

„GENERATIVE FERTIGUNGSVERFAHREN FÜR DIE HERSTELLUNG VON KLEINSTSERIEN IN DER FLUGZEUGKABINE“

Vortragender

Dipl. Ing. (FH) M. Klingseis

Research & Technology
markus.klingseis@diehl-aircabin.de

Tel: +49 (73 92) 703 12 52
 Fax: +49 (73 92) 703 7 12 52
 Diehl Aircabin GmbH
 Am Flugplatz
 88471 Laupheim

Co-Autor

Dr. D. Völkle

Research & Technology
dietmar.voelkle@diehl-aircabin.de

Tel: +49 (73 92) 703 86 20
 Fax: +49 (73 92) 703 7 86 20
 Diehl Aircabin GmbH
 Am Flugplatz
 88471 Laupheim

Co-Autor

Dipl. Ing. (FH) A. Pfetscher

Research & Technology
andre.pfetscher@diehl-aircabin.de

Tel: +49 (73 92) 703 81 70
 Fax: +49 (73 92) 703 7 81 70
 Diehl Aircabin GmbH
 Am Flugplatz
 88471 Laupheim

Zusammenfassung

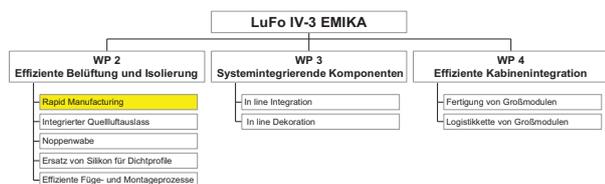
Im Rahmen des laufenden öffentlich geförderten Projektes LuFo IV 3rd Call EMIKA wurden generative Fertigungsverfahren für die Herstellung von fliegenden Serienbauteilen in der Flugzeugkabine untersucht. Die bekannten Verfahren und Materialien wurden hinsichtlich Bauteilqualität, Reproduzierbarkeit, Prozessüberwachung, Brandverhalten, mechanischen Eigenschaften usw. verglichen und optimiert. Der Fokus lag hierbei auf der Qualifizierbarkeit von Material und Prozess hinsichtlich des Einsatzes in kommerziell genutzten Flugzeugkabinen. Die Herausforderungen ergeben sich hierbei wesentlich aus den geltenden Brandanforderungen für Kabinenbauteile, insbesondere Wärmefreisetzung, sowie der Erkennung von Fehlern bzw. Unregelmäßigkeiten während des generativen Aufbaus der Teile, da auf eine 100% Prüfung der fertigen Teile verzichtet werden soll.

Ziel des Projektes ist es ein kostengünstiges Herstellverfahren zu entwickeln und zu qualifizieren das für Kleinstserien in der Flugzeugkabine eingesetzt werden kann.

1. PROJEKTÜBERSICHT

Die Fa. Diehl Aircabin GmbH untersucht im öffentlich geförderten Projekt LuFo IV 3rd Call EMIKA „Effiziente, Modulare und Integrierte Kabinentechnologie“ das Teilprojekt Rapid Manufacturing. Durch die Beauftragung des DMRC „Direct Manufacturing Research Center“, dass an die Universität Paderborn angegliedert ist, werden aktuelle Verfahren bezüglich den Luftfahrtanforderungen untersucht und weiterentwickelt.

Die Kompetenzen am DMRC sollen helfen die Stärken und Schwächen der Verfahren zu erkennen und gegebenenfalls zu optimieren. Teilweise muss mit den Herstellern direkt ein neuer Werkstoff entwickelt werden, bevor er am DMRC angewendet werden kann.



