

Schlussbericht - Teil I – Kurzbericht

Zuwendungsempfänger:

Universität Stuttgart
Institut für Flugzeugbau
Pfaffenwaldring 31
70569 Stuttgart

Fördermittelgeber

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Projekt Förderkennzeichen:

13XP5168A

Zuwendungsbescheid vom:

27.04.2021

Bewilligungszeitraum:

01.09.2021 - 31.10.2022

Kurzbezeichnung des Verbundprojektes:

PRIMA – Portierung des Aufbau- und Funktionsprinzips eines Insektenflügels zur Herstellung multifunktionaler Automobilanwendungen. – Teilvorhaben: Mechanische Verstärkung und Kontaktierung der bionischen Tragstruktur

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Stuttgart, den 27.02.2023

Prof. Dr.-Ing. Peter Middendorf
(Projektleitung)

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung und damaliger technischer Stand

Im Rahmen des Projekts PRIMA soll die Portierung des Aufbau- und Funktionsprinzips eines Insektenflügels zur Herstellung multifunktionaler Automobilanwendungen anhand eines konventionellen Seitenaußenspiegels der Mercedes-Benz AG untersucht werden. Als Vorbild dient dabei die zelluläre Flügeladerung eines Insektenflügels. Hierdurch bieten sich neue Möglichkeiten in der Auslegung, Konstruktion und Fertigung extrem leichter, aber dennoch fehlertoleranter Strukturen. Auf Basis der Bauteil- und Schnittstellendefinition durch die Mercedes-Benz AG widmet sich die CIKONI GmbH mit ihrer langjährigen Erfahrung im Bereich der Strukturauslegung und Bauteiloptimierung zunächst der Optimierung des Seitenaußenspiegels. Parallel soll, auf Grundlage des vom Institut für Flugzeugbau innerhalb des Rahmenprogramms „Vom Material zur Innovation“ entwickelten Fertigungsverfahrens zur lokalen Verstärkung einer stereolithografisch hergestellten Struktur, die Entwicklung eines Infiltrations-Teststands erfolgen. Die Funktionstüchtigkeit des Verfahrens wurde dabei anhand der Einbringung von Kurzfasersuspensionen vom IFB erbracht (TRL 3). Mit dessen Hilfe soll die, vom Insektenflügel inspirierte, optimierte Seitenaußenspiegelstruktur verstärkt werden. Neben der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften zur Reduktion des Gewichts setzt sich das Konsortium auch eine elektrische Kontaktierung zum Ziel. Durch diese soll eine Reduktion des Montageaufwandes möglich werden. Die erreichten Eigenschaften sollen dabei anhand etablierter Testverfahren überprüft und an einer realen Fahrzeugstruktur demonstriert werden.

2. Ablauf und wesentliche Ergebnisse des Vorhabens

Folgende Arbeitspakete wurden innerhalb des Vorhabens durch das IFB bearbeitet:

AP	Monat	09.21 - 11.21			12.21 - 02.22			03.22 - 05.22			06.22 - 08.22		
		9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8
3	Entwicklung der Infiltrationseinheit	█	█	█	█	█	█	█					
4	Nachweis der Materialeigenschaften							◆	█				
5	Herstellung des Demonstrators							Input aus AP1	◆	█	█	█	
6	Funktionsnachweis des Demonstrators								Input aus AP2				█

Im AP 3 wurde ausgehend vom Stand der Technik, bei welchem im Labormaßstab mit einer Kartuschenpresse manuell die Harz-Faser Suspension in das Bauteil initiiert wurde, eine fortschrittlichere Anlage dafür entwickelt. Wesentliche Anforderungen dafür sind:

- Teilautomatisierung
- Zuverlässiger, reproduzierbarer und sicherer Prozess
- Verarbeitung von einem Fasergewichtsanteil > 30 wt% an Kohlenstoffkurzfasern

Um diese Anforderungen zu erfüllen, wurde ein neues Konzept entwickelt, bei welchem die Fasern mit dem Harz in einem Becher unter Vakuum dispergiert werden. Die porenfreie Suspension wird darauf aus dem selben Becher, welcher sich in einem Drucktopf befindet,

mit Überdruck aus diesem herausbefördert. Dafür wurde eine geeignete Anlagensteuerung entwickelt und die Prozessgrenzen herausgefunden. Es stellte sich heraus, dass die Fasern Sigrafil C M80-4.0/240-UN mit 80 μm mittlerer Länge nur bis zu einem Gewichtsanteil von 30 wt% zuverlässig verarbeitet werden können.

In AP 4 wurden die mechanischen und elektrischen Eigenschaften untersucht, welche mit diesem Verfahren auf der Anlage erzielt werden. Für die mechanischen Eigenschaften wurden hohle Zugprüfkörper additiv hergestellt und anschließend mit der Harz-Faser-Suspension infiltriert. Es zeigte sich eine Steigerung des E-Moduls um 189 % auf 7,33 GPa gegenüber der rein additiv gefertigten Probe. Die Zugfestigkeit wurde um 16 % auf 77,12 MPa erhöht bei gleichzeitiger Verringerung der Bruchdehnung um 79% auf 1,67 %. Für den Nachweis der elektrischen Leitfähigkeit wurden Probekörper gegossen und anschließend mit einem Widerstandsmessgerät der ohmsche Widerstand gemessen. Es zeigte sich, dass die rein mit Kohlenstoffkurzfasern verstärkten Proben nicht ausreichend elektrisch leitfähig sind. Zur Verbesserung der Leitfähigkeit wurden Carbon-Nanotubes beigemischt, wodurch die Viskosität der Suspension jedoch stark ansteigt und die mechanischen Eigenschaften verschlechtert werden. Als Kompromiss zwischen Verarbeitbarkeit, mechanischen und elektrischen Eigenschaften wurde daher ein Anteil von 20 wt% Kohlenstofffasern und 2 wt% CNTs gewählt.

In AP 5 wurde der topologieoptimierte Seitenaußenspiegel additiv mittels Stereolithografie hergestellt. Die Infiltration der Struktur erfolgte auf der in AP 3 entwickelten Anlage. Die Kanäle, welche für die elektrische Kontaktierung vorgesehen sind, wurden getrennt von der restlichen Struktur infiltriert. Auf die infiltrierte Struktur wurde anschließend als aerodynamische Verkleidung eine tiefgezogene Hülle in Form der Außenkontur des Spiegels aus transparentem PET aufgeklebt. Um den Blinker nachzubilden, wurden 3 Niederspannungs-LEDs auf die Struktur geklebt und direkt mit den leitfähigen Kanälen kontaktiert. Über die LEDs wurde eine transparente, additiv gefertigte Blende geklebt.

In AP 6 erfolgte der Funktionsnachweis des Demonstrators. Um die Rissstoppfunktion zu zeigen, wurde ein Ausschnitt von der Oberseite des Spiegels ausgewählt. Dieser Ausschnitt wurde mit Anbindungsglaschen für eine Zugprüfmaschine versehen und nach Infiltration der Struktur mit einer dünnen, selbstklebenden Folie bespannt. Anschließend wurde an einer Stelle der Struktur gezielt ein Riss initiiert und auf der Prüfmaschine auseinander gezogen. Es zeigte sich, dass der Riss analog zum Insektenflügel wächst und zunächst auf eine Zelle beschränkt bleibt bevor die Struktur aufgrund der großen Steifigkeitsunterschiede versagt. Der Nachweis der elektrischen Leitfähigkeit erfolgte durch Ansteuerung der LED Blinker durch ein Labornetzteil.

