfeinguss	Lüfter

3D-Modell	Bezeichnung	Material	Gerät
	Verteilerrohr (Manifold)	Edelstahl	-
	Zyklon (Cyclone)	Ultem	Abfall-Separator / Tank Modul

**Tabelle 7-1: Bauteil-Vorauswahl**

Eine Optimierung dieser Bauteile verspricht folgenden Ziele:

- Gewichtsreduktion der Bauteile
- Materialeinsparung
- Weniger Bauteile durch höhere Bauteilkomplexität
- Funktionsintegration
- Geringere Werkzeugkosten (z.B. Einsparung von Spritzgusswerkzeugen)
- Kürzere Produktionszeiten
- Kürzere Beschaffungszeiten
- NRC Einsparungen
- RC Einsparung

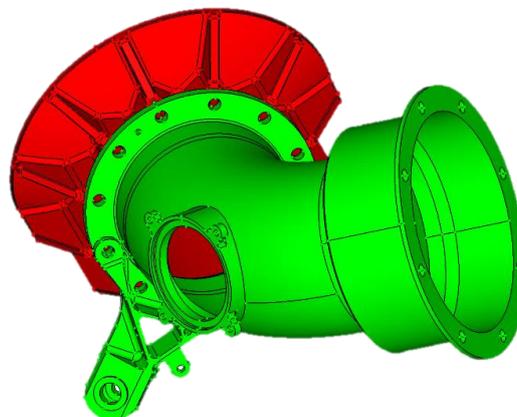
Daher wurde für jedes Bauteil ein Optimierungsschwerpunkt festgelegt. Zusammen mit dem DMRC wurden die drei Hauptkategorien definiert:

- Gewicht / Materialeinsparung
- Funktions- und Bauteilintegration
- Materialwechsel (Metall ⇔ Kunststoff)

Als Ergebnis der Bewertung lässt sich zusammenfassen, dass der Strömungsknoten großes Verbesserungspotential durch eine Bauteilintegration bietet. Allerdings ergibt sich gegenüber dem Feingussverfahren kein klarer Kostenvorteil. Schwierigkeiten bestehen zudem in der Wahl der Orientierung hinsichtlich dem Aufbau und der Entfernung von Stützstrukturen. Dagegen lässt sich bei dem Drainage-Bogen durch Integration von 2 weiteren Bauteilen (Halterung und Drainageflansch) ein deutlicher Kostenvorteil erkennen. Da Kunststoffe im Leichtbau eine zunehmend wichtige Rolle einnehmen, sollen hinsichtlich Materialwechsel das Laufrad für eine Wasserpumpe und ein Zyklon zur Abscheidung von Festkörpern im Abwasser betrachtet werden.

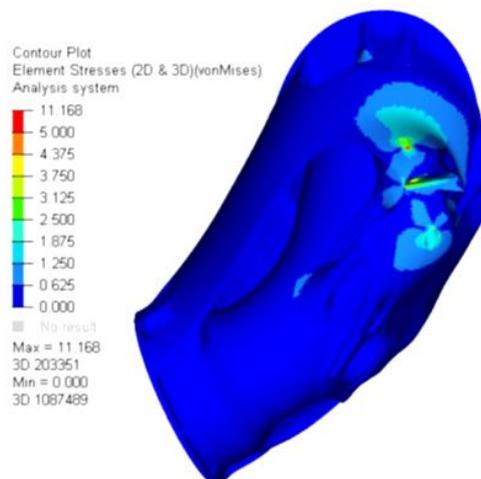
Task 1.1.1.2 Simulation

Ein Bauteil, das als Demonstrator für die Bauteilintegration in Kunststoff additiv gefertigt werden sollte, ist der Drainage-Bogen (Drain Elbow), bestehend aus einem gebogenen Drainagerohr, einem Drainageflansch, einem Halteträger und einem Sensorflansch. Hierfür wurden Konstruktionsdaten angepasst und FE-Modelle erstellt, die dem Verbundpartner DMRC für weitergehende Lastsimulationen und Untersuchungen der Aufbauorientierung zur Verfügung gestellt wurden (Abbildung 7-1).



**Abbildung 7-1: FE-Modell Drainage-Bogen (Drain Elbow)**

Hieraus ergab sich im Rahmen einer Topologieoptimierung folgende Lastsimulation:



**Abbildung 7-2: Spannungsanalyse des Drainagebogen (Drain Elbow)**

11.12.2019	<p>Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH</p>	- 19 -
------------	---	--------

Dabei wurden für den Normalbetrieb bei einer Lasteinleitung von 1700 N an der Halterung Maximalspannungen von  $\sigma_{\max} \approx 11,2$  MPa, sowie bei Crash-Lastfällen von bis zu 10g in z-Richtung Maximalspannungen in Höhe von  $\sigma_{\max} \approx 37,2$  MPa berechnet.

### Task 1.1.1.3 Qualitätssicherung

In diesem Task wurden exemplarische Bauteile, deren Entwicklung und die Herstellung dieser begleitet. Hierfür wurde eine Fertigungsanweisung erstellt, die die Zertifizierungsanforderungen formfester Kunststoffbauteile in der additiven Fertigung berücksichtigt. Darüber hinaus wurde begonnen die notwendigen Zertifizierungsanforderungen und entsprechende Nachweise von Metallbauteile auf Kunststoffbauteile zu übertragen. Grundlage dafür waren nachfolgende Dokumente:

- CS 25.605: Fabrication Methods
- CS 25.613: Mechanical Strength Properties and Design Values Materials

Kontinuierlich, auch nach diesem Vorhaben, werden neue Zertifizierungsanforderungen und entsprechende Nachweise auf die additive Fertigung übertragen.

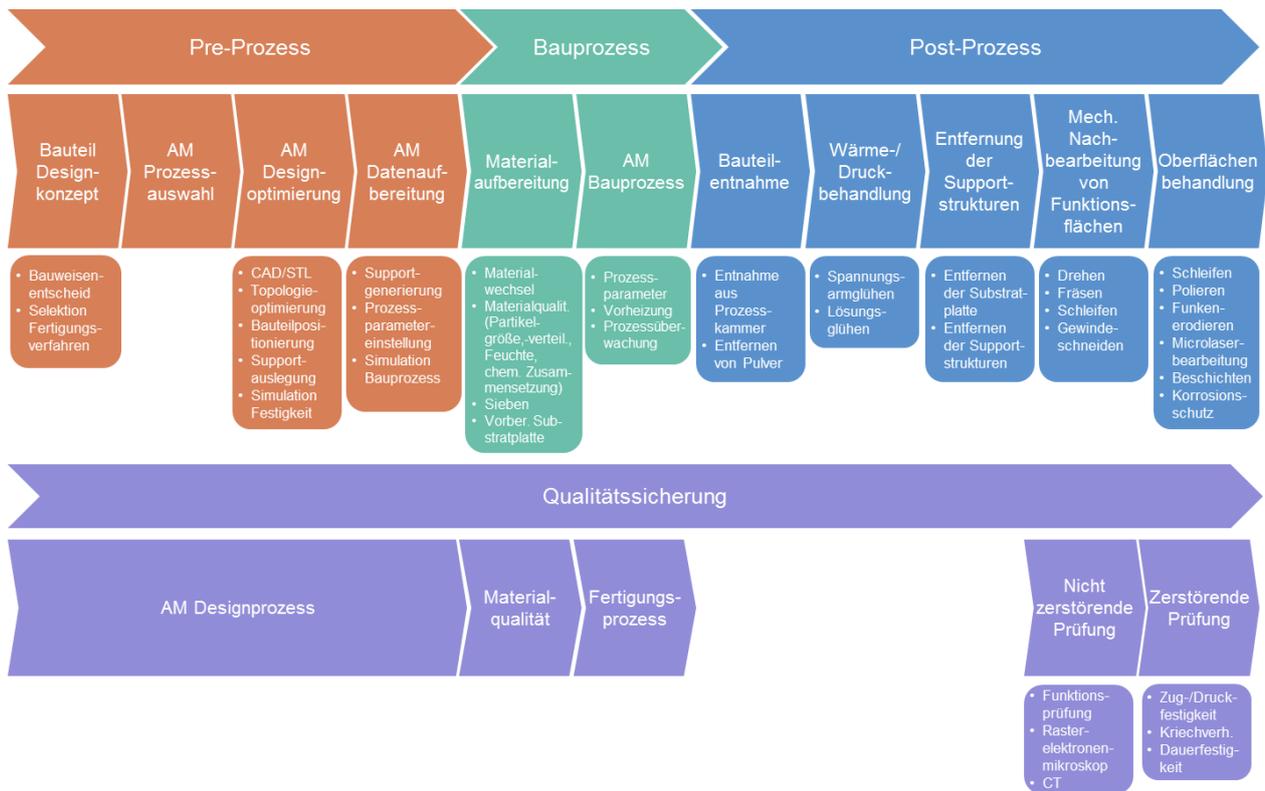
### Task 1.1.1.4 Prozessentwicklung

Der Task 1.1.1.4 wurde vorzeitig gestartet, da der Bauweisenentscheid als Teil der Prozesskette für die additive Fertigung im Kontext der bestehenden Fertigungsprozesse integriert werden sollte.

Dazu wurde die Prozesskette für additive Fertigungsverfahren definiert und die Integration in die bestehende Prozesslandschaft untersucht. Die Prozesskette besteht aus den drei Einzelprozessen: AM Design bzw. Pre-Prozess, Bauprozess und Postprozess. Während dem AM Design-Prozess wird ein Design-Konzept erstellt und das AM-Bauverfahren ausgewählt. Das Design des Bauteils ist dem Bauverfahren entsprechend zu optimieren und die Daten sind für den Bauprozess aufzubereiten. Der Bauprozess beinhaltet die Materialaufbereitung und den Druckprozess. Der Postprozess beinhaltet die Bauteilentnahme aus dem Drucker und die Reinigung vom Pulver, eine Wärme- und Druckbehandlung zur Reduzierung von Spannungen, die Entfernung von Supportstrukturen sowie die mechanische Nachbehandlung von Funktionsflächen und Oberflächen.

Parallel zu diesen Einzelprozessen erfolgt die Qualitätssicherung, die die Überprüfung des AM Designprozesses, der Materialqualität und des Bauprozesses beinhaltet. Abschließend können zur Qualitätssicherung zerstörende und nicht-zerstörende Prüfungen erfolgen.

11.12.2019	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH	- 20 -
------------	--	--------

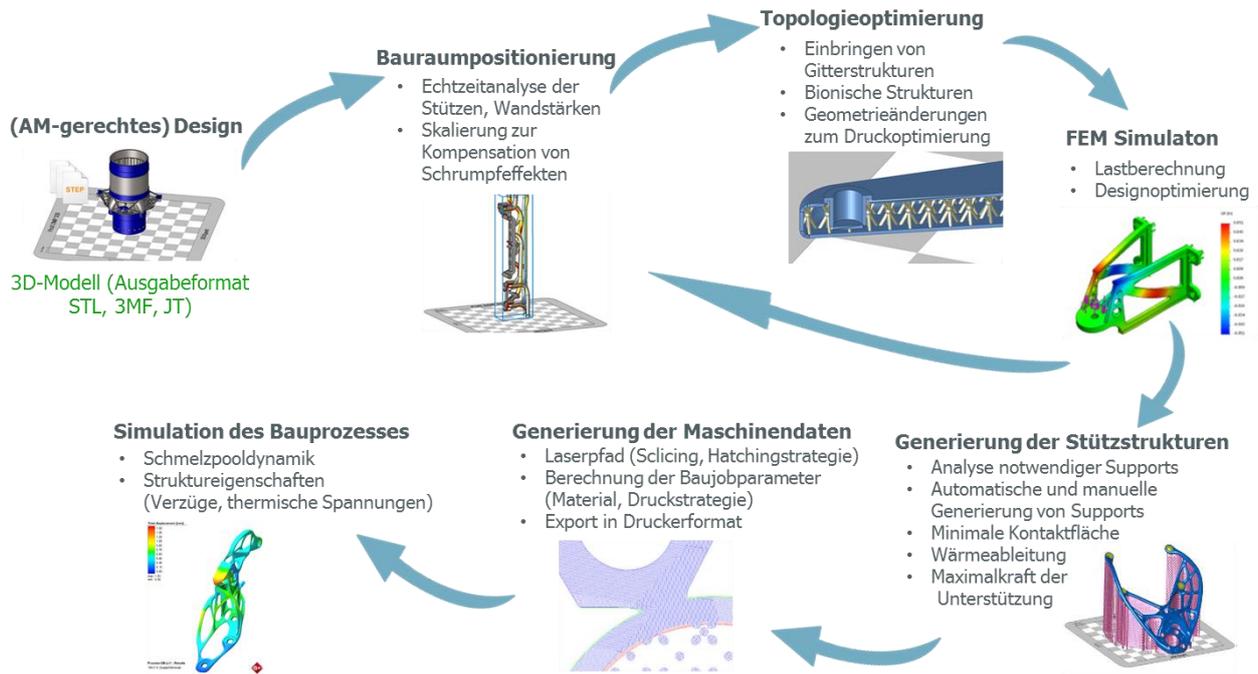


**Abbildung 7-3: Prozesskette Additive Fertigung**

Zur Designoptimierung und Datenaufbereitung (Abbildung 7-4) wird das 3D-Modell eines Bauteils in eine CAM-Software importiert. Mit Hilfe des Werkzeugs wird das Bauteil im Bauraum positioniert und in Abhängigkeit davon der Bedarf an Stützstrukturen und Wandstärken analysiert. Schrumpfeffekte bei Kunststoffen lassen sich mittels Skalierung kompensieren. Anschließend kann eine Topologieoptimierung durchgeführt werden. Standardisierte Gitterstrukturen und bionische Strukturen dienen sowohl der Gewichtsreduktion als auch der Festigkeitsoptimierung. Mit Hilfe einer FEM-Simulation lassen sich Lastberechnungen darstellen und gegebenenfalls zusätzliches Material lokal zur Erhöhung der Festigkeit im Design berücksichtigen. Schließlich lassen sich die notwendigen Stützstrukturen generieren. Hierbei ist auf minimale Kontaktflächen am Bauteil, ausreichende Wärmeableitung und eine Maximalkraft der Unterstützung zu achten.

Des Weiteren werden die erforderlichen Maschinendaten, z.B. Parameter des Bauauftrags, Laserpfad, etc. generiert. Zusätzliche Werkzeuge ermöglichen die Simulation des Bauprozesses (z.B. Schmelzbaddynamik) und die Analyse von Struktureigenschaften des späteren Bauteils (z.B. Verzüge, thermische Spannungen).

11.12.2019	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH	- 21 -
------------	---	--------



**Abbildung 7-4: Designoptimierung und Datenaufbereitung**

Der bisher generalisierte Ablauf wurde anschließend auf einen konkreten Prozess angewandt. Da zu diesem Zeitpunkt bei der Diehl Aviation Laupheim die Serienfertigung mittels FDM Drucker eingeführt wurde, wurde diese Anwendung gewählt. Die Abbildung 7-5 zeigt den freigegebenen Prozess.



**Abbildung 7-5: FDM-Fertigungsprozesse**

Diese Prozessschritte dienen als weitere Grundlage um die Fertigungsprozesse für das SLM-Verfahren (Laserstrahlschmelzen im Metallpulverbett) unter Berücksichtigung der erforderlichen Zulassungsnachweise zu definieren.

