

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Schlussbericht zum Teilvorhaben

**Sensorintegriertes Multifunktionswerkzeug
zur Prozessoptimierung (SiMP)**

im Verbundprojekt

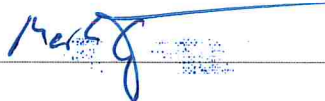
iFeZ - Intelligentes Formwerkzeug der Zukunft

LuFo V-2 : 06/2016 – 12/2019 : Förderkennzeichen 20W1521E

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 20W1521E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Titel	SiMP Schlussbericht
Förderprogramm	Luftfahrtforschungsprogramm LuFo V-2
Laufzeit	01.06.2016-31.12.2019
Zuwendungsempfänger	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Förderkennzeichen	20W1521E
Berichtersteller	Dipl.-Ing. Mark Opitz
	Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik Abteilung Faserverbundtechnologie Lilienthalplatz 7 38108 Braunschweig
Beitragende Autoren	D. Bertling, A. Kühn, N. Liebers, M. Opitz, J.Schmidt, S. Torstrick-von der Lieth, H. Ucan, M. Friedrich (T2-Composite)
Ort, Datum	Braunschweig, 25.08.2020

Unterschrift:



Stempel:

**Deutsches Zentrum für
Luft- und Raumfahrt e.V.**
Institut für Faserverbundleichtbau
und Adaptronik
Lilienthalplatz 7
D-38108 Braunschweig

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	5
1.1.	Aufgabenstellung (iFeZ-Gesamt und DLR-Teilthema: SiMP)	5
1.2.	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
1.2.1.	Wissenschaftlich-technischer Ausgangspunkt.....	6
1.2.2.	Weiterführende Literatur und Patente	10
1.2.3.	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	12
1.2.4.	Bisherige Projekte der Partner mit Themenbezug	14
1.2.5.	Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte.....	14
1.2.6.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	14
2.	Wissenschaftlich-technische Arbeiten und Ergebnisse	15
2.1.	MS-Übersicht.....	15
2.2.	HAP1.....	18
2.3.	HAP 2	22
2.4.	HAP 3	26
2.5.	HAP 4	41
2.6.	HAP 5	63
2.7.	F&E Ergebnisse von Seiten Dritter	74
	F&E-Arbeiten Dritter sind den jeweiligen Themen in den Halbjahresberichten zu entnehmen.	74
2.8.	Patente und Veröffentlichungen, Vorträge, Abschlussarbeiten, Konferenzen	74

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektszenarien und schematische Zuordnung der Partneraktivitäten	5
Abbildung 2: Projektstrukturplan mit Arbeitsanteilen (oker) des DLR-Teilvorhabens (SiMP) im Verbundvorhaben iFeZ.	13
Abbildung 3: Vorgehen zur Definition von Produkthanforderungen in HAP1.....	18
Abbildung 4: Steckbrief zum Bauteilqualitätskriterium "Fehlstellengehalt"	19
Abbildung 5: Anforderungen aus bauteilbezogener Prozessbeschreibung (Bottom-Up-Methode)	19
Abbildung 6: Korrelationsübersicht: Bauteilkriterien und Prozessmesstechnik	20
Abbildung 7: Partneranteile anhand relevanter Bauteilqualitätskriterien.....	20
Abbildung 8: Systematische Erarbeitung des DMU am Beispiel des Sensors „Aushärtegrad Matrix“: 1.) Aufgaben- und Eigenschaftsbeschreibung Sensor, 2.) Identifizierung der Position im FWZ; 3.) Detaillierung Einbau anhand Randbedingungen FWZ und Sensor	21
Abbildung 9: Virtuelles Abbild der Sensorintegration für das "intelligente Formwerkzeug der Zukunft"	22
Abbildung 10: GUI der Software zur Erfassung und Regelung des FWZ-Vakuum	23
Abbildung 11: Schema Thermalmanagement: Zentrale Erfassung alle Formwerkzeug-TE in zentraler Datenbank und Einbindung am Heißkanalregler zur Temperaturregelung der 8 Heizzonen am Formwerkzeug	23

Abbildung 12: Preformgenerierung am iFeZ-Formwerkzeug	24
Abbildung 13: Konzept zur kontinuierlichen Probenentnahme und Offlinemessung	26
Abbildung 14: Gegenüberstellung von konventionellen Ultraschallsensoren (rechts) zu den eingesetzten, angepassten Sensoren (links) zur schallbasierten Prozessüberwachung	27
Abbildung 15: Piezoelektrische Elemente zur Prozessüberwachung auf ein Formwerkzeug geklebt	27
Abbildung 16: Drei unterschiedliche Foliensensoren oben und ein Tool Mount Sensor unten.....	28
Abbildung 17: Aushärteverhalten von RTM 6 1K bei 120°C	28
Abbildung 18: Schnittansicht des Testwerkzeuges mit Sensorpositionen	29
Abbildung 19: Pontos Messsystem vor dem Laborofen mit Borosilikatscheibe	31
Abbildung 20: Probenkörper mit aufgeklebten Messpunkten und definierten Messungen im Laborofen	31
Abbildung 21: Optisch erfasste Dehnung der Probekörper in Abhängigkeit ihrer Temperatur.....	32
Abbildung 22: Prozessrefraktometer und Laborrefraktometer (Firma Krüss)	33
Abbildung 23: Misch- und Dosieranlage zur Herstellung einer Mischungsreihe.....	33
Abbildung 24: Adapter für Dosier- und Mischanlage	34
Abbildung 25: Getriebeeinstellung für EPIKOTE/EPIKURE	36
Abbildung 26: RTM6-2 Brechungsindex in Abhängigkeit der Temperatur	36
Abbildung 27: 3D-Darstellung Ersatzfunktion, RTM6-2.....	37
Abbildung 28: Rayleigh-Welle mit einer Eindringtiefe von 1λ	38
Abbildung 29: Interdigitalwandler.....	39
Abbildung 30: SAW-Sensor nach dem Verzögerungsleitungsprinzip mit Reflektoren zur Identifikation.....	39
Abbildung 31: Signalverlauf eines SAW-Temperatursensors nach dem Verzögerungsleitungsprinzip.....	40
Abbildung 32: SAW-Temperatursensor nach dem Resonatorprinzip	40
Abbildung 33: Frequenzverlauf eines SAW-Temperatursensors nach dem Resonatorprinzip	41
Abbildung 34: rückseitige Modifikation am Formwerkzeug zur Sensorintegration	42
Abbildung 35: Tabelle der geprüften Isolationsmaterialien für die dielektrische Aushärtegraderfassung (+ = sehr gut, O = mit Einschränkungen, - = ungeeignet)	43
Abbildung 36: Kabelführung und -fixierung im FWZ (links) und Zusammenführung am Anschlusspanel (rechts)	44
Abbildung 37: Temperaturfeld über der iFeZ-Spantgeometrie am oberen Formwerkzeug	44
Abbildung 38: Konzept zur Integration der Ultraschallsensoren in das bestehende Formwerkzeug (rot: gefräste Taschen; blau: Impuls-Echo-Methode zur Fließfrontüberwachung in den Flanschbereichen; grün: Impuls-Echo- und Transmissionsmethode zur Fließfront- und Aushärtungsüberwachung im Bereich des Webs)	45
Abbildung 39: Integration der Ultraschallsensoren und deren Kabel in die vorgesehenen Taschen im closed-mold-Formwerkzeug (links Übersicht über drei „Schnitte“ à drei Sensoren und rechts Detail eines „Schnitts“)	46
Abbildung 40: Beispiel eines „DuraAct“ Piezocomposites [INVENT GmbH].....	46
Abbildung 41: Positionen der Ultraschallsensoren im open mold Formwerkzeug [INVENT GmbH].....	47
Abbildung 42: Untersuchung auf Interferenz mit Vibrationsaktuatorik.....	48
Abbildung 43: Untersuchung auf Interferenz mit elektrischer Heizung	48
Abbildung 44: Ergebnisse der Fließfrontdetektion im open-mold-Formwerkzeug.....	49
Abbildung 45: Prototyp des Multiplexers für die Ultraschallsensorik	50
Abbildung 46: Im Schaltschrank eingebauter PiFeZ mit zwei Ultraschall-Multiplexermusername (jeweils 16 Kanäle, übereinander auf linker Seite) und dem angeschlossenen Pulser-Receiver.....	50
Abbildung 47: Unterteilung der Programmfunktionen in Microservices zur Einstellung und Erfassung der (Ultraschall-)Messdaten, der Übertragung und Speicherung in Datenbanken, Analyse und Visualisierung der Daten	51

Abbildung 48: Beispiel der Darstellung mit Grafana der ultraschallbasierten Fließfrontdetektion im Dashboard in Form von Ampeln und Diagrammen	52
Abbildung 49: Dashboard mit „plotly-Dash“ zur Einstellung der Messparameter und Visualisierung der Rohsignale	52
Abbildung 50: Standard-Angussadapter der EVO-Forschungsplattform am DLR-Standort Stade	53
Abbildung 51: Integrationskonzept des Prozessrefraktometers in Angussadapter	54
Abbildung 52: Konstruktion Angussadapter mit Prozessrefraktometer	55
Abbildung 53: geöffneter Angussadapter (1), Prozessrefraktometer (2), Prisma (3) ProfiNet-Kabel zur Anbindung an SPS.....	55
Abbildung 54: von links nach rechts: Durchflussbuchse mit angeschlossenen Schläuchen und Heizplatten; gläserner Drucktopf mit Harzfalle mit angeschlossenen Schläuchen der Vakuumanlage; Vakuumanlage	57
Abbildung 55: Grundsätzlicher Aufbau einer Messkette zur Temperaturmessung mit SAW-Sensoren	58
Abbildung 56: SAW-Reader der Firma SAW Components Dresden mit den Anschlussbezeichnungen	60
Abbildung 57: Hochtemperaturfeste Schlitzantenne	60
Abbildung 58: SAW-Sensor mit fest verbundenem Koaxialkabel für den Antennenanschluss	61
Abbildung 59: Das Messprogramm Start2Gage. Zu sehen ist der Frequenzverlauf eines Sensors bei Raumtemperatur.	61
Abbildung 60: Das Messprogramm Start2Gage. Zu sehen ist der Temperaturverlauf eines Sensors von einer Temperatur von 50°C auf 98°C.....	62
Abbildung 61: Integrierte Gesamtanlage Closed-Mould (Funktionsmuster: Bauteil Spant)	63
Abbildung 62: Mobile M2M-Kommunikationshardware	64
Abbildung 63: Versuchsreihen zur Dichtigkeitsprüfung am gesamten Formwerkzeug unter Temperatur.....	65
Abbildung 64: Tränkungsfortschritt zur Formwerkzeuginbetriebnahme am Funktionsmuster Spant	65
Abbildung 65: Vollständig getränktes Bauteil im Formwerkzeug (links) und Entformtes Bauteil (rechts)	66
Abbildung 66: Automatische Fließfront-Auswertung ermöglicht Visualisierung und einfache Prozesskontrolle für den Anwender mittels Ampel-Anzeige	67
Abbildung 67: Grafana Heatmap: Direkte Darstellung der Häufigkeitsverteilung gemessener Formwerkzeugtemperaturen während des Prozessschrittes: Tränkung	68
Abbildung 68: Klassische Darstellung zum Temperaturverlauf mit Teilprozessschritten sowie möglicher Anomalie im Tränkungsbereich (oben); Live-Darstellung des Temperaturverlaufs während der Fertigung mit markanten Temperaturabfällen für einzelne Thermoelemente (unten)	69
Abbildung 69: Rekonstruktion des Tränkungsverlaufs aus Temperaturzeitreihen und Thermoelementposition.....	69
Abbildung 70: Gemessener Matrixdruck während einer Infusion inklusive charakteristischem Schwingen bzw. Anomalie durch die Auflösung trockener Bereiche	71
Abbildung 71: Systemkomponenten des Resin ImpregNation SystEms (RINSE)	71
Abbildung 72: Front-End des Resin ImpregNation SystEms (RINSE) während der Tränkung.....	72
Abbildung 73: FVK-Fertigungsprozess mit charakteristischen Kurvenverläufen am sensorintegrierten Formwerkzeug.....	73

1. Einleitung

1.1. Aufgabenstellung (iFeZ-Gesamt und DLR-Teilthema: SiMP)

iFeZ-Gesamtvorhaben

Die Fertigung von kostengünstigen, hochpräzisen und leistungsfähigen Faserverbundbauteilen erfordert zukünftig intelligente Formwerkzeuge mit neuartigen Qualitätssicherungsmethoden, die auch für die inkrementelle Verbesserung bestehender Produktionslinien durch den Einsatz innovativer und modularer Prozesstechnik geeignet sind. Die Entwicklung moderner Industriezweige in Richtung des Konzepts der Industrie 4.0 bedeutet intelligent vernetzte Produktionsumgebungen, in die sich die zu erarbeitende Anlagentechnologie durch die Integration von simulationsgestützter und datenbankbasierter inline-Prozessgestaltung und Vorhersagemethodik für den endgültigen Bauteilstatus genau einpassen.

Im Fokus der Luftfahrtindustrie liegen Bauteile, die ein hohes Maß an Wirtschaftlichkeit und Qualität mit sich bringen. Bei der aktuellen Herstellung von Faserverbundstrukturen handelt es sich aber eher um eine erfahrungsbasierte Fertigung mit einem hohen Anteil manueller und damit variierender Prozessschritte. Ziel ist jedoch eine effiziente Serienfertigung durch eine objektive Prozessbetrachtung. Erst dadurch ist in Zukunft die Generierung eines kosteneffizienten, also robusten, beschleunigten und qualitätsgetriebenen, Produktionsprozess zu erreichen. Adressiert wird daher Anlagentechnologie zur Herstellung branchentypischer Bauteile und deren Anwendung an vorkommenden Szenarien in der Luftfahrt. Im Detail werden Grundfunktionen für die Schaffung eines robusten Fertigungsprozesses erarbeitet, kritischer Prozessparameter sensorisch erfasst und ausgewertet, die Prozessregelung zur aktiven Korrektur von erfassten Prozessabweichungen in und nach dem Prozess betrachtet sowie die erarbeiteten Technologien und Methoden an den Funktionsmustern Spant und Schale der Szenarien: open-mould und closed-mould Prozess bewertet. Als Regelungsgrößen werden Laminatqualität und geometrische Präzision in den Vordergrund gestellt. Darauf aufbauend erfolgt die Bestimmung der weiteren Prozessführung bzw. Vorhersage der endgültigen Bauteilqualität und Prozesseffizienz.

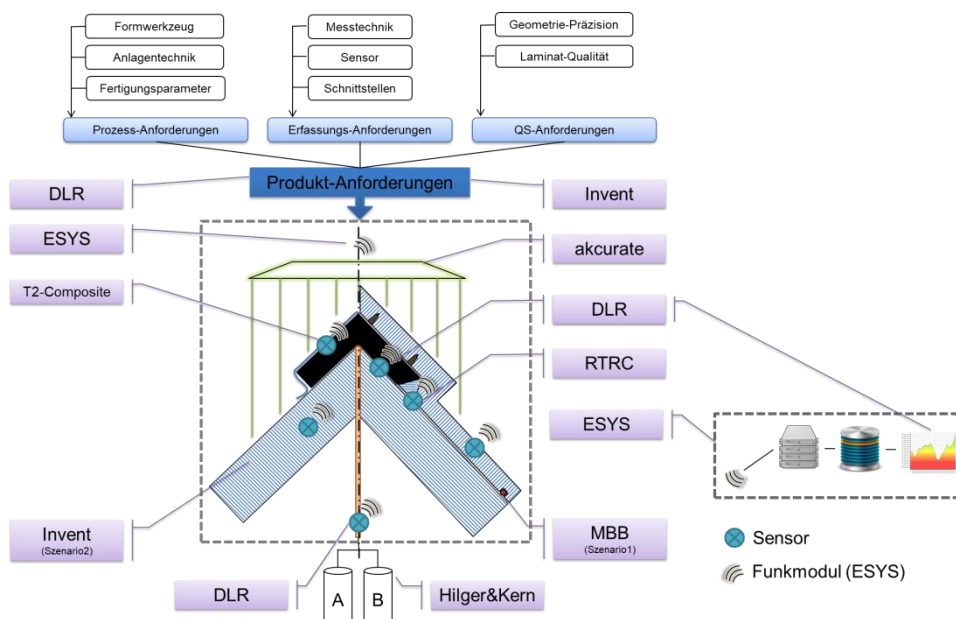


Abbildung 1: Projektszenarien und schematische Zuordnung der Partneraktivitäten

Die im vorliegenden Bericht dargestellten Ergebnisse umfassen den Projektzeitraum 01.06.2016 bis 31.12.2019 und resultieren aus der Zusammenarbeit des DLR mit den Partnern INVENT GmbH (Verbundführer), Akurate GmbH, ESYS GmbH, Hilger&Kern GmbH, RTRC GmbH und dem assoziierten Partner und Unterauftragnehmer Aumann AG (ehemals: MBB Fertigungstechnik) sowie T2-Composite.

Mit dem vorzeitigen Ausstieg des Projektpartners Hilger&Kern übernimmt das DLR in abgewandelter Form und reduziertem Umfang innerhalb einer Aufstockung die zusätzlichen und neu definierten Arbeiten, um die gemeinsamen Ziele erfolgreich abschließen zu können.

DLR-Teilvorhaben SIMP

Das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des DLR am Standort Braunschweig beschäftigt sich seit jeher intensiv mit der Fertigung von Strukturen aus kohlefaserverstärkten Kunststoffen. Die Schaffung von Fertigungsprozessen, Messvorrichtungen, Sensoren und die Analyse des Bauteilverhaltens - geometrisch und laminatspezifisch - mit Hilfe dieser Mittel bilden dabei einen Hauptschwerpunkt der Arbeiten im Institut. Die Aktivitäten im Teilvorhaben „Sensorintegriertes Multifunktionswerkzeug zur Prozessoptimierung“ (SIMP) konzentrieren sich auf Untersuchungen zur Sensierung der Fertigungsteilprozesse Tränkung und Aushärtung von Faserverbundbauteilen. Hierfür wird ein sensorintegriertes und multifunktionelles Formwerkzeug innerhalb einer intelligent vernetzten Produktionsumgebung umgesetzt. Im Wesentlichen beeinflussen die in den form- und materialbildenden Abschnitten auftretenden Prozessparameter die endgültigen Bauteileigenschaften. Im Fokus steht daher die Definition des Bauteils hinsichtlich seiner Qualitäts- und Effizienzkriterien auf Basis von Produkt- und Prozessanforderungen. Darauf aufbauend erfolgt die Identifikation von Prozessstreuungen durch die sensorische (online und inline) Erfassung am und im Formwerkzeug und die Entwicklung von Messtechnik zur Materialcharakterisierung im Prozess. Zur direkten Bereitstellung aller Daten erfolgt eine kabellose Übertragung. Durch das DLR bereits entwickelte Sensorik (z.B. Ultraschall) und kommerziell verfügbare Systeme werden hinsichtlich neuer Einsatzbereiche hin untersucht und modifiziert. Des Weiteren erfolgt die Konzeptionierung von Prozessgrundfunktionen im Bereich Formwerkzeuggestaltung und Formwerkzeugbeeinflussung. Die Teilaktivitäten werden anhand verschiedener Use-Cases erprobt und darauf aufbauend innerhalb des Vorhabens in zwei Szenarien an Funktionsmustern integriert, validiert und analysiert. Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen so im ersten Schritt eine Stabilisierung hinsichtlich robuster, d.h. reproduzierbarer Randbedingungen. Im Weiteren dann eine aktive Gestaltung durch ein direktes Zurückspielen in den laufenden Prozess und seinen Komponenten. Durch die Kopplung von Sensorik mit einer geeigneten Abformungshardware lassen sich so kostengünstige, hoch präzise und leistungsfähige Faserverbundkomponenten herstellen. Darauf aufbauend werden die gewonnenen Daten als realitätsnaher Input für FE-Simulationen der Bauteile und Prozesse dienen und damit die virtuelle Vorhersagegenauigkeit erhöhen. Mit Hilfe der aktiven Prozessgestaltung soll so eine nachhaltige Komponentenfertigung umgesetzt werden.

1.2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

1.2.1. Wissenschaftlich-technischer Ausgangspunkt

Aktuelle Studien aus Forschung und Industrie betrachten meist Einzelphänomene der FV-Fertigung. Untersuchungen dazu werden in Testvorrichtungen betrieben und spiegeln keine realitätsnahen Fertigungsprozesse oder Randbedingungen wieder. Der Einsatz im industriellen Umfeld wird nicht berücksichtigt und kann somit nicht bewertet werden. Obwohl sehr viele Technologien im Labormaßstab erprobt wurden sind sie vermutlich nicht für den industriellen Einsatz geeignet. Im Folgenden werden die vom DLR geplanten

Tätigkeiten in Bezug zum Stand der Technik und Wissenschaft gestellt. Dies beschränkt sich im Wesentlichen auf:

- Sicherstellen der Grundfunktion Dichtung: closed-mould Formwerkzeug

Im Wesentlichen werden heute 2-teilige Formwerkzeuge möglichst mit einer ebenen, nicht komplexen Trennebene konstruiert, um die Abdichtungsfunktion möglichst robust zu gewährleisten. Auf bewegliche Formwerkzeugteile wird im Großen und Ganzen verzichtet, da die Abdichtung dieser beweglichen Komponenten eine große Herausforderung ist und je nach Prozess und Materialkombination verschiedene Anforderungen stellt. Dadurch werden die Werkzeuge größer als notwendig konstruiert und viele integrale Bauteile können aufgrund der fehlenden Möglichkeit für Hinterschnitte nicht abgebildet werden. DLR-interne Untersuchungen zur Abdichtung von Formwerkzeugen mit komplex gekrümmter Trennebene innerhalb des Vorhabens EVo haben gegenüber klassischen Dichtkonzepten gleiche bzw. bessere Eigenschaften erreicht. Die Reduktion des Aufwandes zur FWZ-Gestaltung und zum Fertigungshandling wird mit mindestens 20% eingeschätzt. Nicht quantitativ abschätzbar, aber positiv wirkend ist das Potential auf Grund der erhöhten gestalterischen Freiheit im FWZ-Bau.

- Sicherstellung des Mischvorganges von Mehrkomponentensystemen

Im Bereich der Luftfahrt steht der Übergang von Einkomponentenharzen zu Mehrkomponenten-Systemen kurz vor der Einführung, da dies durch neue Regularien (insbesondere für den Transport gefährlicher Güter) gefordert wird. Derzeit werden in Disziplinen wie der Luftfahrtindustrie ausschließlich vorgemischte Systeme verarbeitet. Im Vergleich zu der Verarbeitung von Mehrkomponentensystemen verfügen diese über einige Nachteile. Dazu gehören sowohl technische als auch wirtschaftliche Aspekte. Bei vorgemischten Systemen muss darauf geachtet werden, dass eine ungeplante Reaktion vor der eigentlichen Verarbeitung verhindert wird. Nach dem Stand der Technik sind vielfältige Methoden und Vorrichtungen bekannt, die das Ziel haben, das Mischungsverhältnis von zwei oder mehreren Komponenten durch das Bereitstellen von konstanten Massen- oder Volumenströmen sicherzustellen, indem gravimetrisch der Verbrauch der einzelnen Komponenten in Abhängigkeit von der Zeit ermittelt wird. Eine andere bevorzugte Methode ist die zeitliche Erfassung von Volumenströmen, indem in die komponentenführenden Leitungen Durchflussmessgeräte eingebaut werden. Darüber hinaus verfügen heutige Injektionsanlagen über die Möglichkeit Abweichungen der ermittelten Massen- oder Volumenströme von vorgegebenen Sollwerten zu erkennen und in einem Regelkreis die Förderpumpen z. B. Zahnradpumpen, zu regeln, so dass das Mischungsverhältnis nur geringen Abweichungen unterliegt.