Schlussbericht - Teil II – Eingehende Darstellung

Zuwendungsempfänger:

Universität Stuttgart
Institut für Flugzeugbau
Pfaffenwaldring 31
70569 Stuttgart

Fördermittelgeber

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Projekt Förderkennzeichen:

13XP5168A

Zuwendungsbescheid vom:

27.04.2021

Bewilligungszeitraum:

01.09.2021 - 31.10.2022

Kurzbezeichnung des Verbundprojektes:

PRIMA – Portierung des Aufbau- und Funktionsprinzips eines Insektenflügels zur Herstellung multifunktionaler Automobilanwendungen. – Teilvorhaben: Mechanische Verstärkung und Kontaktierung der bionischen Tragstruktur

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Stuttgart, den 27.04.2023

Prof. Dr.-Ing. Peter Middendorf
(Projektleitung)



Inhalt

1. Ausführliche Darstellung der im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Arbeiten mit Vergleich zur ursprünglichen Vorhabenbeschreibung	3
AP 3 – Entwicklung der Infiltrationseinheit.....	4
AP 4 – Nachweis der Materialeigenschaften.....	9
AP 5 – Herstellung des Demonstrators	12
AP 6 – Funktionsnachweis des Demonstrators	14
2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	17
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit.....	17
4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses	18
5. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen.....	18
6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	19

1. Ausführliche Darstellung der im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Arbeiten mit Vergleich zur ursprünglichen Vorhabenbeschreibung

Die Forschungsaktivitäten des Instituts für Flugzeugbau (IFB) der Universität Stuttgart umfassten im Rahmen des Projekts PRIMA, neben dem Projektmanagement, die Entwicklung einer Infiltrationseinheit zur nachträglichen Kohlenstoffkurzfaserverstärkung stereolithografisch gefertigter Strukturen, den Nachweis der damit erzielbaren Materialeigenschaften sowie die Herstellung und den Funktionsnachweis eines Demonstrators. Ziel dabei war eine signifikante Verbesserung des im Forschungsprojekt SYMPA entwickelten Infiltrationsprozesses sowie der mechanischen Eigenschaften von Stereolithografie-Bauteilen mittels Faserverstärkung. Hierfür wurden die folgenden wissenschaftlichen Themenfelder bearbeitet, auf welche im Folgenden näher eingegangen wird:




AP 3 – Entwicklung der Infiltrationseinheit

- Konzeptvalidierung
- Entwicklung Vakuummischer
- Beschaffung der Komponenten
- Aufbau Teststand
- Entwicklung Anlagensteuerung
- Finden der Prozessgrenzen



AP 5 – Herstellung des Demonstrators

- Herstellung der Struktur mit SLA-Prozess
- Infiltration der Struktur
- Aufbringen einer techn. Membran



AP 4 – Nachweis der Materialeigenschaften

- Herstellung von Zugprüfkörpern
- Durchführung von Zugversuchen
- Messung der el. Leitfähigkeit



AP 6 – Funktionsnachweis des Demonstrators

- Anbindungskonzept
- Risstoppfunktion
- Ansteuerung von Blinker und Umfeldbeleuchtung

Die eingehende Darstellung der durchgeführten Tätigkeiten wird dabei anhand der Arbeitspaketstruktur der Vorhabenbeschreibung vorgenommen, von welcher im Verlauf des Projekts inhaltlich nicht abgewichen wurde:

AP	Monat	09.21 - 11.21			12.21 - 02.22			03.22 - 05.22			06.22 - 08.22		
		9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8
3	Entwicklung der Infiltrationseinheit	█	█	█	█	█	█						
4	Nachweis der Materialeigenschaften							◆	█				
5	Herstellung des Demonstrators							Input aus AP1	◆	█	█	█	█
6	Funktionsnachweis des Demonstrators								Input aus AP2				█

AP 3 – Entwicklung der Infiltrationseinheit

In diesem Arbeitspaket wurde in Zusammenarbeit mit der CIKONI GmbH eine Anlage entwickelt, mit der teilautomatisiert Kohlenstoffkurzfasern in eine stereolithografisch gefertigte Hohlstruktur infiltriert werden können. Das Schema dieses Prozesses ist in Abb. 1 dargestellt.

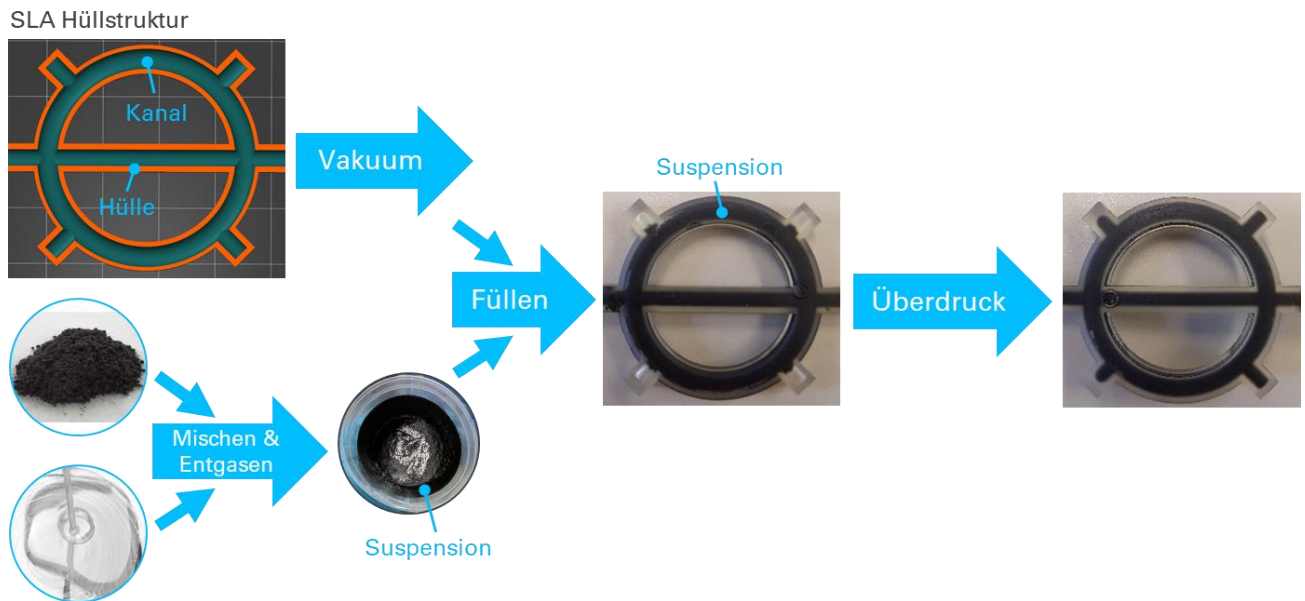


Abbildung 1 Schema des nachträglichen Kurzfaserverstärkens

Beim nachträglichen Kurzfaserverstärken müssen zunächst die Kohlenstoffkurzfasern mit dem Infiltrationsharz zu einer homogenen Suspension vermischt werden. Dies wird mit einem Zentrifugalmischer durchgeführt. Zudem muss die Mischung entgast werden, da sich Lufteinschlüsse im infiltrierten Bauteil negativ auf die mechanischen Eigenschaften auswirken. Beim Mischvorgang im Zentrifugalmischer wird bereits ein Teil der Luft abgeschieden. Um die Suspension vollständig zu entgasen, kommt sie danach für einige Minuten in einen Vakuumpopf. Anschließend wird die Suspension in eine evakuierte Hüllstruktur, welche mittels Stereolithografie hergestellt wurde, eingebracht. Um Hinterschnitte in der Struktur zu füllen, wird die Ableitung der Struktur abgeklemmt und auf beiden Seiten des Zuflusses ein Druck aufgebracht. Nach Aushärtung der Suspension ist das Bauteil fertig. Bisher wurde dieser Prozess manuell ausgeführt, indem die Suspension im Labormaßstab mit einer Kartuschenpresse manuell in ein Bauteil initiiert wird. In Abb. 2 ist der Versuchsaufbau dazu dargestellt. Dieser Aufbau zeigte einige Schwächen. Es muss zu Beginn die gemischte und entgaste Suspension in die Kartuschenpresse umgefüllt werden, wodurch Luft eingebracht wird. Ein weiterer Nachteil ist, dass durch das händische Bedienen der Kartuschenpresse keine definierte und wiederholbare Kraft aufgebracht wird und der Prozess somit nicht genau reproduzierbar ist. Zudem sind die Schlauchverbindungen nur lose