11.12.2019	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH	- 22 -
------------	--	--------

## 7.2 AP2.3 Anwendung Additive Fertigung

In diesem Teilarbeitspaket wurden anwendungsbezogenen Bauteile in ausgewählten, additiven Fertigungsverfahren entsprechend der in TAP1.1.1 definierten Designprozesse und Methoden zum Bauweisenentscheid gefertigt und die erzeugten Bauteile verifiziert.

Zu Beginn wurden die Anforderungen für die in Task 1.1.1.1 zur Funktionsmusterherstellung selektierten Bauteile spezifiziert damit anschließend das Design überarbeitet werden konnte. Für die selektierten Bauteile wurden Konzepte hinsichtlich Bauteilintegration und Materialauswahl erarbeitet. Darauf aufbauend wurden Konstruktions-Schulungsunterlagen erarbeitet und ein Workshop abgehalten.

### Drainage-Bogen

Explizit wurde der Drainage Bogen optimiert. Erste Muster im Maßstab 1:4 wurden gebaut.



**Abbildung 7-6: Drainage-Bogen**

Anschließend wurde der Drainage-Bogen durch mehrere Iterationen bezüglich folgenden Anforderungen optimiert:

- Integration einer Heizmanschette
- Mechanische Interfaces
- Materialreduktion /Verteilung bei maximaler Steifigkeit
- Optimierung für den Lasersinterprozess

Abschließend hat das DMRC den optimierten Drainage Bogen mit Hilfe des Lasersinterns im Pulverbett (SLS) aus PA12-Pulver hergestellt (Abbildung 7-7).

11.12.2019	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH	- 23 -
------------	--	--------



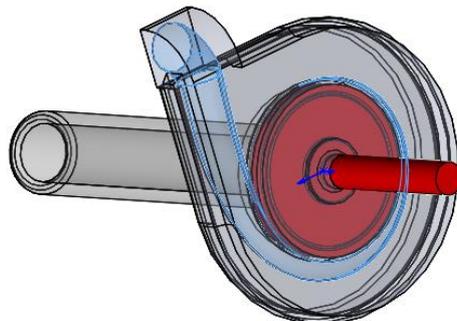
**Abbildung 7-7: Drainage Bogen nach Optimierung**

LaufRad (Impeller)

Das Optimierungsziel für die Laufräder war ein Materialwechsel von Edelstahl (Wasserlaufrad) bzw. Aluminiumlegierung (Treibstofflaufrad) auf Kunststoff. Der Hintergrund war eine geplante Gewichtsreduktion für Laufräder im hohen Drehzahlbereich.

Das DMRC hat Laufräder für die Wasserpumpe gedruckt und Pretests mittels einem eigenen Testaufbau (

Abbildung 7-8 - selbstgefertigtes Pumpengehäuse aus Kunststoff) durchgeführt. Dabei wurde das Laufrad mit Wasser auf 10.000 U/min beschleunigt. Das Laufrad fördert Wasser und arbeitet ohne Verschleiß bei unterschiedlichen Drehzahlen und Druckunterschieden. Jedoch führt der Versuchsaufbau zu einer Wärmeentwicklung am Gehäuse durch zu hohe Reibung.



**Abbildung 7-8: Laufrad mit Pumpenaufbau für Pretests**

Anschließend zum ersten Funktionstest beim DMRC wurden die Laufräder bei der Diehl Aviation Gilching GmbH in reale Pumpengehäuse eingebaut und am Pumpenteststand verifiziert.

11.12.2019	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH	- 24 -
------------	--	--------

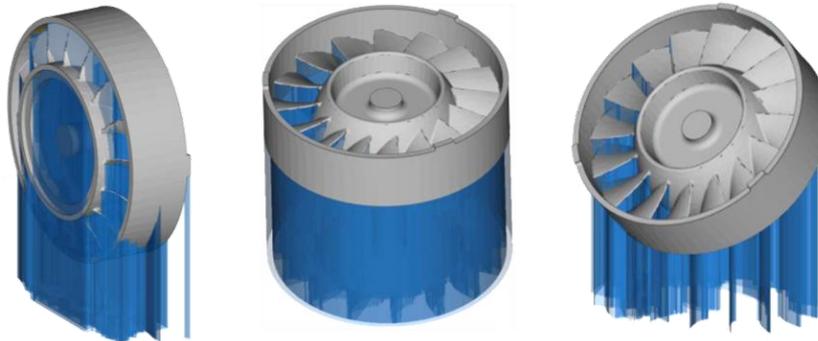
## Zyklon (Cyclone)

Bei der ersten Bauteilwahl wurde der Zyklon als potentiell geeignetes Bauteil identifiziert, jedoch wurde der Zyklon nicht weiterverfolgt, da im Laufe des Projektes folgende Erkenntnisse generiert wurden:

- Die durch die additive Fertigung bedingte raue Oberfläche auf den Innenseiten des Zyklons würden die Effizienz reduzieren (eine Oberflächenbehandlung innenliegender Flächen ist wegen der Unzugänglichkeit problematisch).
- Ein kostengünstigeres Herstellverfahren mittlerweile zur Verfügung steht (Vakuumguss).

## Lüfter-Axiallaufrad

Des Weiteren wurde ein Lüfterlaufrad, welches bisher aus Aluminiumfeinguss hergestellt wird, hinsichtlich einem möglichen Anwendungsfall für die additive Fertigung untersucht. Aufgrund seines Designs stellt das Laufrad hohe Herausforderungen an die Einhaltung von Toleranzen und die mechanische Nachbearbeitung.



**Abbildung 7-9: Axiallaufrad mit Stützstrukturen**

Auf Basis des bestehenden 3D-Modells des Laufrads wurde der Bedarf der erforderlichen Stützstrukturen in Abhängigkeit der Orientierung im Bauraum analysiert. Dies zeigte, dass in jeder Orientierung ein erheblicher Aufwand an Stützstrukturen für Wärmeableitung und mechanischer Abstützung im Pulverbett erforderlich wäre. Eine Analyse der notwendigen Nachbearbeitung ergab, dass die Stützstrukturen nicht mittels Drehen oder Fräsen entfernt werden könnten. Somit stellt dieses Laufrad keinen Anwendungsfall für die additive Fertigung im SLS-Verfahren dar.

## Lüfter-Radiallaufrad

Entsprechend der Vorhabensbeschreibung sollte die additive Fertigung eines faserverstärkten Kunststofflaufrads untersucht werden. Das Laufrad eines Radialverdichters (Abbildung 7-10) wird im Vakuum-Spritzgussverfahren aus PEI mit 30% Glasfaseranteil gefertigt



**Abbildung 7-10: Axiallaufrad**

### Drainagebogen-Flansch

Die heutige Ausführung des Drainagebogens besteht aus Metall. Der Anschlussflansch für die Aufnahme eines Sensors wird bei der Herstellung des Drainagebogens auf ein gekrümmtes Rohr aufgeschweißt. Dieser Schweißprozess stellt sich aufgrund der sphärischen Geometrie und unterschiedlicher Materialdicken sowohl fertigungstechnisch, als auch qualitativ als problematisch dar.

Daher wurde ein Fertigungskonzept entwickelt, bei dem ein additiv hergestellter Anschlussflansch mit einem Materialüberhang bereits Rohrflächen des Drainagebogens enthält. Damit hat der Anschlussflansch an der Schweißkante eine einheitlich dünne Wandstärke, die den Schweißprozess deutlich vereinfacht.

Nachdem Diehl Aviation das entsprechende 3D-Modell des Anschlussflansches erstellt hatte, fertigte das DMRC den Anschlussflansch im selektiven Laser-Schweißverfahren im Pulverbett (SLM). Dabei wurde eine Aluminiumlegierung als Material verwendet.



**Abbildung 7-11 Anschlussflansch für Drainagebogen**

## 7.3 AP3.1 Alternative Materialien

In diesem Arbeitspaket wurden alternative Materialien und Herstellverfahren für Elektronik Kunststoffgehäuse untersucht. Dabei waren die Arbeiten in die fünf Phasen: Analyse, Konzepterstellung, Design, Musterbau und Verifikation untergliedert.

Die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse werden im Folgenden detailliert beschrieben.

### Task 3.1.1.1 Analyse

Zu Beginn des Projektes wurden die Anforderungen an ein polymeres Elektronikgehäuse für typische DAG-Geräte ermittelt. Die Anforderungen wurden in einer Spezifikation (Equipment Supplier Specification for Polymeric Electronic Box) zusammengefasst. Im Rahmen der Anforderungsanalyse zeigte sich, dass die Geräte bezüglich ihrer Anforderungen an die EMV in verschiedene Klassen unterteilt werden können:

1. Geräte mit elektronisch kommutierten Motoren/Leistungselektronik
2. Sensoren
3. Systemcontroller
4. sonstige Geräte

Gewöhnlich finden sich EMV Störer in der Klasse 1 und 4, sodass eine Abschirmung für diese Geräteklassen notwendig ist. Eine Abschirmung kann aber gegebenenfalls auch für die Klasse 2 oder 3 aufgrund höherer Anforderungen an die Störfestigkeit notwendig sein.

Neben der Anforderungsklärung wurde eine Literatur- und Marktrecherche durchgeführt, um Verfahren und Werkstoffe zur Verbesserung der elektromagnetischen Abschirmwirkung zu identifizieren. Diese zeigte, dass es eine Vielzahl von Beschichtungen auf Basis von Kupfer, Gold, Zink, Nickel, Graphit und deren Kombinationen auf dem Markt gibt, die eine abschirmende Wirkung versprechen. Die recherchierten Beschichtungen wurden in einer kleinen Datenbank zusammengetragen und eine Vorauswahl von insgesamt neun verschiedenen Beschichtungen getroffen.

Neben den Beschichtungen wurden noch die folgenden Materialien bzw. Verfahren zur Verbesserung der EMV Eigenschaften ermittelt:

- Metallpulver als Füllstoff im Polymer
- Metallvlies aufgeklebt oder in das Material integriert
- Metallgitter
- Carbonfaserverstärkte Materialien

Um weitere mögliche Verfahren zur Verbesserung der EMV-Eigenschaften zu ermitteln und um die IP Lage zu Projektbeginn abzusichern, wurde neben der Marktrecherche eine Patentrecherche durchgeführt. Um die Anzahl der gefundenen Patente zu begrenzen, wurden die Patente, die sich auf eine Beschichtung bezogen, zunächst nicht betrachtet, da Lösungen auf Basis von Beschichtungen bereits durch kommerziell erhältliche Verfahren/Materialien abgedeckt wurden.

### Task 3.1.1.2 Konzept

Im Rahmen dieser Phase wurde zunächst das experimentelle Vorgehen zur Auswahl geeigneter Verfahren, Materialien und Beschichtungen hinsichtlich ihrer abschirmenden Wirkung von elektromagnetischer Strahlung definiert. Außerdem wurden erste Screeningversuche mit verschiedenen Materialien - insbesondere Beschichtungen - durchgeführt. Zudem wurde ein geeignetes Demonstratorgerät für das Projekt ausgewählt.

Die Abschirmwirkung eines beschichteten Kunststoff-Elektronikgehäuses wird im Wesentlichen durch die Beschichtung (Dicke, Material) und die Kontaktstellen der Gehäusekomponenten zueinander bestimmt (Übergangswiderstand, Korrosion, Anpresskraft, Spaltmaße).

11.12.2019	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH	- 27 -
------------	--	--------

Die jeweiligen Eigenschaften verschiedener Materialien und Aufbauten sollten in einem Versuchsaufbau experimentell miteinander verglichen werden.

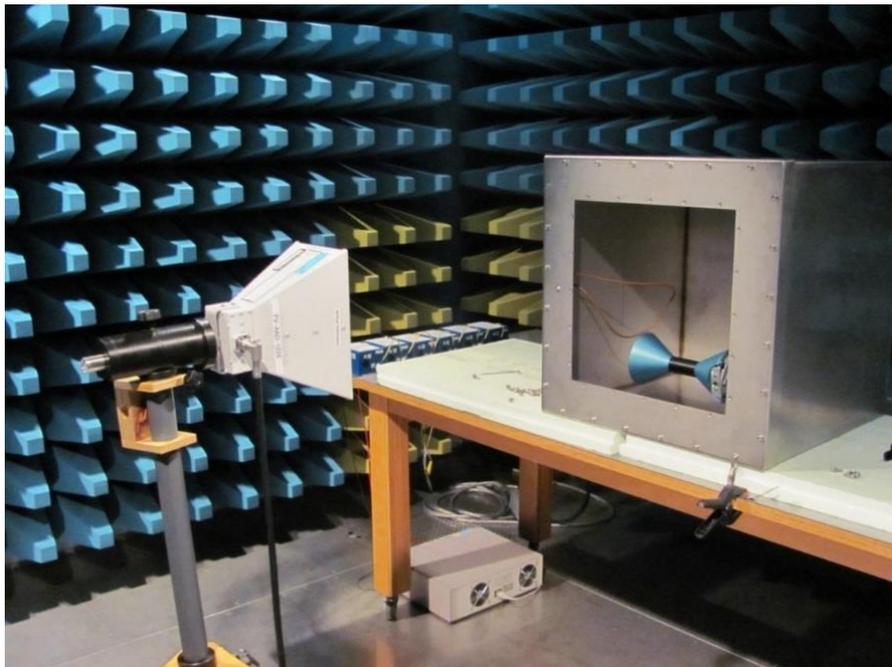
Die Abschirmwirkung sollte über die Messung der Störaussendung bestimmt werden. Als Störsender wurde der für die Leistungsklasse von DAG-Geräten repräsentative Störsender „REFRAD X“ der Firma Seibersdorf Laboratories beschafft (Abbildung 7-12). Es handelt sich um einen batteriebetriebenen Kammgenerator mit einem einstellbaren dreistufigen Kammabstand (10kHz, 1MHz, 5MHz). Der Kammgenerator hat einen nutzbaren Frequenzbereich von 10kHz bis 3GHz. Die Feldstärken, die von diesem Störsender erzeugt werden können, liegen über der abgestrahlten Feldstärken von typischen Geräten der DAG und erlauben somit eine gute Bewertung der Abschirmwirkung von Gehäusen.



**Abbildung 7-12: Ausgewählter Störsender „REFRAD X“**

Um verschiedene Kunststoffmaterialien und Beschichtungen testen zu können wurde ein Messaufbau mit einem metallischen Gehäuse konzipiert, auf das verschiedene Prüfkörper montiert werden können (vgl.: Abbildung 7-14). Übergänge zwischen Gehäusekomponenten können simuliert werden, indem an dem Fenster Kunststoffplatten mit unterschiedlicher Größe miteinander verbunden werden. Die 2 mm starken Edelstahlwände der Prüfbox stellen eine ideale Abschirmwirkung dar, so dass lediglich die Abschirmwirkung durch den Prüfkörper vermessen wird.

Für eine Referenzmessung wurde das Fenster der Prüfbox mit einer Edstahlplatte verschlossen und die Übergänge wurden mit speziellem leitfähigem Dichtband abgedichtet (vgl. Abbildung 7-15). Die Messergebnisse mit Edelstahlplatte entsprachen der Referenzmessung „ambient“ ohne Störsender.