Als Mischeinheit haben sich statische, dynamische oder kombinierte Mischer etabliert. Die Mischeinheiten haben die Aufgabe zwei oder mehrere Komponenten homogen miteinander zu mischen. Die Homogenität der Mischung selbst wird allerdings nicht überwacht. Kommt es aufgrund des Materialverhaltens, Prozessvariationen oder ungeplanten Prozessfehlern zu einer Veränderung, beispielsweise in Form von Volumenstromänderungen, kann dies trotz eines global korrekten Verhältnisses der einzelnen Komponenten des Harzsystems zueinander zu einer inhomogenen Mischung im mikroskopischen Bereich führen. Diese hat lokale Aushärtungsunterschiede im späteren Bauteil zur Folge, was mit lokalen Schwachstellen einhergeht. Entgegen der Herstellerangaben stellt die Aufrechterhaltung des konstanten Mischungsverhältnisses eine große Herausforderung dar, wenn beide Komponenten mit unterschiedlichen Viskositäten in eine geschlossene Kavität mit verhältnismäßig kleinem Volumen injiziert werden sollen, die bereits zu ca. 60Vol% mit einem Faserhalbzeug (Preform) besetzt ist. Besonders die Anfahrtdynamik der Pumpen ist relevant und hat einen größeren Einfluss, je kleiner das zu injizierende Volumen ist. Bei Industriellen Serienanlagen in der Luftfahrt wird derzeit ein Zwischenschritt eingeführt. Um den logistischen Aufwand eines Reaktiven Harz-

systems zu verringern und die Haltbarkeit zu verlängern, wird das Harzsystem nicht gemischt, also zweikomponentig, geliefert und erst vor Ort über eine Dosieranlage vermischt. Diese Mischung kann nun analytisch z.B. durch HPLC Messung qualitätsgesichert werden, bevor sie für den Tränkungsprozess verwendet wird. Dieses Verfahren ist unter anderem beim DLR im Projekt DFP-Wingcover erfolgreich zum Einsatz gekommen.

- Ultraschallbasierte Prozessüberwachung der Injektion und Aushärtung

Ultraschallbasierte Prozessüberwachung besitzt den großen Vorteil, dass die Schallwellen die Formwerkzeugwand durchwandern können und so die Sensoren keinen direkten Kontakt zum Bauteil benötigen, im Gegenteil zu nahezu allen alternativen Sensortechnologien. Dadurch bleiben keine unerwünschten Abdrücke auf der Bauteiloberfläche und die Vakuumdichtheit der Formwerkzeuge wird nicht durch Bohrungen für die Sensorintegration beeinträchtigt. Mit Hilfe der ultraschallbasierten Prozessüberwachung können die wichtigsten qualitätsrelevanten Bauteilgrößen während des Injektions- und Aushärtungsvorgangs ermittelt werden. Diese sind die Position der Fließfront, die Laminatdicke, der Aushärtungsfortschritt, Gelier- und Verglasungspunkt und ferner Poren. Im Stand der Technik wurden und werden hierfür Ultraschallprüfköpfe verwendet, die mittels aufwendiger Adapter und Formwerkzeugmodifikationen und hohe Investitionen erfordern. Bei Untersuchungen im Projekt GrOnQA erwiesen sich die Prüfköpfe als nicht praxistauglich, da unter relevanten Prozessbedingungen die akustische Kopplung zwischen Prüfköpfen und Formwerkzeug versagte. Aus diesen Erkenntnissen wurden Sensoren entwickelt, die den Anforderungen industrieller Fertigung gerecht werden und relativ leicht – auch nachträglich – in Formwerkzeuge integriert werden können. Dabei werden piezoelektrische Keramiken direkt am Formwerkzeug angebracht. Die Sensoren sind zudem kostengünstig und können so in einer bisher nicht erreichbaren Anzahl verwendet werden. Die Vorarbeiten hierzu wurden im Projekt GrOnQA durch das Land Niedersachsen (Fördernummer W3-80029095) und im Projekt LOCOMACHS im FP7-Rahmenprogramm der Europäischen Kommission (Fördernummer 314003) gefördert.

- Aushärtegradüberwachung mittels Dielektrischer Systeme

Für die Aushärtegradüberwachung existieren dielektrische Systeme für den kommerziellen Einsatz. Problematisch ist jedoch die Integration in das Formwerkzeug und die Anbindung an den Lagenaufbau. Das Formwerkzeug erfordert Bohrungen, durch direkten Kontakt mit dem Bauteil ist eine Reinigung der Sensorik nach jedem gefertigten Bauteil notwendig. Des Weiteren ist der Einsatz mit leitfähigem Fasermaterial und Kunststoffen wie C-Faser nur sehr aufwendig oder gar nicht zu realisieren. Untersuchungen haben die grundsätzliche Eignung der Methode unter manufakturähnlichen Fertigungsbedingungen bestätigt. Die Übertragung in eine industrielle Anwendung mit der damit erforderlichen Abschirmung stehen noch aus. Außerdem fehlt eine Kalibrierung der Sensorik, so dass aktuell eine Aussage über die Verglasung, aber keine Verknüpfung mit dem tatsächlichen chemischen Vernetzungsgrad möglich ist. Durch eine passende Umsetzung der Technologie wäre außerdem eine Verfolgung von Bauteilen während eines Post-Cure-Prozesses denkbar. Nach dem aktuellen Stand ist die Sensorintegration in Werkzeuge bisher beschränkt auf wenige Varianten, die bspw. die Druckverhältnisse in der Kavität aufnehmen. Eine aktive Prozessüberwachung was den Vernetzungsgrad der Matrix, die homogene Ausbreitung der Matrix oder die Bauteilqualität am Ende des Härtezykluses angeht, sind nicht verfügbar. Im Rahmen des Vorhabens KOLIPRI wurde die Integration eines Aushärtesensors vorgenommen, um den Vernetzungsgrad im Prozess zu untersuchen und aufzunehmen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung fließen in iFeZ durch den Partner MBB mit ein.

- Deformation-Messung unter Fertigungsrandbedingungen im Prozess

Neben den charakteristischen Laminatgrößen ist die geometrische Bauteilgüte ein wichtiges Kriterium. Auf Grund der verwendeten Materialien und Prozesse ist eine Deformation des Bauteils unvermeidbar. Zur Vermeidung der Verformungen werden diese durch eine Modifikation des Formwerkzeuges vorgehalten. Dies allein ist aber nicht immer zielführend. Vor dem Hintergrund schwankender Prozess- und Materialparameter kann das Vorhalten nur in bestimmten Toleranzfeldern erfolgen. Die durch das DLR entwickelte PiDiR-Anlage ist in der Lage realitätsnahe Fertigungsrandbedingungen reproduzierbar abzubilden und somit den Einfluss schwankender Prozessgrößen auf die Bauteilgeometrie in closed-mould-Fertigungsverfahren zu bestimmen. Die Bestimmung des Verhaltens von im open-mould-Verfahren gefertigten Bauteilen beschränkt sich auf die optische und vergleichende Auswertung von Formwerkzeug und fertigem Bauteil. Ein Zusammenhang zwischen den auftretenden Fertigungsrandbedingungen und eventuellen Verformungen ist damit nicht herstellbar. Hierzu sollen in den Fertigungsprozess integrierbare Messmethoden Abhilfe schaffen, die eine berührungslose und kontinuierliche Analyse von Bauteil und Formwerkzeug ermöglichen.

- Sensordaten zur Überwachung von Dry-Spots

Im Rahmen des Verbundprojektes Sandwich2 / Vorhaben: VTP-InCoDa sind Konzepte zur quantitativen Prozessbewertung erarbeitet worden. Im Rahmen von InCoDa lag das Hauptaugenmerk hierbei auf der Charakterisierung des Verhaltens von „Dry Spots“ im Druckfeld eines LCM-Prozesses. In Vorversuchen konnte gezeigt werden, dass verschiedene Auflösungsmechanismen und -phänomene zum vollständigen Abbau trockener Stellen führen können. Darüber hinaus konnten in den Vorversuchen mehrere Parameter identifiziert werden, die das Auflösungsverhalten eines „Dry Spots“ beeinflussen. Dazu gehören beispielsweise: die Viskosität des Matrixsystems, der anliegende Druckgradient, der Faservolumengehalt und die Permeabilität des Fasermaterials. Auf Basis der gewonnenen Daten wird innerhalb von Sandwich2 / Vorhaben: VTP-InCoDa ein Modell zur Beschreibung des auflösenden Verhaltens von Dry-Spots entwickelt. Im Rahmen von „iFeZ“ soll das Hauptaugenmerk auf Konzepten zur Detektion des beschriebenen Phänomens liegen.

- Eignungsuntersuchung der Ultraschallmesstechnik als Inline-NDT

Die zerstörungsfreie Prüfung von Faserverbundbauteilen ist auf Grund der Komplexität der Materialien, der Größe der Bauteile und der Anforderungen an die Prüfverfahren aufwendig und damit teuer. Im Anschluss an die eigentliche Fertigung wird in einem weiteren Prozessschritt jedes Bauteil einzeln, vollflächig geprüft und bezüglich möglicher Schäden in Form von Signalabweichungen händisch ausgewertet. Häufig kommt hier die Thermographie oder Ultraschallprüfung zum Einsatz. Auf Grund der nachgeschalteten Untersuchung ist zum einen die Einflussnahme auf den Fehler im Prozess nicht gegeben und zum anderen eine Identifizierung der Ursache kaum bzw. nur sehr schwer möglich.

Zukünftige Prozessketten für Faserverbundbauteile benötigen neben einer automatisierten Fertigung eine in die Teilprozessschritte integrierte und angepasste Qualitätskontrolle. Durch dieses Vorgehen ist eine direkte Korrelation zwischen Fertigungsablauf und entstehenden Bauteileigenschaften möglich. Beispielhaft wurde hierzu am DLR (Augsburg) ein Prüfverfahren auf Basis der Thermografie für den Prozessschritt der Faserablage und des Preformings entwickelt. Bereits während der Ablage der Faserhalbzeuge in das Formwerkzeug bzw. vor Erstellen des Injektionsaufbaus kann eine Prüfung auf mögliche Schäden vorgenommen und Ausschuss identifiziert werden. Gleiches soll nun auch für den Prozessschritt der Tränkung und Aushärtung erfolgen. Somit kann zum einen eine Korrelation dieser Teilprozessschritte mit dem Bauteil erfolgen. Zum anderen liegt am Ende des Teilprozesses Aushärtung das Bauteil im gleichen Zustand wie bei der aktuell stattfindenden, nachgeschalteten NDT-Prüfung vor, was eine Einsparung des NDT-Prozessschrittes mit sich bringen würde.

Der Fokus des Projektverbundes liegt auf der Erarbeitung von Technologien und Methoden zur Bereitstellung von verbesserten Fertigungsprozessen bei Luftfahrtbauteilen durch die umfassende Verwendung der Inline-Sensorik. Durch diesen Projektfokus und ein Konsortium aus Luftfahrtzulieferern, Forschungs- und Technologiepartnern inklusive Kontraktoren wird ein reibungsloser Projektablauf durch zeitgerechtes Vorhandensein von benötigten Datengrundlagen ermöglicht, sowie eine diversifizierte und gleichzeitig branchenrelevante Projektbearbeitung und Verwertung sichergestellt. Das Vorhaben knüpft dabei an Arbeiten und Ergebnisse der unter Kapitel 1.2.4 *Bisherige Projekte der Partner mit Themenbezug* genannten Vorhaben und Projekte an.

1.2.2. Weiterführende Literatur und Patente

- Kleineberg, M.; Liebers, N.; Kühn, M. (2013): Interactive Manufacturing Process Parameter Control. In: M. Wiedemann und Michael Sinapius (Hg.): Adaptive, tolerant and efficient composite structures. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Research Topics in Aerospace), S. 363–372.
- Liebers, N. (2012): Effective and flexible ultrasound sensors for cure monitoring for industrial composite production. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. DLR. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt. Berlin, 2012.
- Liebers, N. (2014): Ultrasound – All-Round Tool for Composite Process Monitoring. International Conference on Carbon Composites. Arcachon, 13.05.2014.
- Liebers, N. (2014): In-Situ Laminatdickenmessung während der Infusion und Aushärtung von Faserverbundkunststoffen. DGZfP-Jahrestagung 2014. DGZfP. Potsdam, 26.05.2014.
- Liebers, N.; Stefaniak, D.; Kleineberg, M.; Wiedemann, M. (2013): SENSOR GUIDED CURE PROCESSES – A STUDY OF PRODUCTIVITY AND QUALITY OPTIMIZATION POTENTIAL. ICCM. DLR. Canadian Association for Composite Structures and Materials. Montreal, Canada, 08.08.2013. Online verfügbar unter iccm19.org.
- Liebers, N.; Ucan, H.; Kleineberg, M.; Wiedemann, M. (2012): Sensor and real-time-process-simulation guided autoclave process control for composite production. ICAS. Brisbane, Australia, 2012. Online verfügbar unter http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2012/ABSTRACTS/693.HTM.
- Liebers, N.; Ucan, H.; Kühn, M.; Kleineberg, M.; Meyer, M. (2011): Masterbox: new concept for a dynamic autoclave process control. In: CEAS Aeronaut J 2 (1-4), S. 223–230. DOI: 10.1007/s13272-011-0018-4.
- Stahl, A.; Nickel, J.; Kühn, M.; Liebers, N. (2010): Quality-controlled Manufacturing of Composite Structures. In: ATZ (Springer) 2010, 2010 (06).
- Friedrich, M.; Hilmer, P.; Opitz, M.: Paper: Sealing of closed-mould/RTM-toolings for highly complex CFRP-parts (im Veröffentlichungsprozess)
- Hindersmann, W. Exner, N. Liebers, M. Opitz, S. Torstrick, H. Ucan: FORSCHUNGSPLATTFORM FÜR ENDKONTURNAHE FASERVERBUNDBAUTEILE IM AUTOMATISIERTEN FERTIGUNGSPROZESS; DLRK Kongress 2012
- Opitz, Mark; Liebers, Nico; Kaps, Robert: Experiment-basierte Prozessgestaltung als Schlüssel zum bezahlbaren Leichtbau: Vortrag Faszination Leichtbau (2014)
- Wiedemann, M. et al: Endkonturgenaue, Spring-In kompensierte CFK-Bauteilfertigung in hoher Stückzahl mittels RTM Technologie im DLR Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie am Standort Stade; ATZ 2014
- Friedrich, M., Exner, W., Wietgrefe, M.: Sensitivity analysis of influencing factors on impregnation process of closed mould RTM. In: CEAS Aeronautical Journal, Springer, DOI: 10.1007/s13272-011-0032-6 (2011)

- Opitz, M.: Untersuchung von Messmethoden zur Bestimmung der Schwindung von Reaktionsharzsystemen. Diplomarbeit. DLR-Interner Bericht. DLR-IB 131-2012/51 (2012)
- Bülow, Christian und Torstrick, Sven: Sensorintegration in einen vollautomatisierten RTM-Prozess. Diplomarbeit. DLR-Interner Bericht. DLR-IB 131-2012/37 (2012)
- Schmidt, Thomas und Dutta, Somen: Automated thermography for production integrated NDT. DLR-Interner Bericht. DLR-IB 435-2012/36, 28 S. (2012)
- Patel, N ; Rohatgi, V ; Lee, L.J.: Void Formation and Removal in Liquid Composite Molding, 49th Annual Conference, Composite Institute, The Society of the Plastics Industry, 1994, S. 20 – 30
- Patel, N. ; Rohatgi, V. ; Lee, L. J.: Influence of processing and material variables on resin-fiber interface in liquid composite molding. In: Polymer Composites 14 (1993), April, Nr. 2, S. 161–172. – ISSN 0272–8397
- Feldgoise, S. ; Foley, M. ; Martin, D. ; Bohan, J.: The effect of microvoid content on composite shear strength. Kiamesha Lake, NY : International SAMPE Technical Conference, 23 rd, 1991, S. 259–273
- Ghiorse, S. R.: Effect of Void Content of the Mechanical Properties of Carbon/Epoxy Laminates. In: SAMPE Quarterly 24 (1993), S. 54–59
- Judd, N. C. ; Wright, W. W.: Voids and their effects on the mechanical properties of composites - an appraisal. In: SAMPE J 14 (1978), S. 10–14
- Park, CH ; Lebel, Aurélie ; Saouab, Abdelghani: Modeling and simulation of voids and saturation in liquid composite molding processes. In: Composites Part A 42 (2011), Juni, Nr. 6, S. 658–668. – ISSN 1359835X
- Bernhard, Frank: Handbuch der technischen Temperaturmessung, Springer Vieweg Berlin Heidelberg (2014)

Vorhandene Patente DLR:

- Bölke, J.; Kühn, M.; Liebers, N.; Meyer, M.; Ucan, H. (2011): Steuerung eines Autoklaven-Fertigungsprozesses. Angemeldet durch DLR am 26.09.2011. Anmelde-nr: 102011053921. Veröffentlichungsnr: DE102011053921A1.
- Liebers, N. (2013): Verfahren zur Herstellung eines Faserverbundbauteils. Angemeldet durch DLR am 26.11.2013. Anmelde-nr: 10 2013 113 063.1. Veröffentlichungsnr: DE102013113063A1.
- Liebers, N.; Hindersmann, A.; Kühn, M. (2010): Ultraschallmessverfahren und -vorrichtung, insbesondere zur Aushärtungsüberwachung und Laminatdickenbestimmung bei der Faserverbundteilfertigung (Ultrasound measuring method for e.g. monitoring hardening of laminate of fiber composite part during manufacturing part, involves coupling ultrasound signal in object through advancing body below angle to surface normal of coupling surface). Angemeldet durch DLR am 05.10.2010. Anmelde-nr: 102010037981. Veröffentlichungsnr: DE102010037981A1.
- Liebers, N.; Schadow, F. (2012): Verfahren und Vorrichtung zur synchronen Bestimmung der rheologischen und akustischen Eigenschaften. Angemeldet durch DLR am 10.09.2012. Anmelde-nr: 102012108401. Veröffentlichungsnr: DE102012108401A1.
- Liebers, N.; Schadow, F.; Raddatz, F. (2012): Überwachung eines Herstellungsprozesses. Angemeldet durch DLR am 27.04.2012. Anmelde-nr: 102012103753. Veröffentlichungsnr: DE102012103753A1.
- Friedrich, M.; Hilmer, P.: Verfahren zur Fertigung von Bauteilen in einem druckdichten Formwerkzeug und druckdichtes Formwerkzeug dafür; Veröffentlichungsnr: DE 10 2010 038 115.2-16, eingereicht: EP 11 181 900.9

1.2.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Vorhabenumfang teilt sich auf fünf Hauptarbeitspakete (HAP) auf. Innerhalb dieser bildet es zwei Anwendungsszenarien ab. Für flächige Luftfahrtstrukturen finden Open Mould-Formwerkzeuge Anwendung wohingegen komplex gekrümmte Strukturen in Closed Mould-Formwerkzeugen hergestellt werden.

Im Rahmen des HAP1 werden die Produkt-Anforderungen definiert, welche sich aus einer Szenarien- und bauteilbezogenen Prozessbeschreibung ergeben. Die daraus abgeleiteten Bauteilqualitätskriterien fließen in das Lastenheft zur Sensorspezifikation ein. Den Abschluss innerhalb HAP1 bildet der Aufbau einer Virtualisierungsumgebung (DMU – Digital Mock-Up) für das intelligente Formwerkzeug inkl. Sensorik in Form eines CAD-Modells als Basis für die Identifikation von Randbedingungen und Schnittstellen der von den Projektpartnern im Vorhaben eingebrachten Technologien. Durch diese offene Kommunikation wird das Projektrisiko von parallel laufenden Arbeiten in HAP2 und HAP3 stark minimiert und durch die Beistellung von Input zum DMU in regelmäßigen Abständen kontrolliert.

Im HAP2 werden vorhandene Grundfunktionen zur Prozessrealisierung überprüft. Dies beinhaltet die Sicherstellung der Dichtigkeit des closed-mould Formwerkzeugs anhand der in AP1.3 spezifizierten Anforderungen sowie die Ist-Zustands-Bestimmung der Mischgüte an Laborproben von Mehrkomponentenharzsystemen.

Das HAP3 beinhaltet sechs Themenschwerpunkte der Sensorik-Konzeptionierung und -entwicklung zum Online-Monitoring kritischer Prozessgrößen nach HAP1. Im AP3.1.1 werden hierzu Ultraschallsensoren, deren Integration und Auswertung bezüglich einer Industrialisierung und gesteigerter Aussagefähigkeit weiter entwickelt. Neben der Sensorintegration selbst wird die Standfestigkeit und Anschlussfähigkeit der Kabel- und Steckverbindungen betrachtet. Seitens der Auswertung werden Sensoranordnungen und passende Algorithmen zur Signalauswertung identifiziert. Die Kombination mit anderen im FWZ befindlichen Sensoren soll die Betrachtung von Prozess und Bauteil über eine punktuelle Erfassung hinaus ermöglichen, indem Fließgeschwindigkeit und -richtung abgeschätzt werden. In AP3.1.2 wird ein Sensorsystem aus Drucksensoren zur Überwachung von Dry-Spots erprobt und mit einer FE-Prozesssimulation für Fließvorgänge kombiniert. Die Betrachtung der kontinuierlichen Überwachung des Aushärtegrades zur Qualitätssicherung der Faserverbundbauteile erfolgt in AP3.1.4 durch dielektrische Sensoren mit dem Ziel den Harzzustand online zu erfassen und eine bauteilspezifische Prozessoptimierung zu ermöglichen. Neben den Harzcharakteristika spielt die geometrische Bauteilgüte eine ebenso große Rolle. In AP3.1.5 wird hierzu mit den Projektpartnern eine Messmethodik zur Erfassung eines globalen Verformungsbildes von Werkzeugen und Faserverbundbauteilen während des Prozesses unter realen Fertigungsrandbedingungen erarbeitet. In AP3.1.6 wird die Eignung der Ultraschallmesstechnik als Inline-NDT eruiert. Das Ziel des AP 3.4 ist die Auswahl bzw. die Entwicklung eines Messsystems, das sich in die bestehende Anlagentechnik aus dem System zwischen Injektionsanlage und Formwerkzeug integrieren lässt und erstmals eine Auswertung des Durchmischungsverhaltens eines Mehrkomponentenharzsystems während eines Injektionsprozesses zulässt.

Die in HAP2 und HAP3 entwickelten, erprobten bzw. erweiterten Messsysteme, Sensoren und Grundfunktionen des Formwerkzeugs werden dann in HAP4 übertragen und an die Funktionsmuster der beiden Szenarien angepasst. Hierfür werden die verifizierten Sensoriken an geeigneter Stelle des Formwerkzeugs oder zwischen Formwerkzeug und Anlage in Zusammenarbeit mit den Partnern konstruiert und am Formwerkzeug-Anlageninterface appliziert. Der Datenaustausch zwischen Fertigungsanlage und dem Formwerkzeug wird bezüglich der Schnittstellen und Gesamtkommunikation gemeinsam mit den Partnern spezifiziert und umgesetzt.