2. AUSGEWÄHLTE RM-VERFAHREN, MATERIALIEN UND BAUTEILE

2.1. Verfahren

Da die Auswahl der Rapid Prototyping Verfahren am Markt sehr groß ist, ist es für Diehl Aircabin wichtig zu Beginn die vielversprechendsten Verfahren zu untersuchen. Aus diesem Grund ist das DMRC ein wichtiger Partner der neutral die Verfahren bewerten kann. Da nur wenige Materialien die hohen Anforderungen in der Flugzeugkabine erfüllen, sind auch nur wenige RPT Verfahren geeignet. In dem beschriebenen Projekt werden folgende Verfahren untersucht:

Fused Deposition Modelling (FDM)

Laser Sintering (LS)

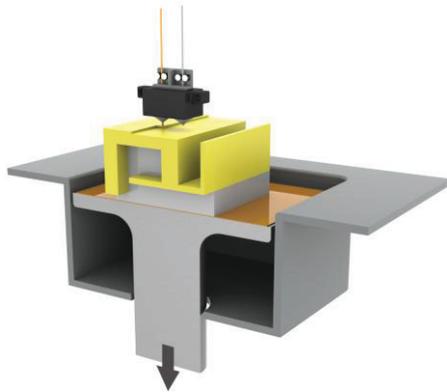


BILD1. FDM Verfahren, Quelle DMRC

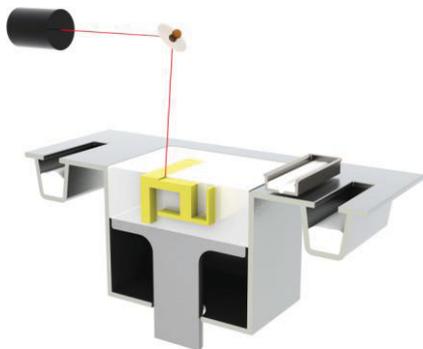


BILD2. LS Verfahren, Quelle DMRC

2.2. Material

Für das FDM Verfahren stehen zwei Materialien zur Auswahl. Zum einen ein PPSU und zum anderen ein PEI. Die ersten mechanischen Prüfungen haben ergeben, dass das PPSU dem PEI unterlegen ist. Um die weiteren Aufwände im Projekt zu minimieren wurden die weiteren Untersuchungen mit nur einem Material durchgeführt.

Für das Laser Sinterverfahren entwickelt die Fa. EOS ein hinsichtlich Brandeigenschaften optimiertes Material mit dem einige Tests im weiteren Verlauf durchgeführt wurden. Desweiteren wird ein Material getestet mit optimierten mechanischen Eigenschaften, da die Temperaturanforderungen in der Kabine für Thermoplaste als kritisch anzusehen sind.

Folgende Materialien werden näher untersucht:

ULTEM 9085 (FDM)

PA2241 FR (LS)

PA2241 MB25 FR (LS)

2.3. Materialscreening

Um die einzelnen Materialien verifizieren zu können, müssen die relevanten Materialeigenschaften abgeprüft werden. Zu diesen Eigenschaften gehören die Brandwerte sowie die mechanischen Kennwerte der Kunststoffe in Abhängigkeit von den Herstellverfahren. Die Brandscreenings werden beim DLR in einem zertifizierten Labor durchgeführt. Die Ermittlung der Werkstofffestigkeit wird intern bei Diehl Aircabin sowie auch extern am DMRC durchgeführt. Bauteilspezifische Prüfungen werden zu einem späteren Zeitpunkt durchlaufen.

2.3.1. Zugversuche

Die Proben für die Zugprüfung werden nach der DIN EN ISO 527-1 erstellt. Die Prüftemperatur wurde mit 30°C und 40°C festgelegt, um die Prüfaufwände so gering wie möglich zu halten, aber dennoch eine wesentliche Erkenntnis über die Festigkeit des Werkstoffs zu bekommen. Desweiteren müssen die Festigkeiten in Abhängigkeit der Baurichtung betrachtet werden, da diese bei den additiven Fertigungsverfahren einen nicht ganz unerheblichen Einfluss hat.



BILD3. Vorrichtung für die Zugprüfung bei Diehl Aircabin

2.3.1.1. PEI

Die Polyetherimid Proben werden mit dem FDM Verfahren der Fa. Stratasys hergestellt. Es werden jeweils 6 Proben in X, Y und Z Richtung gebaut. Der Sonderfall der 45° Lage der Proben wurde ebenfalls in zwei Richtungen betrachtet. Wichtig für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist die Festlegung der Bauparameter des Fertigungsverfahrens. Die Baurichtungen sind für beide Verfahren gleich definiert und sehen wie folgt aus.