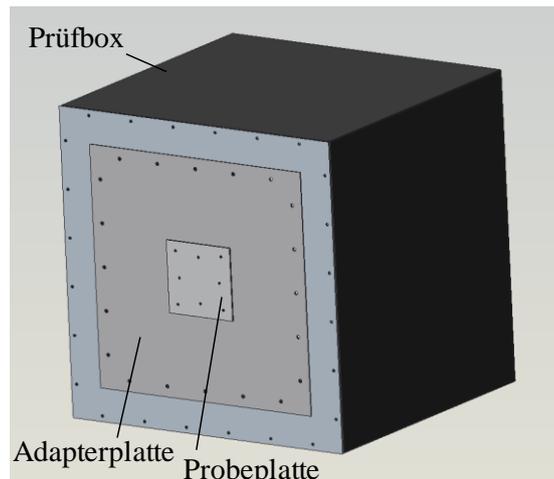
**Abbildung 7-13: Messaufbau zur Untersuchung der Schirmdämpfung**

Die Abstrahlcharakteristik des Störsenders „REDRAD X“ wurde in den drei Frequenzbereichen von 30 MHz bis 200 MHz, von 200 MHz bis 1 GHz und von 1 GHz bis 3 GHz mit und ohne Edelstahlplatte gemessen.



**Abbildung 7-14: Abdichtung des Messfensters mit einer EMV-Flachdichtung (Hersteller- Hollandshielding)**

Um im weiteren Projektverlauf auch kleinere Platten mit den Abmessungen 150 mm x 150 mm testen zu können, wurde außerdem ein Adapterrahmen für die Prüfbox gefertigt (vgl.: Abbildung 7-15). Dies ermöglichte den Test von spritzgegossenen Proben mit definierten Oberflächen.

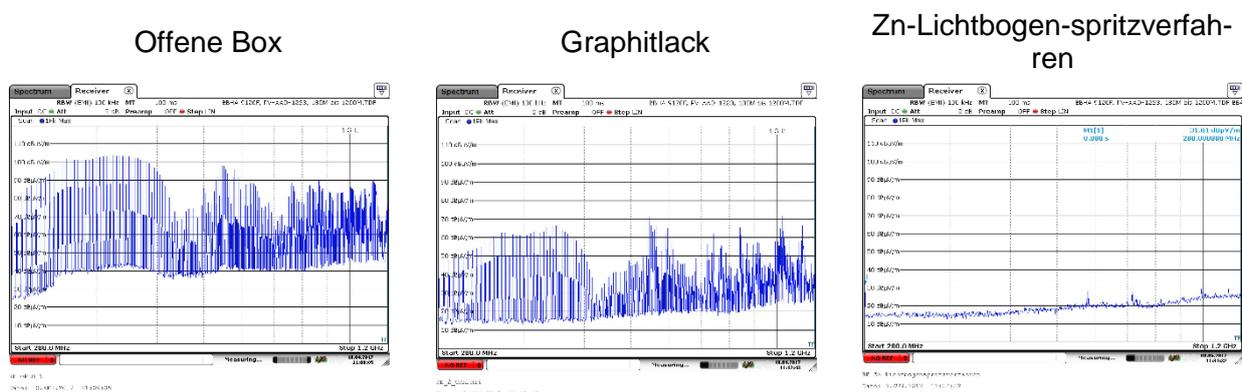


**Abbildung 7-15: Prüfbox mit Adapterplatte für kleinformatige Prüfplatten**

Im Rahmen der Screeningversuche wurden zunächst kommerziell verfügbare EMV-Beschichtungen untersucht. Diese Beschichtungen basierten auf Kupfer, Gold, Zink, Nickel, Graphit und deren Kombinationen. Für die Untersuchungen wurden PA6 Kunststoffplatten mit einer Kantenlänge 500 x 500 mm und einer Dicke von 3 mm beschichtet:

1. Graphitlack
2. EMV-Vlies;
3. Cu- Ni-Cr Beschichtung
4. Zn-Lichtbogenspritzverfahren
5. CuVA
6. Au

Ziel der Tests war es, eine Beschichtung zu finden, welche über den gesamten Frequenzbereich eine hinreichende Schirmdämpfung aufweist. In Abbildung 7-16 ist exemplarisch der Vergleich zwischen einer geeigneten und einer ungeeigneten Beschichtung dargestellt:



**Abbildung 7-16: Exemplarischer Vergleich zweier Beschichtungen im Frequenzbereich von 200MHz bis 1.2GHz**

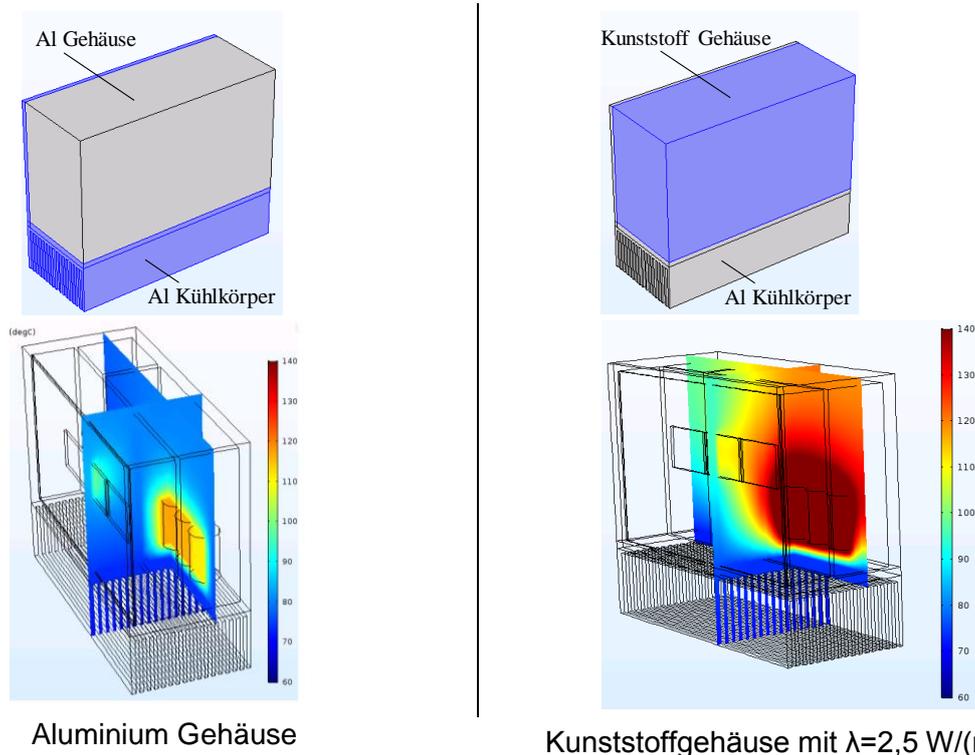
<p>11.12.2019</p>	<p>Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH</p>	<p>- 30 -</p>
-------------------	---	---------------

Auf Grund der geringen Schirmdämpfung im Bereich ab 500MHz wird Graphitlack als ungeeignet bewertet. Die Zn Beschichtung, welche im Lichtbogenspritzverfahren aufgebracht wurde, zeigte hingegen in diesem Frequenzbereich eine Schirmdämpfung, die größer als der maximale Messbereich des Störsenders war und ist daher sehr gut geeignet.

Beim Einsatz alternativer Materialien für Elektronikgehäuse muss neben der Abschirmung elektromagnetischer Strahlung die Abfuhr von Wärme aus dem Gehäuseinneren sichergestellt werden. Kunststoffe besitzen dabei eine wesentlich geringere Wärmeleitung als metallische Werkstoffe. So beträgt die Wärmeleitfähigkeit von Aluminium ca. 235 W/(m·K), die von gängigen unverstärkten Kunststoffen lediglich 0,3 W/(m·K). Durch Additive oder Carbonfaserverstärkung kann die Wärmeleitfähigkeit auf 2,5 – 10, in Einzelfälle auf bis zu 40 W/(m·K) gesteigert werden [2].

Bei Elektronikgehäusen mit geringen Wärmeverlusten ist eine geringe Wärmeleitfähigkeit unproblematisch. Für das Gehäuse einer Leistungselektronik kann die geringe Wärmeleitung jedoch einen limitierenden Faktor darstellen. Um diese Problematik genauer zu untersuchen, wurde eine Simulation des thermischen Verhaltens einer Leistungselektronik-Box durchgeführt.

Für die Analyse des thermischen Verhaltens wurde eine Ersatzhardware bestehend aus Leistungswiderständen aufgebaut, die die thermischen Verluste der Elektronik abbilden. Anschließend wurde dieser Ersatzaufbau in ein Simulationsmodell (Software COMSOL®) überführt, um den Einfluss verschiedener Gehäusematerialien auf die Wärmeabfuhr zu untersuchen. Das Simulationsmodell wurde durch experimentelle Messungen am physischen Ersatzmodell validiert. Abbildung 7-17 zeigt die Modellannahmen und die Simulationsergebnisse für ein Gehäuse aus Aluminium (Al) und ein Kunststoffgehäuse. Für das Kunststoffgehäuse wurde eine mittlere Wärmeleitfähigkeit von 2,5 W/(m·K) angenommen.

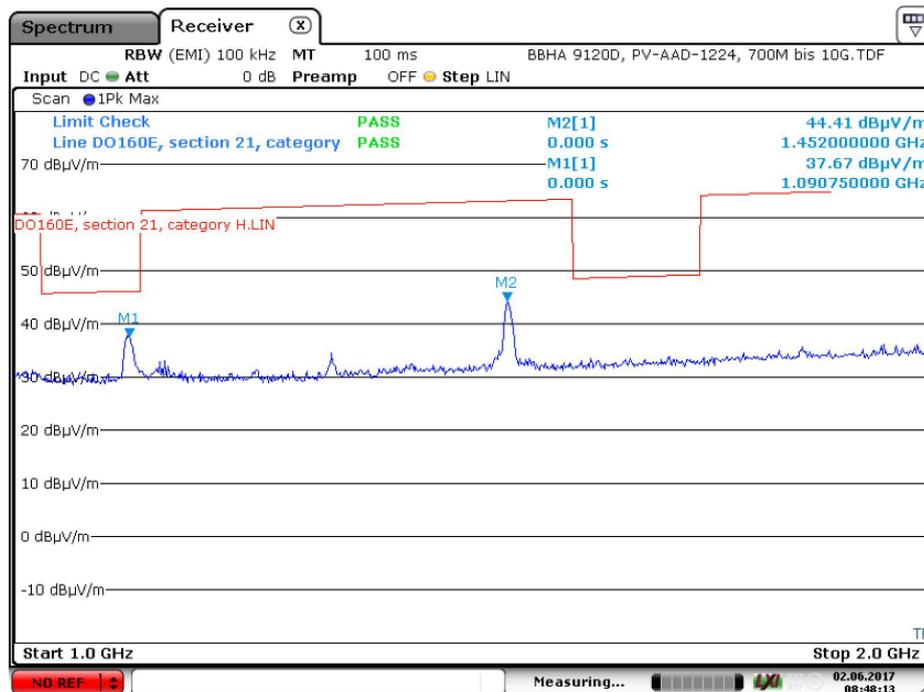


**Abbildung 7-17: Thermische Simulation eines Leistungselektronikgehäuses**

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass bei der Verwendung eines Kunststoffgehäuses die gewickelten Kupferspulen der Leistungselektronik im eingeschwungenen Betriebszustand eine um ca. 40°K höhere Temperatur erreichen als die Spulen, die von einem Aluminiumgehäuse umgeben sind. Der Kunststoff hat in der konkreten Anwendung, wie vermutet, eine stark thermisch isolierende Wirkung. Die maximalen Temperaturen von bis zu 160°C sind für die Lebensdauer des Gerätes als kritisch zu betrachten. Die geringere Wärmeabfuhr durch das Kunststoffgehäuse wirkt sich nicht nur auf die Leistungselektronik aus, sondern führt auch zu erhöhten Temperaturen im Motorcontroller ( $\Delta T \approx 10^\circ K$ ). Die Verwendung modifizierter Kunststoffe mit einer Leitfähigkeit von bis zu 10 W/(m·K) führte in der thermischen Simulation zu einer leichten Verbesserung der Ergebnisse. Insbesondere die Motorcontroller wurden geringer belastet. Die Temperatur der Spulen lag jedoch weiterhin über den zulässigen Temperaturen.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der thermischen Simulation, dass die geringe thermische Leitfähigkeit von Kunststoffen die Einsatzgebiete von Kunststoffgehäusen bei kompakter Leistungselektronik einschränken. Im weiteren Projektverlauf werden sich die Arbeiten an beschichteten Kunststoffgehäusen daher auf Controller-Gehäuse fokussieren, in denen geringere Wärmeverluste entstehen. Ein Beispiel hierfür sind Magnetventile.

Die Abstrahlcharakteristik der Elektronik eines solchen Magnetventils wurde ohne Gehäuse vermessen. Diese strahlt bei ca. 1090MHz und 1482MHz ab, in Abhängigkeit von Temperatur und Bauteiltoleranzen kann die Abstrahlung zu einer Grenzwertüberschreitung führen. Für dieses Gerät wird daher aktuell ein Elektronikgehäuse aus Aluminium verwendet, das im Fräsverfahren hergestellt wird.



**Abbildung 7-18: Vermessung des Magnetventils mit geöffnetem Gehäusedeckel**

Abbildung 7-19 zeigt das Magnetventil mit E-box und metallischem Gehäuse. Das metallische Gehäuse ist mit einem speziellen Kupferklebeband zusätzlich abgedichtet.



**Abbildung 7-19: Magnetventil mit Aluminium-Gehäuse und mit Kupferklebeband abgedichtetem Spalt**

Die dargestellte E-box des Ventils wurde im Rahmen des Projektes als Demonstrator ausgewählt.

#### Task 3.1.1.3 Design

Basierend auf den Screeningversuchen der Konzeptphase wurden folgende Beschichtungen für weitere Versuche in der detaillierten Designphase ausgewählt:

- CuVA
- Zn-Lichtbogenspritzverfahren
- Cu-Ni-Cr Beschichtung

Die aufgeführten Beschichtungen zeigten in den Screeningversuchen alle gute Dämpfungseigenschaften für elektromagnetische Strahlung.

Für die weitere Bewertung der thermischen Beständigkeit der einzelnen Beschichtungen auf unterschiedlichen Kunststoffsubstraten durch Temperaturwechseltests wurden Spritzgussplatten aus den folgenden Kunststoffen hergestellt:

- PPS mit 40% Glasfaserverstärkung
- PEI
- PC/ABS
- PC mit 20% Glasfaserverstärkung
- PEEK mit 30% Carbonfaserverstärkung
- PEEK

Die aufgeführten Materialien sind für den Einsatz in Luftfahrtserienanwendungen grundsätzlich geeignet. Das betrachtete Spritzgussverfahren stellt ein wirtschaftliches Herstellverfahren für die Fertigung kleiner Gehäuseteile, wie das betrachtete Demonstratorgehäuse, dar.