In HAP5 erfolgt die hard- und softwareseitige Implementierung der Grundfunktionen und Systeme in die Gesamtanlage im industriellen Umfeld. Nach der Anlageninbetriebnahme werden Versuchsdurchführung bzgl. der Funktionsfähigkeit der Systeme gefahren und darauf aufbauend die Funktionsmuster Schale und Spant unter industriellen Fertigungsrandbedingungen gefertigt. Zur Erfassung aller Sensordaten gehört auch

die parallele Aufnahme der Prozess- und Anlagengrößen. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der synchronen Übertragung und -erfassung aller Messdaten auf einem zentralen Leitstand. Dieser übernimmt gleichzeitig die Auswertung und visuelle Bereitstellung aller direkten und indirekten Größen. Abschließend erfolgt die Auswertung und Analyse der gesammelten Daten. Darüber hinaus erfolgt die Bewertung anhand der in HAP1 definierten Spezifikationen. Hieraus kann das Potential bzgl. einer möglichen Prozess-Verbesserung und/oder Produktlinienintegration abgeleitet werden. Das Aufzeigen zukünftiger Arbeitsfelder und Forschungsthemen schließen das Projekt ab.

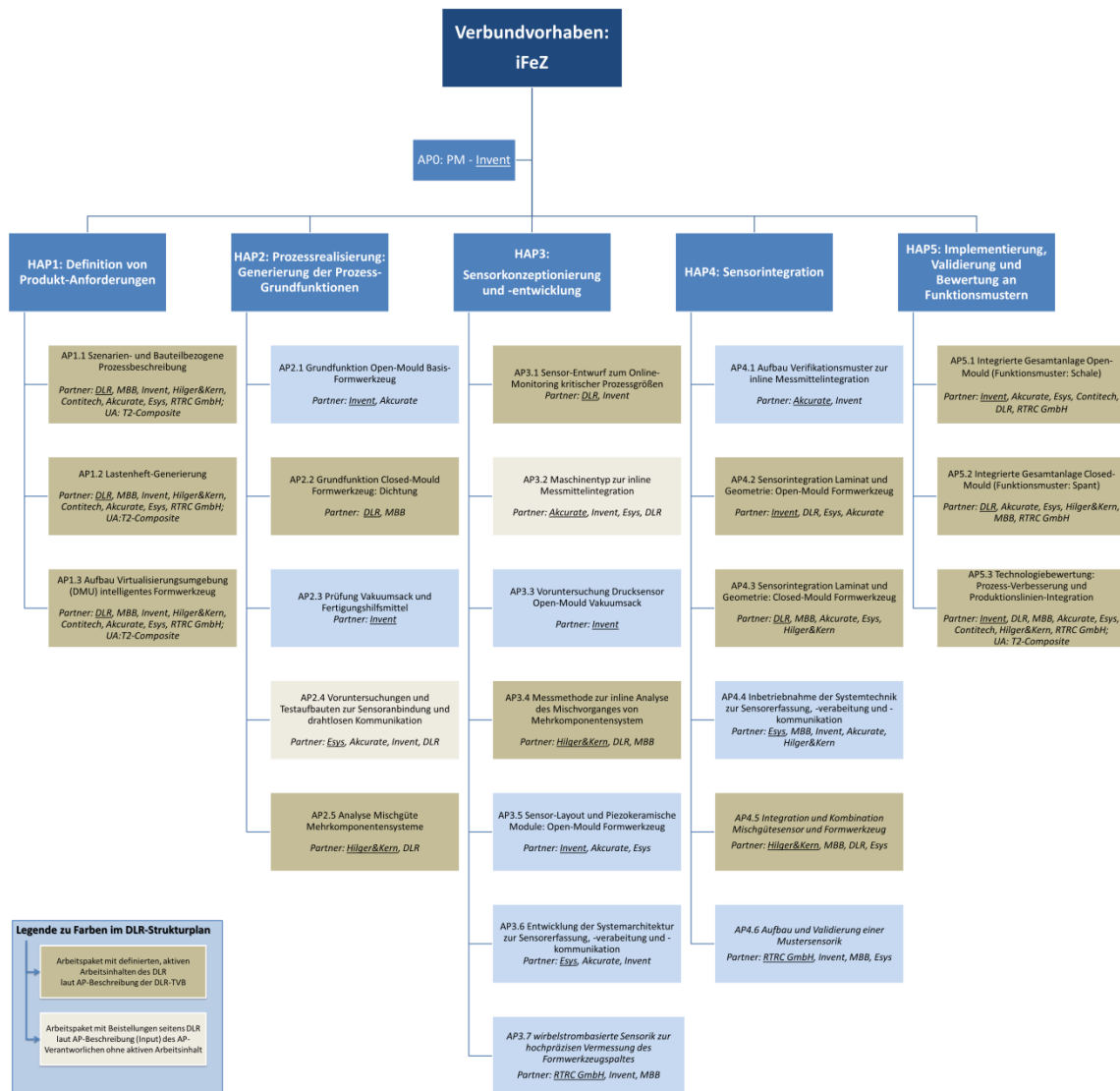


Abbildung 2: Projektstrukturplan mit Arbeitsanteilen (oker) des DLR-Teilvorhabens (SiMP) im Verbundvorhaben iFeZ.

1.2.4. Bisherige Projekte der Partner mit Themenbezug

- CompTAB (LuFoIV): Composite Toolkette und Erweiterung auf As Built (im Verbundvorhaben: CEP)
- LAWIPRO/LAWOP (LuFoIV): Entwicklung und Simulation eines laminaren Flügelabschnitts
- MoMiTex: Modulare Mikroelektronik / Sensorik auf textilen Verdrahtungsträgern zur Fertigung intelligenter Faserverbundstrukturen
- KOLIPRI (LuFoIV-4): Konzipierung, Aufbau, Inbetriebnahme und Test einer automatisierten Prozesskette für CFK-Strukturprofile
- VTP-InCoDa (LuFoIV-4): Hochindustrialisierte Einzelteilfertigung einer Schaumkernverbundschale in Infusionstechnologie (im Verbundvorhaben: Sandwich²)
- LOCOMACHS (EU – FP7): LOW COst Manufacturing and Assembly of Composite and Hybrid Structures
- ECOMISE (EU – FP7): Enabling Next Generation Composite Manufacturing by In-Situ Structural Evaluation and Process Adjustment
- RoCk (LuFoIV-4): Robuste CFK-Gesamtprozesskette
- EVo (Landesförderung Niedersachsen): Endkonturnahe Volumenbauteile im RTM-Verfahren
- OnQa (Landesförderung Niedersachsen): Online Qualitätssicherung im Autoklav industriell hergestellter Faserverbundstrukturen
- LoKosT (LuFoV): Effizienzsteigerung bei der Fertigung von FVK-Strukturen mit modularen Formwerkzeugen und flexibel, anpassbaren Formwerkzeugen (SmartTooling mit MultiTool und FlexTool)

1.2.5. Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte

- Verbundprojekt KOLIPRI: Formwerkzeugbeistellung durch MBB Fertigungstechnik
- Die ultraschallbasierte Prozessüberwachung wurde in den Projekten OnQA (gefördert durch das Land Niedersachsen, FKZ W3-80029095) und LOCOMACHS (gefördert durch die Europäische Union, FKZ FP7-314003) entwickelt.

1.2.6. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb des Vorhabens wurden Unteraufträge an die Firmen Aumann (ehemals MBB Fertigungstechnik) sowie Efficient Engineering (T2-Compoiste) vergeben.

2. Wissenschaftlich-technische Arbeiten und Ergebnisse

2.1. MS-Übersicht

Die folgende Tabelle gibt eine zusammenfassende Übersicht der im Projekt geplanten Ziele anhand vordefinierter Meilensteine und stellt diese den erreichten Ergebnissen gegenüber. Konkrete Details sind den Ergebnisberichten der einzelnen AP-Beschreibungen sowie den Zwischenberichten des DLR und der Verbundpartner zu entnehmen.

Vorgegebenes Ziel		Erreichtes Ergebnis
HAP1	Definition von Produkt-Anforderung	
MS1	Produkt-Anforderungskatalog und Digital-Mock-Up intelligentes FWZ	Lastenheft mit Anforderungen der Szenarien- und Bauteilbezogenen Prozessbeschreibung erstellt; 5 relevante Bauteilqualitätskriterien FVK wurden abgeleitet; DMU „intelligentes FWZ“ zur virtuellen Projekt-Begleitung erstellt; Sensorikbaukasten entworfen
HAP2	Prozessrealisierung: Generierung der Prozess-Grundfunktionen	
MS2.2	Gestaltungsrichtlinien für Dichtflächen in Closed-Mould RTM-Formwerkzeugen erstellt	Erarbeitung der Grundfunktion: Dichtung für Formwerkzeug und zu integrierender Sensorik; Definition der Grenzwerte und des Prozesses Dichtigkeitstest anhand industrieller Luftfahrtspezifikation; Überarbeitung des KOLIPRI-FWZ für ClosedMould-Szenario
MS2.5	Definition Grundlagen Sensorauslegung Mischgüte Mehrkomponentensysteme	Lastenheft mit Anforderungen zu MV und Mischgüte sowie Messbereich erstellt und mit Stand der Technik abgeglichen
HAP3	Sensorkonzeptionierung und -entwicklung	
AP3.1	Sensor-Entwurf zum Online-Monitoring kritischer Prozessgrößen	

MS3.1	Einsatz mittels Funktionsmuster nachgewiesen	industrialisierbare Sensorintegration der US-Prozessüberwachung erarbeitet und Impuls-Echo-Methode zur Laufzeitmessung umgesetzt sowie Anpassung der Messsoftware zur direkten Datenverarbeitung; Praktische Umsetzung des Drucksensor-Konzeptes zur Detektion der Entstehung und Auflösung von Einschlüssen (Dry-Spots); Nachweis der Fähigkeit, den Aushärtegrad mit Hilfe dielektrischer Sensoren in einem realitätsnahen Laminataufbau zu erfassen sowie Erstellung von Kalibrierdaten; Messmethode zur Inline Bestimmung der Mischungsqualität im FWZ evaluiert; Einfluss der Temperierung und Temperaturerfassung auf das FWZ-Thermalmanagement sowie deren Bauteilinteraktion
HAP4 Sensorintegration zur Prozess-Regelung und -Bewertung		
AP4.2	Sensorintegration Laminat und Geometrie: Open-Mould Formwerkzeug	
MS4.2	Bereitstellung funktionsfähiger und angepasster Systeme zur Gesamtanlagenimplementierung	Integration der Sensorsysteme: Ultraschall, Dielektrik und Druck ins FWZ für das Open-Mould-Funktionsmuster; Verknüpfung der Messsysteme über zentrale Schnittstelle: PiFeZ umgesetzt; Aufbau einer Open-Source-Kommunikationsschnittstelle mittels MQTT und -Visualisierung über Grafana-Dashboard
AP4.3	Sensorintegration Laminat und Geometrie: Closed-Mould Formwerkzeug	
MS4.3	Bereitstellung funktionsfähiger und angepasster Systeme zur Gesamtanlagenimplementierung	Integration der Sensorsysteme: Ultraschall, Dielektrik, Druck, Wirbelstrom sowie Thermoelement ins FWZ für das Closed-Mould-Funktionsmuster; Verknüpfung der Messsysteme über zentrale Schnittstelle Datenkonzentratoren: PiFeZ umgesetzt; Aufbau einer Open-Source-Kommunikationsschnittstelle mittels MQTT und -Visualisierung über Grafana-Dashboard
HAP5 Implementierung und Validierung der Einzel-Prozess-Ansätze aus HAP2 bis HAP4 an Funktionsmustern		
AP5.1	Sensorgestützte Prozess-Betrachtung des Fertigungsprozesses: Open-Mould auf Industrieneiveau	

MS5.1	Bauteilfertigung Schale inklusive Prozess-Monitoring anhand entwickelter Messmethoden	Erfolgreiche sensorische Begleitung der Open-Mould-Fertigungsversuche am Funktionsmuster Schale; Bereitstellung kontinuierlich erfasster und aufbereiteter (online) Daten aus dem Prozess (inline); Identifikation möglicher Störgrößen seitens Prozessrandbedingungen sowie Messsystem-Interaktion
AP5.2	Integrierte Gesamtanlage Closed-Mould und Sensorgestützte Prozess-Betrachtung des Fertigungsprozesses: Closed-Mould auf Industrieneiveau	
MS5.2	Gesamtanlage Closed-Mould funktionsfähig (FWZ, Sensorik, Anlagentechnik)	Erfolgreiche hardwareseitige Implementierung des sensorintegrierten Formwerkzeugs in die Presseninfrastruktur sowie Anbindung der Infusionsanlage; Umsetzung der digitalen Verknüpfung aller Systeme in einem Maschinennetz auf Basis einer Service-Orientierten-Architektur
MS5.2	Bauteilfertigung Spant inklusive Prozess-Monitoring anhand entwickelter Messmethoden	Durchführung von fertigungsbegleitenden Messungen am Funktionsmuster Spant mit sensorgestützter Betrachtung des Einflusses von Fertigungsrandbedingungen auf eine robuste Prozessgestaltung und Aufnahme sensoridentifizierter Prozessstreuungen
AP5.3	Technologiebewertung hinsichtlich Potential: Prozess-Verbesserung und Produktionslinienintegration	
MS5.3	Methoden zur robusten Prozessgestaltung anhand sensoridentifizierter Prozesssteuerung	Aufbau einer sensorgestützten Prozesssimulation (RINSE) zur online-Vorhersage und Analyse des Fließbildes während des Tränkungsprozesses; Implementierung eines Algorithmus zur automatischen Datenauswertung und Prozessbewertung hinsichtlich Fehlerstellen im Bauteil; Darstellung des Mehrwertes aller integrierter Sensoriken für die relevanten Bauteilqualitätskriterien hinsichtlich einem früheren Messzeitpunkt, verbesserter Genauigkeit sowie Herausforderungen im industriellen Umfeld.

2.2. HAP1

Hauptziel in HAP1 war die Definition von Produkt-Anforderungen im Bereich FVK, um eine Abstimmung der verschiedenen Fachbereiche aller Partner zu ermöglichen. Hierzu gehörten die Schaffung einer Szenarien- und Bauteilbezogenen Prozessbeschreibung (AP1.1) und die Lastenheft-Generierung (AP1.2) in Abstimmung mit allen Projektpartnern. Begleitet wurde dies durch den Aufbau einer DMU-Umgebung (AP1.3). Abbildung 1 zeigt das Vorgehen schematisch zusammengefasst. Die Kommunikation und Dokumentation der Arbeiten erfolgt dabei über eine durch das DLR bereitgestellte Teamsite, welche auch die Plattform des DMU und Ticketsystems darstellt.

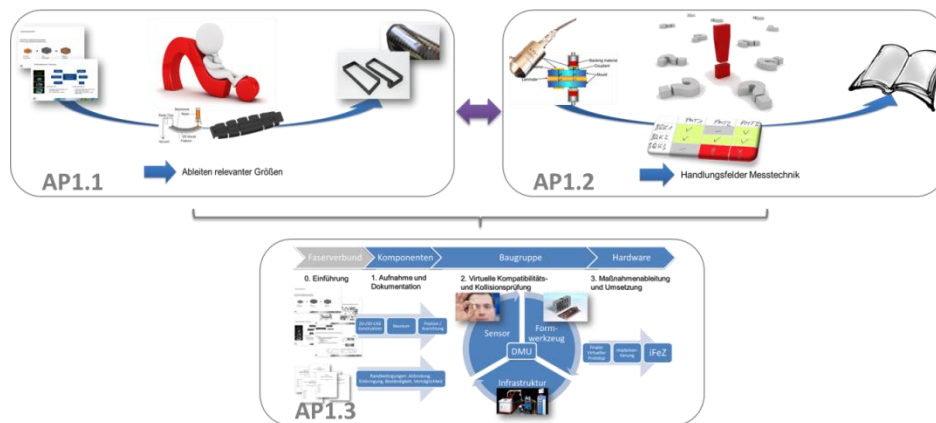


Abbildung 3: Vorgehen zur Definition von Produktanforderungen in HAP1

Die direkte Prozessgestaltung auf Basis von sensorisch im Prozess erfassten Daten erfordert im Vorfeld die Festlegung von Bauteilqualitätskriterien. Zur Identifikation und Beschreibung erstellte das DLR einen Fragebogen für den Anwendungsbereich Luftfahrt und CFK. Die Befragung hatte zum Ziel neben der relevanten Bauteileigenschaft selbst, deren Beschreibbarkeit, Größenordnung und Wechselwirkung mit anderen Parametern unabhängig zu erfassen. Der Kreis der Befragten setzte sich aus Projektpartnern, Wissenschaftlern (DLR-intern) und der fertigenden Industrie zusammen. Bei der Auswertung von 60 Formularen konnten 10 relevante Eigenschaften auf Grund der Häufigkeit der Nennung identifiziert werden. Des Weiteren konnten Hilfsmittel und Zeitpunkt der Identifikation sowie Einflussparameter benannt werden. Für jede Eigenschaft ließ sich daraus ein detaillierter Steckbrief „Bauteilqualitätskriterium“ (BQK) erstellen. Beispielhaft zeigt dies Abbildung 4 für die Eigenschaft „Fehlstellengehalt“.

1. Fehlstellengehalt

Beschreibung:

- Anzahl, Form und Größe von Fehlstellen, wie Poren, Luft- bzw. Fremdstoffeinschlüsse innerhalb eines Laminates

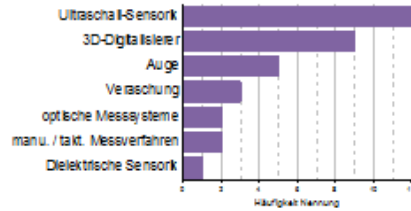


- Interessierter Projektpartner/Person?

Messzeitpunkt:



Hilfsmittel:



Einflussparameter:

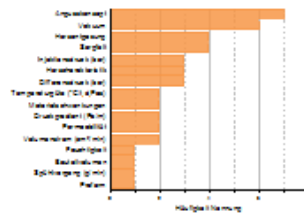


Abbildung 4: Steckbrief zum Bauteilqualitätskriterium "Fehlstellengehalt"

Aus der Befragung selbst konnte jedoch keine schlüssige werthinterlegte Definition der Eigenschaften bzgl. Größenordnung, Genauigkeit, Messbereich oder Auflösung abgeleitet werden. Es wurden daher Arbeitsgruppen gebildet, um passende Größen der 6 relevantesten Kriterien in Bezug zu den Szenarien und Bauteilen festzulegen. Auf Basis einer bauteilbezogenen Prozessbeschreibung mittels Bottom-Up-Methode wurden die Anforderungen eines sensorintegrierten Formwerkzeugs für die beiden Fertigungsszenarien zusammengetragen. Es erfolgte eine Vorstellung der Bauteile inkl. der notwendigen technischen Daten und eine schrittweise chronologische und werthinterlegte Detailbeschreibung der Fertigungsprozesse von Faserhalbzeug bis zum einbaufertigen Bauteil. Hieraus erfolgte durch die Projektpartner die Ableitung Ihrer technischen Spezifikationen.

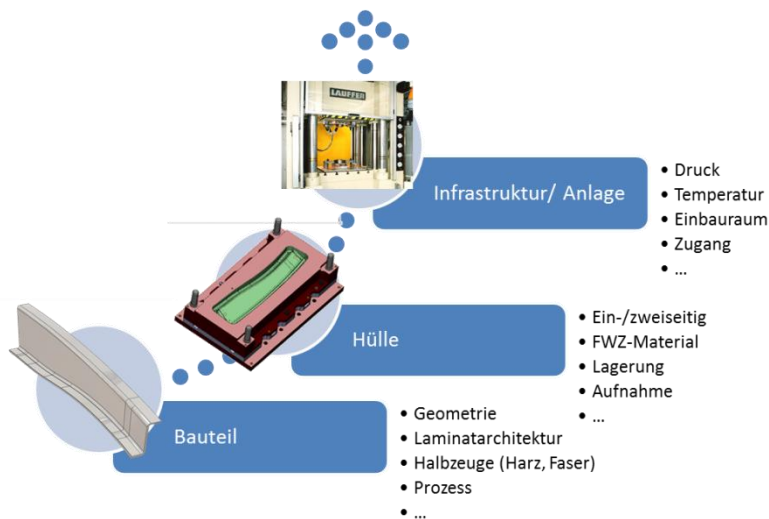


Abbildung 5: Anforderungen aus bauteilbezogener Prozessbeschreibung (Bottom-Up-Methode)

Zur Erstellung des Lastenheftes wurden die BQK dem Stand der Technik zur Prozessmesstechnik gegenübergestellt und daraus die erforderlichen Bedarfe identifiziert. Die Eignungsbewertung erfolgte über ein Notensystem: 0 = ungeeignet; 4 = sehr gut geeignet. Hieraus konnte in enger Abstimmung mit den Partnern abgeleitet werden, wo aktueller Bedarf bzgl. Neuentwicklungen liegt bzw. Möglichkeiten zur Optimierung

der Messtechnik und Datenverarbeitung bestehen, um so einen einfachen und kostengünstigeren Industrieinsatz zu ermöglichen. Abbildung 6 stellt die Korrelationsübersicht: Bauteilkriterien / Einflussgrößen und Prozessmesstechnik dar.

Bauteil- und Hilfsparameter	Aushärtegrad	Gelieren	Glasübergang	Dicke	Faservolumen gehalt	Faserorien tierung	Temperatur	Druck	Poren	Fließfront
Sensoren										
Thermoelement	1	0	0	0	0	0	3	0	0	2
Widerstandsthermometer	1	0	0	0	0	0	4	0	0	2
Drucksensor							2	4		3
Ultraschall	3	4	3	3	3	0	Werkzeug: 3	0	1	4
Ultraschall: Array (bildgebend)	3	4	3	3	3	0	3	0	3 (?)	4
Dielektrische Sensoren	3		3							3
Widerstandssensoren (Harzwiderstand à la Synthesites)	3		3							3
Fibre Bragg							3			3
Bewertungsmaßstab: 0 = ungeeignet ... 4 = sehr gut geeignet										

Abbildung 6: Korrelationsübersicht: Bauteilkriterien und Prozessmesstechnik

Hieraus ebenfalls abgeleitet wurden die Arbeitsanteile der Verbundpartner im Vorhaben iFeZ, die gleichzeitig deren Kompetenzen widerspiegeln.

Nr	Kriterium	H&K	RTRC	Akurate	DLR	Invent	Esys
1	Fehlstellengehalt				X	X	systematische, übergreifende Datenverknüpfung
2	Formtreue		X	X	X	X	
3	FVG		X		X	X	
4	Harzzustand	X			X	X	
5	Oberflächengüte			X			
6	Faserwinkel		X				
	Szenario: Open-Mould (mbb)	X		X	X	X	
	Szenario: Closed-Mould (Invent)	X	X	X	X		

Abbildung 7: Partneranteile anhand relevanter Bauteilqualitätskriterien

Zur gemeinsamen Zusammenarbeit wurde ein Digital-Mock-Up des Closed-Mould-Szenarios auf Basis des durch den Projektpartner MBB bereitgestellten KOLIPRI-Formwerkzeugs aufgebaut. Grundlage hierfür stellte die Erfassung der Anforderungen der einzelnen Komponenten an ihre Umgebung und das Formwerkzeug und die Dokumentation der hieraus abgeleiteten Schnittstellen. Diese Version des DMUs stellte die Berücksichtigung der definierten Anforderungen der Komponenten sicher, sorgte für deren Kompatibilität bzw. half beim Identifizieren von notwendigem Abstimmungsbedarf.

Im weiteren Projektverlauf erfolgte zur Aufrechterhaltung dieser Kompatibilität eine fortwährende Detailierung und Anpassung an die im Projekt entstanden Entwicklungsstufen der einzelnen Komponenten.