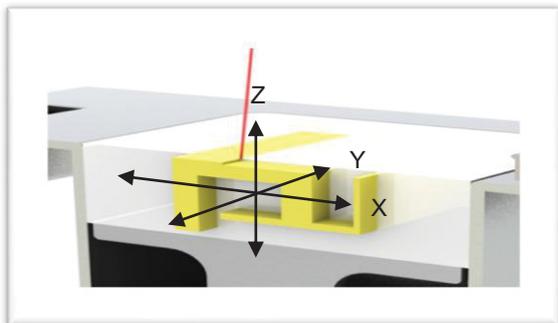


BILD4. Bauraumrichtungen LS und FDM

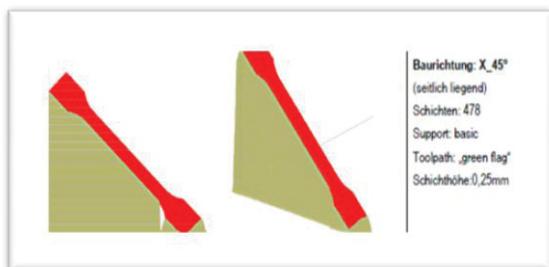


BILD5. Lage der Zugprobe bei der Herstellung „seitlich stehend“

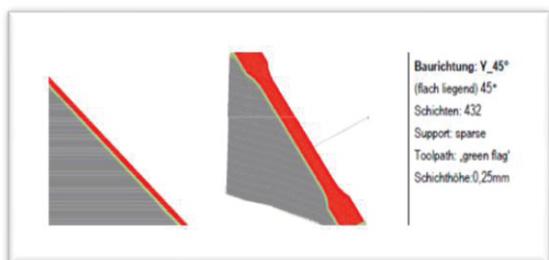


BILD6. Lage der Zugprobe bei der Herstellung „seitlich liegend“



BILD7. Bruchbild Zugprobe PEI „seitlich stehend“

2.3.2. Brandscreening

Die Brandanforderungen werden nach der von Airbus geforderten Norm ABD0031 getestet. Wegen der in der Flugzeugkabine geltenden strengen Brandanforderungen müssen die dafür vorgesehenen Werkstoffe diese Tests separat wie auch im Bauteilverbund bestehen. Ein Beispiel ist die Seitenverkleidung. Hier muss jedes einzelne Material qualifiziert werden. Zusätzlich muss der

Gesamtaufbau der Seitenwand mit Dekorfolie aber die gleichen Grenzwerte erfüllen. Das bedeutet, dass einzelne Materialien deutlich unter diesen Werten liegen müssen.

Durchgeführter Test	1) Anforderungen für Interiorbauteile	2) Anforderungen für Bauteile, die nicht unter 1) fallen	Bemerkung
	(z. Bsp. Seitenwände, PSU Kanäle, TTR-Bauteile)	(z. Bsp. Isolierpakete, Stoffe, Klimarohre, Thermoplaste = durchsichtig)	
	F1 ABD0031	F2 ABD0031	
Burn length [mm]	152	203	
After flame time [s]	15	15	
After flame time of drips [s]	3	5	
	HR / HRR ABD0031		
HRR max [kW / m²]	65		
HR [kW*min / m²]	65		
	SD ABD0031	SD ABD0031	
Flaming mode			
Dm* within 4 min	150 / 200*	200	* Bauteile, die nicht lackiert bzw. mit Folie appliziert sind
	Tox ABD0031	Tox ABD0031	
Flaming mode			
HCN / CO / NOx	150 / 1000 / 100	150 / 1000 / 100	
SO ₂ / HF / HCL	100 / 100 / 150	100 / 100 / 150	

TAB1. Brandanforderungen

3. AUSGEWÄHLTE BAUTEILE

Die Ausgewählten Bauteile stammen alle aus dem Klimabereich, da die für die Flugzeugkabine geltenden Brandanforderungen nur von wenigen Thermoplasten erfüllt werden. Diese Thermoplaste können derzeit nur bedingt mit den ausgewählten Verfahren verarbeitet werden. Bei den nachfolgend dargestellten Bauteilen handelt es sich daher um Bauteile aus dem Klimabereich.