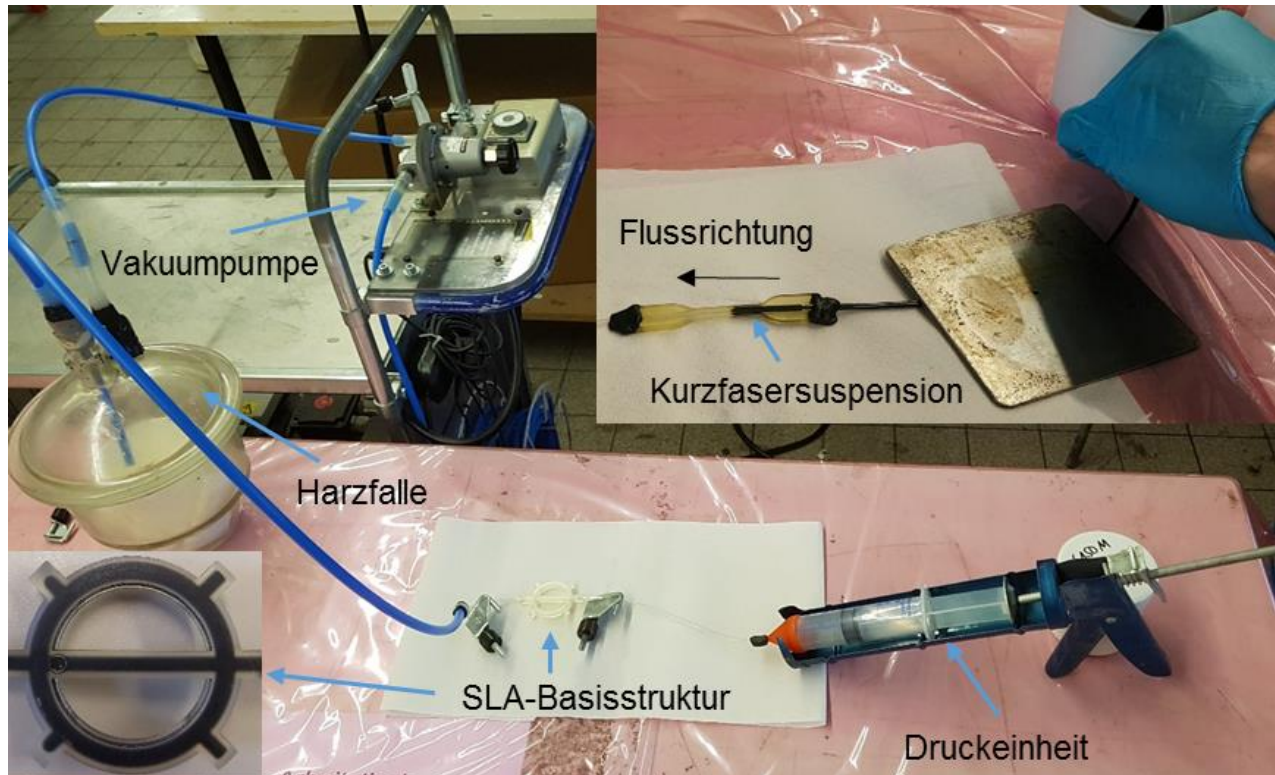


Abbildung 2 Nachträgliche Kurzfasereinfiltration mit der ursprünglichen Prozesstechnik im Labormaßstab in die Anschlüsse gesteckt und mit Tacky-Tape fixiert und haben sich bei Aufbringen von zu hohen Kräften gelöst, wodurch kein sicherer Prozess gewährleistet ist. Ziel des AP 3 war deshalb ausgehend vom diesem Stand der Technik, eine fortschrittlichere Anlage für den Infiltrationsprozess zu entwickeln. Die wesentlichen Anforderungen ergeben sich hauptsächlich aus den Schwächen der bisherigen Technik und sind:

- Teilautomatisierung
- Zuverlässiger, reproduzierbarer und sicherer Prozess
- Verarbeitung von einem Fasergewichtsanteil $> 30 \text{ wt}\%$ an Kohlenstoffkurzfasern

Um die bestehenden Probleme zu lösen und die Anforderungen zu erfüllen, wurde ein neues Konzept zur Beförderung untersucht. Hierfür werden die Fasern mit dem Infiltrationsharz in einem Becher unter Vakuum dispergiert und entgast. Die porenfreie Suspension soll darauf aus demselben Becher befördert werden, um ein umfüllen und Lufteintrag zu vermeiden. Dafür wurden Versuche unternommen, dies mittels Druckdifferenz zu realisieren. Der Becher mit der Suspension wurde dafür in einem Drucktopf platziert aus welchem die Suspension über einen Schlauch herausgeleitet wird. Der Aufbau dieses Versuches ist in Abb. 3 zu sehen. Durch Bedrücken des Topfes beginnt die Suspension durch den Schlauch zu fließen. Das Druckgefälle kann über ein Regelventil relativ genau gesteuert werden. In Versuchen wurden Auswirkungen von verschiedenen Schlauchdurchmessern, Druckdifferenzen, und Faseranteilen auf die Fließfähigkeit der Suspension untersucht. Es stellte sich heraus, dass



Abbildung 3 Versuch zur Überdruckförderung einer Harz-Faser-Suspension

ein Schlauchinnendurchmesser von 4 mm geeignet ist, um eine Suspension mit 32 wt% Kohlenstoffkurzfasern bei 3,5 bar Druckdifferenz zu befördern. Für höhere Faseranteile ergaben sich Probleme, da die Suspension im Becher nicht schnell genug nachfließt und Luft am Schlaucheingang durchschlägt. Das Konzept stellte sich insgesamt als brauchbar heraus und wurde zur Infiltration der Bauteile weiterverfolgt. Dafür wurde ein Mischer entwickelt, der im Drucktopf platziert wird. Dieser ist in Abb. 4 dargestellt. Der Mischer besteht im