In der ersten Anwendung konnte auf Basis der frühzeitigen und systematischen Datensammlung mittels DMU für das closed-mould-Szenario Herausforderungen für die Sensorintegration am Formwerkzeug identifiziert werden. Abbildung 8 stellt beispielhaft für den Sensor „Aushärtegrad Matrix“ das Vorgehen dar.

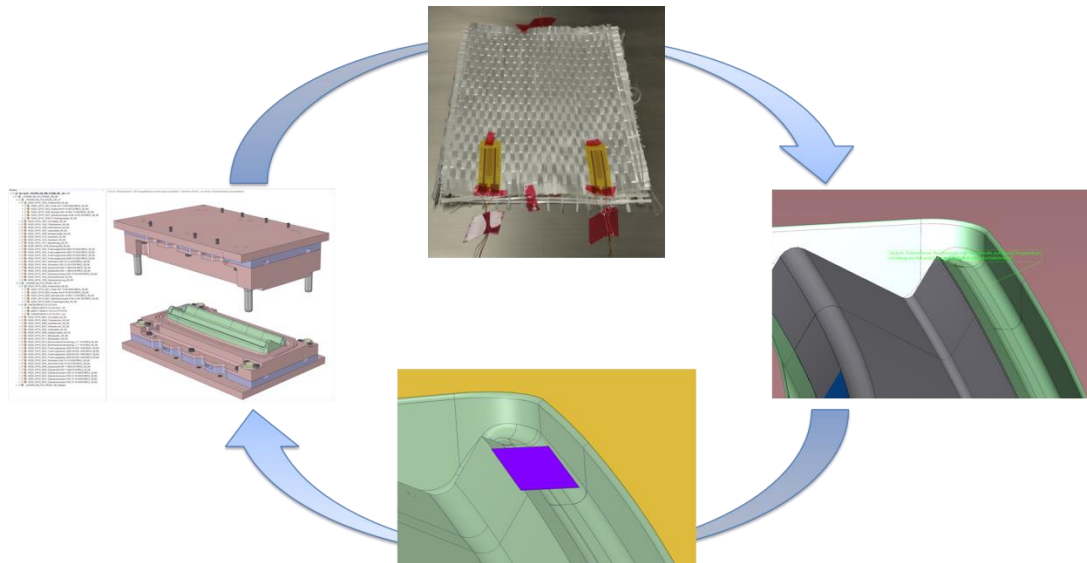


Abbildung 8: Systematische Erarbeitung des DMU am Beispiel des Sensors „Aushärtegrad Matrix“: 1.) Aufgaben- und Eigenschaftsbeschreibung Sensor, 2.) Identifizierung der Position im FWZ; 3.) Detaillierung Einbau anhand Randbedingungen FWZ und Sensor

Diese stellen sodann die Randbedingungen für die anstehenden Arbeiten zur Umsetzung von Grundfunktionen zur Prozessrealisierung (HAP2) sowie die Sensorkonzeptionierung und Entwicklung (HAP3) auf Basis der erarbeiteten Spezifikationen. Als Schnittstelle zu den gelaufenen Arbeiten sowie zur Sicherstellung einer funktionsfähigen Integration der Systeme in das closed-mould-Formwerkzeug wurde das DMU weiter ausgebaut. In der ersten Stufe fand eine Auswertung und Konsolidierung des gelieferten Inputs der Partner statt. Hieraus resultierte eine Implementierung in die vorhandene CAD-Architektur sowie systematische Detaillierung und Dokumentation über ein Ticketsystem.

Das Ergebnis der Arbeiten war ein virtuelles CAD-Abbild des geplanten „intelligenten Formwerkzeugs der Zukunft“, wodurch eine Übersicht über alle Komponenten und Sensoren, die Abstimmung dieser untereinander und die Erkennung und Auflösung von möglichen Geometrien- und Funktionskollisionen am KO-LIPRI-Formwerkzeug geschaffen wurde. Gleichzeitig diente es als Basis für die mechanische Überarbeitung des Formwerkzeug für die spätere Sensorintegration in HAP4.

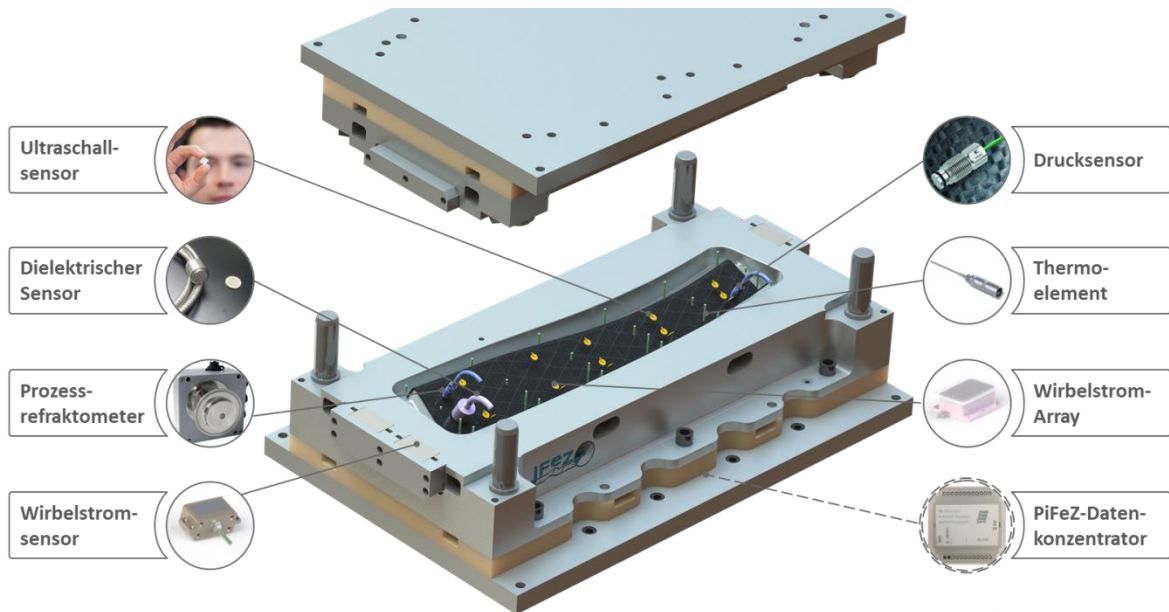


Abbildung 9: Virtuelles Abbild der Sensorintegration für das "intelligente Formwerkzeug der Zukunft"

2.3. HAP 2

Zusammenfassung zu den Zwischenberichten: ZB01_0616-1216; ZB02_0117-0617; ZB04_0118-0618

Grundfunktion Closed-Mould Formwerkzeug: Dichtung

Nach Abschluss der Arbeiten zum Anforderungskatalog sowie Besichtigung des Formwerkzeuges vor Ort bei der MMB Fertigungstechnik in Beelen wurden die Inhalte Grundfunktion Closed Mould Formwerkzeug um die Aspekte der Temperierung, Anschluss der Injektionsanlage sowie Preforming erweitert.

Für die Analyse der Grundfunktion „Dichtigkeit“ am Closed-Mould-Formwerkzeug wurde das Formwerkzeug hinsichtlich seiner Trennebene, Angusskonzept sowie bereits integrierter Sensoriken und Durchbrüche hin analysiert. Es stellte sich heraus, dass das FWZ als Tauchkantenwerkzeug für Pressprozesse ausgestaltet wurde, wobei explizit für das Verpressen des Materials sowie Auspressen überschüssiger Luft nach außen erst bei Erreichen der Endbauteildicke eine umlaufende Dichtwirkung eintritt. Das integrierte Angusskonzept stellte für einen Infusionsprozess mit den Anforderungen „schnell und robust“ keine ideale Lösung da. Die Trängung erfolgt über Anguss- und Absaugpunkte, mit der größten Distanz zueinander und dementsprechend den längsten Fließwegen. Die Versorgungspunkte befinden sich in der Trennebene des Formwerkzeuges zwischen Formplatte und Unterbau, so dass für jede Versuchsdurchführung eine Demontage erforderlich war. Auf Grund dieser und weiterer Punkte wurde das Dichtungskonzept überarbeitet.

In Vorversuchen wurde gezeigt, dass sich die Dichtigkeit in Abhängigkeit der Formwerkzeugtemperatur und Dichtschnurrhärte ändert. Hinzu kam die Prüfung als klemmende Dichtung, um der Kontur des Bauteils in der Trennebene folgen zu können. Auf das nachträgliche Einbringen einer neuen Dichtnut auf dem Überlauf-Sattel wurde auf Grund von Geometrie und Platzbedarf verzichtet. Zur Minimierung des Harzvoreilens und der Minimierung des Harzbedarfes wurde jedoch die Dichtung näher an das Bauteil gebracht. Da es sich beim Überlaufbereich um eine Freifläche ohne definierten Konturbereich und Länge handelt, konnte keine

klassische Normdichtung verwendet werden. Als Alternative erfolgte die Fertigung einer FWZ-angepassten Dichtung im RapidPrototyping-Verfahren mittels Silikonabformung. Weiterhin wurde die prozessichere Nutzung von Auswerfer, der Tränkungsanschlüsse und integrierten Sensorik bzgl. Beweglichkeit, Dichtigkeit, Passgenauigkeit und Handhabung untersucht.

Basierend auf den Voruntersuchungen erfolgte die Definition der Prozessanforderungen: Vakuum mit einer maximal zulässigen Leckage von 5mbar/min. Mittels Versuchswerkzeug wurden Untersuchungen zum Einfluss der Shorehärte, Temperatur und Zwangshaltung durchgeführt. Im Hinblick auf die bereitzustellende Formwerkzeugintelligenz wurde für die verwendeten Messgeräte (Vakuum-Controller CVC 3000, Fa. vacubrand) eine Software auf Python-Basis erstellt, die eine selbständige Messwerverfassung, Vakuum-Regelung und Einbindung in die zentrale Datenspeicherung ermöglicht (Abbildung 10). Die Bewertung der Dichtigkeit von Formwerkzeug, Anschlussleitungen und integrierter Sensorik in Abhängigkeit der Temperatur und der Formwerkzeug-Zuhaltekraft erfolgten nach dem Einbau in die Gesamtanlageninfrastruktur (Kapitel 2.5 HAP 4).

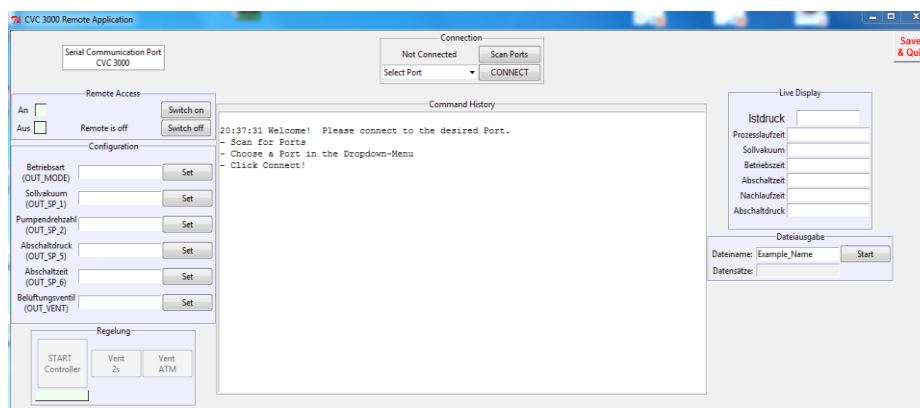


Abbildung 10: GUI der Software zur Erfassung und Regelung des FWZ-Vakuum

Die Temperierung als Grundvoraussetzung für die chemische Vernetzungsreaktion sowie die finalen Materialkennwerte wurde konkretisiert. Hierzu musste ein Heißkanalregler beschafft werden, der Heizpatronen und Heizzonen gleichermaßen bedient. Zu den weiteren Ausstattungen gehörte die Netzwerkfähigkeit zur Datenspeicherung also auch die Verarbeitung bereitgestellter Ist-Werte zur Temperaturregelung. Hierzu erfolgte die Ausrüstung des Formwerkzeuges mit 46 Thermoelementen, um das Thermalverhalten ganzheitlich erfassen und regeln zu können.

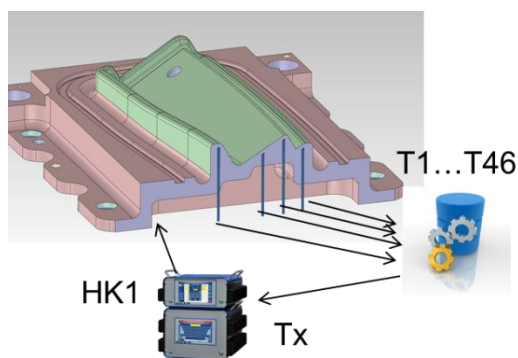


Abbildung 11: Schema Thermalmanagement: Zentrale Erfassung alle Formwerkzeug-TE in zentraler Datenbank und Einbindung am Heißkanalregler zur Temperaturregelung der 8 Heizzonen am Formwerkzeug

Für die harzführenden Leitungen am Formwerkzeug wurde aus Personen- und Prozesssicherheit eine Festverrohrung gewählt. Die vor Projektbeginn angedachte Verwendung der automatisierten Preformerstellung mit Hilfe der in Stade zur Verfügung stehenden EVo-Anlage konnte auf Grund von Geometrieabweichungen zum KOLIPRI-Spantprofil nicht verwendet werden. Es wurde daher ein neues Preformkonzept auf Basis des vorhandenen Formwerkzeuges sowie vorhandener Faserhalbzeuge und symmetrischer Lagenaufbauten entwickelt und umgesetzt. Die Überprüfung der Eignung fand mittels Drapiersimulation in Catia statt. Es handelt sich hierbei um einen mittels Silikonmembran realisierten Umformprozess am Faserhalbzeugstapel. Über IR-Strahler fand ein Aufschmelzen des Thermoplastbinders statt, der nach dem Umformen und Abkühlen einen formstabilen Preform in Endkonturgenometrie generierte. Abbildung zeigt die Abfolge bei der Preformgenerierung. Die Qualitätssicherung erfolgte durch Einlegen in die male-Formwerkzeughälfte.

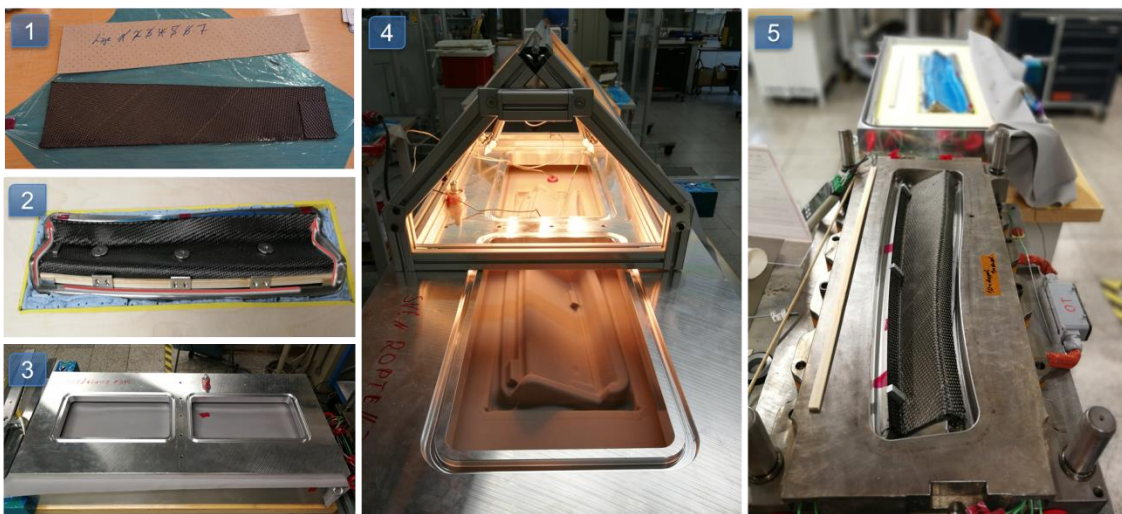


Abbildung 12: Preformgenerierung am iFeZ-Formwerkzeug

Analyse Mischungsgüte Mehrkomponentensysteme

Durch Vorgespräche mit Vertretern aus der CFK-Bauteilproduktion in der Luftfahrtindustrie wurde der Bedarf an einer Online-Mischungsanalyse eruiert. Er resultiert aus dem Bestreben, das Prozessieren von RTM-Harzen zu vereinfachen und kostengünstiger umzusetzen. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Lieferkette. Vorgemischte Harzsysteme bringen zwar herstellerseitig eine definierte und qualitätsgesicherte Mischgüte mit, diese muss der Anwender jedoch bezahlen und hat zudem erhöhte Kosten durch Kühltransport und klimatisierte Lagerung. Darüber hinaus haben vorgemischte Harzsysteme nur ein begrenztes Zeitfenster, in dem sie verarbeitet werden können, da sich sonst ihre Eigenschaften mit beginnender Vernetzung verändern. Der noch gültige Stand zu Projektbeginn war, dass die Luftfahrtindustrie zwar bestrebt ist, von vorgemischten (sog. 1K-) Systemen auf separat bereitgestellte (2K-) Systeme umzustellen. Dafür muss jedoch sichergestellt werden, dass das bei der Injektion vermischte Harzsystem „vom ersten bis zum letzten Tropfen“ dasselbe Mischungsverhältnis aufweist. Es genügt nicht, allein über die eingesetzten Volumina zu argumentieren, da so nicht ausgeschlossen werden kann, dass das Mischungsverhältnis über die Dauer der Injektion variiert, auch wenn in Summe die richtigen Mengen Harz und Härter im Bauteil enthalten sind. Dies würde zu Schwachstellen im Bauteil führen. Der Prozess der kontinuierlichen Mischung von Harz und Härter ist sehr robust und kann gut qualitätsgesichert werden, in dem die Fördermengen überwacht und Stichproben für eine Laboranalyse genommen werden. Dies geschieht u.a. mit einer Kombination aus den Verfahren FT-IR (Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie) und HPLC (Hochleistungs- Flüssigchromatographie). Bei einer diskontinuierlichen Injektion können dagegen Schwankungen im Mischungsverhältnis beim

Anfahren und Stoppen der Förderpumpen auftreten, da die beiden Komponenten verschiedene Viskositäten aufweisen und unterschiedlich stark komprimierbar sind.

In einem ersten Ansatz wurde noch vor Projektbeginn die Anwendbarkeit von Photometrie für die online-Mischungsanalyse während der Injektion im Rahmen einer Bachelorarbeit (nicht veröffentlicht) betrachtet und als prinzipiell machbar, aber mit vielen Hindernissen verbunden bewertet. U.a. muss dafür einer Komponente ein Fluoreszenzfarbstoff hinzugefügt werden, was wiederum einen erneuten Materialqualifikationsprozess nach sich ziehen würde. Aus diesem Grund wurde im Projekt iFeZ ein alternatives Verfahren betrachtet: Mit einem Refraktometer kann der Brechungsindex einer Flüssigkeit bestimmt werden. Es wird u.a. dazu verwendet, den Zuckergehalt von Trauben zu bestimmen, oder den Grad der Verunreinigung von Kühlmitteln. Da Harz und Härter leicht voneinander abweichende Brechungsindizes aufweisen, kann die Messung des Brechungsindex der Mischung einen Rückschluss auf das Mischungsverhältnis zulassen.

Als Alternative zum Refraktometer wurde im Projektverlauf die Digitale Dichtemessung betrachtet. Sie basiert auf der Messung der Eigenfrequenz eines mechanischen Biegeschwingers. Diese ist abhängig von der schwingenden Masse. Der Biegeschwinger wird als U-Rohr mit eingespannten Enden ausgeführt, womit die Eigenfrequenz direkt von der Dichte des durchströmenden Mediums abhängig ist. Mit dieser Messmethode sind Genauigkeiten bis $0,0001\text{g/cm}^3$ möglich. Das Verfahren findet in der Lebensmittel- und chemischen Industrie Verwendung und wird als Wartungsfrei bezeichnet. In der Praxis kann ein digitales Dichtemessgerät an eine Rohrleitung geflanscht werden, wobei das Medium durch den U-Rohr Biegeschwinger geleitet wird. So kann inline die Dichte gemessen werden. Im Fall reaktiver Substanzen, wie Epoxidharzen bleibt dieses Verfahren jedoch nicht wartungsfrei. Es muss sichergestellt werden, dass sich keine Rückstände im U-Rohr ablagern, dort aushärten und das Messergebnis beeinflussen. Weiter hat der Harzkanal der Injektionsleitung einen Querschnitt in der gleichen Größenordnung wie der Biegeschwinger. Eine Integration stellt sich somit als schwierig dar. Die Refraktometrie wurde daher weiterhin als favorisiertes Verfahren verfolgt.

Neben dem eigentlichen Messverfahren wurde betrachtet, ob eine wirkliche Onlinemessung oder eine kontinuierliche Probenentnahme und Offlinemessung zielführender seien. Allen zuvor betrachteten Analytikmethoden ist gemein, dass die Messungen i.d.R. an diskreten Proben vorgenommen werden, die je nach Methode vor der Messung präpariert werden müssen. Dies trifft insbesondere auf die HPLC-Messung zu, was ihren Einsatz als Onlineanalyse weitgehend ausschließt. Zur Integration der optischen Analyseverfahren in den Injektionsprozess muss ein Fenster im Injektionskanal geschaffen werden, das sowohl Druck, Temperatur als auch Chemikalienresistent und leicht zu reinigen ist. Diese Anforderungen sind nicht trivial in der Umsetzung, da es sich bei dem Injektionskanal i.d.R. um eine zylindrische Bohrung von wenigen Millimetern Durchmesser handelt. Es muss gewährleistet sein, dass es zu keinen strömungstechnisch toten Bereichen kommen kann, in denen sich Harzablagerungen bilden können. Ferner ist nicht sicher auszuschließen, dass es zu einer Filmbildung über dem Fenster kommen könnte und die Analytik stets dasselbe Material bei jeder Messung erfasst und somit kein Verlauf über den gesamten Injektionsvorgang bewertet werden kann.

Um dieses Problem zunächst zu umgehen, wurde eine Alternative zur Onlinemessung geprüft. Zwar kann in diesem Konzept die Mischungsanalyse parallel zur Injektion laufen, ist jedoch zeitlich leicht versetzt, was somit einen Einsatz als Prozessregelung ausschließt. Dennoch kann die Analyse noch während der Bauteilherstellung vollendet werden und eine "Gut/Schlecht"-Aussage getroffen werden.

In Abbildung 13 ist der Injektionsprozess mit online Probenentnahme schematisch dargestellt. Harz und Härter (Komponente A und B) werden mit Zahnradpumpen aus ihren jeweiligen Tanks gefördert und im Statikmischer zusammengeführt und vermischt. Der erzeugte Volumenstrom beider Pumpen wird über Flussmesser aufgenommen und die Pumpen danach geregelt. Dies stellt die aktuelle Situation dar. Ohne Mischungsanalyse würde das Harzgemisch nun direkt in die evakuierte RTM-Werkzeugkavität mit dem sich darin befindlichen Preform injiziert.