3.1. Halter A

Das hier aufgeführte Bauteil ist in der Serie aus Aluminium gefertigt. Gefordert sind Festigkeiten für eine Belastung in Y und Z von 200N und in X (Flugrichtung) von 100N sowie eine hohe Medienbeständigkeit z.B. gegen Skydrol. Die Gewichte der Halter mit dem neuen Werkstoff dürfen nicht höher liegen als die der Standard Bauteile. Die CAD Daten werden als STL File dem DMRC zu Verfügung gestellt. Die verschiedenen Varianten werden im Kapitel „Statiktest“ dargestellt.



BILD8. Halter A aus Aluminium mit Masse 100g

3.2. Halter B

Der Aufbau dieses Aluminium Halters mit FDM wurde aufgrund der Geometrie nicht näher untersucht. Fehlende Ansätze erschweren die konstruktive Überarbeitung des Halters zwecks Bauraumbestimmungen, die für FDM nötig sind.



BILD9. Halter B aus Aluminium

3.3. Halter C

Dieser Aluminium Halter wurde umgestaltet, so dass die neue Geometrie für FDM geeignet ist. Die Gestaltänderung wird genauer im Kapitel „Statiktest“ betrachtet. Die Anforderungen für Halter A (eine Belastung in Y und Z von 200N und in X (Flugrichtung) von 100N) gelten auch für Halter C.



BILD10. Halter C aus Aluminium mit Masse 48g

3.4. Temperatursensorgehäuse

Das originale Temperatursensorgehäuse wird aus PEI (ULTEM 1010) im Spritzgussverfahren hergestellt. Dieses Bauteil wird hinter der Kabinenverkleidung montiert, um die Luft aus der Kabine an den Temperatursensor vorbei zu leiten. Eine genaue Messung der Kabinentemperatur ist für die Steuerung der Klimatisierung erforderlich. Dabei muss das Temperatursensorgehäuse zusätzlich isoliert werden. Beim ursprünglichen Temperatursensorgehäuse aus Spritzguss wurde nachträglich ein Schaum um das Gehäuse geklebt. Beim neu konstruierten FDM-Teil wird die Isolationsfunktion durch eine doppelwandige Konstruktion realisiert. Als weitere Anforderungen wurden eine deutliche Gewichtsreduktion und eine Festigkeit bei einer Belastung von 45 N an 6 kritischen Stellen festgelegt. Diese wird im Statiktest geprüft.



BILD11. Temperatursensorgehäuse aus Spritzguss mit Masse 67g

4. BAUTEILANFORDERUNGEN FESTIGKEIT

4.1. Halter

Die Testparameter werden nach Rücksprache mit Statikern festgelegt. Halter A und C müssen einer Belastung von 200 N in Y und Z bzw. von 100 N in X (Flugrichtung) für mindestens 3 s standhalten.

4.2. Temperatursensorgehäuse

Das Temperatursensorgehäuse muss einer Belastung von 45 N an 6 kritischen Stellen für mindestens 3 s standhalten. An Bauteilmontage- und Sensoreinbaustellen müssen geeignete Befestigungsarten gewählt werden. Bezugnehmend auf Norm ABS 1021 3A85, die die Insert-Verbindung im originalen Spritzgussgehäuse beschreibt, muss die Auszugskraft mindestens 2600 N betragen. Für verschiedene Befestigungsarten wird die Gewindefestigkeit an der Montagestelle durch Zugprüfungen untersucht. Die Schraubenverbindung an den Sensoreinbaustellen muss die Spezifikation 80-T-34-3016 erfüllen, die ein minimal erforderliches Losbrechmoment von 0,09Nm spezifiziert. Die maximal zulässige Leckage für die untersuchten Bauteile beträgt 3l/min pro m². Als Referenzwert dient die Leckagerate des originalen Spritzgusstemperatursensorgehäuses.