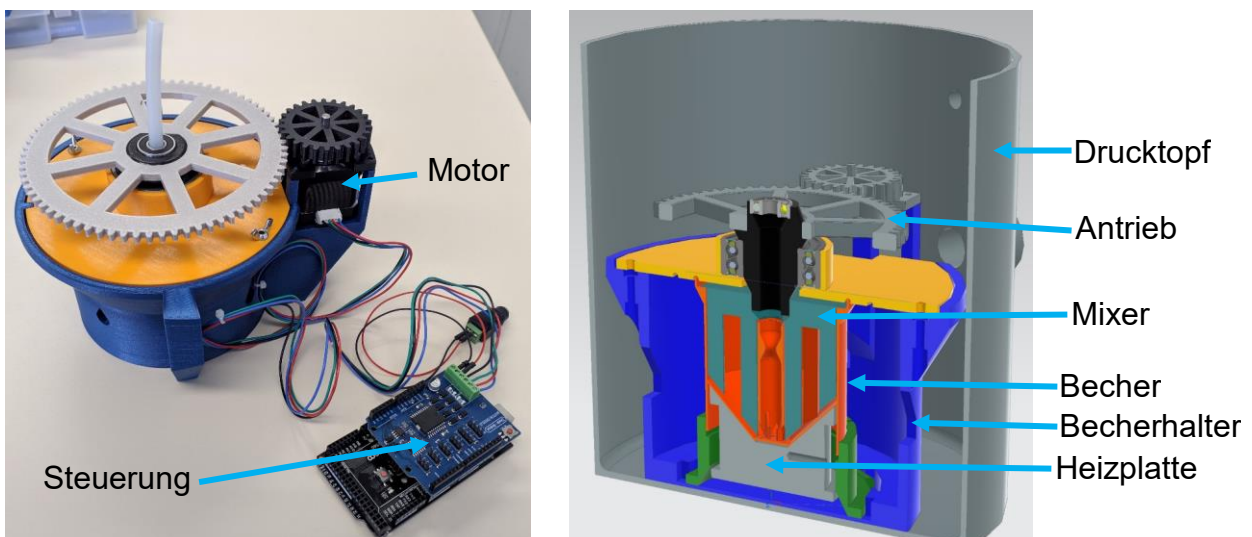


Abbildung 4 Mischer; links: mit Steuerung, rechts: im Drucktopf

Wesentlichen aus den Komponenten Motor, Steuerung, Becherhalter, Heizplatte, Becher, Mixer und Antrieb. In dem Becher befindet sich in der Mitte eine Hohlwelle mit Einlässen am Boden. Durch diese Welle wird der Schlauch an den Boden des Bechers geführt und die Suspension wird darüber herausbefördert. Die gesamte Konstruktion wird für die Prozessausführung in einem Drucktopf platziert. Ein vorhandener Topf war für die Aufnahme der Mischerkonstruktion zu klein und verfügte nicht über die passenden Anschlüsse, weshalb

für dieses Projekt ein dafür angepasster beschafft werden musste. Um den Druck im Drucktopf präzise steuern zu können, ist ein Proportionaldruckregelventil erforderlich, welches mit einer Vakuumpumpe und einem Kompressor verbunden ist. Der Drucktopf wurde zusammen mit den anderen erforderlichen Komponenten des Infiltrationsteststandes auf einem Tisch samt Schutzeinhausung platziert. Der gesamte Teststand besteht im Wesentlichen aus den Komponenten Drucktopf, Bauteilarretierung und Vakuumpumpe mit Vakuumpumpe. Hinzukommen die Steuerungen für die einzelnen Komponenten. Der Aufbau des gesamten Versuchsstandes ist in Abb. 5 zu sehen.

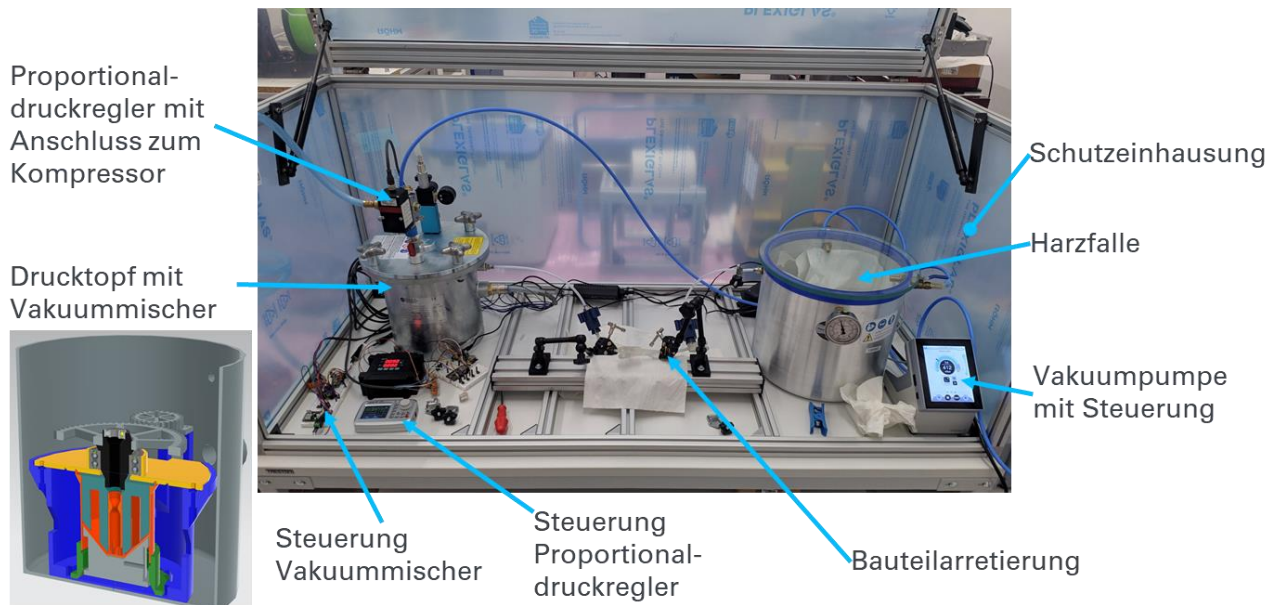
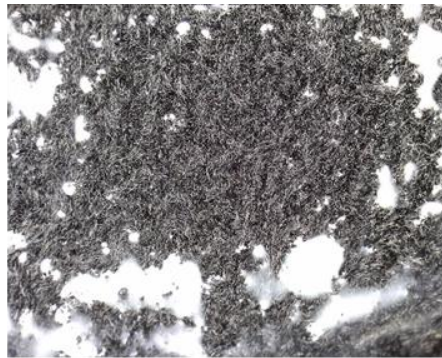
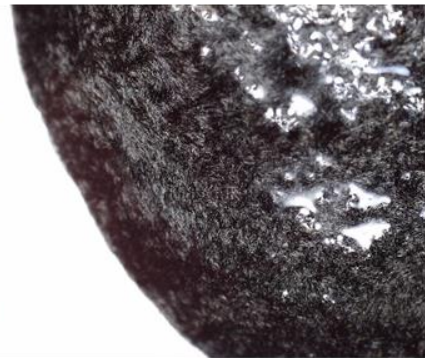


Abbildung 5 Infiltrationsteststand

Um die Prozessgrenzen herauszufinden, wurde in Versuchen schrittweise der Fasergewichtsanteil der Suspension erhöht und die Misch- und Förderbarkeit evaluiert. Es stellte sich heraus, dass mit der Anlage Suspensionen bis zu 34 wt% homogen dispergiert und entgast werden können, wie in Abb. 6 zu erkennen ist. Die Förderung der Suspension mit dieser Technik gelingt zwar prinzipiell damit auch bis zu einem Fasergewichtsanteil von 34 wt%, jedoch ist der Prozess für so hohe Anteile nicht mehr zuverlässig und es kann zu Luftdurchschlägen kommen. Deshalb wird empfohlen, die Anlage nur bis zu einem Anteil von 30 wt% zu verwenden. Als Fasern kommen dafür Sigrafil C M80-4.0/240-UN mit 80 µm mittlerer Länge zum Einsatz.