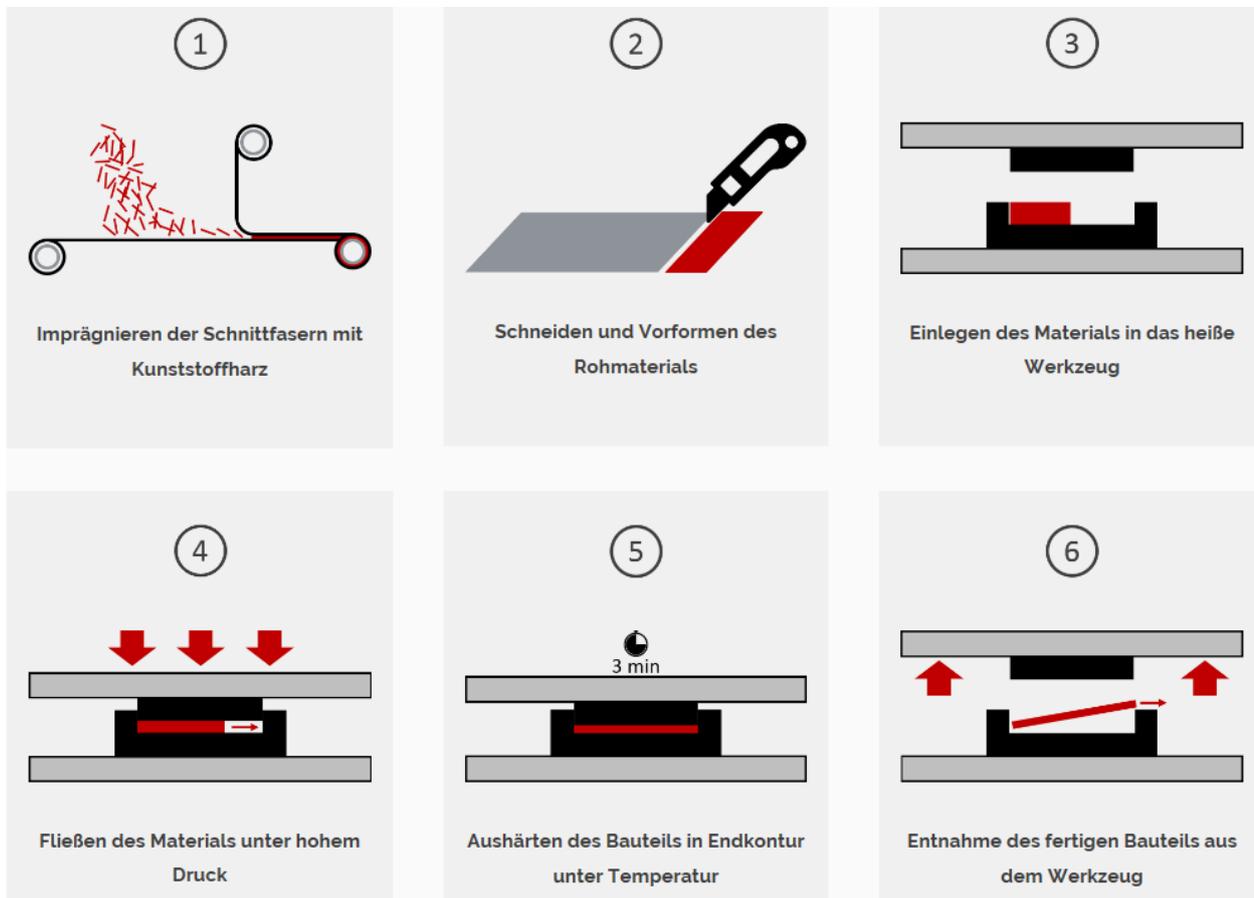
Um Einflüsse des Fertigungsverfahrens auf die Beständigkeit der Beschichtungen berücksichtigen zu können, wurde ein spezielles Spritzgusswerkzeug zur Herstellung der Prüfplatten konstruiert und beschafft.

11.12.2019	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH	- 33 -
------------	--	--------

Insbesondere die Oberflächenrauigkeit hat einen signifikanten Einfluss auf die Haltbarkeit der verschiedenen Beschichtungen. Um diesen Einfluss genauer zu untersuchen, wurden unterschiedliche Rauigkeiten für die Vorder- und Rückseite der Platten gewählt.

Neben den aufgeführten Spritzgussmaterialien wurden außerdem Platten aus verschiedenen Vakuumgussmaterialien hergestellt. Das Vakuumgussverfahren ist aufgrund deutlich geringerer Werkzeugkosten im Vergleich zum Spritzguss für Kleinserien und Prototypen geeignet.

Eine weitere Reihe Probenplatten wurde im Sheet Moulding Compound (SMC) Verfahren hergestellt. Bei diesem Verfahren handelt es sich um ein Heißfließpressen von duroplastischen Kunststoffen mit Faserverstärkung (vgl. Abbildung 7-20). Bei diesem Prozess können beispielsweise Folien direkt in den Fertigungsprozess integriert werden. Im Falle der betrachteten Probenplatten wurde das EMV-Metallvlies (vgl. Bericht 1. Halbjahr 2017) mittig in eine Probenplatte eingebracht. Die direkte Einbringung des EMV-Vlieses macht zusätzliche Beschichtungsprozesse obsolet und das EMV-Vlies ist im Vergleich zu einer Oberflächenbeschichtung vor mechanischer Beschädigung durch den Kunststoff geschützt. Eine Herausforderung bei dieser Methode stellt die elektrisch leitende Kontaktierung des metallischen Vlieses dar. Außerdem muss die Drapierbarkeit des Vlieses bei komplexen Gehäusegeometrien im SMC-Verfahren genauer betrachtet werden.



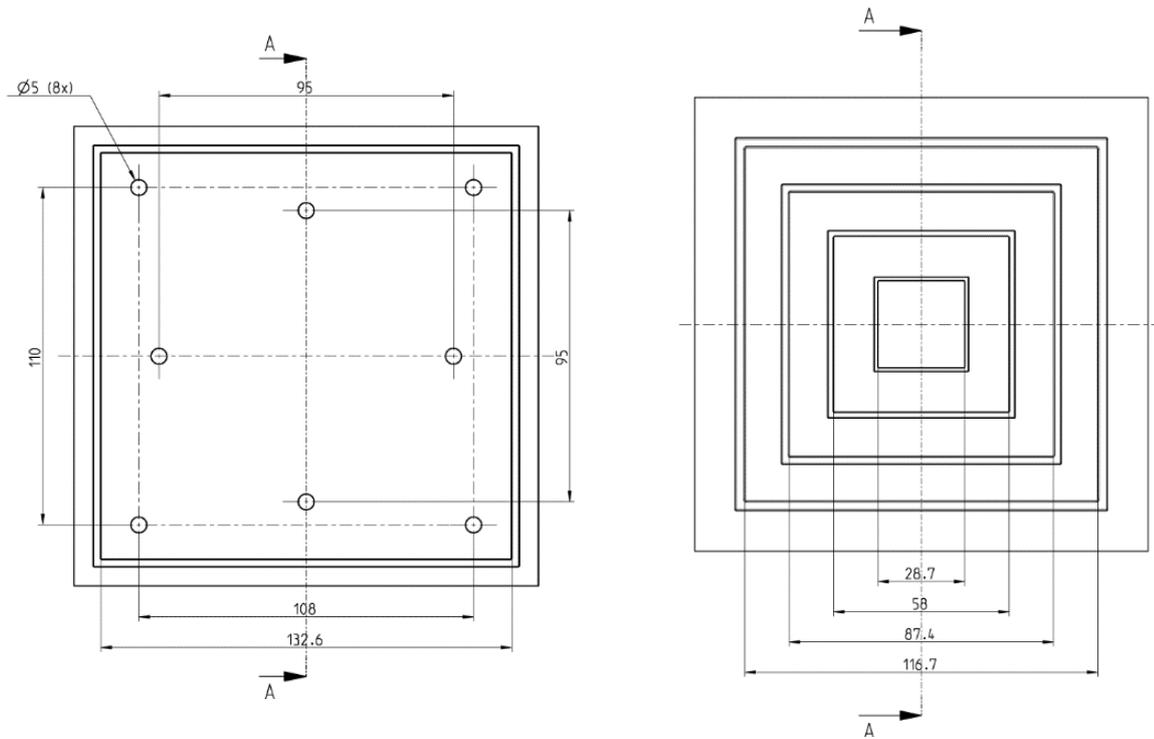
**Abbildung 7-20: Illustration der einzelnen Schritte des SMC Prozesses [1]**

Die hergestellten Rohplatten wurden zusätzlich mechanisch nachbearbeitet. In einer Variante der Platten werden vor der Beschichtung Bohrungen und eine umlaufende Nut für die spätere Montage auf der EMV-Prüfbox eingebracht.

11.12.2019	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH	- 34 -
------------	---	--------

Bei einer weiteren Plattenvariante wurden unterschiedliche Nutgeometrien realisiert, um die Beschichtbarkeit von Kanten und engen Geometrien bewerten zu können (Abbildung 7-21).

Für die Evaluierung der thermischen Beständigkeit durch Temperaturwechseltests, werden unbearbeitete Prüfplatten verwendet. Um den Einfluss der Substratraugigkeit zu untersuchen, wurden sowohl die raue als auch die glatte Oberfläche der Platten beschichtet.



a) Probeplatten für EMV Tests

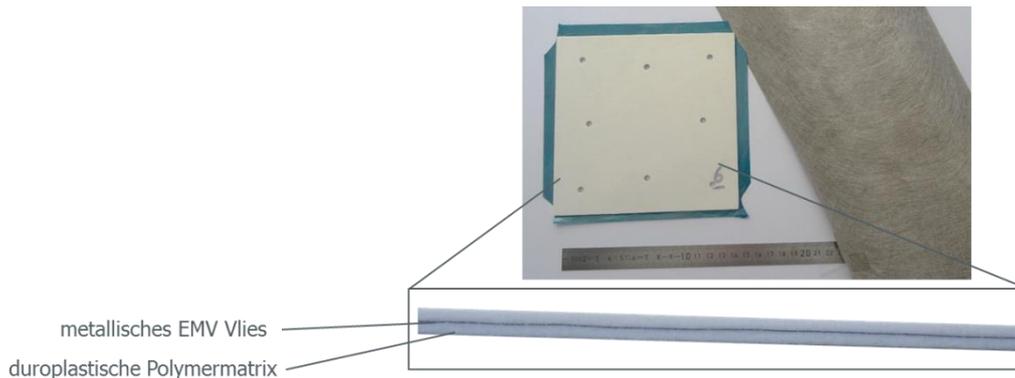
b) Probeplatten zur Untersuchung unterschiedlicher Nutgeometrien

**Abbildung 7-21: Mechanische Bearbeitung der Probeplatten**

Im Folgenden werden die detaillierten Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen dargestellt.

### SMC Bauteile mit integriertem metallischem Vlies

Das Konzept ein metallisches Vlies in eine SMC Platte einzubringen (vgl.: Abbildung 7-22) wurde nach der Durchführung der Fertigungsversuche verworfen. Zwar konnte das Konzept an Platten erfolgreich umgesetzt werden, allerdings ist die Darstellbarkeit von komplexen Geometrien mit engen Radien – wie es z.B. beim betrachteten Ventilgehäuse der Fall ist – fraglich.

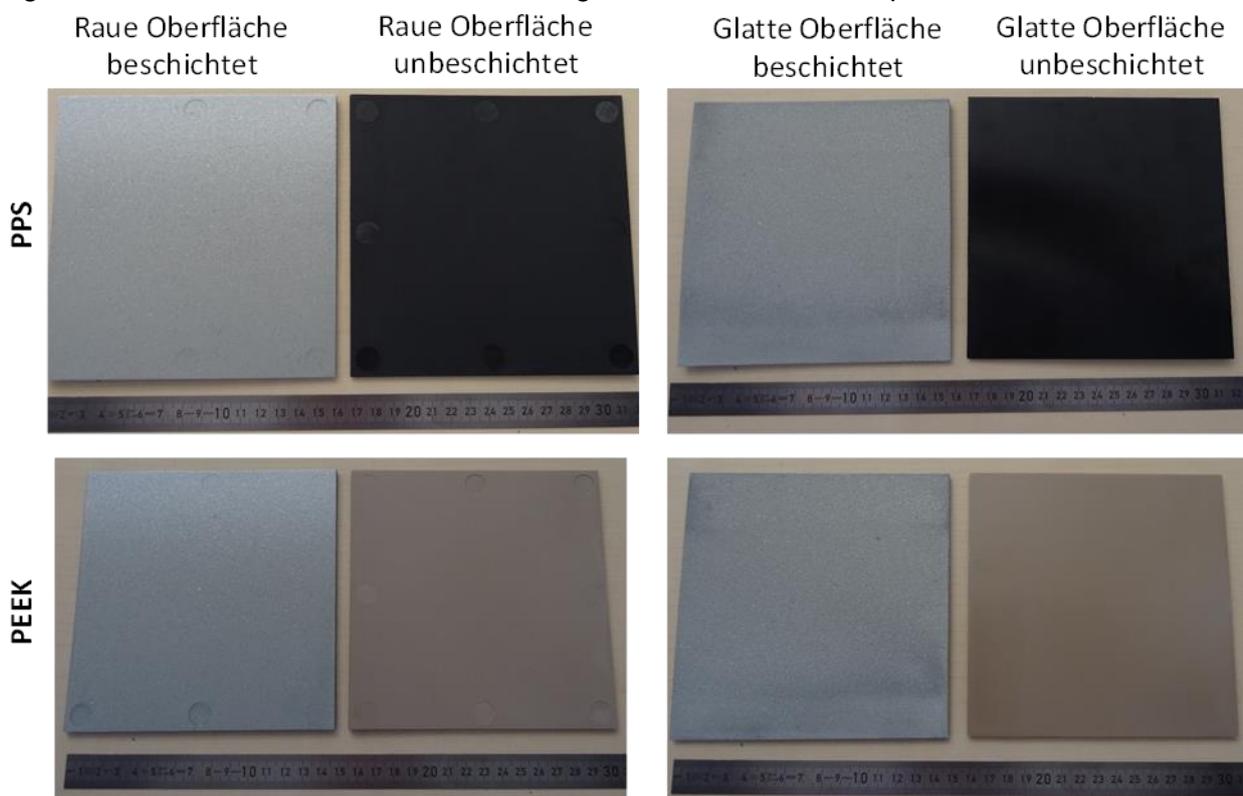


**Abbildung 7-22: Konzept zur Herstellung von SMC Bauteilen mit integriertem metallischem Vlies**

**Einfluss des Substratmaterials und der Oberflächenrauigkeit**

Um den Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Beschichtungsqualität zu bewerten, wurden Probeplatten mit unterschiedlicher Oberflächengüte/Rauheit auf Vorder- und Rückseite gefertigt. Die im Folgenden als „glatt“ bezeichnete Oberfläche weist einen Mittenrauwert  $Ra=0,14 \mu m$  und die „raue“ Oberfläche einen Mittenrauwert  $Ra=4,48 \mu m$  auf. Die raue Seite der Platten ist durch kreisrunde Abdrücke der Auswerferstifte des Spritzgusswerkzeugs gekennzeichnet.