5. BAUTEILTESTS

5.1. Halter A

Im Vergleich zum originalen Halter aus Aluminium wurde beim mit dem FDM-Verfahren hergestellten Halter eine Fachwerkstruktur zur Kraftleitung realisiert. Die Konstruktion des Halters wurde optimiert um die geforderte Festigkeit bei einer gleichzeitigen Reduktion des Gewichts zu realisieren. 3 Varianten des mit FDM hergestellten Halter A aus ULTEM 9085 (PEI) wurden im Statiktest untersucht.



TAB2. Varianten Halter A aus ULTEM 9085

5.1.1. Statiktest

Kritisch sind insbesondere die Anschraubpunkte, die eine Schwachstelle bei einer Belastung in X-Richtung aufweisen. Die Spannungen bündeln sich bei der Beanspruchung in den Anschraubpunkten bis das Bauteil versagt.

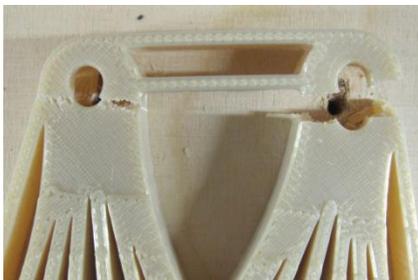
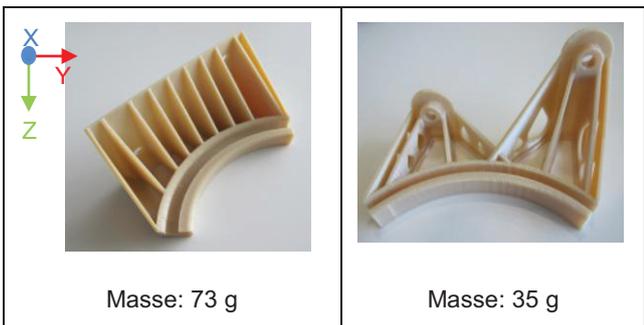


BILD12. Versagen Halter A an Anschraubpunkten

5.2. Halter C

Das Prinzip der Stege wie in der Konstruktion des Halters A wurde hier weiter verfolgt, um das Gewicht zu minimieren. Die Materialverteilung in der leichteren Variante des Halters C entspricht dem Spannungsbild bei Belastung (organisches Design). Dadurch werden die Verschraubungspunkte verstärkt und gleichzeitig eine Gewichtsreduzierung erzielt.



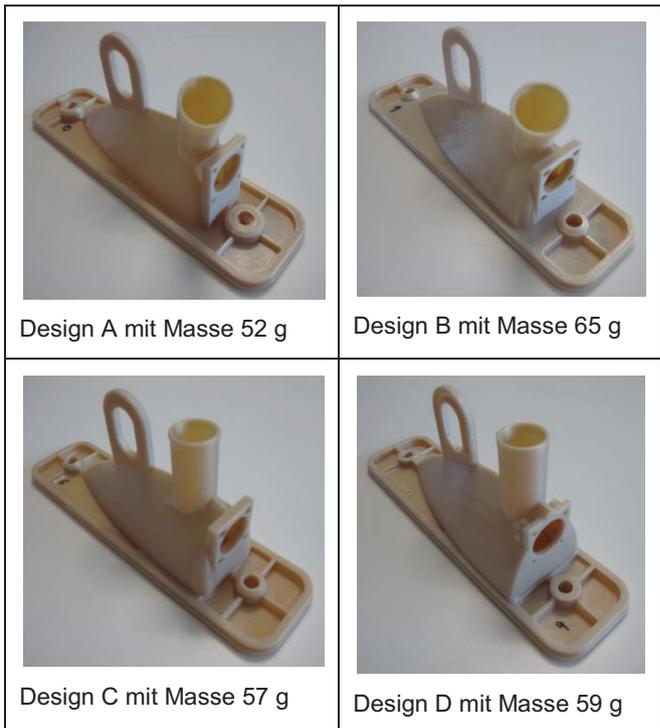
TAB3. Varianten des Halters C aus ULTEM 9085

5.2.1. Statiktest

2 Varianten des Halters C aus ULTEM 9085 werden mit FDM hergestellt. Beim Statiktest zeigen beide Halter unter den vorgeschriebenen Beanspruchungen ausreichende Festigkeit.