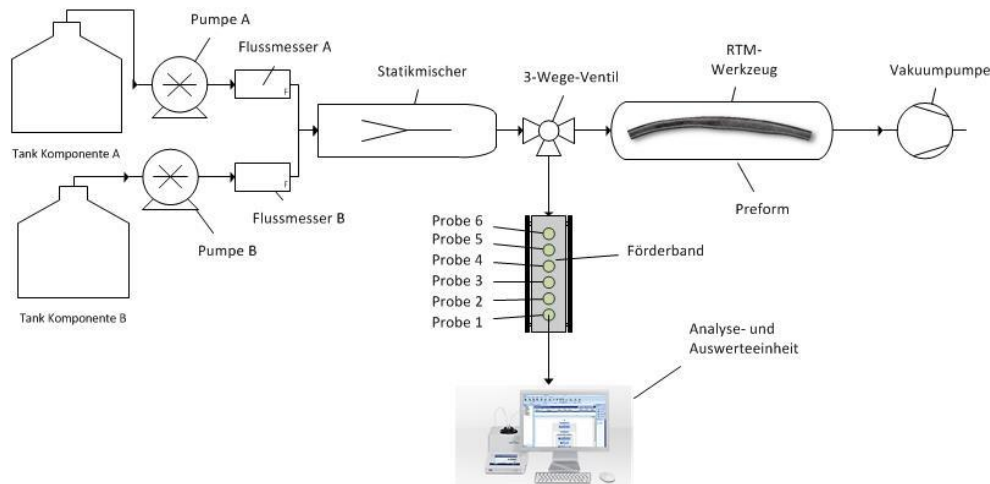


Abbildung 13: Konzept zur kontinuierlichen Probenentnahme und Offlinemessung

Der Lösungsansatz für die Mischungsanalyse besteht darin, einen Bypass zwischen Mischkopf und Formwerkzeug einzusetzen. Dafür sind zwei Varianten denkbar: Die erste Variante ist im Bild dargestellt und beinhaltet ein 3-Wege-Ventil, welches in bestimmten Zeitintervallen kurz umschaltet und so den Harzstrom diskontinuierlich umleitet, damit er aus dem System austritt, statt ins RTM-Werkzeug zu gelangen. Die zweite Variante ist eine definierte Leckage, die kontinuierlich Harz zwischen Mischkopf und Werkzeug austreten lässt. Auf diese Weise kann der zeitliche Verlauf des Mischungsverhältnisses analysiert und dokumentiert werden.

Im Rahmen von AP 3.4 wird das Refraktometer als geeignete Messmethode für die Bestimmung des Mischungsverhältnisses eingesetzt. Es ermöglicht mit seinem Messprinzip eine inline Messung, so dass die Variante mit Probenentnahme und Offlinemessung nicht weiter verfolgt wurde.

2.4. HAP 3

Zusammenfassung zum Zwischenbericht: ZB02_0117-0617

Ultraschallbasierte Prozessüberwachung der Injektion und Aushärtung

Die Ultraschallsensorik wurde zur Überwachung des Injektions- und Aushärtevorgangs eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine Eigenentwicklung des DLR. Der Stand der Technik und der Wissenschaft zu Beginn des Projekts ist in einer Dissertation des DLR [Liebers2018] umfassend dokumentiert, die aber erst im Laufe des Projekts veröffentlicht wurde. Seitens der eingesetzten Sensoren hebt sich die Eigenentwicklung vom Stand der Technik ab, indem anstatt integraler Ultraschallprüfköpfe einfache, piezoelektrische Elemente direkt auf das Formwerkzeug angebracht werden (Abbildung 14 und Abbildung 15). Dadurch werden eine bessere Ankopplung an das Formwerkzeug und höhere Amplituden erreicht. Auch sind die Sensoren somit deutlich günstiger und einfach zu integrieren.

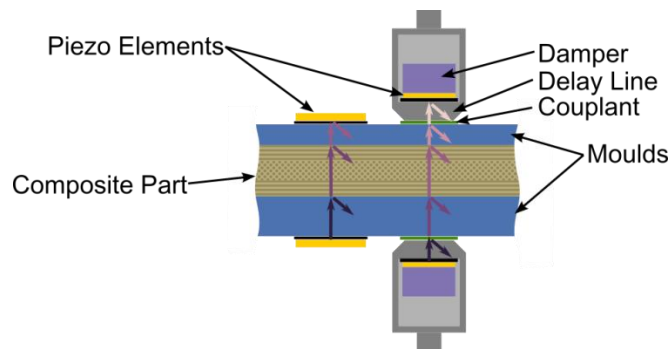


Abbildung 14: Gegenüberstellung von konventionellen Ultraschallsensoren (rechts) zu den eingesetzten, angepassten Sensoren (links) zur schallbasierten Prozessüberwachung

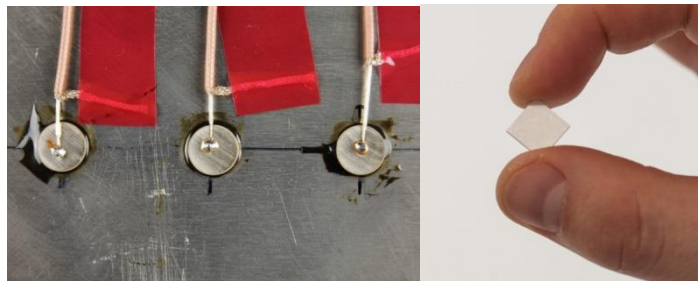


Abbildung 15: Piezoelektrische Elemente zur Prozessüberwachung auf ein Formwerkzeug geklebt

Neben den Sensoren wurden mehrere Analysemethoden entwickelt, um die wichtigsten Bauteilqualitätsgrößen erfassen zu können. Während des Injektionsvorgangs kann die Ankunft der Fließfront und auch dessen Geschwindigkeit beim Passieren des Sensors erfasst werden. Die Berechnung der Fließfrontgeschwindigkeit wurde während des Projekts weiterentwickelt und erprobt. Bei der Aushärtung des Harzes können neben dem Aushärtegrad auch der Gel- und der Verglasungspunkt überwacht werden. Im Projekt wurden vor allem Aspekte der Hardware zur Aufnahme der Signale, der Software und der Übertragung, Speicherung und Visualisierung der Daten fokussiert. Auch Lösungen für die Integration der Sensoren in Formwerkzeuge, wie sie in der Luftfahrtindustrie verwendet werden, war ein Schwerpunkt.

Dielektrische Sensorsysteme zur Aushärtegradüberwachung

Es wurde eine Literaturrecherche zum Funktionsprinzip der Aushärtegraderfassung mittels dielektrischer Sensoren durchgeführt, um Klarheit darüber zu erlangen, welche elektrotechnische Größe insbesondere mit dem verwendeten PDE 1 System der Firma Gelinstrumente genau erfasst wird. Auf Basis dieser Recherche wurde ein Vorversuch zur Charakterisierung durchgeführt, bei dem parallel auch Messgeräte der Hersteller INASCO und Synthesites und unterschiedliche Sensortypen untersucht wurden. Das Ergebnis ist, dass alle Messgeräte prinzipiell geeignet sind, den Verlauf der Aushärtereaktion zu überwachen. Das PDE 1 System speziell erfasst den komplexen Anteil der Impedanz. Dieser Wert wird durch die Beweglichkeit der Ladungsträger im Harz bestimmt, welche mit fortschreitender Vernetzung immer weiter sinkt. Abbildung 16 zeigt die genutzten Sensortypen, die sich in ihrer Bauart und insbesondere in der Anordnung der Elektroden unterscheiden. Die Fähigkeit unterschiedliche Sensoren betreiben zu können, war im Projekt von Bedeutung, da für den Open Mold Ansatz Foliensensoren für den Closed Mold Ansatz dagegen massive Tool Mount Sensoren Anwendung fanden.

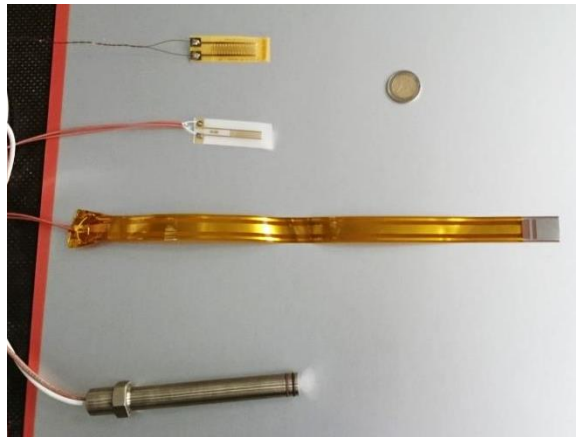


Abbildung 16: Drei unterschiedliche Foliensensoren oben und ein Tool Mount Sensor unten

Zur ersten Charakterisierung des Messsystems wurden isotherme Aushärteversuche mit dem Harzsystem RTM 6 1K von Hexcel durchgeführt, da dessen Verhalten während der Vernetzung bekannt ist. Die folgende Abbildung zeigt eine Gegenüberstellung der Messdaten aus der dielektrischen Analyse mit Daten aus der Dynamischen Differenzkalorimetrie und rechnerisch ermittelten Werten für einen isothermen Aushärteprozess bei 120°C.

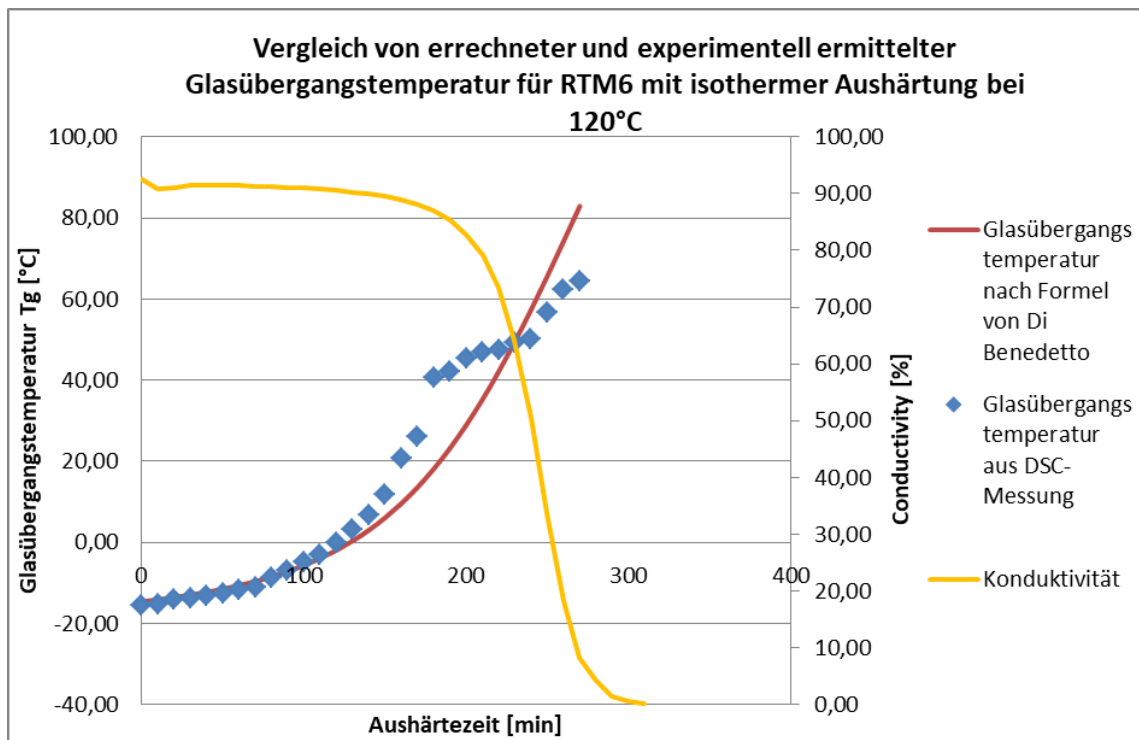


Abbildung 17: Aushärteverhalten von RTM 6 1K bei 120°C

Das Diagramm zeigt, dass mit Hilfe der dielektrischen Analyse der Beginn der Vernetzung, d.h. der Bildung von längererkettigen Makromolekülen bei ca. 150 Minuten erfasst werden kann. Des Weiteren kann auch der Zeitpunkt identifiziert werden, zu dem die Glasübergangstemperatur die aktuelle Härtungstemperatur

überschreitet. Dies geschieht, wenn die Leitfähigkeit sich dem Wert Null annähert, da die Beweglichkeit der Ladungsträger im Matrixwerkstoff nahezu vollständig unterbunden ist.

Um sicherzustellen, dass sowohl das System zur dielektrischen Aushärtegraderfassung als auch das Ultraschallsystem parallel betrieben werden können, wurde eine Versuchsreihe durchgeführt. Ein zweiseitiges Aluminiumwerkzeug wurde von außen mit permanent Piezoelementen bestückt und im Inneren des Werkzeuges wurde ein Foliensensor platziert. Die folgende Abbildung zeigt den Versuchsaufbau im Schnitt.

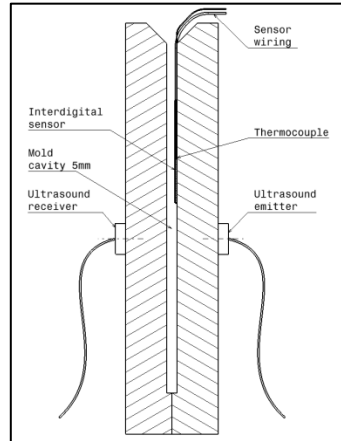


Abbildung 18: Schnittansicht des Testwerkzeuges mit Sensorpositionen

Auf Grund des breiten Prozessierungsfensters auch bei niedrigen Temperaturen wurde das Harzsystem LY564 / Aradur 22962 der Firma Huntsman genutzt. Zusätzlich wurden noch Versuche mit RTM6 1K von Hexcel durchgeführt, um den Bereich bis 200 °C Aushärtetemperatur abdecken zu können. Die Aushärtung erfolgte immer Isotherm entsprechend der in der folgenden Tabelle aufgetragenen Temperaturen.

Epoxy resin system	Sample Name	Curing temperature	Expected curing time
Araldite LY564 / Aradur 22962	LY564_040_01	40 °C	120 min
	LY564_060_01	60 °C	60 min
	LY564_090_01	90 °C	18 min
	LY564_090_04	90 °C	18 min
	LY564_120_01	120 °C	6 min
	LY564_150_01	150 °C	2 min
Hexflow RTM6 1K	RTM6_120_01	120 °C	320 min
	RTM6_140_01	140 °C	140 min
	RTM6_170_01	170 °C	50 min
	RTM6_200_01	200 °C	25 min

Tabelle 1: Versuchsplan zur Überprüfung der Kompatibilität von dielektrischer und ultraschallbasierender Aushärtegraderfassung

Während der gesamten Aushärtedauer wurden sowohl die Konduktivität als auch das Ultra-schallsignal kontinuierlich erfasst. Die folgende Tabelle zeigt die so erfassten Effektivwerte.

Sample	Dielectric System		DSC Analysis				Piezoelectric System			
	Conductivity at Cool Down [%]	Dielectric Degree of Cure [%]	Average Residual Reaction Enthalpy [J/g]	Average Degree of Cure from DSC [%]	Standard Deviation	Average Tg from DSC [°C]	Standard Deviation	Normalised Pulse Velocity Start [m/s]	Normalised Minimum Pulse Velocity [m/s]	Normalised Pulse Velocity at Cool Down [m/s]
LY564_040_01	5,69	0,94	114,74	0,758	12,47	62,11	0,03	1355	1305	1605
LY564_060_01	5,52	0,94	103,69	0,781	13,22	62,86	0,07	1355	1255	1605
LY564_090_01	0,10	1,00	25,03	0,947	1,08	88,89	1,39	1355	1255	1705
LY564_090_04	3,38	0,96	100,41	0,788	2,41	65,96	0,25	1355	1195	1605
LY564_120_01	4,77	0,95	23,11	0,951	2,38	100,00	3,59	1355	1105	1585
LY564_150_01	9,84	0,90	0,00	1,000	0,00	123,23	0,18	1355	1055	1225
RTM6_120_01	6,19	0,94	178,91	0,608	5,39	64,13	2,14	1383,75	1258,75	1728,75
RTM6_140_01	5,11	0,94	117,17	0,743	4,81	111,35	0,74	1383,75	1183,75	1683,75
RTM6_170_01	3,33	0,96	66,26	0,855	1,79	150,93	1,96	1383,75	1123,75	1813,75
RTM6_200_01	24,08	0,74	17,25	0,962	0,58	211,18	3,62	1383,75	1133,75	1723,75

Tabelle 2: Verlauf der Konduktivität und der Schallgeschwindigkeit während der isothermen Aushärtung von LY564 / Aradur 22962 bei 90 °C

Es zeigte sich, dass beide Systeme die charakteristischen Vorgänge wie das Einfüllen des Harzes, die beginnende Exothermie und den Übergang in den glasartigen Zustand sehr gut erfassen können. Ein Parallelbetrieb ist also möglich.

Für das weitere Vorgehen wurde vom Hersteller Linseis der Tool Mounted Sensor CCR_250_J_300_1 für den Closed Mold Ansatz beschafft und integriert.

Sensorik zur Geometrieerfassung

In einer Recherche zum Stand der Technik wurden unterschiedliche Prinzipien wie optische, taktile oder induktive Sensoren zur Geometrieerfassung verglichen. Das Ziel der Entwicklung war es, die Geometrieänderung von Werkzeugen oder Bauteilen im Fertigungsprozess bei Temperaturen bis min. 180°C kontinuierlich zu erfassen. Kriterien zur Auswahl waren die Genauigkeit, die Robustheit, der Messbereich oder die Kosten des Systems. Auf dieser Basis wurde das Pontos System des Herstellers GOM als tauglich identifiziert. Es erfasst kontinuierlich die Position definierter Messpunkte mit Hilfe eines Stereokamerasystems. Da dieses Kamerasystem selbst nicht temperaturbeständig ist und Temperaturänderungen die Genauigkeit sehr stark beeinflussen, muss das System abgeschirmt werden. Um die Funktion auch mit dieser vom Hersteller nicht vorgesehenen Abschirmung sicher zu stellen, wurde der Versuchsaufbau in Abbildung 19 entwickelt. Eine temperaturbeständige und entspiegelte Glasscheibe aus Borosilikatglas dient hier als Abschirmung. Diese wurde beschafft und in einen eigens dafür gefertigten Rahmen eingesetzt. Somit war es möglich von außen die Geometrieänderung von Probenkörpern zu erfassen, die im Laborofen unter Prozessrandbedingungen temperiert wurden.



Abbildung 19: Pontos Messsystem vor dem Laborofen mit Borosilikatscheibe

Ziel der anschließenden Untersuchungen war es herauszufinden, ob Deformationen in der für die im Projekt genutzten Prozesse charakteristischen Größenordnung von unter einem Millimeter erfasst werden können. Dazu wurden Probenkörper unterschiedlicher Geometrien aus CFK und Metall mit Messpunkten versehen. Diese Punkte erlauben bei ausreichender Anzahl zum einen die Messung von Abständen, zum anderen aber auch die Definition von Ebenen und die Messung der Winkel zwischen diesen Ebenen.

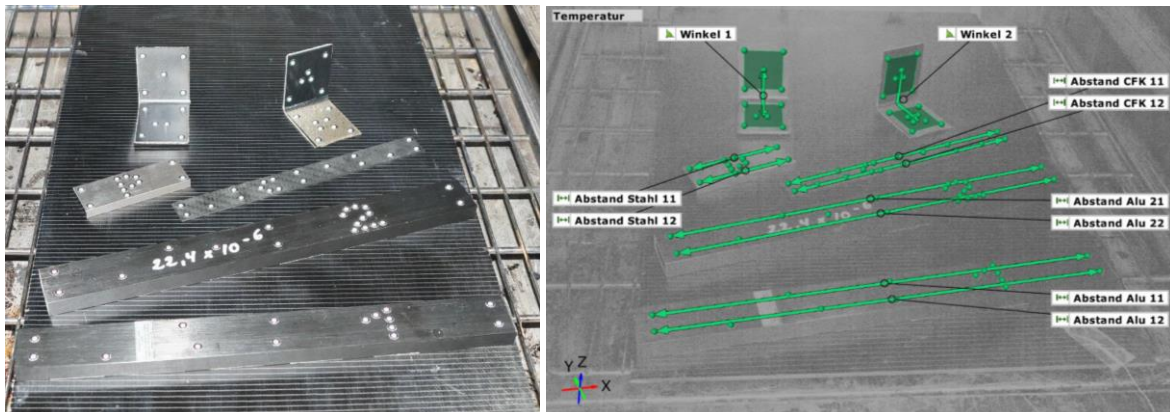


Abbildung 20: Probenkörper mit aufgeklebten Messpunkten und definierten Messungen im Laborofen

Um die Genauigkeit in Abhängigkeit der Prozesstemperatur bewerten zu können, wurden die Proben im Laborofen auf 180 °C erhitzt, wobei kontinuierlich die vordefinierten Messwerte aufgezeichnet wurden. Das Diagramm in Abbildung 21 zeigt die auf diesem Weg erfassten Dehnungen für die jeweiligen Materialien. Es zeigt sich, dass die Genauigkeit mit zunehmender Temperatur und insbesondere im Bereich zwischen 140°C und 180°C abnimmt. Grundsätzlich entsprechen die Werte aber den Wärmedehnungskoeffizienten der verwendeten Materialien. Das System kann also genutzt werden um relevante Deformationen in Aushärtprozessen unter Temperatureinfluss zu erfassen.

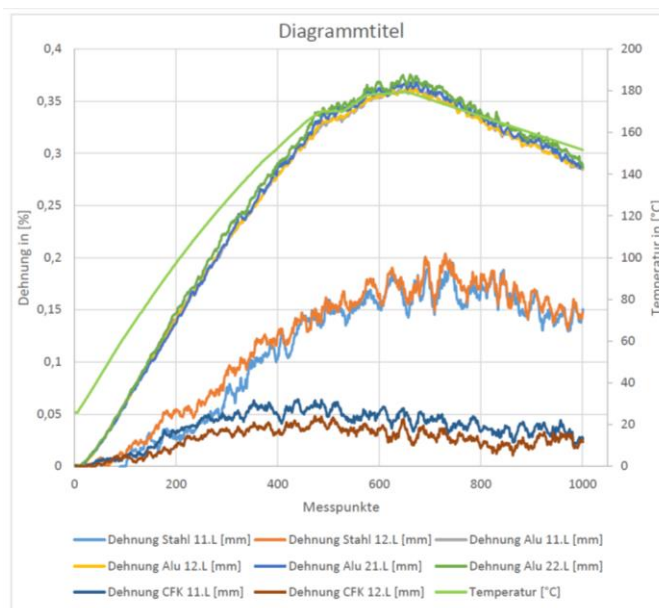


Abbildung 21: Optisch erfasste Dehnung der Probekörper in Abhängigkeit ihrer Temperatur

Messmethode zur Inline-Analyse des Mischvorgangs von Mehrkomponentensystemen

Die Messmethoden zur Photometrie, HPLC, FTIR Spektroskopie und Refraktometrie wurden genauer hinsichtlich ihrer Eignung zur Online-Mischungsanalyse untersucht. Sowohl HPLC als auch FTIR-Spektroskopie stellen sehr genaue Analyseverfahren dar, die zur Untersuchung der Zusammensetzung eingesetzt werden können. Beide Verfahren sind mit Anschaffungskosten zwischen 20k€ und 100k€ kostenintensiv und benötigen qualifiziertes Personal zur Auswertung der Ergebnisse. Bei der FTIR-Spektroskopie kann eine automatische Auswertung vorgenommen werden, indem charakteristische Banden des Spektrums zueinander ins Verhältnis gesetzt werden. Diese ist jedoch nur bedingt verlässlich, da es durch Alterungsprozesse zu Teilvernetzungen im Harz kommen kann, die das Messergebnis beeinflussen, jedoch nichts mit dem Mischungsverhältnis zu tun haben. Die Photometrie stellt eine vereinfachte Form der IR-Spektroskopie dar, indem von vorne herein nur bestimmte Wellenlängen analysiert werden. Auch hier ist jedoch eine Verfälschung der Ergebnisse durch eine alterungsbedingte Vorvernetzung möglich. Die HPLC-Messung setzt eine aufwendige Probenpräparation voraus, bei der eine definierte Menge Harz in Lösungsmittel gelöst werden muss. Dies ist schwierig zu automatisieren und zusammen mit den hohen Anschaffungskosten nicht zielführend, wengleich die HPLC Analyse die genaueste Messmethode zur quantitativen Bestimmung einer Mischung darstellt. Die Messung des Brechungsindex durch Refraktometrie eignet sich nur bei der Mischung von maximal zwei Komponenten, da sie nur einen Zahlenwert ausgibt, der durch Zumischen einer dritten Komponente wieder ausgeglichen werden könnte. Darüber hinaus ist der Brechungsindex temperaturabhängig, was bei der online Messung berücksichtigt werden muss. Die Auflösung bezogen auf das Mischungsverhältnis in Prozent ist abhängig davon, wie sehr sich die Brechungsindizes der Einzelkomponenten unterscheiden. Um dies zu ermitteln, wurden Vorversuche bei der Fa. Krüss Optronics in Hamburg durchgeführt. Die Ergebnisse für RTM6 2K bei Raumtemperatur sind:

- n Komponente A: 1,600
- n Komponente B: 1,588

Die Differenz der Brechungsindizes n beträgt rund 0,01. Die Auflösung eines Prozessrefraktometers wird mit 0,0001 bis 0,00005 angegeben. Damit ist eine Auflösung des Mischungsverhältnisses auf +/-1% möglich.