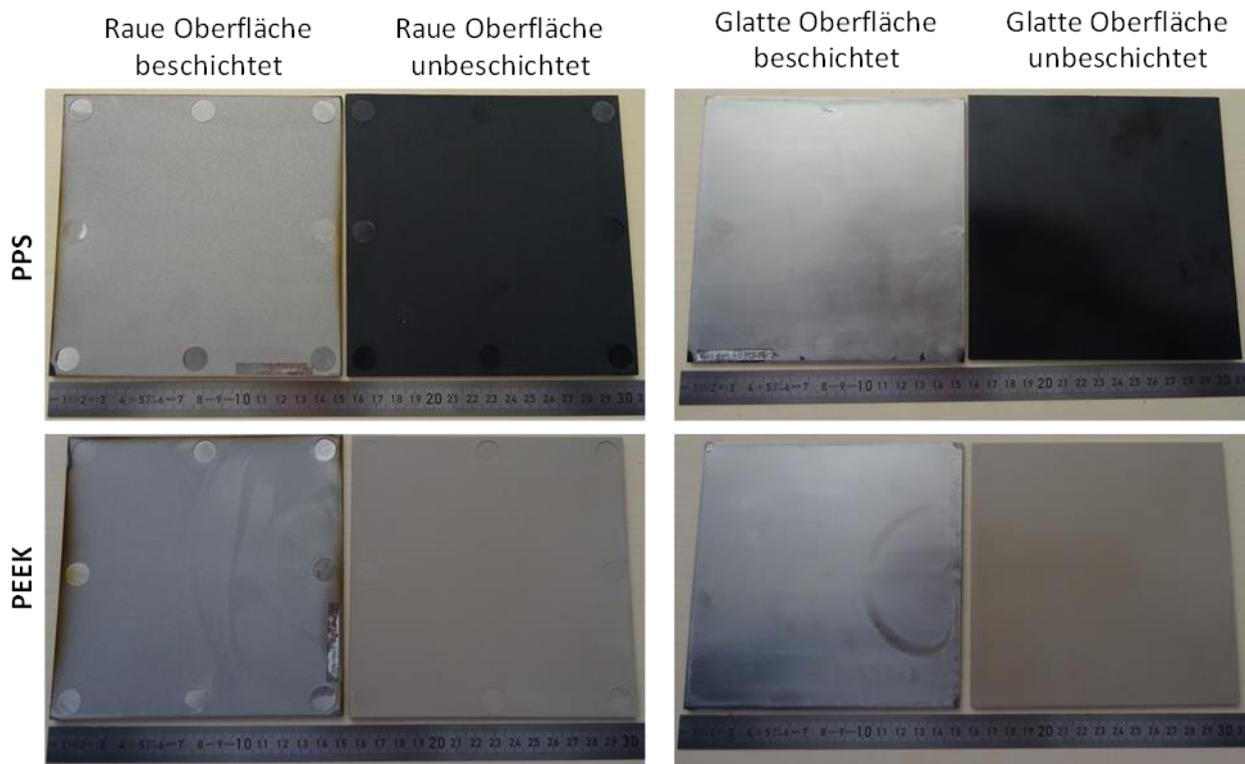
Abbildung 7-23 zeigt jeweils die raue und die glatte Plattenoberfläche vor und nach der Beschichtung mit Zn im Lichtbogenspritzverfahren exemplarisch für PPS- und PEEK- Substrate. Die dargestellten Ergebnisse sind auch für die weiter oben aufgeführten Kunststoffe repräsentativ.



**Abbildung 7-23: Probepplatten mit Zn-Beschichtung**

Die Zn-Beschichtung weist eine sehr raue Oberfläche mit einem Mittenrauwert  $Ra=9,46 \mu\text{m}$  (glatte Substratseite) bzw.  $Ra=12,10 \mu\text{m}$  (raue Substratseite) auf. Die Substratrauheit ist somit unerheblich für die effektive Rauheit der Oberfläche. Bei der optischen Bewertung der Beschichtungsqualität zeigten sich für dieses Verfahren weder Unterschiede aufgrund des Substratmaterials, auf das die Beschichtung appliziert wurde, noch aufgrund der Oberflächenrauheit. Auffällig ist die unterschiedlich starke Abdeckung der Auswerferabdrücke an verschiedenen Positionen auf der Platte. Dies lässt auf eine ungleichmäßige Schichtdickenverteilung schließen. Durch Dickenmessungen am Beispiel der PEEK-Platten konnte jedoch keine signifikante systematische Schwankung der Schichtdicken ermittelt werden.

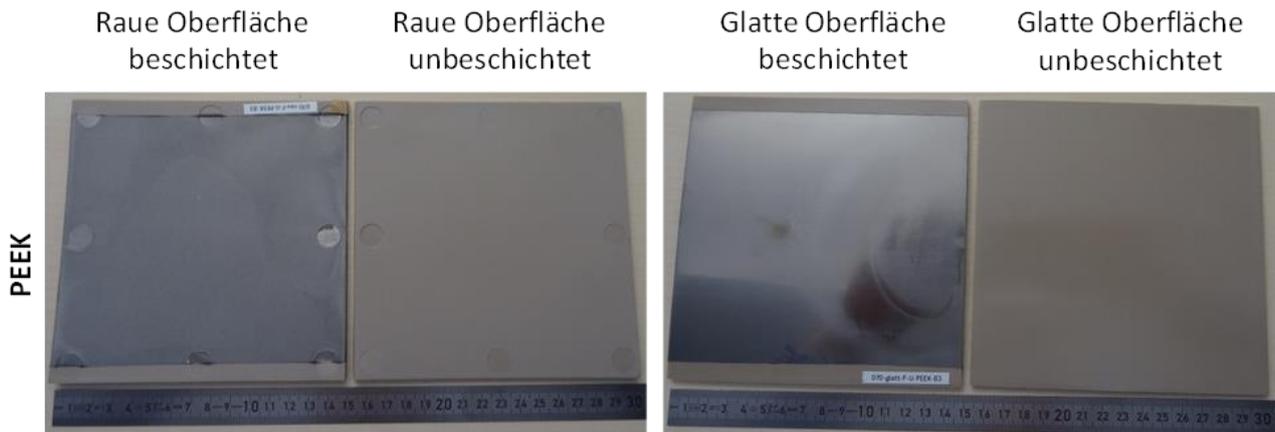
Abbildung 7-24 zeigt die Ergebnisse der CuVA-Beschichtung ebenfalls am Beispiel von PEEK- und PPS-Substraten. Ähnlich wie bei den Zn-Beschichtungen hatten weder der beschichtete Kunststoff noch die Oberflächenrauheit einen Einfluss auf die optische Beschichtungsqualität. Die Substratrauheit bildet sich im Falle der CuVA-Beschichtung in den beschichteten Oberflächen ab. Der Mittenrauwert der glatten Substratseite beträgt  $Ra=0,24 \mu\text{m}$ . Der Mittenrauwert der rauhen Seite liegt bei  $Ra=4,84 \mu\text{m}$  und liegt damit in der gleichen Größenordnung wie der Mittenrauwert des rauhen Substrats ohne Beschichtung.



**Abbildung 7-24: Probepplatten mit CuVA-Beschichtung**

Bei den rauhen Oberflächen zeigten sich leichte bräunliche Verfärbungen an den Kanten. Diese konnten auf der glatten Seite nicht beobachtet werden. Allerdings werden die bräunlichen Verfärbungen auf Randeffekte während des Beschichtungsprozess zurückgeführt und sind nicht repräsentativ für die jeweilige Oberflächengüte. Außerdem sind auf den verschiedenen Oberflächen leichte Schlieren zu erkennen. Diese stammen wahrscheinlich von der Reinigung der Oberflächen mit Isopropanol vor der Beschichtung. Ein ungleichmäßiges Abdampfen des Lösungsmittels kann ursächlich für solche Wischbilder sein. Die Schichtdicke war so dünn, dass sie aufgrund der Varianz in der Substratplattendicke nicht mit gewöhnlichen Messmitteln bestimmt werden konnte. Eine Abschätzung der Schichtdicke erfolgt im folgenden Abschnitt „Beschichtung von Platten mit Nuten“.

Die Ergebnisse des dritten Beschichtungsverfahrens mit Cu-NiCr sind exemplarisch für PEEK- Proben in Abbildung 7-25 dargestellt. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit den Ergebnissen der CuVA-Beschichtung. Die Qualität der Beschichtung ist bei allen Substratmaterialien und auch bei beiden Oberflächengüten vergleichbar. Die Struktur der Substratrauheit bildet sich wie bei der CuVA-Beschichtung ebenfalls in der beschichteten Oberfläche ab. Die glatte Substratseite besitzt nach der Beschichtung einen  $Ra=0,17 \mu m$  und die raue Substratseite einen  $Ra=4,04 \mu m$ . Auch Strukturen, die von der Oberflächenreinigung stammen, sind erkennbar. Eine Bestimmung der Schichtdicke mit herkömmlichen Messmitteln war ebenfalls nicht möglich. Eine Abschätzung erfolgt im folgenden Abschnitt „Beschichtung von Platten mit Nuten“.

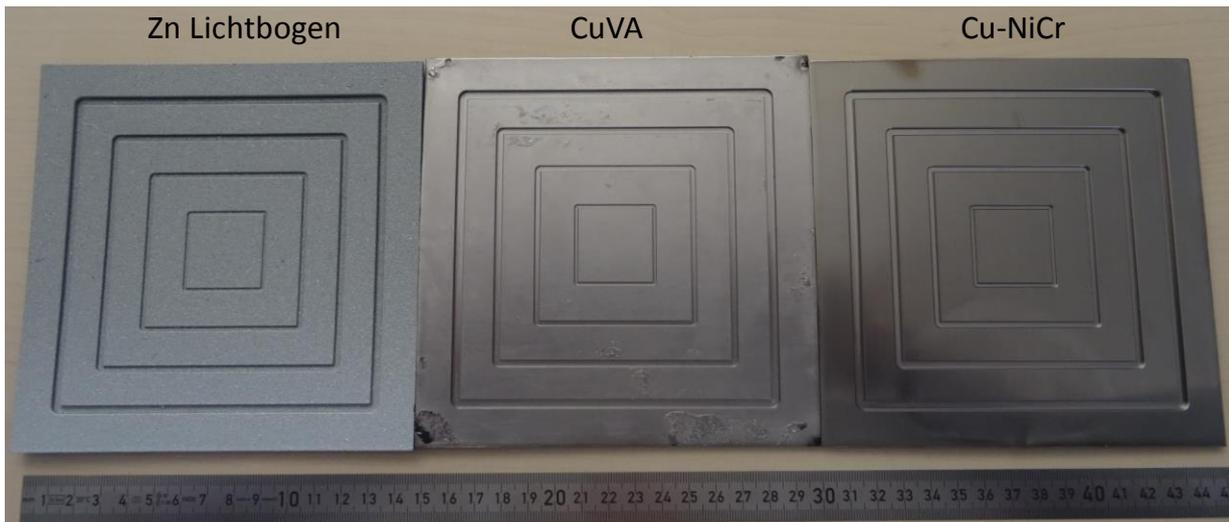


**Abbildung 7-25: Probepplatten mit Cu-NiCr-Beschichtung**

### Beschichtung von Platten mit Nuten

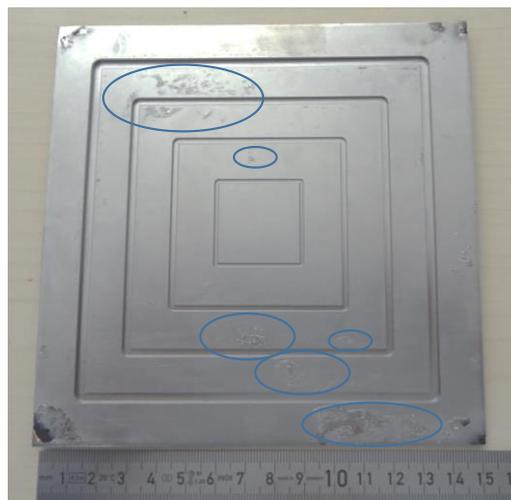
Zusätzlich zu den ebenen Probepplatten wurden Platten mit Nuten hergestellt. Die Nuten wurden durch mechanische Nachbearbeitung in die spritzgegossenen Platten eingebracht. Somit entspricht die Ist-Geometrie unbeschichteter Nuten sehr exakt der Soll-Geometrie aus der Zeichnung. Die verschiedenen Nuten besitzen unterschiedliche Nuttiefen und -breiten.

Ziel der Untersuchungen war, die Beschichtbarkeit enger Bauräume zu überprüfen und die Maßhaltigkeit der Nuten nach der Beschichtung zu quantifizieren. Nuten stellen hierfür eine relevante Beispielgeometrie dar. Die vollständige und gleichmäßige Beschichtung von Nuten ist für die Medien-dichtigkeit sowie die Sicherstellung der elektromagnetischen Abschirmwirkung von großer Bedeutung. Abbildung 7-26 zeigt Proben mit den drei unterschiedlichen Beschichtungen.



**Abbildung 7-26: Unterschiedliche Beschichtungen auf Probeplatten mit Nuten**

Die Beschichtungen mit Zn und Cu-NiCr zeigen ein sehr gleichmäßiges Bild. Lediglich die CuVA Beschichtung zeigt fleckige Bereiche (vgl.: Abbildung 7-27). Die fleckigen Materialanhäufungen sind ungleichmäßig verteilt und konnten auf den ebenen Probekörpern nicht beobachtet werden. Die sichtbaren Abplatzungen in den Ecken resultieren aus der provisorischen Einspannung während der Beschichtung und sind nicht repräsentativ für das Verfahren.



**Abbildung 7-27: Fleckige Materialanhäufungen bei CuVA beschichteten Proben**

Die optische Begutachtung ergab, dass bei allen drei Beschichtungsverfahren der Nutgrund und die Flanken – unabhängig von der Nuttiefe und -breite – vollständig beschichtet wurden.

Die beschichteten Nutgeometrien wurden zusätzlich vermessen. Daraus wurden für die Nuten mit einer Rohteilbreite von 3,3 mm bzw. 1,3 mm Schichtdicken berechnet:

Die Ergebnisse zeigen, dass die Schichtdicke bei schwer zugänglichen, engen Nuten tendenziell abnimmt. Des Weiteren kann aus den Ergebnissen abgeleitet werden, dass bei der Auslegung von Dichtungsnuten die Aufdickung durch das Zn-Lichtbogenspritzverfahren zu berücksichtigen ist, während die Aufdickung durch die beiden anderen Verfahren in der Regel vernachlässigbar ist.

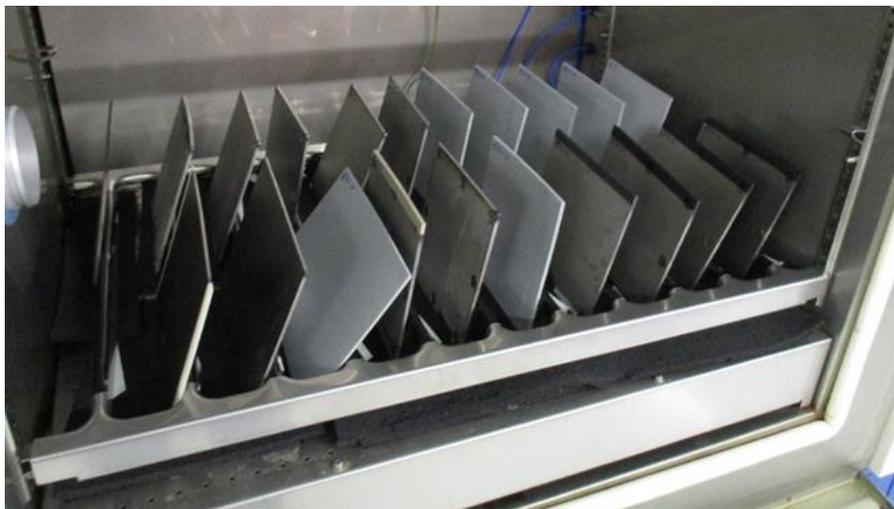
11.12.2019	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH	- 39 -
------------	--	--------

**Ergebnisse der Klimawechseltests**

Die Klimawechseltests wurden durchgeführt, um die Alterung sowie die Beständigkeit der Beschichtungen selbst und die Anbindung der Beschichtung zum Substrat unter dem Einfluss von hohen und niedrigen Temperaturen zu bewerten. Außerdem wurde der Einfluss erhöhter Luftfeuchtigkeit überprüft. Die Testbedingungen wurden in Anlehnung an MIL-STD-810 Rev. F ausgewählt. Die maximalen und minimalen Temperaturen schließen auch den Temperaturbereich der Ground Survival Anforderungen der RTCA DO-160G ein. Für die Temperaturwechseltests wurde folgender Prüfzyklus definiert:

1. Abkühlen der Prüfkammer auf -55°C; Kühlrate von 5K/min, kontrollierte Luftfeuchtigkeit
2. Haltezeit von 4 Stunden
3. Aufheizen der Prüfkammer auf 30°C, Erhöhung der Luftfeuchtigkeit auf mindestens 95%RH
4. Haltezeit von 30 min
5. Aufheizen der Prüfkammer auf 100°C, mindestens 95%RH Luftfeuchtigkeit
6. Haltezeit von 2 Stunden
7. Abkühlen der Prüfkammer auf Umgebungsbedingungen.