30 wt%



32 wt%



34 wt%



34 wt%

Abbildung 6 Mikroskopierte dispergierte Harz-Faser-Suspensionen

AP 4 – Nachweis der Materialeigenschaften

In AP 4 wurden die mechanischen und elektrischen Eigenschaften untersucht, welche mit diesem Verfahren auf der Anlage erzielt werden. Für den Nachweis der mechanischen Eigenschaften wurden hohle Zugprüfkörper additiv mittels Stereolithografie hergestellt. Die Geometrie der Prüfkörper orientiert sich an der Norm DIN EN ISO 3167 und ist abgewandelt durch einen runden anstatt rechteckigen Prüfquerschnitt. Der Querschnitt ist ausgeführt mit 4 mm Kanaldurchmesser und 1 mm Wandstärke, sodass sich ein Flächenverhältnis von Kern zu Mantel von 55,56 % zu 44,44 % ergibt. Dieser Querschnitt entspricht dem kleinsten Durchmesser, der zuverlässig infiltriert werden kann und die Wandstärke ist die minimal erforderliche, um der Druckdifferenz während des Infiltrationsvorgangs sicher standzuhalten. Diese Werte dienen auch als Randbedingungen für die Topologieoptimierung des Seitenaußenspiegels, welche von CIKONI in AP 2 durchgeführt wurde. Nach Herstellung der hohlen Prüfkörper wurden diese mit der Infiltrationsanlage mit 30 wt% Kohlenstoffkurzfaser-Harz-Suspension infiltriert. In Abb. 7 ist die Prüfkörpergeometrie, die Herstellung, sowie die



Abbildung 7 Prüfkörper; links: Geometrie, Mitte: Herstellung mittels SLA, rechts: fertig infiltrierte Probe
 fertig Infiltrierten Proben zu sehen zu sehen. Zum Vergleich mit dem reinen, unverstärkten Photopolymer BASF RG35, wurde die gleiche Geometrie ohne hohlen Kanal als massive Ausführung hergestellt. Die additiv hergestellten und infiltrierten Proben wurden anschließend noch für 10 min pro Seite mit 5,81 mW/cm² nachbelichtet und bei 60 C für 16 h getempert.

Nach Herstellung der Prüfkörper wurden die mechanischen Kennwerte in Zugversuchen herausgefunden. Die Ergebnisse davon sind in Abb. 8 dargestellt. Es zeigte sich eine Steigerung des E-Moduls um 189 % auf 7,33 GPa gegenüber der rein additiv gefertigten Probe. Die Zugfestigkeit wurde um 16 % auf 77,12 MPa erhöht bei gleichzeitiger Verringerung der Bruchdehnung um 79% auf 1,67 % durch die höhere Steifigkeit der Kohlenstofffasern. Die gemittelten Zahlenwerte der Versuche sind in Tab. 1 zu entnehmen.

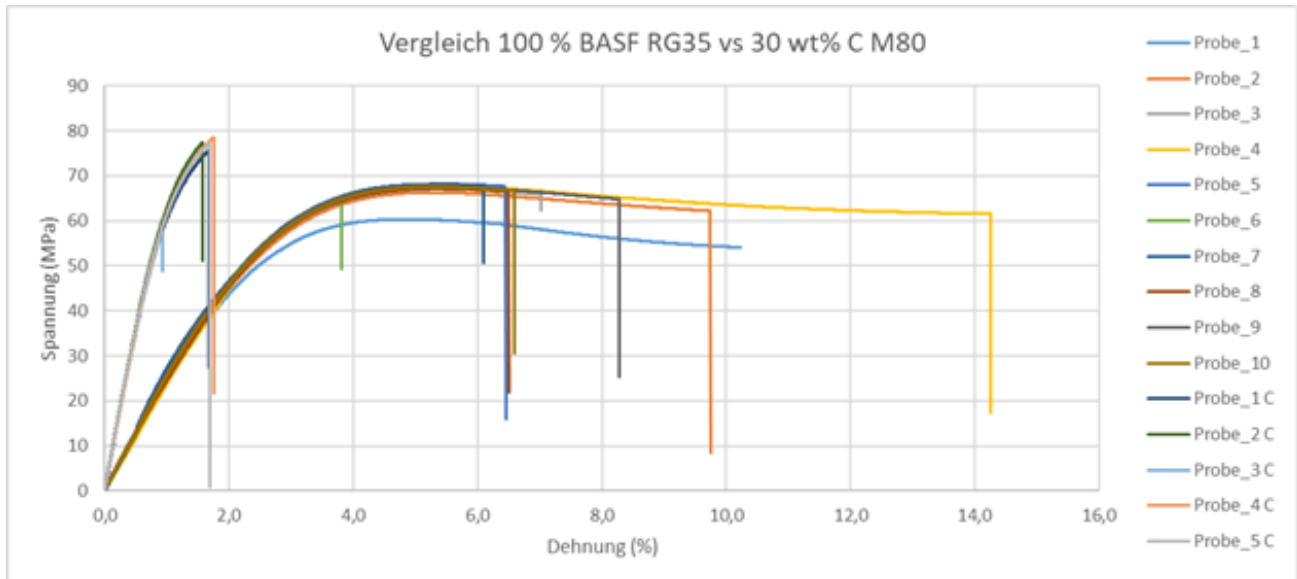


Abbildung 8 Vergleich der mechanischen Eigenschaften

Parameter	BASF RG35	BASF RG35 + 30 wt% C-Fasern	Vergleich
E-Modul	2,53 GPa	7,33 GPa	Erhöhung um 189 %
Zugfestigkeit	66,5 MPa	77,12 MPa	Erhöhung um 16 %
Bruchdehnung	7,9 %	1,67 %	Verringerung um 79 %

Tabelle 1 Vergleich der mechanischen Eigenschaften

Für den Nachweis der elektrischen Leitfähigkeit wurden Probekörper mit variierendem Kohlenstofffaseranteil gegossen und anschließend mit einem Widerstandsmessgerät der ohmsche Widerstand gemessen. Es zeigte sich, dass die rein mit Kohlenstoffkurzfaser verstärkten Proben nicht ausreichend elektrisch leitfähig sind. Zur Verbesserung der Leitfähigkeit wurden Carbon-Nanotubes (CNTs) beigemischt, wodurch die Viskosität der Suspension jedoch stark ansteigt und die mechanischen Eigenschaften verschlechtert werden. Als Kompromiss zwischen Verarbeitbarkeit, mechanischen und elektrischen Eigenschaften wurde daher ein Anteil von 20 wt% Kohlenstofffasern und 2 wt% CNTs gewählt. Für den finalen Nachweis der elektrischen Leitfähigkeit wurde eine Suspension mit diesen Faseranteilen in die Zugprüfkörper infiltriert und die Enden mit Silberleitlack

kontaktiert. Die Durchführung der Messungen ist in Abb. 9 zu sehen. Es ergab sich ein durchschnittlicher Wert für die el. Leitfähigkeit von $\sigma_L = \frac{l}{R \cdot A} = 4,04 \cdot 10^{-1} (\Omega \cdot m)^{-1}$. Zum Vergleich, Kupfer besitzt eine el. Leitfähigkeit von $\sigma_{L,K} = 5,80 \cdot 10^7 (\Omega \cdot m)^{-1}$. Es sind daher nur geringe Stromstärken realisierbar.

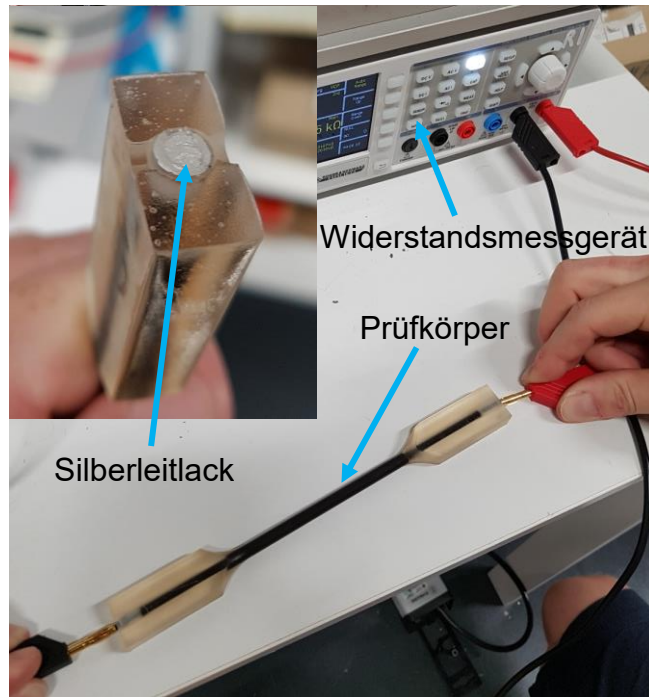


Abbildung 9 Messung des elektrischen Widerstands der Prüfkörper

AP 5 – Herstellung des Demonstrators

In diesem Arbeitspaket wurde der in AP 2 von CIKONI topologieoptimierte Seitenaußenspiegel additiv mittels Stereolithografie hergestellt. Da die finale Struktur zu groß für die vorhandenen Anlagen am IFB war, erfolgte die Fertigung bei einem externen Dienstleister. Zuvor wurde an kleiner skalierten Versionen die Herstell- und Infiltrierbarkeit sichergestellt sowie die Positionen der Angüsse bestimmt. In Abb. 10 ist die hergestellte Hohlstruktur im linken Bild zu sehen.