Eine Bestimmung der Messunsicherheit für diesen Fall steht noch aus. Basierend auf den Ergebnissen der Vorversuche wurde ein Prozessrefraktometer angeschafft.



Abbildung 22: Prozessrefraktometer und Laborrefraktometer (Firma Krüss)

Nach weiterer Recherche und Rücksprache mit verschiedenen Refraktometerherstellern (Krüss, Sartorius, Buehler) sind die meisten Inline-Prozessrefraktometer auf einen Brechungsindex bis $n_D = 1,53$ ausgelegt bzw. justiert. Der für die Mischungsanalyse von Epoxidsystemen relevante Bereich liegt zwischen 1,58 und 1,60. Die Firma Krüss kann bei einer Bestellung das Messfenster zu möglichst hohen Werten ausdehnen, ob jedoch auch 1,60 erreicht werden können, kann nicht garantiert werden. Ein entsprechendes Prozessrefraktometer sollte über den Projektpartner Hilger und Kern beschafft werden. Neben dem Prozessrefraktometer wurde das Laborrefraktometer DR6300-T der A.Krüss Optronik GmbH beschafft und in Betrieb genommen. Es wurde nicht aus Projektmitteln, sondern aus DLR-Investmitteln beschafft, da es über das Projekt iFeZ hinaus genutzt werden soll. Diese Laborrefraktometer mit Messbereich bis 1,60 wurde zur Eichkurvenaufnahme mit verschiedenen Mischungsverhältnissen genutzt, um die Ergebnisse des Prozessrefraktometers zu verifizieren.

Um eine Eichkurve mit verschiedenen Mischungsverhältnissen erstellen zu können, mussten zunächst Mischungen mit bekannten Verhältnissen hergestellt werden. Projektpartner H&K hatte diese zugesagt, ist jedoch vorzeitig aus dem Vorhaben ausgestiegen. Alternativ wurde durch das DLR eine Misch- und Dosieranlage für kleine Versuchsmengen beschafft und nach deren Inbetriebnahme entsprechende Mischungsreihen erstellt.



Abbildung 23: Misch- und Dosieranlage zur Herstellung einer Mischungsreihe

Für die richtige Mischung und Dosierung der Harz und Härter Bestandteile wurde eine eigens mit Adaptern an kritische Harzkomponenten angepasste Dosier- und Mischanlage der Firma (Fa.) Tartler genutzt. Der verwendete Anlagentyp MDM6 # 6251 ist in der Lage, flüssige 2K Kunstharze wie Epoxidharz oder auch Polyurethan in kleinen Mengen zu verarbeiten. Ziel dabei ist das Erreichen einer homogenen Mischung bei gleichbleibendem Mischungsverhältnis (MV). Bei einem eingestellten MV von 100 : 100 kann der Ausstoß bis zu 3,5 kg/min betragen.

Sollten sich die Komponenten bei Raumtemperatur nicht im flüssigen Zustand befinden, verfügt die Anlage über Heizmatten an den Behältern und in den Schläuchen, mit denen die dafür erforderliche Wärmeenergie zur Verflüssigung eingebracht werden kann. Da jedoch nicht alle Bereiche, die die Komponenten durchfließen, mit Heizungen ausgestattet sind und Verunreinigungen in den Leitungen auftreten können, die zu einer Kristallisation der Komponenten führen, wurde die Anlage angepasst. Die Harzkomponenten sollen erst am Mischkopf durch externe Behälter eingespeist werden, um kritische Punkte, wie das Förderzahnrad, in der Anlage nicht zu passieren.



Abbildung 24: Adapter für Dosier- und Mischanlage

Das Prinzip der Behälter (Abbildung 24) entspricht dem eines Pneumatik Zylinders. Auf der unteren Seite wird ein in der Dosier- und Mischanlage eingefülltes und unschädliches Lösungs- und Reinigungsmittel (Mesamoll) in den externen Adapter gefördert. In diesem Adapter befindet sich eine Membran (hier ein Nitrilhandschuh), die ihn in zwei Kammern teilt. In einer Kammer tritt Mesamoll ein, in der Anderen befindet sich die bereits eingefüllte Harz- oder Härterkomponente. Durch das Eindringen des von der Anlage geförderten Mesamolls wird die Komponente aus der anderen Behälterseite gedrückt und somit in den Mischkopf gefördert. Die zwei verschiedenen Komponenten werden somit erst im Mischkopf zusammengeführt. Für die Erstellung von Mischungen muss auf den Mischkopf ein Mischelement aufgesetzt und angeschraubt werden. Dafür gibt es drei verschiedene Kombinationen von Mischkopfaufsätzen. Eine Möglichkeit ist die Verwendung eines Statikmischers. Dieser entspricht einem Plastikrohr, in dem sich ein spiralähnliches Mischelement befindet, durch das die beiden Komponenten geführt und dabei gemischt werden. Neben den statischen Mischern gibt es zusätzlich die dynamischen Mischaufsätze. Der Aufbau eines Kunststoffrohrs mit einem spiralähnlichen Innenteil ist der gleiche. Der Unterschied besteht darin, dass das innenliegende Mischelement am Mischkopf eingehängt und durch einen Luftmotor angetrieben wird. Hierbei werden die beiden Komponenten zur Mischung durch ein sich drehendes Mischelement geführt. Die dritte Möglichkeit ist eine Kombination aus dem statischen und dynamischen Aufsatz. Die Komponenten werden zuerst durch den dynamischen Bereich geführt und danach durch einen statischen.

Verschiedene Parameter der Anlage lassen sich frei variieren. Dazu gehören die Einstellung des gewünschten Ausstoßes, die Getriebe der jeweiligen Komponente zur Einstellung des MV, die Heizung sowie Schuss- und Topfzeit. Die Schusszeit beschreibt den Zeitraum der Materialförderung und die Topfzeit, die Zeit, in der die Mischung verarbeitet werden kann, ohne dass die Komponenten Reaktionen miteinander eingehen. Das 2K-System RTM6-2 der Fa. Hexcel wird vorwiegend für die Verfahren des Resin Transfer Molding (RTM) und für Injektionsprozesse verwendet. Es wurde speziell an die Anforderungen der Flugzeugindustrie angepasst. Vorteile dieses 2K-Systems sind die guten Prozesseigenschaften, da nur ein geringer Injektionsdruck notwendig ist, sowie die gute Transportfähigkeit durch die getrennte Lagerung, bei der keine Aushärtereaktionen stattfinden können.

Part A (Harz) und Part B (Härter) sind an ihrer honigfarbenen bis bräunlichen Färbung zu erkennen und liegen bei Raumtemperatur im zähflüssigen (Part A) und im kristallinen (Part B) Zustand vor. Das Harzsystem hatte die Batch-Nummer 60M1525132. Die mögliche Einsatztemperatur liegt zwischen -60 °C und 120 °C . Die im LCM-Verfahren hauptsächlich vorkommenden Verarbeitungstemperaturen liegen im Bereich von 70 °C bis 90 °C . Die Aushärtung findet standardmäßig bei 180 °C statt. Erhöht man die Temperatur, so verringert sich die Viskosität der Mischung. Das vom Hersteller empfohlene stöchiometrische Harz/Härter Gewichts-verhältnis beträgt $100 : 68,1$. Die Bezeichnungen für die Mischungen ergeben sich aus dem prozentualen Gewichtsanteil der Komponente A zu $\text{Mix } (A/(A+B)) \cdot 100$. Bei einem stöchiometrischen Verhältnis entspricht dies der Bezeichnung Mix 59,49.

Für die Messung des Brechungsindex der Mischungen wurde das digitale Refraktometer DR6300-T der Fa. A. Krüss Optronic GmbH verwendet. Es ist mit einem Peltier-Element ausgestattet, das die Proben in einem Bereich von 10 °C bis 80 °C mit einer Toleranz von $0,2\text{ °C}$ temperieren kann. Über eine LED Lichtquelle und ein aus Saphir bestehendes Messprisma bestimmt es mit einer Wellenlänge von 589 nm den Brechungsindex. Für die Messung wurden ein bis zwei Tropfen des Probemediums in die vorhandene Messmulde aus Edelstahl gegeben. Der Benutzer kann zwischen einer Einzelmessung, einer Intervallmessung und einer Dauermessung entscheiden. Dabei sind die Messzeit und die Intervallzahl frei einstellbar. Über ein Touchdisplay wird der Brechungsindex angezeigt.

Beim Harzsystem RTM6 wurden im ersten Schritt die reinen Komponenten untersucht. Es wurde eine Menge von 2 ml mit Einmalspritzen in die Messtools gegeben und ein Tropfen in die Messmulde des Refraktometers. Da das Refraktometer nur bis 80 °C temperieren kann, wird der Temperaturbereich von 70 °C bis 80 °C in 2 °C Schritten untersucht. Höhere Temperaturen müssen interpoliert werden. Die Kennwerte weisen eine ausreichende Differenz auf, um Mischungen zu untersuchen. Da für die Komponenten keine Dichte bekannt ist, können keine konkreten MV geplant werden. Daher wurde die Mischung über die Getriebeeinstellungen der Dosieranlage vorgenommen. Für jede Getriebeeinstellung wurde bei einem Ausstoß von 200 und einer Schusszeit von 20 s das zugehörige MV über Abwiegen der einzelnen ausgestoßenen Mengen berechnet. Ein dynamisches Mischelement wurde auf den Mischkopf geschraubt, sobald ersichtlich war, dass sich ein MV eingestellt hat.

Beim Füllen der Behälter mit den Komponenten, die bei 80 °C im Ofen über mehrere Stunden lagerten, trat das Problem auf, dass die Härterkomponente beim Auffüllen im Schlauch bereits auskristallisierte. Aus diesem Grund wurden die Mischungen Mix 25, Mix 50 und Mix 75 manuell angerührt und dann in den Mischkopf eingeführt. Die Topfzeit von mehr als 240 min bei 120 °C der Mischung ist ausreichend, um sie problemlos verarbeiten zu können. Die Mischung wurde dafür in nur einen Behälter gegeben. Der Behälter wurde an die Schläuche der B Komponente der Anlage angeschlossen. Das dazugehörige Getriebe wurde auf das Maximum von 12 gestellt und das Getriebe der A Komponente auf 0 . Dann wurde an den Mischkopf ein dynamisches Mischelement geschraubt und die vorgemischte Mischung hindurch gefördert und ausreichend durchmischt. Die Mischung wurde in die Messmulde des Refraktometers gegeben und wie geplant

untersucht. Erste Auswertungen machten ersichtlich, dass es sich empfiehlt, weitere Mischungen zu untersuchen, um Datenlücken aufzufüllen. Es wurden zusätzlich Mix 40 und Mix 60 untersucht.

Das ursprüngliche Mischprinzip wurde mit einem bei Raumtemperatur zu verarbeitenden Harzsystem, bei dem beide Komponenten unbeheizt in flüssigem Zustand vorliegen, validiert.

Hierbei konnte das gewünschte Mischungsverhältnis direkt über die Getriebe der zwei Behälter vorgenommen werden. Den Zusammenhang zwischen Getriebeeinstellung und Mischungsverhältnis zeigt exemplarisch am System EPIKOTE™ Resin MGS LR 135 (Harz) und EPIKURE™ Curing Agent MGS RIMH 137 (Härter) der Firma Hexion (Abbildung 25). Das stöchiometrische Harz/Härter Verhältnis liegt hier bei 100 : 35 (Gewicht) und 100 : 41 (Volumen) mit der Bezeichnung Mix 74,07.

Mix	Getriebeeinstellung			
	A		B	
	schwarzer Zeiger	roter Zeiger	schwarzer Zeiger	roter Zeiger
10	1	0	10	12
30	3	2	8	10
50	5	5	6	7
70	7	11	4	1
90	10	7	1	5




Abbildung 25: Getriebeeinstellung für EPIKOTE/EPIKURE

Die Daten aus der Refraktometrie konnten als solche direkt zur Erstellung der jeweiligen Ersatzfunktion eingesetzt werden. Die Abhängigkeit der Brechungsindexe von der Temperatur ist in Abbildung 26 für RTM6-2 dargestellt.

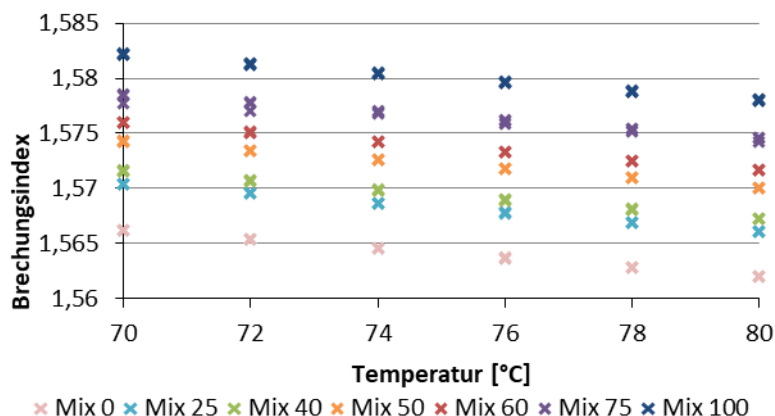


Abbildung 26: RTM6-2 Brechungsindex in Abhängigkeit der Temperatur

Es sind jeweils alle 3 Wiederholungen des jeweiligen MV im Diagramm dargestellt. Mix 0, die reine Härterkomponente, hat den kleinsten Brechungsindex und Mix 100, die reine Harzkomponente den größten. Die Messpunkte der anderen Mischungen ordnen sich jeweils dazwischen ein. Folgende Unterschiede im Brechungsindex sind bei 20 °C in der ersten Messreihe ermittelt worden:

- RTM6-2:

- Härter: 1,56623
- Harz: 1,58221

Die reinen Komponenten (Mix 0 und Mix 100) weisen keine sichtbaren Veränderungen innerhalb der Messreihen auf. Bei den Mischungen (Mix 25 bis Mix 75) war hingegen eine geringfügige Zunahme des Brechungsindex für die jeweiligen Temperaturen über die drei Messwiederholungen zu beobachten. Eine etwas stärkere Abweichung tritt bei Mix 75 auf.

Aufbauend auf den aufbereiteten Messdaten wurden mit dem Programm Optimus Ersatzfunktionen erstellt. Optimus Rev 10.19 ist eine von der Firma Noesis Solutions entwickelte Software. In der Industrie wird sie als führende Plattform für Prozessintegration und Designoptimierung eingesetzt und ist mit einer Reihe von Programmen, wie z.B. Matlab oder auch Excel kompatibel. In dieser Arbeit wurden mit den importierten Daten (Brechungsindex, Temperatur und Mix) Modelle erstellt. Die Software Optimus erstellte daraus Funktionen. Grundlegende Kriterien für die Auswahl der Funktionen sind:

- die Übereinstimmung der Messpunkte mit der Funktion und
- Trends, wie z. B. Krümmungen im Verlauf der Messreihen.

Zur Entscheidungsfindung wurden die 3D-Modelle der Funktionen mit den ermittelten Werten ausgewertet und das von Optimus bestimmte Bestimmtheitsmaß betrachtet. Mix 0 und Mix 100 stehen dabei im Vordergrund der Betrachtung, denn bei den reinen Komponenten tritt keine Abweichung zwischen dem angenommenen und dem vorliegenden Verhältnis auf, wie es bei den Mischungen möglich ist.

Es ergibt sich für RTM6-2 eine lineare Funktion zur Bestimmung des MV aus der Temperatur und dem Brechungsindex:

$$Mix(T, nD) = -9776,88484 + 2,57110 \cdot T + 6128,47766 \cdot nD$$

Abbildung 27 zeigt als Ergebnis die Funktion mit den Messpunkten. Das von Optimus ermittelte Bestimmtheitsmaß dieser Funktion ist: $R^2 = 0,99285$.

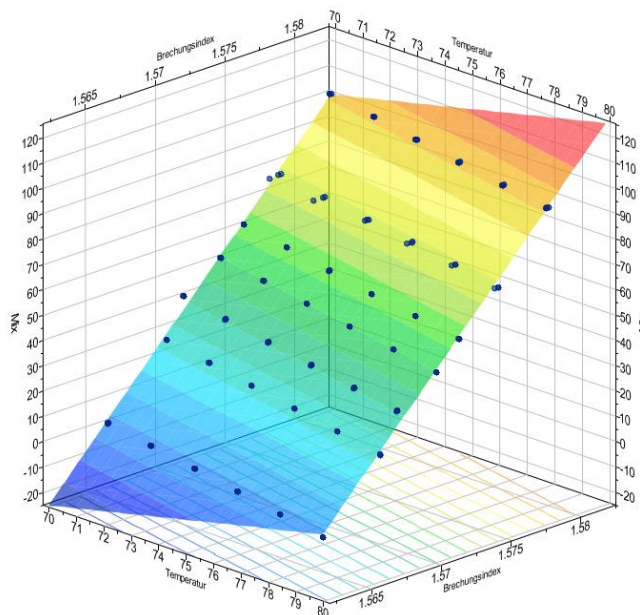


Abbildung 27: 3D-Darstellung Ersatzfunktion, RTM6-2

Die ausgegebenen Faktoren der Funktion zeigen, dass der Brechungsindex mit einem höheren Faktor in die Berechnung des MV eingeht als die Temperatur. Die Messreihen weichen kaum von der Funktion ab, mit

Ausnahme von Mix 40. Dieses MV weicht sehr auffällig ab. Es ist anzunehmen, dass hier das tatsächliche MV durch einen Fehler bei der Erstellung der Mischung vom angenommenen Wert abweicht. Der tatsächliche Wert kann durch Einsetzen des Brechungsindex in Formel 1 zu Mix 33,77 berechnet werden. Bei Mix 75 ist außerdem die Abweichung innerhalb der drei Messreihen erkennbar.

Die vorliegende Mischungsanalyse und die Erstellung der zugehörigen Ersatzfunktionen zeigten, dass das MV durch die Variablen der Temperatur und des Brechungsindex berechnet werden kann.

Die Refraktometrie stellte sich in dieser Arbeit bezogen auf den Untersuchungsgegenstand als einfach zu handhabendes und präzises Messverfahren dar. Begründet wird das durch die einheitliche Messpunktverteilung sowie die geringe Abweichung innerhalb der Messreihen. Auch die Bestimmtheitsmaße von 0,99 zeigten die nahezu vollständige Übereinstimmung der Messwerte mit den ermittelten Ersatzfunktionen.

Neben der Auswertung der Daten auf Verwendbarkeit, kann diskutiert werden, ob für die Erstellung von Funktionen mittels optischer Kennwerte überhaupt MV untersucht werden müssen, oder ob die Bestimmung der Kennwerte der reinen Komponenten für eine Funktionserstellung ausreicht. Da eine lineare Funktion ermittelt wurde, die durch Mix 100 und annähernd durch Mix 0 geht, lässt sich vermuten, dass eine lineare Funktion zwischen den Messpunkten der reinen Komponenten gebildet werden kann. Wendet man dieses Vorgehen an und ordnet dann die weiteren gemessenen Brechungsindexe mit der zugehörigen Temperatur in die Funktion ein, können wie bei Mix 40 Abweichungen zwischen dem angenommenen und dem tatsächlich vorliegenden MV berechnet werden. Im Gegensatz zu den erstellten Mischungen ist es sicher, dass die MV 0 und 100 wirklich vorliegen und somit die Funktionserstellung nicht von möglichen falsch angenommenen MV beeinflusst wird.

Drahtlos-Temperatursensorik

Nachfolgend wird in aller Kürze die physikalischen Hintergründe zur Temperaturmessung mit akustischen Oberflächenwellen und anschließend die Funktionsweise der kabellosen Temperaturmesstechnik der Firma SAW-Components erläutert.

Bei der Untersuchung von Erdbebenwellen stieß Lord Rayleigh 1885 auf das Phänomen, dass es Wellenformen gibt, die sich auf der Oberfläche von Festkörpern ausbreiten. Als Grundannahme steht das Modell, dass Festkörper aus elastisch verbundenen Massepunkten bestehen. Bei Anregung bilden sich elliptische Wellen aus, die das Punktgitter verformen. Ab einer Tiefe von einer Wellenlänge (λ) ist das Gitter keiner Verformung mehr ausgesetzt. Die gesamte Energie konzentriert sich also auf das Material unmittelbar in Oberflächennähe. Diese Wellen werden Akustische Oberflächen-Wellen (AOW, engl. *surface acoustic waves*, SAW) genannt. In Abbildung 28 ist eine schematische Darstellung gegeben, welche das Modell beschreibt.

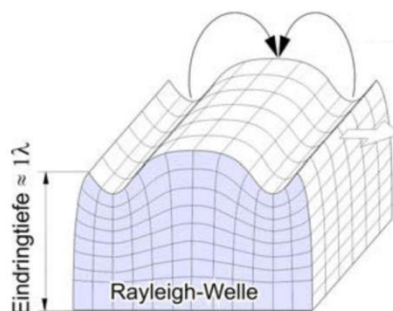


Abbildung 28: Rayleigh-Welle mit einer Eindringtiefe von 1λ

Diese Oberflächenwellen treten nicht nur im makroskopischen Bereich auf, sondern können sich auf allen Feststoffoberflächen mit einer von dem Material abhängigen Geschwindigkeit ausbreiten. Regt man Halbleiterchips aus ausgewählten Kristallschnitten über sogenannte Interdigitalwandler (*IDW*) mit einem hochfrequenten Wechselspannungssignal an, entstehen über den umgekehrten piezoelektrischen Effekt akustische Oberflächenwellen im Bauteil. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit beträgt, je nach Material, ungefähr 3000 m/s.