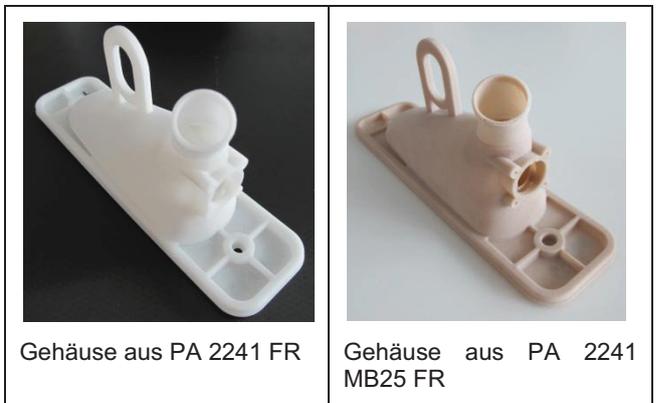
5.3. Temperatursensorgehäuse

Beim Temperatursensorgehäuse wurden verschiedene Varianten mit FDM und LS hergestellt. Die Konstruktion des Gehäuses wurde für das jeweilige Verfahren prozessgerecht modifiziert und optimiert. Das bedeutet, dass bei der Herstellung der FDM-Bauteile möglichst wenig Stützmaterial verwendet wird und bei der Herstellung der LS-Bauteile die Pulverentfernung nach dem Bau möglich ist. In jeder Entwicklungsphase der Konstruktion wurde das Gehäuse schrittweise an verschiedenen Teilfunktionen wie Anbindungsstellen, Luften- und -auslass angepasst. Fehlstellen wurden erkannt und behoben.



TAB4. Varianten des mit FDM hergestellten Temperatursensorgehäuses aus ULTEM 9085

Die Firma EOS GmbH bietet die Möglichkeit, LS Bauteile mit flammhemmendem Polyamid herzustellen, das verbesserte Brandeigenschaften besitzt und gleichzeitig für das Laser Sinterverfahren einsetzbar ist.



TAB5. Varianten des mit LS hergestellten Temperatursensorgehäuses

5.4. Gewindefestigkeit

Für die Verbindungen an der Montagestelle des Gehäuses wurden drei Varianten untersucht und die zugehörige Gewindefestigkeit ermittelt. An ULTEM 9085 Platten wurden die Verbindungselemente in den dafür vorgesehenen Aussparungen eingebaut. Beim Test wurde eine Schraube senkrecht im Verbindungselement befestigt, die Platte auf dem Prüfmaschinentisch eingespannt und die Gewindeauszugskraft ermittelt. Alle Befestigungsvarianten liefern größere Werte als die geforderte Mindestauszugskraft von 2600 N.



BILD13. Prüfaufbau des Gewindefestigkeitstest

5.4.1. Geschnittenes Gewinde

Das Gewinde wurde nach dem Bau in die Kunststoffaussparungen mittels Gewindeschneideinsatz eingeschnitten. Beim anschließenden Test weist diese Befestigungsart eine hohe Festigkeit auf und ist den anderen Befestigungsarten überlegen.



BILD14. Geschnittenes Gewinde in ULTEM 9085 Platte

5.4.2. V-Coil

Gewindeeinsätze, sogenannte „V-Coils“, wurden zur Verstärkung in die Aussparungen eingeschraubt. Allerdings zeigen die Testergebnisse entgegen den Erwartungen niedrigere Auszugskräfte als das geschnittene Gewinde.



BILD15. Gewindeeinsatz „V-Coil“ in ULTEM 9085 Platte

5.4.3. Insert

Bei der Herstellung des originalen Spritzgusstempersensorgehäuses wurde der Kunststoff um den Insert gespritzt. Der Einbau des Inserts an der ULTEM 9085 Platte erfolgte mittels Kleben. Da der Klebevorgang des

Inserts in Bauteilen aber relativ zeitaufwändig ist und die Festigkeitswerte schwanken, wird diese Variante nicht weiter untersucht.