Abbildung 7-28 zeigt die Probeplatten und deren Lagerung im Klimaschrank vor Beginn der Tests.



**Abbildung 7-28: Probeplatten im Klimaschrank**

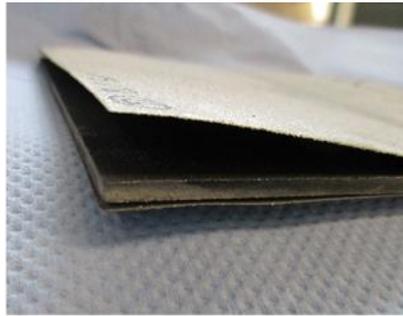
Die erste Inspektion der Proben erfolgte nach 12 Zyklen. Dabei zeigten sich insbesondere bei den ABS/PC- und reinen PC-Proben erste Schadensbilder, wie exemplarisch in Abbildung 7-29 dargestellt. Trotz einer Wärmebeständigkeit größer 100°C<sup>1</sup> gemäß Datenblatt des Polymerherstellers weist die ABS/PC Platte deutliche Verformungen auf. Die Verformungen führten zu einer Orangenhautbildung in der Beschichtung (Bsp.: Cu-NiCr). Außerdem bildeten sich lokal dunkle Flecken auf der Beschichtung und vereinzelt konnten Ablösungen beobachtet werden. Bei PC, das ebenfalls temperaturbeständig bis deutlich über 100°C<sup>2</sup> ist, konnten ebenfalls Schäden beobachtet werden. Die Zn-Beschichtung löste sich vollständig von der PC-Oberfläche. Dabei blieb die Schicht in sich stabil. Bei der CuVA Beschichtung auf PC-Platten kam es zur Bildung von Orangenhaut und lokalen Ablösungen.

<sup>1</sup> temperature of deflection under load 100°C [ISO 75-1,-2]; Vicat softening temperature 108°C [ISO 306]

<sup>2</sup> temperature of deflection under load 144°C[ISO 75-2/Be]; Vicat softening temperature 147°C [ISO 306/B50]



ABS/PC mit Cu-NiCr



PC mit Zn



PC mit CuVA

**Abbildung 7-29: PC- und PC/ABS- Proben nach 12 Zyklen des Klimawechseltests**

Vergleichbare Deformationen wurden bei den Platten aus den Hochleistungskunststoffen PEEK, PEI oder PPS nicht beobachtet.

Abbildung 7-30 zeigt exemplarisch PEEK- und PEI-Platten, die mit Cu-NiCr bzw. CuVA beschichtet wurden, nach 20 Temperaturzyklen. Die Cu-NiCr-Beschichtung auf den PEEK-Platten weist weder auf der glatten noch auf der rauhen Oberfläche mechanische Beschädigungen auf. Die Beschichtung zeigt typische bräunliche bzw. regenbogenfarbene Verfärbungen, die von Oxidationsprozessen stammen. Es kam zu keiner Ablösung der jeweiligen Beschichtung.

Die CuVA-Schicht auf den PEI-Platten zeigt ebenfalls bräunliche bis regenbogenfarbene Verfärbungen. Zusätzlich kam es zum lokalen Abblättern der Beschichtung auf der rauhen Plattenseite.

Die beobachtete Oxidation der Oberflächen ist problematisch in Bezug auf die Verschlechterung des elektrischen Kontaktwiderstandes. Die Auswirkungen auf die Kontaktierung mehrerer Gehäuseelemente muss genauer untersucht werden.

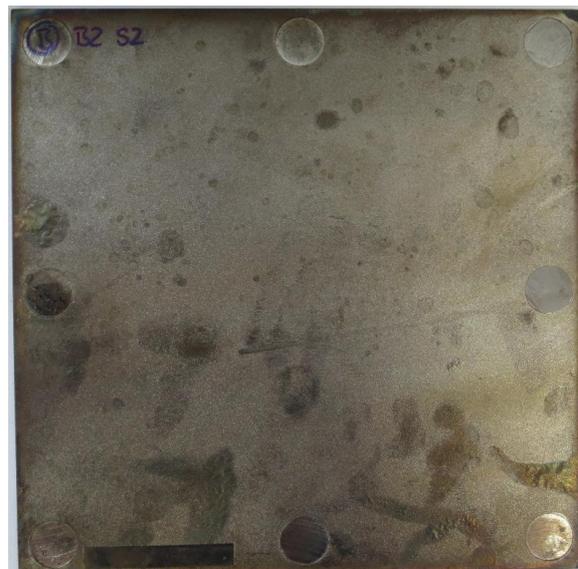
**Glatte Oberfläche**

**Raue Oberfläche**

PEEK/ Cu-NiCr



PEI/ CuVA



**Abbildung 7-30: Optische Inspektion der Beschichtungen nach 20 Zyklen**

Nach 40 Testzyklen konnte an wenigen Platten mit CuVA-Beschichtung Verfärbungen beobachtet werden. Besonders ausgeprägt trat dies bei den PX330 Platten auf (Abbildung 7-31). Als Grund für die starke Ausprägung wird die Bildung von Kondenswasser oder Wassertropfen an dieser Platte während der Prüfzyklen vermutet.



PX330/  
CuVa

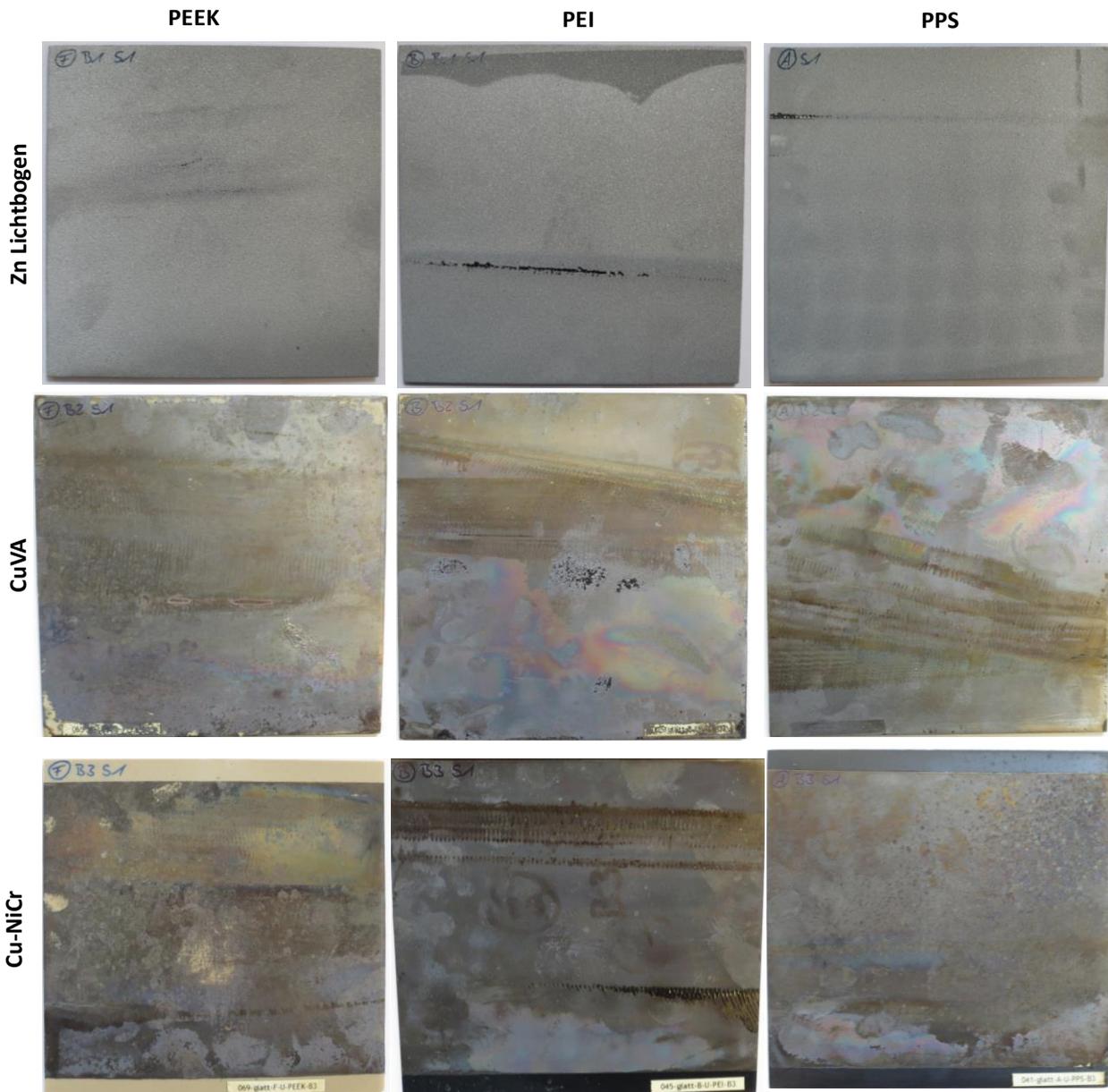
**Abbildung 7-31: Optische Inspektion der Beschichtung: Auffälligkeiten nach 40 Zyklen**

Abbildung 7-32 zeigt zusammenfassend die glatten Oberflächen der als am relevantesten eingeschätzten Probeplatten aus PEEK, PEI und PPS nach 40 Temperaturwechsel-Zyklen. Die Zn-Beschichtung hat sich auf den genannten Kunststoffsubstraten als robusteste der drei untersuchten Beschichtungen erwiesen. Es kam weder zu Verfärbungen durch Oxidation noch zu Ablösungen.

Die CuVA-Beschichtung löste sich an verschiedenen Stellen sowohl von den PEEK-Platten als auch von den PEI-Substraten. Außerdem wies die Beschichtung erste Anzeichen von Oxidation auf.

Auch die Cu-NiCr Beschichtung löste sich in einem Fall von der glatten Seite der PEEK-Probe ab. Auf den anderen Probeplatten – darunter eine zweite Platte mit PEEK-CF Substrat - erwies sich die Beschichtung jedoch als robust. Die sichtbaren Streifen auf der PEI Platte in Abbildung 7-32 stammen von der Kontaktstelle mit der Klimakameraaufnahme und stellen bei näherer Betrachtung keine Beschädigung dar.

Das Oxidationsverhalten und die damit verbundene Verfärbung der Cu-NiCr-Beschichtung ist ähnlich wie bei der CuVA-Beschichtung.



**Abbildung 7-32: Optische Inspektion der 3 untersuchten Beschichtungsverfahren auf PEEK, PEI und PPS Substraten nach 40 Zyklen im Klimawechseltest**

**Zusammenfassende Bewertung der Beschichtungsversuche und Klimawechseltests**

Alle drei untersuchten Beschichtungen konnten auf die verschiedenen Substrate aufgebracht werden. Sie besitzen bei Umgebungsbedingungen eine gute Anbindung an die ausgewählten Polymerplatten. Auch enge Konturen, wie Nuten mit Breiten zwischen 1,3 mm und 3,3 mm, wiesen eine gute Beschichtungsqualität auf.

Das Zn-Beschichtungsverfahren führte zu einer relativ rauen Oberfläche, während die CuVA und die Cu-NiCr-Beschichtung spiegelglatte Oberflächen ergaben. Die Auswirkungen auf z.B. Mediendichtigkeit an Dichtflächen ist noch zu bewerten.

11.12.2019	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH	- 44 -
------------	---	--------

Im Rahmen der Temperaturwechseltests bzw. Alterungsversuche erwies sich die Zn-Beschichtung am robustesten. Es wurden bei den relevanten Kunststoffen PEEK, PEI und PPS keinerlei Ablösungen beobachtet. Auch Oxidation trat bei keiner Probe auf.

Im Vergleich hierzu stellten sich die Cu-basierten Beschichtungen als anfällig gegenüber Oxidation heraus, die durch charakteristische Verfärbungen sichtbar wurde.

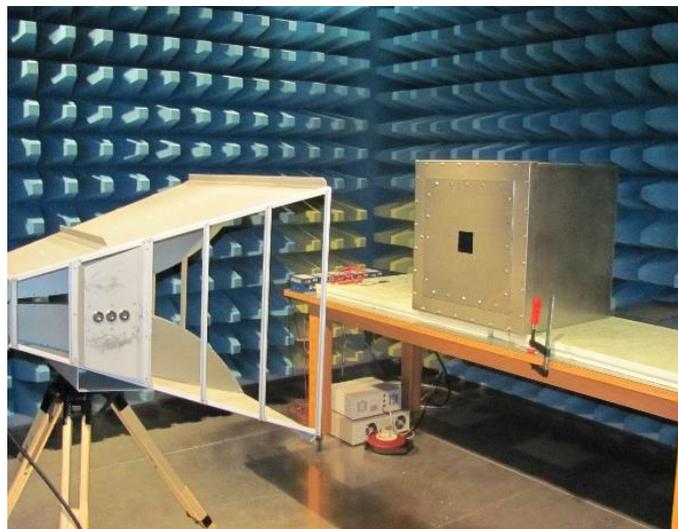
Die meisten und großflächigsten Ablösungen wurden bei Proben mit der CuVA-Beschichtung beobachtet.

Die Cu-NiCr-Beschichtung zeigte bei den meisten Proben eine gute Haftung und wird daher weiterhin betrachtet. Insbesondere da sie eine sehr wirtschaftliche Alternative zu der Zn-Beschichtung darstellt. In Richtpreisangeboten war der Preis für eine Beschichtung im Zn-Lichtbogenverfahren ca. zehnmal so hoch wie der Preis für einer Cu-NiCr-Beschichtung.

Auf Basis der Klimawechseltests wurde als favorisierte Materialkombination daher eine Cu-NiCr oder eine CuVA Beschichtung mit PEEK oder PEI als Substratmaterial ausgewählt. Die Zn-Beschichtung wird trotz der guten Ergebnisse im Klimawechseltest nicht weiter betrachtet. Ausschlaggebend hierfür waren der große Schichtdickenaufbau, die ungleichmäßige Schichtdicke sowie wirtschaftliche Aspekte.

**EMV Tests mit spritzgegossenen Proben**

Mit den beschichteten spritzgegossenen Kunststoffproben wurden EMV Tests durchgeführt. Für diese Tests wurde eine metallische Adapterplatte auf die bereits vorhandene Prüfbox aufgesetzt (siehe Abbildung 7-33). Nachteilig bei diesem Versuchsaufbau war jedoch der durch die kleine Öffnung der Prüfbox eingeschränkte messbare Frequenzbereich. Die Dämpfungseigenschaften konnten nur für Frequenzen größer 300 MHz verlässlich ausgewertet werden. Allerdings handelt es sich hierbei um einen für Ventilcontroller relevanten Frequenzbereich.