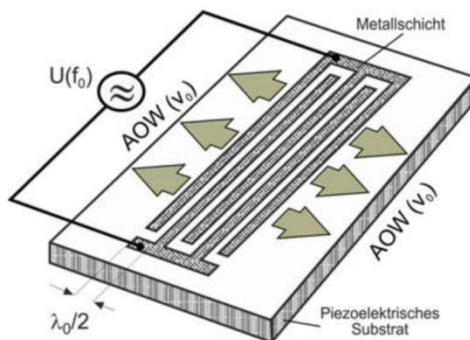


Abbildung 29: Interdigitalwandler

Diese Eigenschaft nutzen viele verschiedene hochgenaue elektronische Bauteile. Beispielsweise: Frequenzfilter, RFID-Tags (*engl. radio-frequency identification*), Belastungssensoren, hochgenaue Waagen und Temperatursensoren. Die mit der SAW-Technologie realisierbaren Temperatursensoren lassen sich nach ihren Funktionsprinzipien in zwei Gruppen einteilen. Die Erste basiert auf dem *Verzögerungsleitungsprinzip*, was nachfolgend erläutert wird. Die durch den Interdigitalwandler erzeugten SAWs breiten sich in lateraler Richtung entlang des piezoelektrischen Materials aus und werden, durch einen Reflektor zurückgeworfen, wieder in ein Wechselspannungssignal umgewandelt. Dadurch, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit auf der Bauteiloberfläche um 5 Potenzen langsamer ist als die Geschwindigkeit von elektromagnetischen Wellen, wird das Signal verzögert. Über die Zeit zwischen dem Senden des Abfrageimpulses und dem Empfangen des Echos, oder der Zeitdifferenz zwischen definierten Start- und Stoppechos, kann unter Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit im Bauteil dessen Länge errechnet werden. Da Halbleiterchips, wie nahezu alle Feststoffe, einer Temperatursausdehnung unterliegen, kann über den Wärmeausdehnungskoeffizienten und der Kenntnis der Chipgröße bei einer Referenztemperatur, die Signalverzögerungszeit in eine eindeutige Temperatur umgerechnet werden. Die Verzögerungszeiten liegen im Micro- bis Millisekundenbereich, die Chipgrößen im Millimeterbereich. In Abbildung 30 ist der Aufbau eines SAW-Temperatursensors, der nach dem Verzögerungsprinzip funktioniert, dargestellt.

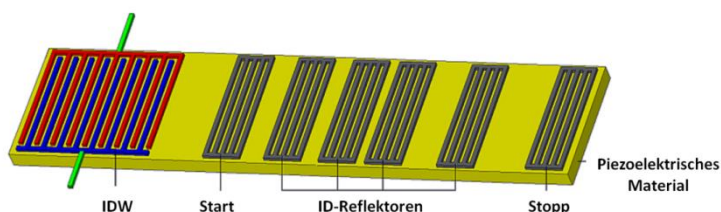


Abbildung 30: SAW-Sensor nach dem Verzögerungsleitungsprinzip mit Reflektoren zur Identifikation

Neben dem Interdigitalwandler und den Start- und Stoppreflektoren sind noch vier weitere Reflektoren zu sehen. Diese Identifikationsreflektoren ermöglichen, über die elektronische Auswertung des zurückgegebenen

nen Signals, eine genaue Zuordnung des Sensors. In Abbildung 31 ist ein beispielhafter Signalverlauf eines solchen Sensors zu sehen.

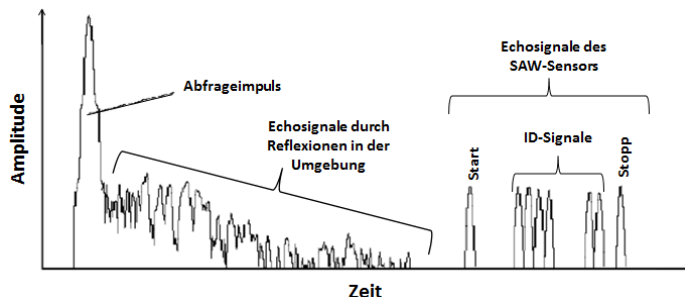


Abbildung 31: Signalverlauf eines SAW-Temperatursensors nach dem Verzögerungsleitungsprinzip

Die zweite Sensorgruppe basiert auf dem *Resonatorprinzip*. Bei der Messung nach dem Resonatorprinzip wird die Temperatur über die Resonanzfrequenz eines Halbleiterchipbauteils ermittelt. Eine mögliche Bauform eines solchen SAW-Temperatursensors ist in Abbildung 32 abgebildet.

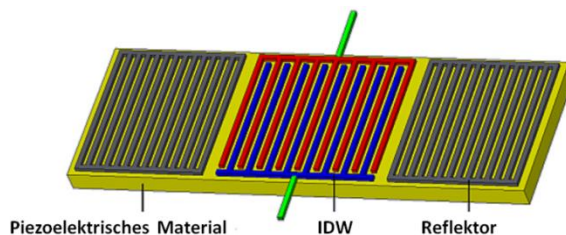


Abbildung 32: SAW-Temperatursensor nach dem Resonatorprinzip

Über einen, mittig auf dem Chip platzierten, Interdigitalwandler werden SAWs erzeugt. Durch die symmetrische Anordnung der Reflektoren bildet sich eine stehende Oberflächenwelle. Die höchste Amplitude der Schwingung liegt vor, wenn die Anregungsfrequenz mit der Resonanzfrequenz des Chips übereinstimmt. Um diese zu ermitteln erfolgt, die Anregung mit einer ganzen Bandbreite von Frequenzen, beispielsweise von 2,4 GHz bis 2,5 GHz. Diese werden nacheinander auf den Interdigitalwandler aufgeschaltet. Die Frequenz, die mit der temperaturabhängigen Resonanzfrequenz des Chips übereinstimmt, regt diesen zu besonders starken stehenden Wellen an. Nach einem Frequenzdurchlauf wird das Eingangssignal pausiert. Der Halbleiterchip schwingt dann allerdings noch weiter und dissipiert die gespeicherte kinetische Energie über die Wandler zurück und erzeugt ein Wechselstromsignal. Das Wechselstromsignal wird messtechnisch ausgewertet und die Resonanzfrequenz in ein Verhältnis zu der bekannten Grundfrequenz des Chips gesetzt. Daraus wird über einen Messcomputer die Temperatur errechnet. In Abbildung 33 ist ein Frequenzverlauf eines SAW-Temperatursensors nach dem Resonatorprinzip dargestellt.

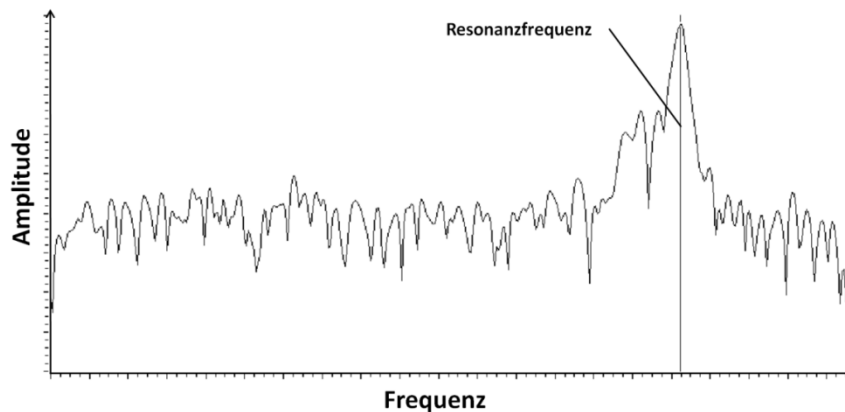


Abbildung 33: Frequenzverlauf eines SAW-Temperatursensors nach dem Resonatorprinzip

Beide SAW-Sensorvarianten haben gegenüber den meisten anderen berührenden Temperatursensoren den großen Vorteil, dass die Messung kabellos erfolgen kann. Dazu wird das hochfrequente Abfragesignal des Messcomputers über eine Antenne in Form elektromagnetischer Wellen in die Umgebung abgestrahlt. Befindet sich die Antenne eines SAW-Sensors in Reichweite, wird das Signal in eine Wechselspannung umgewandelt, welche über akustische Oberflächenwellen ein Antwortsignal erzeugt. Die Rücksendung des Antwortsignals zum Messcomputer erfolgt auf umgekehrtem Wege mit der kinetischen Energie, die in Form der SAWs gespeichert ist. Im Rahmen dieser Projektarbeit wurde ein System verwendet, bei dem Antenne und Sensor aus Gründen der Flexibilität über Koaxialkabel verbunden sind.

Die sogenannte passive Energieversorgung ermöglicht es, bei dem Einsatz von SAW-Sensoren auf eine Energiequelle in Form einer Batterie oder eines Akkumulators zu verzichten, die zum kabellosen Einsatz anderer berührender Temperaturfühler, wie Thermoelement oder Widerstandsthermometer erforderlich wäre.

2.5. HAP 4

Zusammenfassung zu den Zwischenberichten: ZB03_0717-1217; ZB04_0118-0618; ZB05_0718-1218; ZB06_0119-0619

Zur Integration der Sensorik, Systemtechnik und Methoden aus HAP2 und HAP3 wurde auf die Arbeiten zum Aufbau der Virtualisierungsumgebung intelligentes Formwerkzeug aus AP1.3 zurückgegriffen. Hierzu erfolgten in mehreren Iterationen die Ermittlung geeigneter Sensorpositionen sowie deren Anpassung an Bauteilgeometrie und Formwerkzeugfunktionalität. Als eine Herausforderung stellte sich dabei die Kabelführung heraus, welche in der Trennebene zwischen dem formgebenden Werkzeug und den Temperiermodulen verläuft. Hierfür ist das Entfernen von Werkzeugmaterial erforderlich, was gleichzeitig zu Lasten eines gleichmäßigen Energieeintrags und der Grundstabilität des Formwerkzeugs geht. Zusätzlich stellt die Trennebene den Zugang zu den Injektionsleitungen bereit, so dass alle Leitungen und Sensoren dauerhaft in Position fixiert werden müssen. Als ebenfalls kritisch ist die beeinflussungsfreie Anordnung benachbarter Sensoren anzusehen. Die finale Konstruktion ergab sich durch die Machbarkeit der Modifikationen mittels mechanischer Bearbeitungsmöglichkeiten am Formwerkzeug bzgl. Zugänglichkeit, Hinterschnitte, Radien und Bohrungsdurchmesser. Als Lösung wurden Taschen zur Platzierung der US-Sensoren auf der Rückseite eingefräst. Über diese werden ebenfalls die Thermoelemente eingebracht und die Kabelführung konturfol-

gend realisiert. Seitlich führen die Taschen zu zentralen Kabelkanälen mit Befestigungsschienen und stirnseitigen Durchführungen nach außen.

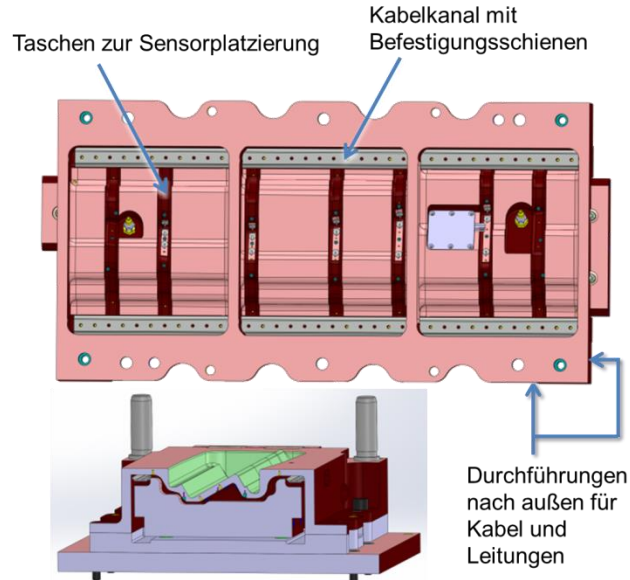


Abbildung 34: rückseitige Modifikation am Formwerkzeug zur Sensorintegration

Bereitstellung funktionsfähiger und angepasster Systeme zur Gesamtanlagenimplementierung

Neben den Sensorsystemen nach HAP2 und HAP3 erfolgte die Anpassung weiterer für den Herstellungsprozess relevanten Anlagen bezüglich des automatischen Auslesens von Messgrößen zur Steuerung und Regelung. Für den Heißkanalregler Fitron TP8 zur Temperierung des Formwerkzeuges wurde die Kommunikation per Ethernetschnittstelle via Modbus (TCP) und der Implementierung auf Basis von pyModbusTCP umgesetzt. Der Einsatz passender Softwarebibliotheken ermöglicht hierbei das einfache Auslesen wichtiger Parameter je Zone. Für den Vakuumregler Vaccubrand CVC3000 erfolgte die Library-basierte Portierung einer intern entwickelten GUI mit Hilfe Python3. Mehrere Instanzierungen zur Bedienung verschiedener Regler sind so parallel möglich. Neben dem Auslesen wird weiterhin die Speicherung in die zentrale Datenbank und Visualisierung der Werte in nahezu Echtzeit mittels Dashboard ermöglicht.

Integration Abstandssensor und Wirbelstromarray

Die Arbeiten und Ergebnisse zur Integration der Sensoriken können dem Abschlussbericht des Projektpartners Rosen entnommen werden.

Integration Dielektrischer Sensor

- Open-Mold-Szenario

Zur dielektrischen Überwachung des Aushärteverhaltens im Open Mold Prozess liegt der Foliensensor auf dem Werkzeug zwischen Faserpreform und Werkzeugoberfläche. Um zu gewährleisten, dass das Messergebnis nicht beeinträchtigt wird, müssen die Kontaktflächen auf dem Sensor gegenüber leitfähigen Materialien wie Kohlenstofffasern isoliert werden. Diese Isolierung muss gleichzeitig aber durchlässig für das Epoxidharz sein um eine Benetzung der Sensorfläche und damit eine Messung zu ermöglichen. Zur Identifizie-

ung eines geeigneten Materials wurden gängige Verbrauchsmaterialien, die auch bei den Projektpartnern in der Faserverbundfertigung genutzt werden, auf ihre Eignung hin untersucht. Dafür wurden jeweils Testmessungen durchgeführt, bei denen das Isolationsmaterial wie zu Beginn eines Infusionsprozesses üblich, mit einem Bar Druck auf den Sensor gepresst wurde. Die folgende Tabelle zeigt die getesteten Materialien und ihre Eignung als Isolationsmaterial.

Material	Eignung	Bemerkung
Abreißgewebe Release Ease 234 TFP	+	
Abreißgewebe Hexforce T0098 (PA66)	-	
Glasgewebe Interglas 92626	O	Tracerfaden kann die Messung negativ beeinflussen.
Glasgewebe Interglas 92110	+	
Glasnadelvlies	-	Der Binder beeinträchtigt die Messung.
Vakuumsfolie PATS 215 (PA6)	O	Die vollflächige Benetzung des Sensors kann nicht gewährleistet werden.

Abbildung 35: Tabelle der geprüften Isolationsmaterialien für die dielektrische Aushärtegraderfassung
(+ = sehr gut, O = mit Einschränkungen, - = ungeeignet)

Es zeigte sich, dass das Abreißgewebe Release Ease 234 TFP und das Glasgewebe Interglas 92110 hinsichtlich der Harzdurchlässigkeit und der Isolationsfähigkeit am besten zur Abdeckung der dielektrischen Sensoren geeignet sind.

- Closed-Mold-Szenario

Die Integration im geschlossenen Formwerkzeug erfolgte anhand der gegebenen Einbausituation des alten Sensors. Der Linseis Sensor passt in die bestehende Bohrung, die Stirnfläche ist dabei 0,22 mm nach hinten versetzt. Nachteile ergeben sich hierdurch nicht.

Integration der Thermoelemente

Die zuvor auf Maß konfektionierten Mantelthermoelemente wurden auf die Formwerkzeugkontur gebogen und mit einer Wärmeleitpaste in die Thermoelementbohrungen der gefrästen Taschen eingebracht. Die Führung und Fixierung erfolgt hierbei über Halteschienen. Außerhalb des Formwerkzeuges werden die Einzelelemente mit Miniatur-Steckverbindungen zentral über ein Panel gesammelt. Zur Gewährleistung der thermalen Randbedingungen sowie zur korrekten Erfassung der Temperatur am modular aufgebauten Formwerkzeug musste eine geeignete Wärmeleitpaste identifiziert werden. Neben einer hohen Temperaturbeständigkeit über mehrere Stunden erfordert die Zugänglichkeit der Trennebene zwischen Formwerkzeugkavität und Heizmodul ein nicht aushärtendes und elastisches Medium. Ebenfalls von dieser Seite wurden die Sensoren und Anschlussleitungen im FWZ eingebracht. Um untereinander eine Kontaktierung auszuschließen, muss die Paste eine elektrische Isolierung aufweisen. Die erforderlichen Mengen und genannten Anforderungen führten dazu, ein keramisch gefüllte Einkomponentensilikone zu verwenden. Die Ergebnisse der durchgeführten Temperaturvermessungen zu HAP 5 (Kapitel 2.6) zeigt Abbildung 37: Temperaturfeld über der iFeZ-Spantgeometrie am oberen Formwerkzeug beispielhaft für die 21 Messstellen im Oberwerkzeug für eine isotherme Haltephase bei 160°C. Gegenüber der Solltemperatur zeigte sich eine Abwei-

chung von -15K, wobei besonders die Randbereiche Temperatursenken darstellen. Um dies auszugleichen, erfolgt im Weiteren eine heizzonenabhängige Anpassung der Solltemperatur am Regelgerät.

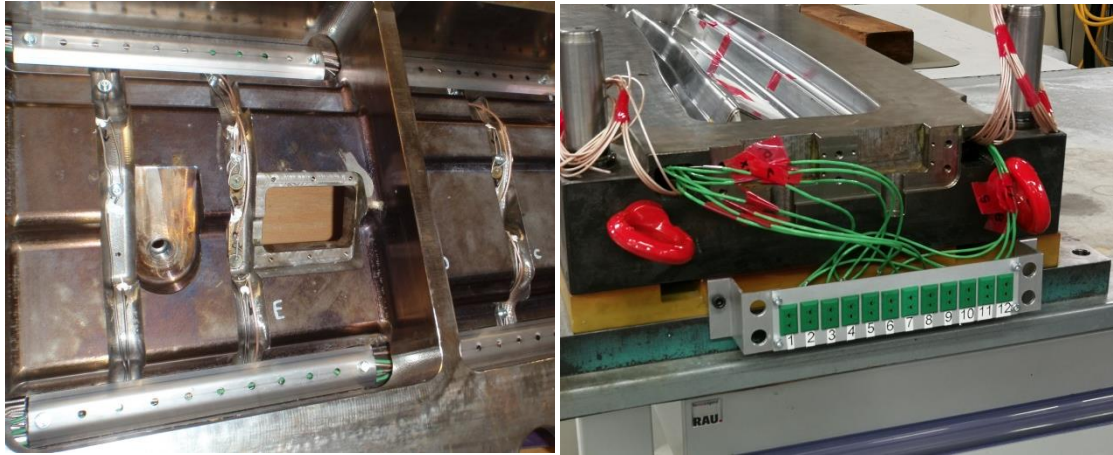


Abbildung 36: Kabelführung und -fixierung im FWZ (links) und Zusammenführung am Anschlusspanel (rechts)

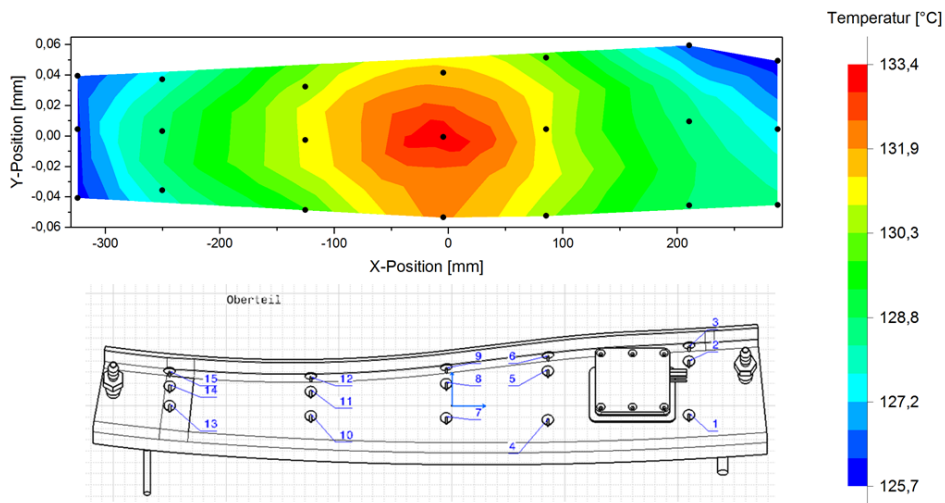


Abbildung 37: Temperaturfeld über der iFeZ-Spantgeometrie am oberen Formwerkzeug

Sensorintegration der US-Module

- Closed-Mold-Szenario

Für das closed-mold-Szenario mussten die Sensoren in ein bestehendes, komplexes RTM-Formwerkzeug integriert werden. Die Ultraschallsensoren benötigen keinen direkten Kontakt mit dem Bauteil, da die Schallsignale von der Außenseite des Formwerkzeuges zum Bauteil gesendet werden. Dazu muss jedoch die Fläche, auf der die Sensoren aufgeklebt werden, parallel zur Innenfläche ausgerichtet sein. Die Werkzeuggestärke spielt dabei eine geringe Rolle, da in Metallen der Schall verhältnismäßig wenig gedämpft wird. Eine größere Wanddicke erleichtert die Signalauswertung, da so die Schallsignale deutlich voneinander getrennt zum Sensor gelangen. Auch sollte die Innenfläche eben oder nur leicht gekrümmt sein. Dies ist vor allem bei der Verwendung der Impuls-Echo-Methode von großer Bedeutung, damit die vom Sensor ausgesandten Schallsignale zurück reflektiert werden. Diese Methode wird zur Fließfronterkennung verwendet. Zur Über-

wachung der Aushärtung wird die Transmissionsmethode verwendet. Dabei stehen sich zwei Sensoren jeweils in einer Formwerkzeughälfte gegenüber. Hier muss das Schallsignal ebenfalls senkrecht auf Grenzflächen treffen.

Für das closed-mold-Werkzeug wurde entschieden, etwa äquidistant über die Länge des Spants an fünf Schnitten Ultraschallsensoren anzubringen. Die Schnitte sind dabei annähernd senkrecht zur Spantachse angeordnet. Das Schema in Abbildung 38 zeigt das Prinzip der Sensorintegration. Um die Forderung nach parallelen Flächen zu erreichen, müssen Taschen in das untere und obere Formwerkzeug gefräst werden (rot). Dabei muss möglichst viel der Kontaktfläche zwischen Formwerkzeugen und Heizmodulen bestehen bleiben, um die Wärmeübertragung zu gewährleisten. Im Bereich des Webs des Spants werden pro Schnitt zwei Transmissionssensorenpaare angeordnet (grüne Pfeile). Die Sensoren werden zusätzlich sequentiell im Impuls-Echo-Modus betrieben, um zusätzliche Fließfrontinformationen zu erhalten. In den Flanschbereichen war keine Integration von paarweisen Sensoren möglich, sodass hier nur der Impuls-Echo-Modus genutzt werden kann (blaue Pfeile). Insgesamt werden infolgedessen je Schnitt sechs Sensoren in das Formwerkzeug integriert, das heißt 30 Ultraschallsensoren insgesamt.