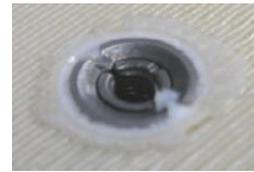


BILD16. Insert in ULTEM 9085 Platte

5.5. Losbrechmoment Schrauben

Für den Einbau des Sensors eignet sich auch der Einsatz von selbstschneidenden Schrauben. Die DELTA PT gewindeformende Schraube von EJOT GmbH mit der Norm WN 5451 ermöglicht die Erstellung des Gewindes durch Umformung des Kunststoffes direkt beim ersten Einschrauben. Sie bietet zusätzlich eine selbsthemmende Funktion und findet beim mehrmaligen Lösen und Einschrauben das gleiche Gewinde. Das Losbrechmoment der Schrauben wurde jeweils an einer Platte aus ULTEM 9085 mit FDM hergestellt und an einer Platte aus Polyamid mit LS hergestellt mittels eines Drehmomentschlüssels gemessen. Das Losbrechmoment der Schrauben an beiden Platten liegt weit über dem mindestens erforderlichen Wert.



BILD17. Drehmomentschlüssel bei der Ermittlung des Losbrechmoments

5.6. Statiktest

An den kritischen Stellen analog Bild 18 wurde jeweils eine Kraft von 45N mittels eines Handmessgeräts eingeleitet.

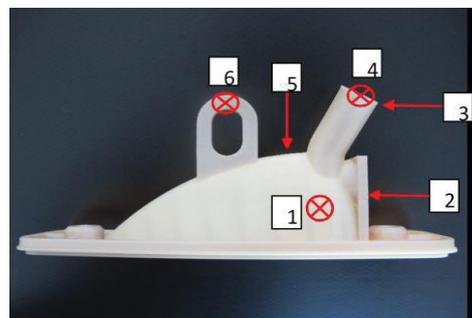


BILD18. Kräfteinleitungspunkte am Temperatursensorgehäuse beim Statiktest

Während das FDM Gehäuse an den Stellen 1 bis 5 den Belastungen standhält, zeigt sich der Hakenbereich des Gehäuses als Schwachstelle und wurde durch Versteifungsstege verbessert.

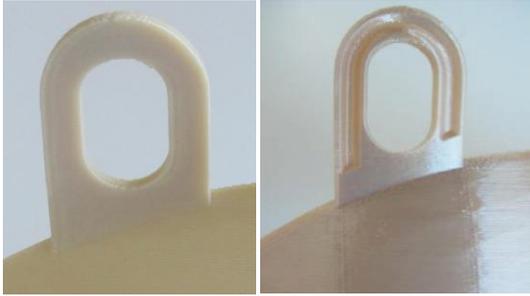


BILD19. Optimierung des Hakenbereichs

Die LS Gehäuse bestanden alle Versuche ohne Versagen.

5.7. Leckage-Test

Teile aus generativen Fertigungsverfahren zeigen eine hohe Porosität. Die Luftdurchlässigkeit wurde mittels Leckage-Tests untersucht. Die Tests wurden bei 30mbar (rel.) und 40mbar (rel.) durchgeführt. Dazu wurde das Gehäuse abgedichtet. An der Luftereinleitungsstelle befinden sich die Anschlüsse für Druck- und Leckagesensoren.

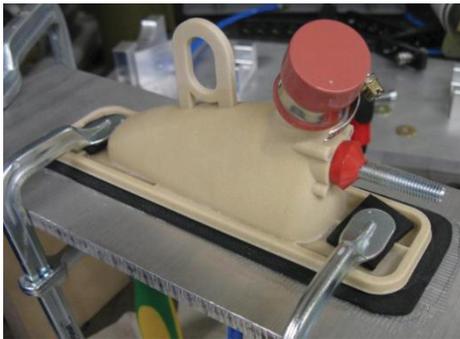


BILD20. Aufbau des Leckage-Tests

Sowohl das unlackierte als auch das lackierte FDM Gehäuse weisen eine größere als die maximale zulässige Leckagerate von 0,06l/min auf. Undichtigkeit tritt vor allem an scharfen Kanten auf, an denen der Lack schlecht benetzt. Abgerundete Kanten würden hier wahrscheinlich eine Verbesserung bringen.