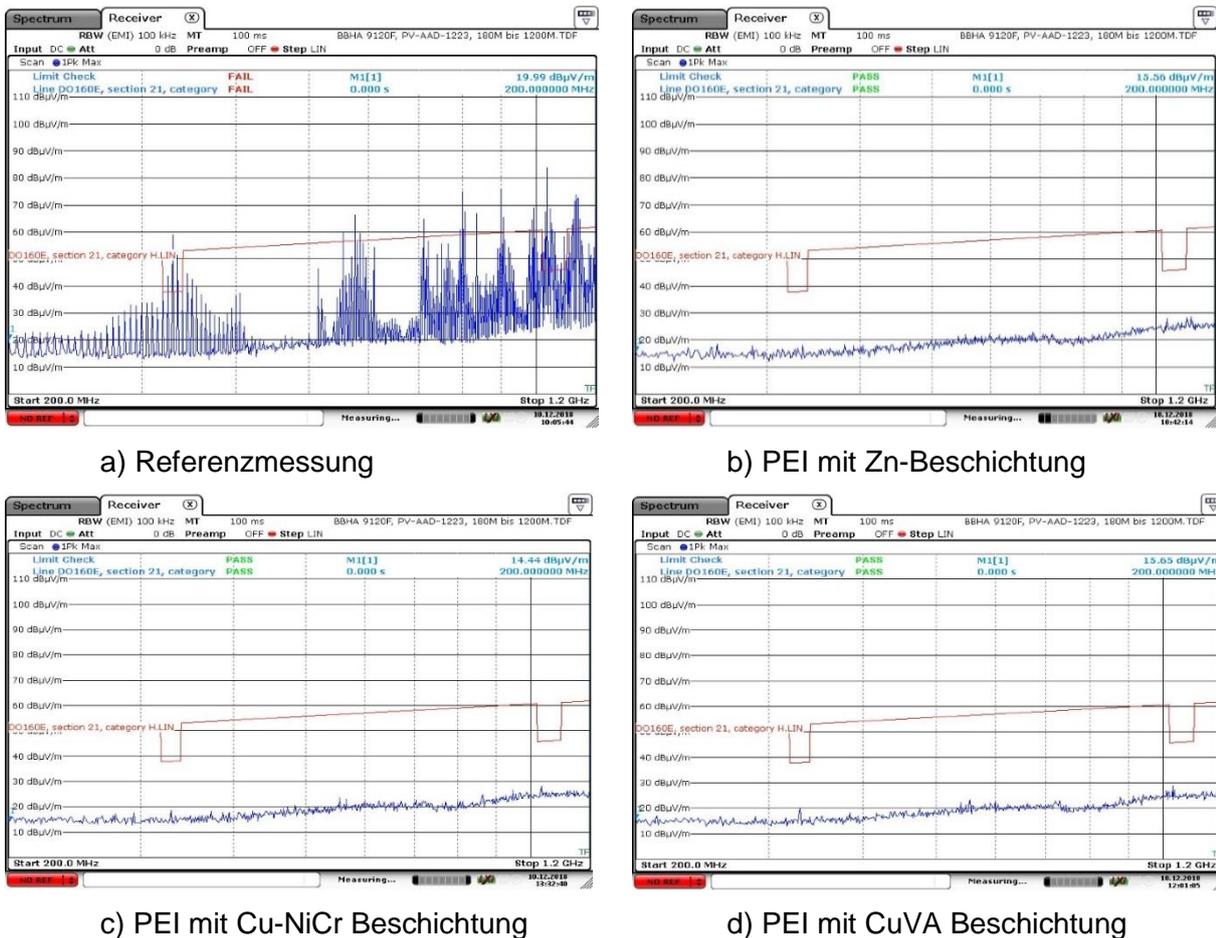
**Abbildung 7-33: Prüfaufbau mit kleinem Messfenster für Kunststoffproben**

Erwartungsgemäß konnte kein Einfluss der unterschiedlichen Kunststoffsubstrate auf die Abschirmungswirkung festgestellt werden. Auch die Dämpfungseigenschaften der drei untersuchten Beschichtungen waren im genannten Messbereich vergleichbar und anforderungsgerecht.

Abbildung 7-34 zeigt exemplarische Ergebnisse der durchgeführten EMV Messungen. In Bild a) ist die Referenzmessung in der Kammer ohne Probepalette dargestellt. Die Bilder b-d zeigen die Ergebnisse für die PEI-Platten mit den drei unterschiedlichen metallischen Beschichtungen.

11.12.2019	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH	- 45 -
------------	---	--------

Bei den Versuchen zeigte sich erneut, dass eine gute elektrische Kontaktierung zwischen verschiedenen abschirmenden Komponenten, d.h. im Versuchsaufbau zwischen Probenplatte und Prüfkammer, entscheidend für die Abschirmung ist. Diese Tatsache wird auch bei der Konstruktion der Kunststoffgehäuse von Bedeutung sein. Beispielsweise müssen die Gehäuseflanken ausreichend steif ausgeführt werden.



**Abbildung 7-34: EMV-Messungen an PEI-Proben mit verschiedenen Beschichtungen**

Die detaillierten Ergebnisse sind in dem Dokument „Report EMI Measurement Coated Plastics Samples“ zusammengefasst.

**Vermessung elektrisch leitfähiger Dichtungen**

Ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung eines Kunststoffgehäuses ist die Verbindung zwischen den beiden Gehäusehälften. Diese muss einerseits mediendicht sein, um die darin befindliche Elektronik vor Feuchtigkeit zu schützen. Andererseits muss sie elektrisch leitfähig sein, um einen möglichst geringen elektrischen Übergangswiderstand zwischen den Gehäusehälften zu erreichen. Dies ist zum einen aus EMV Sicht, aber auch aus Gründen der elektrischen Erdung des Gehäuses, erforderlich.

Um diese Anforderungen zu erfüllen wurden EMV Messungen mit speziellen leitfähigen Dichtungen durchgeführt. Unter den ausgewählten Materialien waren sowohl flächige Dichtungen als auch leitfähige O-Ringmaterialien. Beispielhafte Ausführungen sind in Abbildung 7-35. dargestellt.

11.12.2019	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH	- 46 -
------------	---	--------

Die elektrische Leitfähigkeit der O-Ringe wird entweder durch Additivierung mit metallischen Partikeln oder durch Umstricken mit einem Metalldraht erreicht. Bei letztgenannter Lösung muss die Mediendichtigkeit der Dichtung noch überprüft werden.



**Abbildung 7-35: Exemplarische Auswahl von Dichtungsmaterialien**

Um die Bewertung der Schirmungseigenschaften der Dichtungen nicht durch die Eigenschaften der beschichteten Kunststoffprobepplatten zu verfälschen, wurden die Dichtungen mit Stahlplatten (Abbildung 7-36) vermessen. Bei diesen ist von einer idealen Schirmungswirkung auszugehen.



**Abbildung 7-36: Metallische Prüfplatten zum Testen von EMV-Dichtungen**

Die Ergebnisse zeigten, dass alle untersuchten Dichtungen die geforderte Schirmungswirkung erreichen.

Die detaillierten Ergebnisse sind in dem Dokument „Report EMI Measurement Coated Plastics Samples“ zusammengefasst.

**Task 3.1.1.4 Musterbau**

In der Musterbauphase wurde zunächst ein neues Elektronikgehäuse für das ausgewählte Demonstratorgehäuse konstruiert, das die Besonderheiten des Spritzgussverfahrens berücksichtigt, um diese anschließend mit den favorisierten Materialien beschichten zu können.

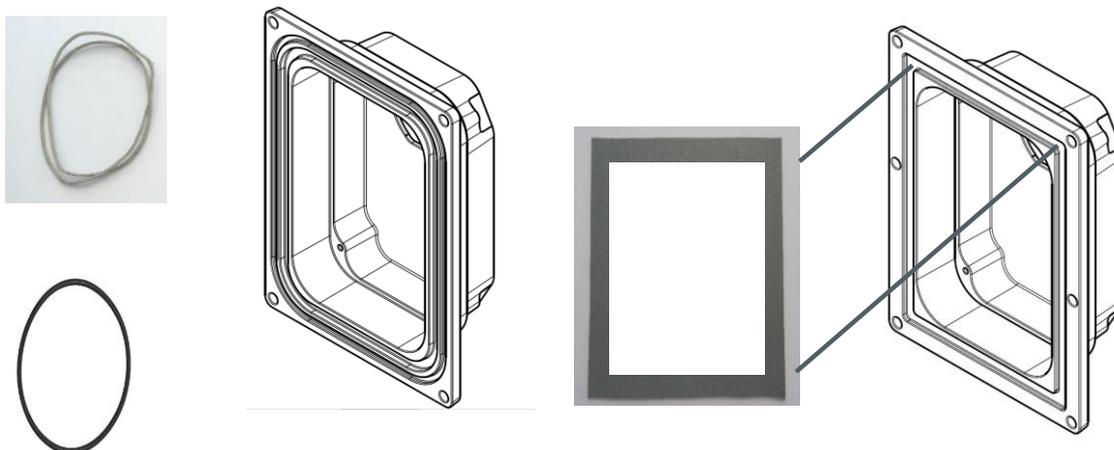
Abbildung 7-37 zeigt ein erstes Konstruktionsmuster, das im 3D-Druck gefertigt wurde. Um mit einem Spritzgusswerkzeug verschiedene Dichtungskonzepte erproben zu können (verschiedene O-Ringe und Flachdichtungen), wurden die Dichtflächen des Gehäuses möglichst breit ausgeführt. In diese konnten dann unterschiedliche Nuten durch mechanische Bearbeitung für Versuchszwecke eingebracht werden.



**Abbildung 7-37: Im 3D-Druck gefertigtes Konstruktionsmuster**

Nach der Bewertung des 3D gedruckten Konstruktionsmusters wurden die Dichtflächen des Gehäuses nochmals versteift, um eine ausreichende Verpressung der O-Ringe zu ermöglichen. Die Versteifung wurde durch Stege erzielt.

Abbildung 7-38 zeigt die beiden umgesetzten Dichtungskonzepte. Zum einen wurde ein Doppeldichtungskonzept betrachtet, bei dem eine klassische O-Ringdichtung mit einer speziellen leitfähigen EMV-Dichtung kombiniert wurde. Der O-Ring stellt dabei die Mediendichtigkeit sicher, die metallische Dichtung die EMV. Das zweite Konzept basierte auf einem additiviertem Silikon, aus dem eine Flachdichtung ausgeschnitten wurde.



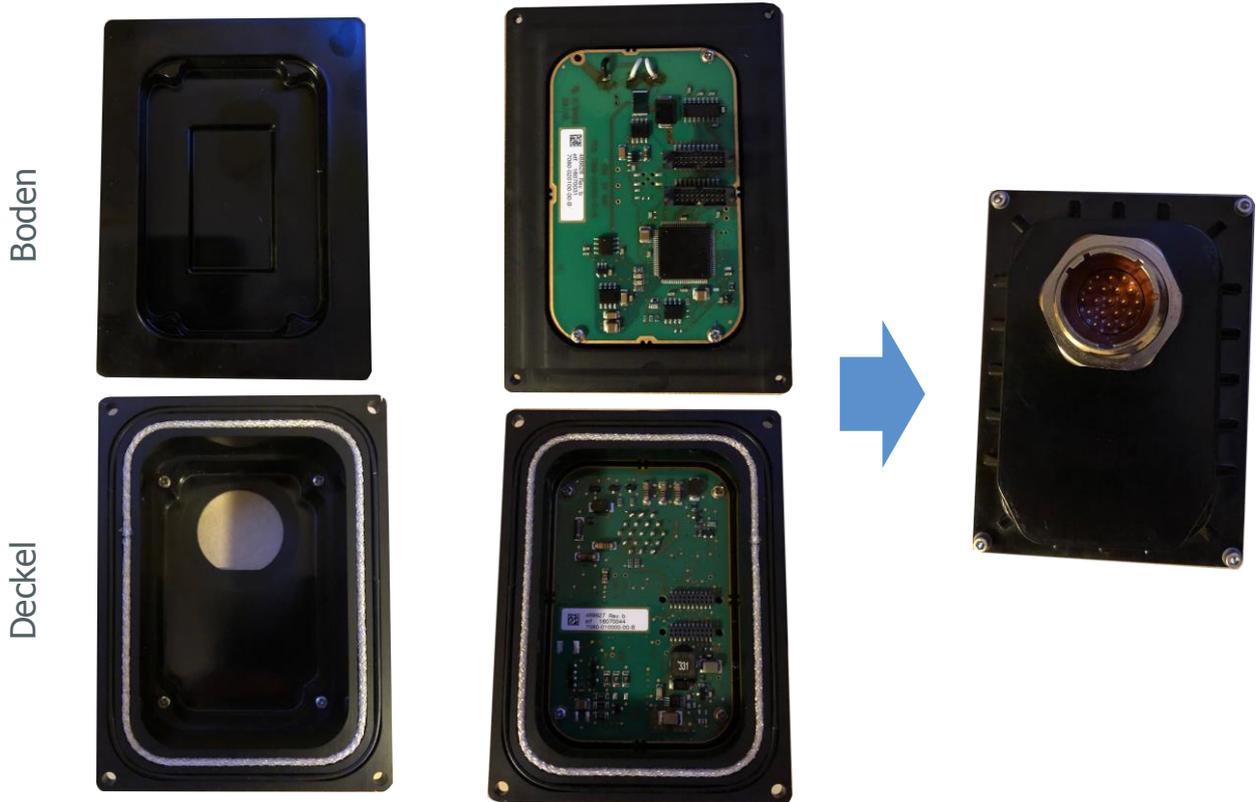
Doppeldichtung: Metallgeflecht O-Ring und klassischer O-Ring

Flachdichtung mit additiver Silikonmatte

**Abbildung 7-38: Umgesetzte Dichtungskonzepte**

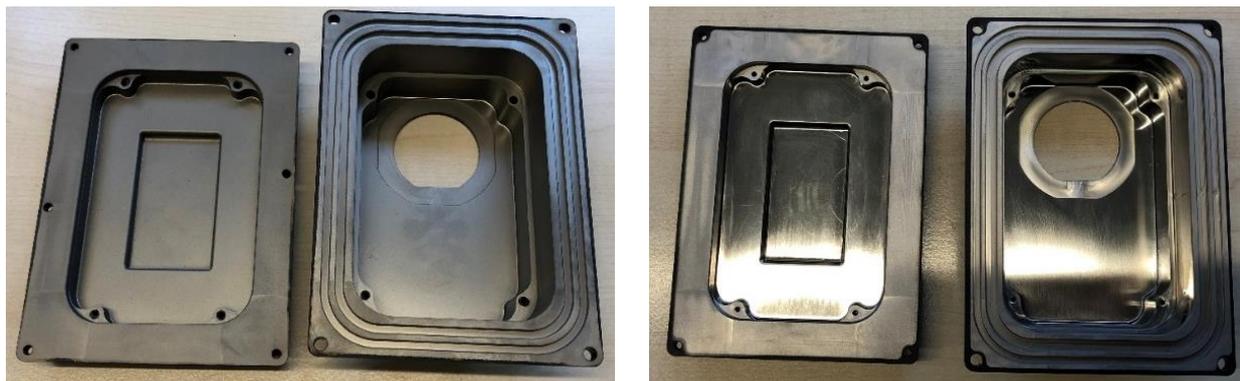
Die folgende Abbildung zeigt die spritzgegossenen Demonstratorgehäuse nach der mechanischen Bearbeitung und vor der Beschichtung. Die Gehäuse wurden aus schwarzem PEI gefertigt. Die Platinen passen in die gefertigten Gehäuse und es ist kein Verzug der Spritzguss Elemente erkennbar.

11.12.2019	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH	- 48 -
------------	---	--------



**Abbildung 7-39: Spritzgegossene Mustergehäuse**

Abbildung 7-40 zeigt die PEI-Gehäuse mit zwei unterschiedlichen Beschichtungen. Beide Beschichtungen wurden von den jeweiligen Dienstleistern gleichmäßig und vollständig auf den definierten Flächen der Mustergehäuse aufgebracht. Verformungen durch z.B. thermischen Einwirkungen waren nicht zu erkennen. Die Seitenflächen und die Außenseite der Gehäuse wurden sorgfältig mas-kiert, so dass keine metallischen Rückstände auf diesen sichtbar waren.