Abbildung 10 Stereolithografisch gefertigter Seitenaußenspiegel, Hohlstruktur

Die Infiltration der Struktur erfolgte auf der in AP 3 entwickelten Anlage.

Im Sinne eines multifunktionalen Ansatzes sollte der Seitenaußenspiegel nicht nur mechanische, sondern auch elektrische Aufgaben erfüllen. Daher sollen LEDs, die die Funktion des Blinkers übernehmen, direkt über die Struktur kontaktiert werden. Die Kanäle, welche für die elektrische Kontaktierung vorgesehen sind, wurden getrennt von der restlichen Struktur infiltriert. Die Position der leitfähigen Kanäle, der LEDs und Schnittstellen ist in Abb. 11 zu erkennen. Für die Nachbildung des Blinkers wurden 3 Niederspannungs-LEDs auf die Struktur geklebt und direkt mit den leitfähigen Kanälen kontaktiert. In die Kanäle sind im inneren des Spiegels ebenfalls Stromkabel direkt eingeklebt, über die die Kanäle und somit die LEDs mit Strom versorgt werden. Über die LEDs wurde eine transparente, additiv gefertigte Blende geklebt.

Auf die infiltrierte Struktur wurde anschließend eine aerodynamische Verkleidung aufgebracht. Es stellte sich heraus, dass eine tiefgezogene Hülle in Form der Außenkontur

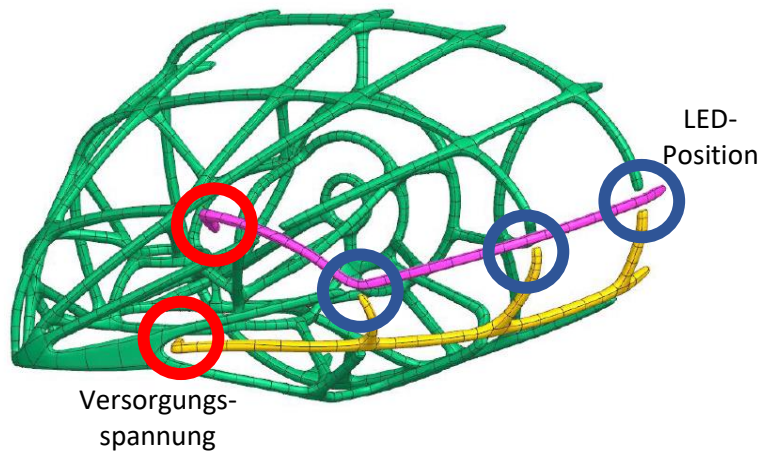


Abbildung 11 Elektrisch leitfähige Pfade und Positionen der LEDs

des Spiegels aus transparentem PET die beste Variante darstellt. In Abb. 12 ist die Tiefziehvorrichtung und die tiefgezogene Hülle dargestellt. Die Hülle wurde an der Außenseite der Streben auf die Struktur mit 2-Komponenten Epoxidharzkleber aufgeklebt. Der fertige Seitenaußenspiegel ist in Abb. 10 im rechten Bild dargestellt.



Abbildung 12 Tiefziehvorrichtung für die Hülle des Seitenaußenspiegels

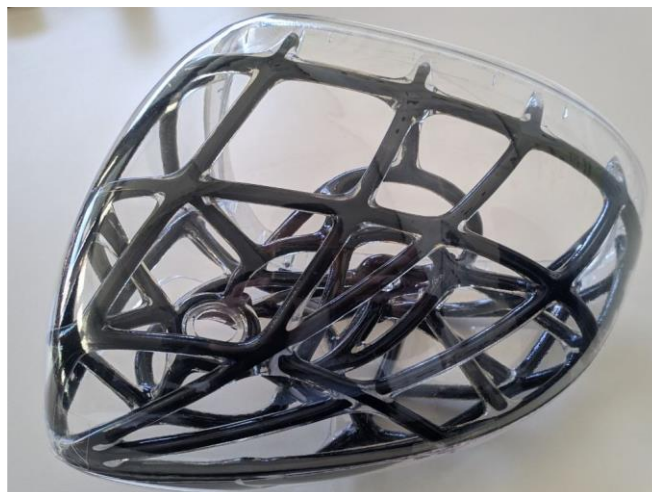


Abbildung 13 Fertiger Seitenaußenspiegel

AP 6 – Funktionsnachweis des Demonstrators

In AP 6 erfolgte der Funktionsnachweis des Demonstrators. Um die Rissstoppfunktion zu zeigen, wurde ein Ausschnitt von der Oberseite des Spiegels ausgewählt, welcher in Abb. 14 im linken Bild abgebildet ist. Die Zugrichtung und die Position des initialen Risses sind im rechten Bild zu sehen.