BILD21. Undichtigkeit an einer scharfen Kante durch Seifenlauge sichtbar

Im Gegensatz dazu sind die LS Gehäuse sowohl im unlackierten als auch lackierten Zustand dicht.

6. QUALITÄTSSICHERUNG

Die Prozesssicherheit der generativen Fertigungsverfahren ist ein weiteres wichtiges Thema. Bei der Definition des Prozesses sind Faktoren wie Materialzufuhr und Bauraumbedingung zu berücksichtigen. Eine Checkliste wurde vom DMRC sowohl für das FDM- als auch das LS-Verfahren erstellt. Dadurch kann eine systematische Prozessdefinition unter Berücksichtigung aller Parameter erfolgen.

Desweiteren wurde eine Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) erstellt. Die FMEA wurde aus den bisher gesammelten Erfahrungen über die Verfahren hergeleitet und berücksichtigt die umfassenden Richtlinien für die Konstruktions- und Herstellungsprozesse des Temperatursensorgehäuses. Beim FDM-Verfahren können gegebenenfalls auch Fehler bei der Konvertierung der 3D-Modelle vom CAD-Tool zur RM-Maschine durch abweichende Maschinenparameter auftreten. Potentielle konstruktive Fehler an jeder Teilfunktion des Temperatursensorgehäuses wurden aufgelistet. Dabei wurden auch die Messverfälschung aufgrund einer mangelhaften Dichtigkeit des Sensoreinbauraums und die Haltbarkeit der Verbindung an der Montagestelle berücksichtigt. Eine ausführliche Bewertung wird aktuell vom DMRC erstellt.

7. TOLERANZEN

Während des Bauprozesses wird der Kunststoff erwärmt und das Bauteil kühlt sich nach dem Bau ab. Dabei schrumpft das Bauteil. Dieser Effekt muss mit berücksichtigt werden, indem ein Faktor bei der Geometrieauslegung eingerechnet wird. Bei den Spritzgusstemperatursensorgehäusen wird im Bereich der Abmessung 5 - 100 mm eine Toleranz von $\pm 0,2$ mm eingehalten. Im Vergleich dazu haben die mit FDM und LS hergestellte Gehäuse einen größeren Toleranzbereich von $\pm 0,5$ mm bei gleichen Abmessungen. Aussparungen, die kleiner als 5 mm Durchmesser haben müssen nach dem Bau zusätzlich bis zum Sollwert aufgebohrt werden um eine maßgetreue Form zu gewährleisten. Die Entfernung des Pulvers aus kleinen Sacklöchern bei LS Teilen ist zudem nur schwer möglich.

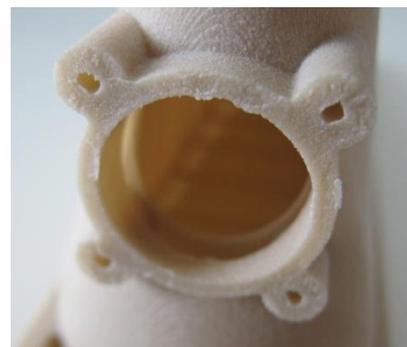


BILD22. Grat an Sensorbauraumkanten des LS Gehäuses

8. AUSBLICK

Nachdem die untersuchten Bauteile hinsichtlich Brandverhalten sowie Festigkeit die Anforderungen erfüllen und konstruktive Richtlinien für das FDM- und LS-

Verfahren erstellt wurden, liegen die Schwerpunkte der weiteren Untersuchungen auf der Absicherung des Herstellungsprozesses. Wichtig ist dabei eine hundertprozentige Prozessüberwachung um zu jeder Zeit der generativen Fertigung die Qualität der Bauteile beurteilen zu können. Wenn die Erkenntnisse über umfangreiche Testreihen abgesichert sind, kann mit der Qualifikation bzw. Zulassung der Materialien und Herstellungsprozesse für Anwendungen in der Flugzeugkabine begonnen werden.