2 µm Cu 150 nm Ni-Cr Beschichtung

Cu-VA Beschichtung

**Abbildung 7-40: Beschichtete Gehäuse**

Task 3.1.1.5 Verifikation

In der Designphase wurde bereits ausführlich nachgewiesen, dass die ausgewählten Beschichtungen (Cu-Ni-Cr bzw. CuVA) in Bezug auf Abschirmwirkung und thermischer Beständigkeit grundsätzlich alle Anforderungen erfüllen. Der Schwerpunkt in der Verifikation lag nun auf der Überprüfung der Dichtigkeit der Gehäuse.

Hierzu wurden Mustergehäuse mit den unterschiedlichen Dichtungskonzepten für beide Beschichtungen aufgebaut. Für die Trennebene zwischen Gehäuseboden und Gehäusedeckel wurden zum einen additierte Flachdichtungen verwendet, als auch ein Doppeldichtungskonzept bestehend aus O-Ring und O-Ring mit Drahtgeflecht (vgl.: Designphase). Um den Versuchsaufwand zu begrenzen wurden keine Platinen in die Gehäuse eingesetzt, allerdings wurden die Originalstecker mit den Originaldichtungen verwendet. Um die Menge eindringender Feuchtigkeit zu quantifizieren, wurde Indikatorpapier verwendet. Die montierten Gehäuse wurden in eine Klimakammer gelegt und dem gleichen Temperatur- und Feuchtigkeitszyklus ausgesetzt, wie zuvor die Probeplatten (vgl.: Designphase). Abbildung 7-41 zeigt den Versuchsaufbau und die Mustergehäuse.



**Abbildung 7-41: Versuchsaufbau für Verifikation**

Abbildung 7-42 zeigt exemplarisch zwei geöffnete Mustergehäuse mit Cu-Ni-Cr Beschichtung nach dem Klimawechsel-Feuchtigkeitsstest. Durch die Cu-Anteile in der Beschichtung ist die Gehäuseinnenseite bräunlich verfärbt. Sowohl das Gehäuse mit Doppeldichtung als auch das Gehäuse mit Flachdichtung zeigt deutliche Flüssigkeitsansammlungen. Dieses Ergebnis ist repräsentativ für verschiedene, getestete Dichtungsausführungen (Materialien, O-Ring Durchmesser).

11.12.2019	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH	- 50 -
------------	---	--------

Details zu den Testergebnissen sind im Testbericht „Combined Temperature, Altitude and Humidity Test with E-box“ zusammengefasst.



Cu-Ni-Cr Beschichtung mit Doppeldichtung

Cu-Ni-Cr Beschichtung mit Flachdichtung

**Abbildung 7-42: Deutliches Eindringen von Feuchtigkeit bei Cu-Ni-Cr Beschichtung**

Abbildung 7-43 zeigt exemplarisch zwei geöffnete Mustergehäuse mit CuVA Beschichtung nach dem Klimawechsel-Feuchtigkeitstests. Es ist keine Veränderung durch Feuchte oder Temperatur erkennbar. Im Gegensatz zu der Cu-Ni-Cr Beschichtung ist bei beiden Dichtungskonzepten kein auskondensiertes Wasser sichtbar. Das Indikatorpapier hat bei verschiedenen Mustergehäusen jedoch eine maximal erreichte Luftfeuchtigkeit von mehr als 50% angezeigt. Dies ist jedoch auch bei konventionellen Aluminiumgehäusen der Fall.



CuVA Beschichtung mit Doppeldichtung

CuVA Beschichtung mit Flachdichtung

**Abbildung 7-43: Trockene Gehäusen mit CuVA Beschichtung**

Entgegen den Erwartungen hatten die unterschiedlichen Dichtungskonzepte keinen signifikanten Einfluss auf das Eindringen von Feuchtigkeit. Im Gegensatz dazu korrelierte die Dichtigkeit eindeutig mit dem Beschichtungsverfahren, welches bei den unterschiedlichen Gehäusen angewendet worden war. Die Gründe hierfür konnten nicht abschließend ermittelt werden. Es wird vermutet, dass die Oxidation der Cu-Ni-Cr-Beschichtung während des Klimatests die Porosität im Material bzw. an der Grenzfläche zur Dichtung erhöht hat.

11.12.2019	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH	- 51 -
------------	--	--------

## 7.4 Technologiebewertung

### Additive Fertigung

Die technologische Machbarkeit konnte während dem Vorhaben für fast alle ausgewählten Bauteile nachgewiesen werden. Eine Umstellung der Bauteile zeigte sich jedoch an vielen Stellen schwierig.

- Drainage Bogen: Die Reduktion der Einzelteile wurde erreicht und die technologische Machbarkeit wurde bewiesen. Leider ist mit aktuellen Fertigungspreisen eine Reduktion der Stückkosten nicht gegeben. Ebenso kann bisher das Teil nicht Gewichtsneutral erstellt werden.
- Laufrad (Impeller): Die Umstellung des Bauteils auf Kunststoff ist gelungen und der verschleißfreie Betrieb kann realisiert werden. Durch die vorhandene Gewichtsreduktion wird die Trägheitskraft auf das Bauteil weiter reduziert. Die raue Oberfläche aus dem SLS Prozess führte jedoch zu einer erhöhten Aufheizung der Struktur. Wird diese durch evtl. Nachbehandlungen optimiert, ist für dieses Bauteil der Einsatz der SLS-Technologie zu empfehlen.
- Zyklon: Dieses Bauteil ist bereits relativ früh als ungeeignet eingestuft worden. Die hohen Prozesskosten und die hohe Oberflächenrauigkeit führen zu wirtschaftlichen wie auch technologischen Einbußen.
- Lüfter-Axiallaufrad: Die Notwendigkeit von diversen Stützstrukturen führte relativ schnell zum Ausschluss des Bauteils. Eine Entstützung wäre technologisch als auch wirtschaftlich nicht vertretbar.
- Lüfter-Radiallaufrad: Der verschleißfreie Betrieb konnte nachgewiesen werden. Auch hier ergeben sich durch die erhöhten Oberflächen-Rauigkeitswerte Probleme mit der thermischen Aufheizung. Auch dies sollte mit einer entsprechender Nachbehandlung zu einem produktiven Einsatz der additiven Fertigung führen.

Die umgesetzten Bauteile zeigen, dass die additive Fertigung bei Flugzeugsystemen durchaus zur Anwendung gebracht werden kann, jedoch muss eine detaillierte Einzelteil-Betrachtung durchgeführt werden.

### Kunststoff Elektronikgehäuse

Basierend auf den durchgeführten Verifikationstests sowie den verschiedenen Untersuchungen im Rahmen der Designphase wurde eine abschließende Bewertung der unterschiedlichen Beschichtungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7-2 zusammengefasst.

Die Zn-Beschichtung hat sich als ungeeignet erwiesen, da der Schichtdickenaufbau sehr ungleichmäßig war. Bei komplexen Geometrien kam es außerdem zu Fehlstellen, was in Hinblick auf die elektromagnetische Abschirmwirkung nicht akzeptabel ist. Im Vergleich zu den anderen Beschichtungsverfahren war das Zn-Lichtbogenspritzverfahren außerdem das mit Abstand teuerste.

Die beiden anderen näher untersuchten Beschichtungen auf Basis von CuVA bzw. Cu Ni-Cr zeigten eine ähnlich gute Performance in Bezug auf Oberflächenqualität und Schichtdickenhomogenität. Bei den Untersuchungen auf Probenplatten war die Cu Ni-Cr Beschichtung etwas robuster als die CuVA Beschichtung.

11.12.2019	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH	- 52 -
------------	--	--------

Bei den abschließenden Klimawechseltests mit Mustergehäusen stellte sich die CuVA Beschichtung als überlegen heraus. Insbesondere der massive Eintrag von Wasser während der Umwelttests bei den Gehäusen mit Cu Ni-Cr Beschichtung erwies sich als problematisch.

	Zn-Lichtbogen-spritzverfahren	CuVA	Cu - NiCr
Verträglichkeit mit unterschiedlichen Substraten	++	++	++
Homogenität Schichtdicke	--	++	++
Oberflächenqualität	++	++	++
Beständigkeit Klimawechseltest	+	+	o
EM Schirmung	+	+	+
Dichtigkeit beschichteter Gehäuse	?	+	--
Kosten	--	+	++

sehr gut: ++ gut: + befriedigend: o eher unzureichend: - unzureichend: -- nicht untersucht: ?

**Tabelle 7-2: Zusammenfassende Bewertung der Beschichtungen**

In Bezug auf eine mögliche Herstellkosteneinsparung ist mit beschichteten Kunststoffgehäusen eine Einsparung von 20-30% gegenüber konventionellen Aluminiumgehäusen möglich. Die exakte Höhe der realisierbaren Einsparungen ist deutlich von den zu realisierenden Stückzahlen abhängig.

Das Gewicht konnte beim reinen Gehäuse um 15% reduziert werden. Durch ein schweres Dichtungskonzept wird dieser Gewichtsvorteil jedoch größtenteils wieder aufgebraucht. Für größere Gehäuse kann sich jedoch ein relevanter Gewichtsvorteil ergeben.

## 7.5 Liste der erstellten Dokumente

- “Equipment Supplier Specification for Polymeric Electronic Box”
- “Report EMI Measurement Coated Plastics Samples”
- „Combined Temperature, Altitude and Humidity Test with E-box“

## 7.6 Verwendete Literatur

Im Vorhaben wurden nachfolgend aufgeführte Dokumente und Regularien verwendet:

- |      |  |             |
|------|--|-------------|
| [L1] | European Aviation Safety Agency (EASA)<br>“Certification Specifications and Acceptable Means<br>of Compliance for Large Aeroplanes”<br>Amendment 15, 21 July 2014      | CS-25       |
| [L2] | Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA)<br>“Environmental Conditions and Test Procedures for<br>Airborne Equipment”<br>Version G, Change 1, 16 December 2014 | RTCA/DO-160 |
| [L3] | Department of Defense test Method Standard<br>“ <i>Environmental Engineering Considerations and Laboratory</i> ”<br>Revision F, Notice 3, 5 May 2003                   | MIL-STD-810 |

## Weitere Quellen

- [1] Blackwave Composites GmbH, <http://blackwave.de/de/technologie/>
- [2] N.N. „Product Presentation Introduction of Celanese CoolPolymers Thermal Conductive Polymers (TPC)“, Jan. 2015

## **8 VORAUSSICHTLICHE VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE**

### **8.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Während der Durchführung des Projekts sind Kosten angefallen für

- Personal
- Material
- Dienstleitungen
- Reisekosten

Die Personalkosten haben den Großteil der Gesamtkosten ausmacht. Der Verwendungsnachweis enthält eine detaillierte Aufstellung der Projektkosten. Die Kosten sind in Artikel 6.2 Einsatz Personal, Material, Fremdleistung kurz erläutert.

### **8.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die Diehl Aviation Gilching GmbH ist Weltmarktführer auf dem Gebiet von Wasser-/Abwassersystemen und wichtiger Lieferant von Lüftern in der Luftfahrtindustrie. Es ist daher von grundlegender strategischer Bedeutung, diese Positionen am Weltmarkt zu halten und auszubauen, dazu zählt auch die kontinuierliche Bereitstellung von Innovationen. Auf dem System-Level erfordert dies allerdings eine ganze Reihe unterschiedlicher, technischer Disziplinen auf sehr hohem Niveau, um innovative Lösungen hervorzubringen. Die Gewichts- und Kostenreduktionen bei Komponenten sind der entscheidende Wettbewerbsvorteil. Schlüsseltechnologien hierfür sind der Einsatz von Kunststoffen an Stelle von Metall und Additive Herstellverfahren. Das Vorhaben war eine wichtige Maßnahme um diese Anforderungen zu erfüllen. Der Einsatz von Polymer-Elektronikgehäusen mit EMV Schutz führt zu direkten Kosten- und Gewichtseinsparungen. Der industrielle 3D-Druck hat das Potential zur Funktionsintegration bei geringem Gewicht, allerdings sind noch weitere Kostensenkungen erforderlich.

Mit der Förderung wurde daher das für Forschungsthemen verfügbare Budget signifikant erhöht und somit konnte die parallele Bearbeitung der geplanten Teilprojekte in der notwendigen Tiefe geleistet werden.

In Anbetracht der erzielten Ergebnisse war die Förderung eine angemessene Anschubhilfe, um die risikobehaftete, disruptiven Lösungsansätze zu untersuchen, sowie neue Fertigungsprozesse zur Anwendung zu bringen.

### **8.3 Voraussichtlicher Nutzen und Verwendbarkeit der Ergebnisse (im Sinne des Verwertungsplans)**

Nachdem das Vorhaben vielversprechende Ergebnisse hervorbrachte, bieten sich sehr gute Verwertungsperspektiven und wirtschaftliche Erfolgsaussichten.

Das im Vorhaben erarbeitete Konzept für Polymer-Elektronikgehäuse mit EMV Schutz soll künftig in zahlreichen Geräten wie Pumpe, Vakuumpgenerator, Lüfter, Klimageräte, etc. eingesetzt werden. Auf Basis dieser Technologien können neue oder umkonstruierte Geräte- und Systemkomponenten gewichtsbasiert in nachfolgenden, kundenspezifischen Entwicklungen ca. bis zum Jahre 2023 marktreif gemacht werden.

Die Verwertung der Polymer-Elektronikgehäuse ist sowohl in zukünftigen Passagierflugzeugen als auch durch die Nachrüstung bestehender Flotten vorgesehen. Als einer der wichtigsten Lieferanten von Wasser-/Abwassersystemen und Klimasystemkomponenten sehen wir auch im Rahmen der laufenden Airbus-Kostenreduzierungsprogramme gute Verwertungschancen.

11.12.2019	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH	- 55 -
------------	--	--------

Der industrielle 3D-Druck hat das Potential zur Funktionsintegration bei geringem Gewicht insbesondere für Produkte der Diehl Aviation Gilching, allerdings sind noch weitere Kostensenkungen für unsere Anwendungen erforderlich. Es konnte im Projekt gezeigt werden, dass die Fertigung der Diehl Aviation Gilching GmbH Bauteile Additiv möglich ist, allerdings sind zurzeit die Kosten der additiven Fertigung in Kombination mit den erforderlichen Nacharbeiten nicht wirtschaftlich. Die Arbeiten zur Kostensenkung des 3D-Drucks durch Optimierung und Funktionsintegration werden im Lufo VI-1 Verbund EFFEKT fortgeführt.

**9 WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG BEKANNT GEWORDENER FORTSCHRITT BEI ANDEREN STELLEN**

Dem Zuwendungsempfänger sind keine Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens „Polymer-Elektronikgehäuse“ bei anderen Stellen bekannt geworden. Der industrielle 3D-Druck als neue Technologie hat sich während des Projektes kontinuierlich weiterentwickelt. Daher wurde mit zwei technologisch führenden Druckeranbietern zusammengearbeitet, um einen kontinuierlichen Wissenstransfer zu generieren.

**10 GEPLANTE ODER ERFOLGTE VERÖFFENTLICHUNGEN UND VORTRÄGE**

Während der Projektlaufzeit gab es keine Veröffentlichung der Vorhabenergebnisse.

11.12.2019	Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20K1513B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. © Diehl Aviation Gilching GmbH	- 56 -
------------	--	--------