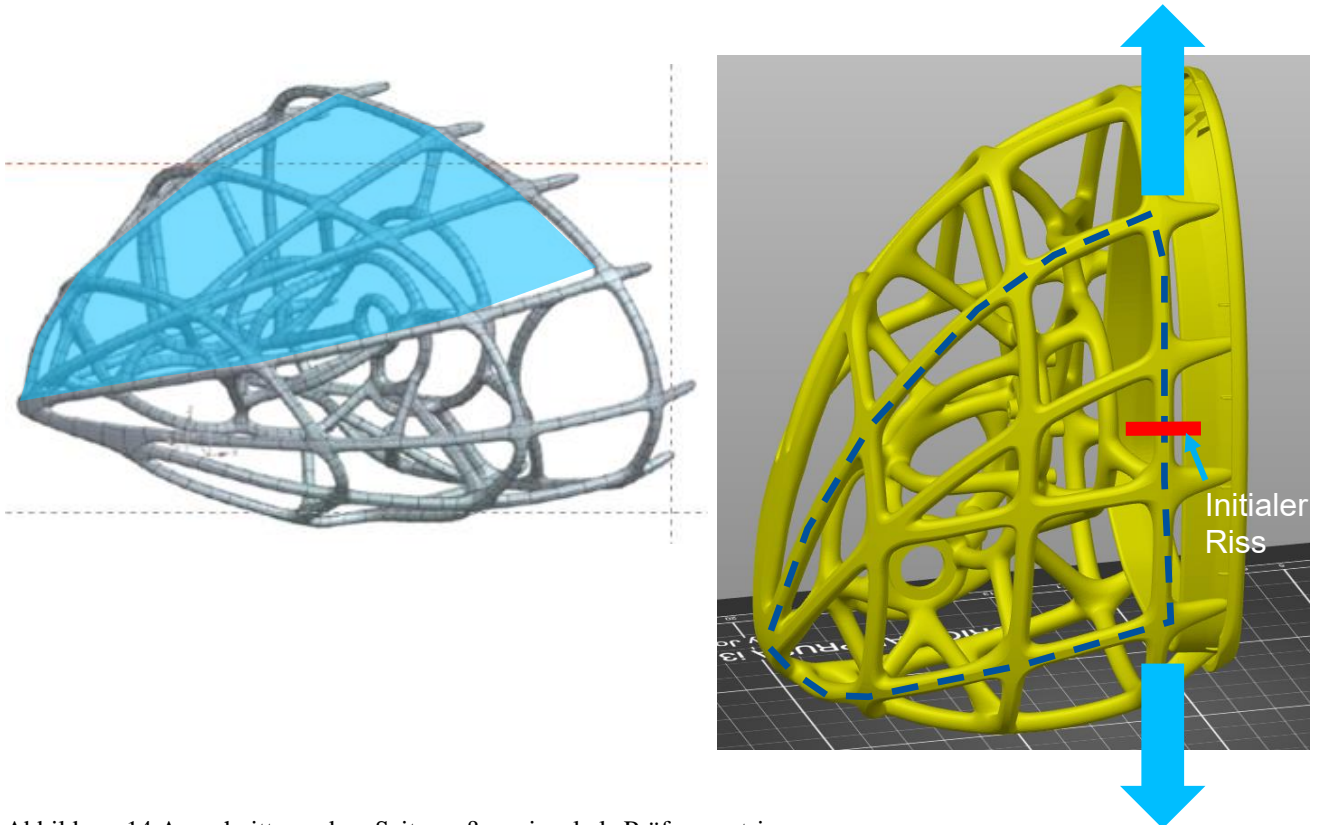


Abbildung 14 Ausschnitt aus dem Seitenaußenspiegel als Prüfgeometrie

Dieser Ausschnitt wurde mit Anbindungsflaschen für eine Zugprüfmaschine versehen und nach Infiltration der Struktur mit einer dünnen, selbstklebenden Folie bespannt. Die Prüfstruktur ist in Abb. 15 mit dem Anbindungskonzept dargestellt und die infiltrierte und mit Folie bespannte Struktur ist in Abb. 16 zu sehen.

Anschließend wurde an einer Stelle der Struktur gezielt ein Riss initiiert und auf der Prüfmaschine auseinander gezogen. Es zeigte sich, dass der Riss analog zum Insektenflügel wächst und zunächst auf eine Zelle beschränkt bleibt bevor die Struktur aufgrund der großen Steifigkeitsunterschiede versagt. In Abb. 17 ist der Prüfvorgang, das Risswachstum und das Versagen der Struktur über 3 Bilder dargestellt.

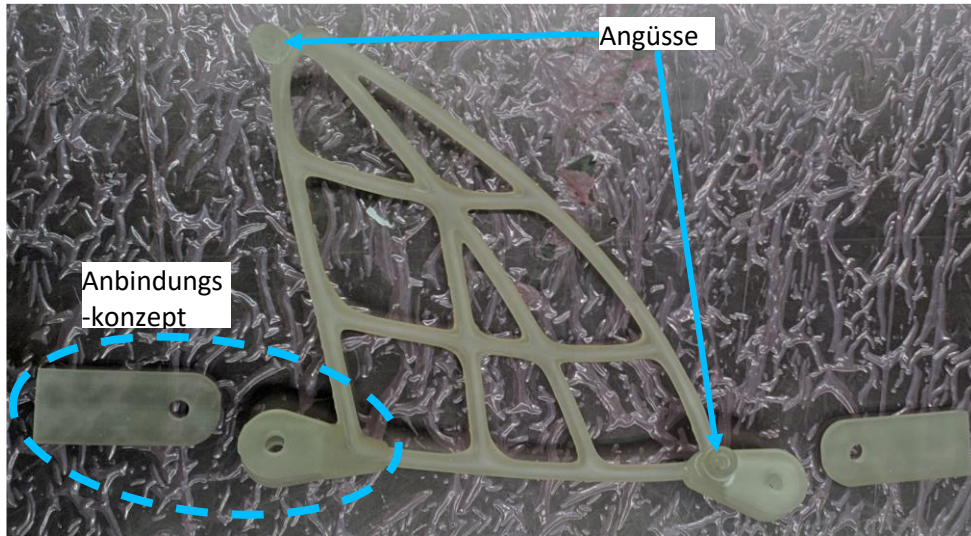


Abbildung 15 Prüfgeometrie des Seitenaußenspiegels mit Anbindungskonzept



Abbildung 16 infiltrierte und mit Folie bespannte Prüfgeometrie

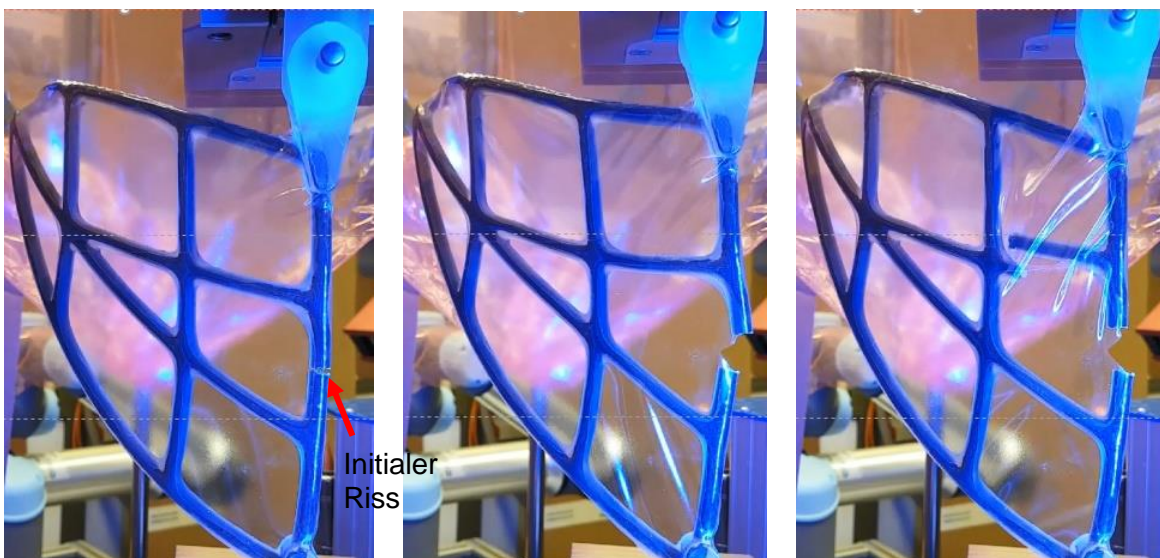


Abbildung 17 Prüfungsvorgang mit Risswachstum

Der Nachweis der elektrischen Leitfähigkeit erfolgte durch Ansteuerung der LED Blinker durch eine elektrische Schaltung und ein Labornetzteil. In Abb. 18 ist ein Vergleich der Helligkeiten der LEDs bei direkter Kontaktierung über die Kabel (links) im Vergleich zur Kontaktierung über die mit CNTs-Kohlenstofffaserverstärkte Struktur zu sehen. Es zeigt sich, dass durch den hohen el. Widerstand der Struktur die LEDs schwächer leuchten, als bei direktem Anschluss. Dennoch wurde der multifunktionelle Ansatz damit nachgewiesen und die Struktur ist in der Lage, neben mechanischen Eigenschaften auch noch elektrische Signale zu übertragen. Es empfiehlt sich an dieser Stelle in zukünftigen Forschungsvorhaben die elektrische Leitfähigkeit genauer zu untersuchen und zu verbessern.

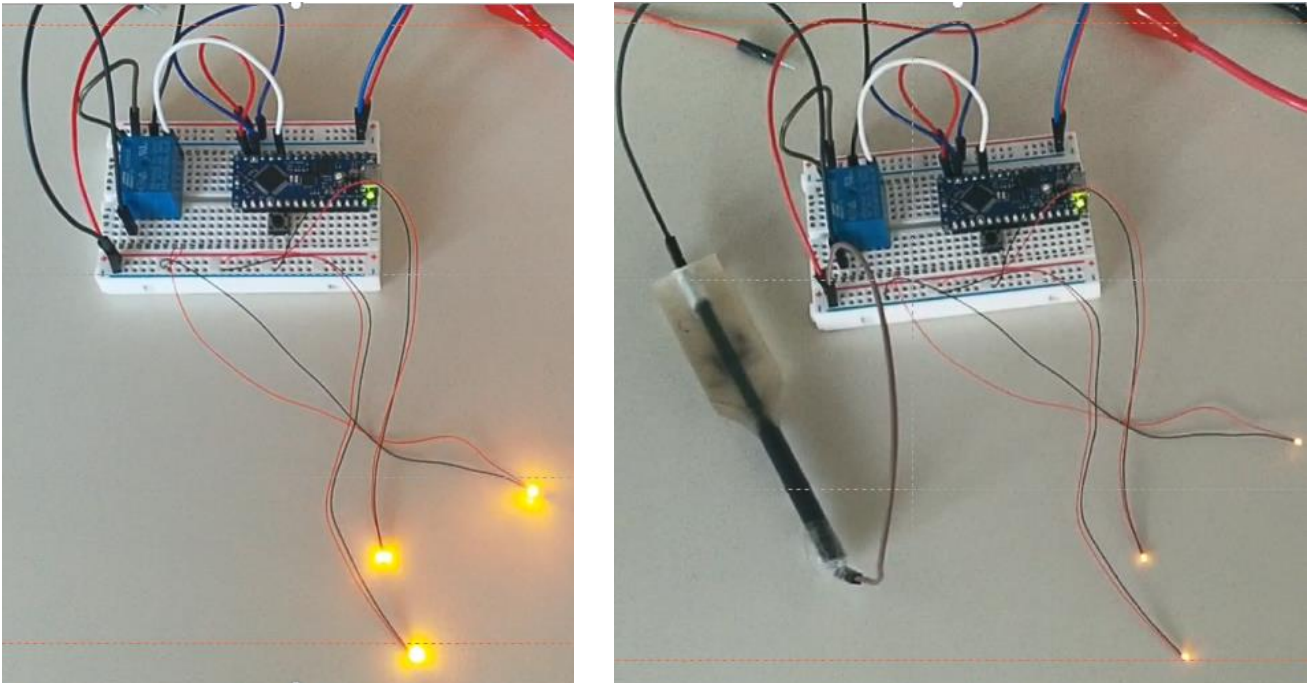


Abbildung 18 Vergleich der Helligkeit der LEDs; links: direkte Kontaktierung, rechts: Kontaktierung über die Struktur

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Zur Bearbeitung der oben beschriebenen Arbeitspakete wurden über die Projektlaufzeit insgesamt 71.713,93 € an Personalmittel für wissenschaftliche Mitarbeiter verwendet. Die praktischen Tätigkeiten, wie der Aufbau des Versuchsstandes oder die Durchführung von Zugversuchen, wurden über die Projektlaufzeit zusätzlich durch studentische Hilfskräfte unterstützt, für welche in Summe 5.999,81 € Personalkosten angefallen sind.

Für den Aufbau der Infiltrationseinheit innerhalb des AP 3 wurde eine Vakuumpumpe von Häberle Labortechnik GmbH&Co KG für 3332,00 € beschafft. Diese ist notwendig, um sowohl die Harz-Faser-Suspension zu entgasen, als auch die Bauteile zur Infiltration zu evakuieren. Daneben war für den Aufbau des Versuchsstandes und die Durchführung der Infiltration die Beschaffung eines für das Vorhaben angepassten Drucktopfes von Oberflächentechnik Seelmann e.K. für 1507,40 € erforderlich. Mit diesem ist es möglich, eine sichere Umgebung für die erforderliche Druckdifferenz für den Infiltrationsprozess bereitzustellen.

Die sonstigen Ausgaben umfasste die Bereitstellung von Fasern, Harzen, Materialien für Laboraufbauten und sonstige Verbrauchsmaterialien im Umfang von 9.634,62 €.

Die Ausgaben für Dienstreisen beliefen sich auf 481,84 €.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit

Die Projektarbeit wurde zielgerichtet durchgeführt, wobei frühe Forschungsergebnisse zur Fokussierung der anschließenden Untersuchungen genutzt wurden. Beispielsweise konnte durch die anfängliche Untersuchung zu Fördermöglichkeiten einer Harz-Faser-Suspension ein neues Verfahren dafür etabliert werden, welches die Schwächen der bisherigen Technologie weitgehend behebt. Somit konnte ein sicheres, teilautomatisiertes und reproduzierbares Verfahren zur nachträglichen Kurzfaserverstärkung stereolithografisch gefertigter Leichtbaustrukturen entwickelt werden und ein Versuchsstand dazu aufgebaut werden. Mit der Durchführung von Zugversuchen konnten die mechanischen Eigenschaften charakterisiert werden und Kennwerte für dieses Verfahren bereitgestellt werden. Durch die Herstellung des topologieoptimierten Seitenaußenspiegels konnte die Technologie erfolgreich an einem industrierelevanten Anwendungsfall demonstriert werden, wodurch das Potential dieser Technik verdeutlicht wird.

4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses

Durch die im Rahmen dieses Projekts getätigten Arbeiten konnte der Technologiereifegrad des nachträglichen Kurzfaserverstärkens stereolithografischer Leichtbaustrukturen deutlich vorangebracht werden. Durch die Herstellung des topologieoptimierten Seitenaußenspiegels konnte diese Technologie erstmals an einem industrierelevanten Anwendungsfall erfolgreich demonstriert werden.

— Ebenfalls konnte bereits die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit durch die erfolgreiche Antragsstellung des Anknüpfungsprojekts EMSIG (FKZ: 03LB2066C) umgesetzt werden. Innerhalb dieses neuen Forschungsprojekts wird die Technologie zur nachträglichen Faserverstärkung weiterentwickelt. Geplant sind die Materialien wie die Fasern und Harze für Hülle sowie Infiltration aufeinander abzustimmen, um so die mechanischen Eigenschaften weiter zu steigern. Zudem sollen Simulationsmodelle entwickelt werden, um die Faserausrichtung im Bauteil vorhersagen zu können. Dadurch sollen Designrichtlinien geschaffen werden und das Leichtbaupotenzial der Technologie weiter gesteigert werden.

— Das Projekt PRIMA hat somit einen wichtigen Beitrag zur längerfristigen Forschungsaktivität des IFB auf dem Gebiet des nachträglichen Faserverstärkens geschaffen, wodurch eine Promotionsstelle ermöglicht wurde und weitere in Folgeprojekten geschaffen werden sollen. Durch die Veröffentlichung auf dem Münchner Leichtbausymposium 2022 konnte das Forschungsnetzwerk im Bereich der additiven Fertigungsverfahren ausgeweitet werden. Dabei wurde auf die weiterentwickelte Technologie zur Kurzfaserverstärkung aufmerksam gemacht, welche auf großes Interesse durch das Fachpublikum aus dem Bereich der Verbundwerkstoffe gestoßen ist.

5. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen.

Auf wissenschaftlicher Ebene sind keine Fortschritte anderer Stellen auf diesem Gebiet bekannt geworden.



6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Am Ende der Projektlaufzeit wurde auf dem 19. Münchner Leichtbauseminar am 26.10.2022 Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt in Zusammenarbeit mit der CIKONI GmbH vorgetragen. Die Veröffentlichung im Tagungsband zum Seminar steht noch aus.

Der Beitrag lautet

Mesarosch, F.; Schlotthauer, T.; Middendorf, P.; Fink, F.; Kopp, F.; and Fuhr, J.-P.: *Insect Wing Inspired Design and Manufacturing of Multifunctional Automotive Applications Using Stereolithography and Subsequent Short Carbon Fiber Reinforcement*. (2022). Proceedings of the Munich Symposium on Lightweight Design 2022. Springer Berlin Heidelberg

Ein Belegexemplar ist dem Schlussbericht beigelegt.