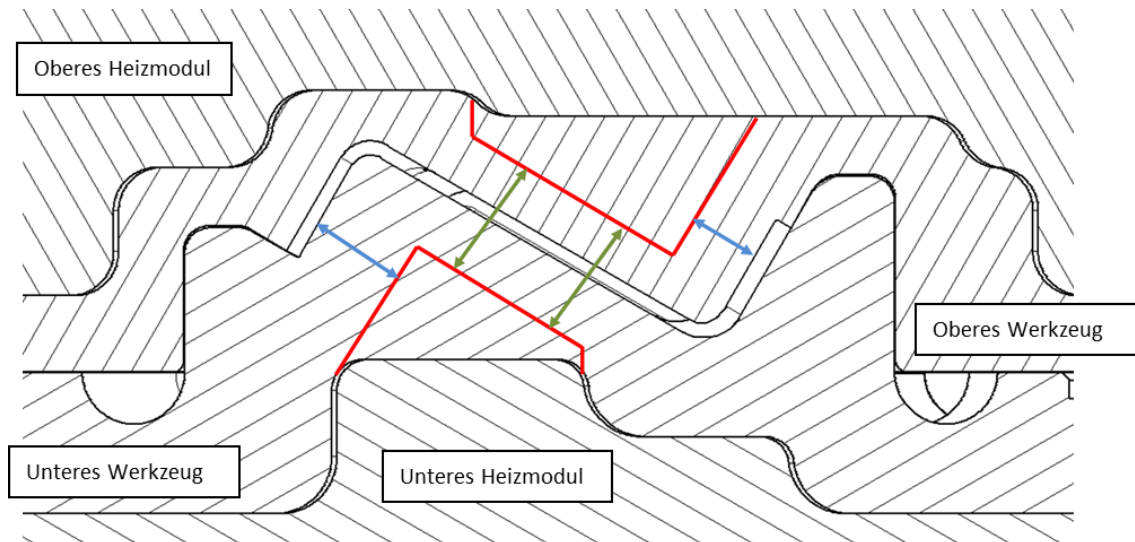


Abbildung 38: Konzept zur Integration der Ultraschallsensoren in das bestehende Formwerkzeug (rot: gefräste Taschen; blau: Impuls-Echo-Methode zur Fließfrontüberwachung in den Flanschbereichen; grün: Impuls-Echo- und Transmissionsmethode zur Fließfront- und Aushärtungsüberwachung im Bereich des Webs)

Ausgehend von diesen Angaben hat Projektpartner MBB die Detailkonstruktion der Fräsarbeiten übernommen und umgesetzt. Eine weitere Herausforderung war dabei, die unterschiedlichen Sensorsysteme und deren Kabel im vorhandenen Raum zu verteilen. Die Lösungen dazu sind in Zwischenbericht 4 aufgeführt. In Abbildung 39 sind die in das überarbeitete Formwerkzeug integrierten Sensoren zu sehen. Dabei wurden die Ultraschallsensorpositionen nahe an denen der Temperatursensoren gewählt. Die Schirmung der koaxialen Signalkabel ist zur Zugentlastung über eine Schraube fixiert und die Kabel werden über Kabelkanäle zu den Stirnseiten der Formwerkzeuge geführt. An den Stirnseiten sind Paneele mit Steckern angebracht, an denen die Signalkabel zur Messhardware angeschlossen werden kann. Zur Reduzierung des Aufwandes beim Anschließen der Kabel wurden Stecker mit vier Kontakten gewählt. Damit müssen je Formwerkzeughälfte lediglich vier Kabel angeschlossen werden.

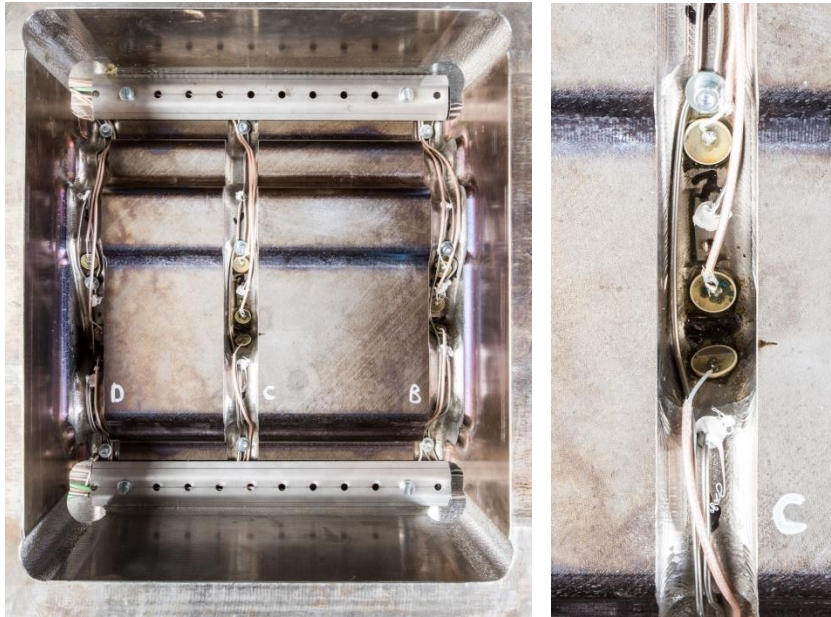


Abbildung 39: Integration der Ultraschallsensoren und deren Kabel in die vorgesehenen Taschen im closed-mold-Formwerkzeug (links Übersicht über drei „Schnitte“ à drei Sensoren und rechts Detail eines „Schnitts“)

Im closed-mold-Formwerkzeug wurde eine Vielzahl von Infusionsversuchen durchgeführt und die installierte Ultraschallsensorik dabei erfolgreich erprobt. Dabei wurden die Signale über den im Projekt entwickelten Datenkonzentrator „PiFeZ“ erfasst, die Fließfrontinformationen direkt ausgewertet und über Dashboards visualisiert. Details hierzu gibt Kapitel 2.6: HAP 5 und die Projektberichte des Partners ESYS GmbH.

- Open-Mold-Szenario

In diesem Szenario wurde ein Werkzeug durch den Projektpartner INVENT GmbH entwickelt und hergestellt. Das Werkzeug besteht dabei aus Faserverbundmaterialien mit einer integrierten Heizung und Vibrationsselementen. Die Integration der Ultraschallsensoren ist unter enger Abstimmung mit dem DLR durch INVENT selbst realisiert worden. Die Sensoren wurden dabei erst als ein „DuraAct“-Piezoverbund eingebettet (Abbildung 40) und schließlich in den Faserverbund des Formwerkzeugs integriert. Der Piezoverbund schützt die Sensoren vor den mechanischen Belastungen während der Herstellung des Formwerkzeugs und vereinfacht die Sensorintegration.



Abbildung 40: Beispiel eines „DuraAct“ Piezocomposites [INVENT GmbH]

Die gewählten Sensorpositionen im Formwerkzeug sind Abbildung 41: Positionen der Ultraschallsensoren im open mold Formwerkzeug [INVENT GmbH] Abbildung 41 zu entnehmen. Insgesamt wurden 20 Ultraschallsensoren integriert. Für weitere Details sei auf den Bericht des Projektpartners INVENT verwiesen.

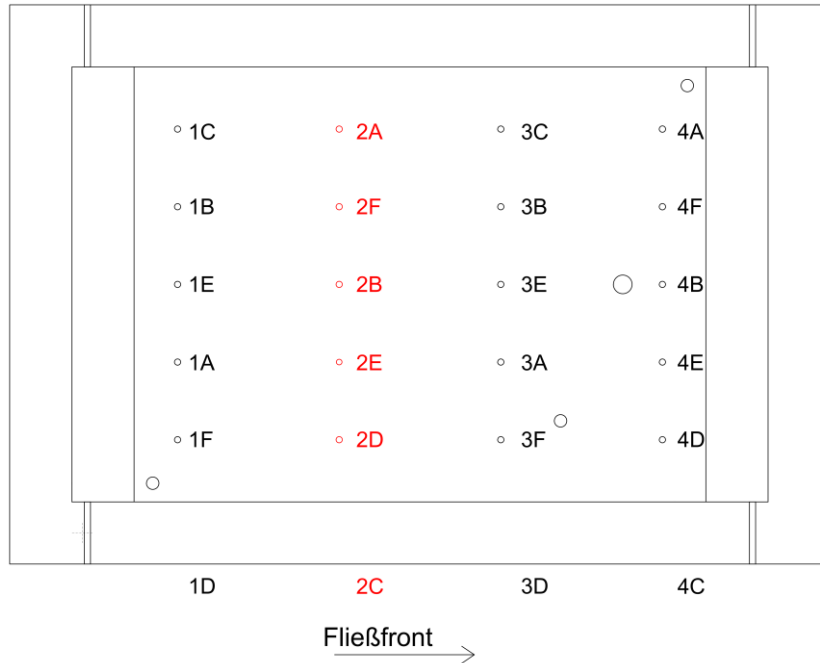


Abbildung 41: Positionen der Ultraschallsensoren im open mold Formwerkzeug [INVENT GmbH]

In diesem Szenario war vor allem durch die elektrische Heizung und die Vibrationsaktuatoren eine Interferenz zu erwarten. Die elektrische Heizung ist als Kupferdrähte nahe der Werkzeugoberfläche integriert und liegt damit auf dem Übertragungsweg der Schallsignale. Durch die Heizungsregelung sind wechselnde elektrische und magnetische Felder zu erwarten, die mit den piezoelektrischen Sensoren interferieren könnten. Die Vibrationsaktuatoren sind ebenfalls piezoelektrische Elemente und regen das Formwerkzeug zu Biegeschwingungen an, um den Injektionsprozess zu beschleunigen. Die Vibration könnte Störsignale bei der Signalerfassung der Ultraschallsensoren auslösen.

Die Ergebnisse des Einflusses der Vibrationsaktuatorik sind in Abbildung 42 dargestellt. Dabei wurden Impuls-Echo-Signale der Ultraschallsignale aufgezeichnet und währenddessen die Vibrationen aktiviert und deaktiviert. Weder in den Amplituden noch in den Rohsignalen selbst konnte ein Einfluss festgestellt werden.

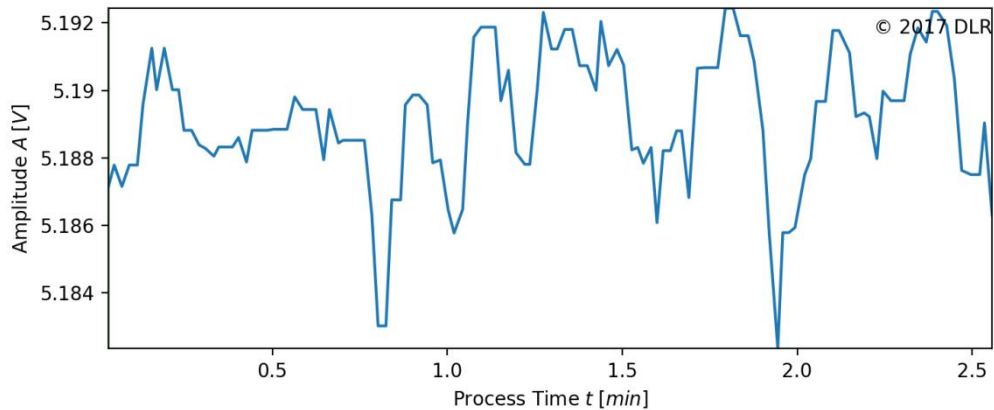


Abbildung 42: Untersuchung auf Interferenz mit Vibrationsaktuatorik

In Abbildung 43 ist die Impuls-Echo-Amplitude eines Ultraschallsensors während des Heizvorgangs dargestellt. Hier ist ein klarer Einfluss zu erkennen. Jedoch wird die sinkende Amplitude auf die steigende Temperatur des Formwerkzeugs zurückgeführt. Hierdurch ändern sich das Dämpfungsverhalten des Faserverbundmaterials und auch die Eigenschaften der piezoelektrischen Sensoren (bspw. deren elektrische Kapazität). Als nach ca. 62 min eine isotherme Temperatur erreicht wurde, blieb die Amplitude konstant. Infolgedessen wird von keinem Einfluss des Heizstroms auf die Messung ausgegangen. Der Temperatureinfluss kann entweder vernachlässigt werden, da die Infusion bei Erreichen des isothermen Zustands durchgeführt wird, oder er kann auch kompensiert werden.

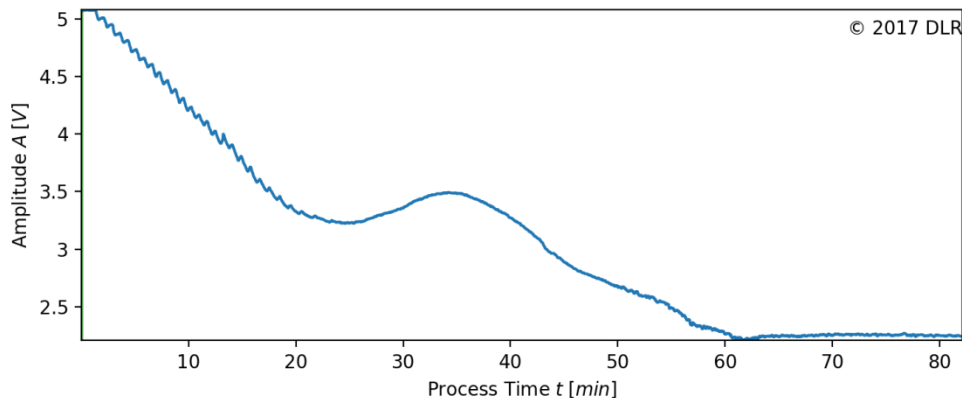


Abbildung 43: Untersuchung auf Interferenz mit elektrischer Heizung

In Abbildung 44 sind beispielhaft die Ergebnisse aus einem der Infusionsversuche dargestellt. Die Amplitude der Impuls-Echo-Signale fällt bei Ankunft der Fließfront am Sensor stark ab, sodass die Fließfront eindeutig detektiert werden kann. Der Vorteil des Faserverbund-Formwerkzeugs ist, dass es eine akustische Impedanz nahe der des Bauteils besitzt und so der Sprung des Reflexionsfaktors durch Fließfrontankunft groß ist und diesen deutlichen Signalabfall verursacht. Die Versuche zeigen also, dass die Fließfronterfassung in diesem Szenario funktioniert.

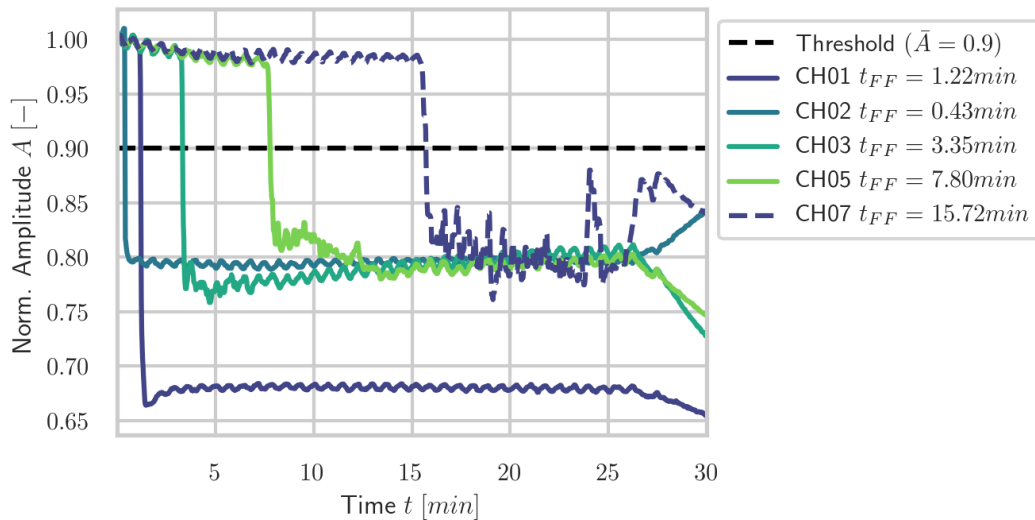


Abbildung 44: Ergebnisse der Fließfrontdetektion im open-mold-Formwerkzeug

- Messhardware

Ein Projektziel war die kabellose Übertragung der Sensordaten und die Weiterentwicklung für einen industriellen Einsatz. In enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner ESYS GmbH wurde nach einer Lösung gesucht, die benötigten Messdaten zur Überwachung der definierten Bauteilqualitätskriterien zu erfassen, transferieren, speichern und visualisieren. Im Projekt entstand dabei der Datenkonzentrator „PiFeZ“ (siehe Bericht Projektpartner ESYS GmbH), in welchem modular unterschiedliche Platinen eingesteckt werden, um die verschiedenen Sensorsysteme zu bedienen. Die Platinen werden jeweils von einem Mikrokontroller gesteuert und diese wiederum von einem Edge-Computer (hier Raspberry Pi). Dieser erfasst die Messdaten, nimmt gegebenenfalls Auswertungen vor und schickt die Daten zu einem Server.

Für die Ultraschallsensorik bestand die bisherige Messhardware aus einem Pulser-Receiver und einem Multiplexer mit 32 Kanälen. Der bisher genutzte Multiplexer ist jedoch im eigentlichen Sinne ein aus 32 Impuls-generatoren bestehendes Gerät, das nicht den Spannungsimpuls des Pulser-Receiver zu dem jeweiligen Kanal weiterleitet, sondern dieses lediglich als Trigger nutzt und dann selbst einen Impuls erzeugt. Das Antwortsignal dagegen wird analog an den Pulser-Receiver zurückgeleitet.

Seitens des DLR wurde ein Prototyp eines einfachen Multiplexers basierend auf Reed-Relais konstruiert und für vier Sensorkanäle umgesetzt. Der Prototyp ist in Abbildung 45 zu sehen und besteht aus einer von Hand angefertigten Leiterplatte in der Mitte des Bildes, dem Pulser-Receiver „Opbox“ rechts, oben einem Raspberry Pi und links zur Demonstration einem Stahlblock mit Sensoren. Der Pulser-Receiver erzeugt auf einem Ausgang einen Impuls, der durch die Schaltung der Relais zum gewählten Sensor geleitet wird. Im Impuls-Echo-Betrieb wird das Antwortsignal auf dem gleichen Eingangskanal des Pulser-Receiver empfangen – das heißt das Signal wird verstärkt und getriggert auf den Impuls digitalisiert. Im Transmissionsbetrieb wird das Schallsignal von einem anderen (gegenüberliegendem) Sensor empfangen, hierfür gibt es einen zweiten Eingang im Pulser-Receiver. Um diese beiden Eingangskanäle zu jedem Sensorkanal (hier vier) schalten zu können, werden zwei Relais pro Sensorkanal benötigt. Es handelt sich dementsprechend um einen 2x4-Multiplexer. Das Design und weitere Spezifikationen des Prototyps wurden ESYS als Input übergeben und hieraus ein Modul für den PiFeZ erstellt. Die Impulsgenerierung und Digitalisierung wird dabei weiterhin von einem Pulser-Receiver übernommen. Dies hat den Vorteil, modular andere Geräte einzusetzen. Durch den Ersatz des bisher eingesetzten Multiplexers werden bessere Signale erreicht und der Preis und die Abmaße des Multiplexers verringern sich deutlich.

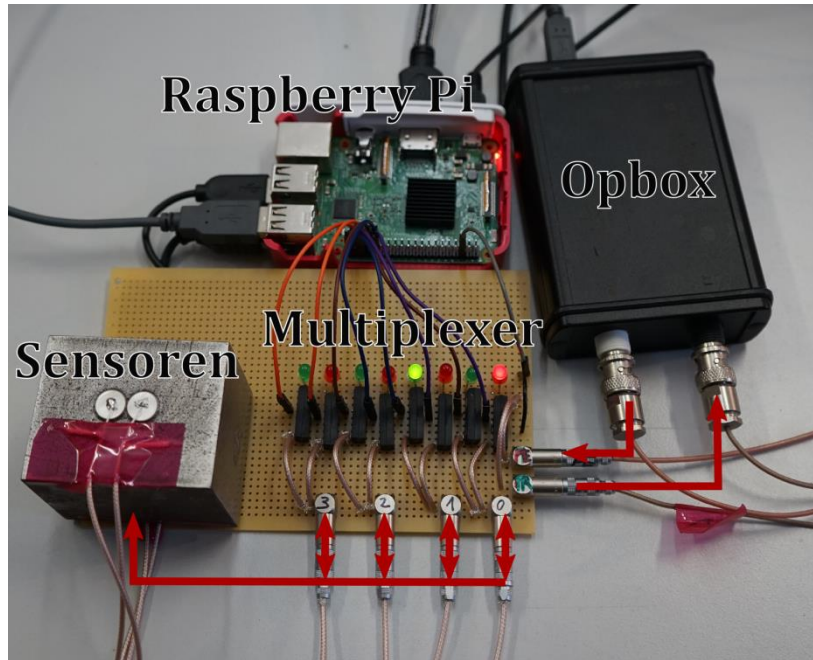


Abbildung 45: Prototyp des Multiplexers für die Ultraschallsensorik

Abbildung 46 zeigt das Ergebnis des Projekts mit dem PiFeZ mit zwei Multiplexermodulen und dem angeschlossenen Pulser-Receiver. Mit zwei Multiplexern können 32 Sensoren angeschlossen werden.

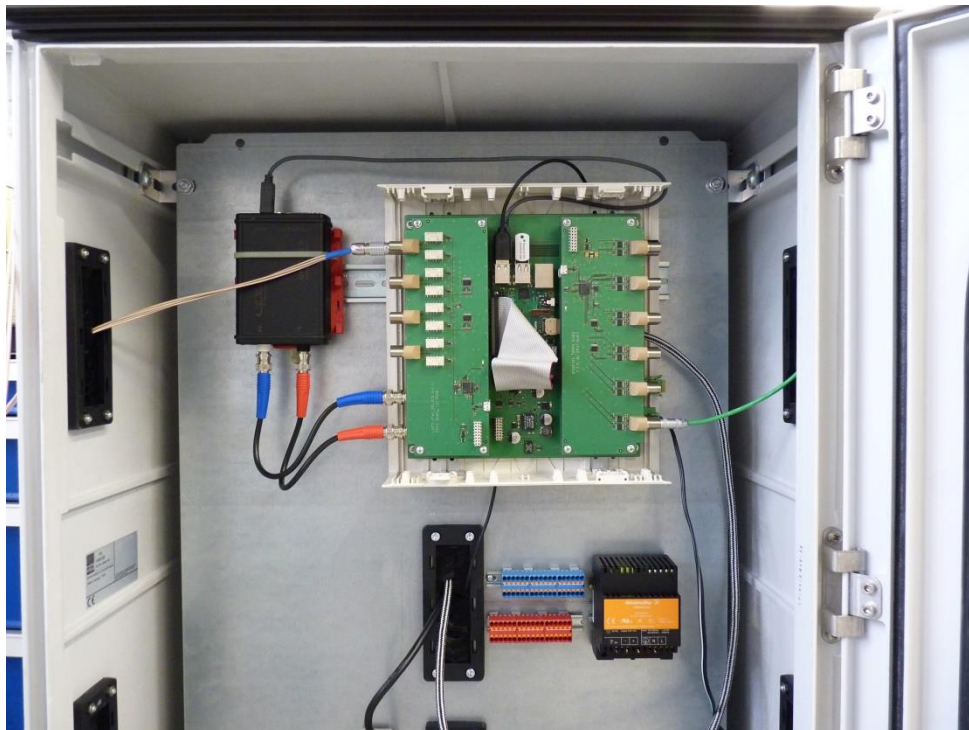


Abbildung 46: Im Schaltschrank eingebauter PiFeZ mit zwei Ultraschall-Multiplexermodulen (jeweils 16 Kanäle, übereinander auf linker Seite) und dem angeschlossenen Pulser-Receiver

- Software

Vor dem Projekt wurde ein selbst entwickeltes Messprogramm mit einer grafischen Oberfläche verwendet, um Einstellungen zur Signalgenerierung und -erfassung vorzunehmen und die Messergebnisse zu speichern und zu visualisieren. Alle diese Funktionen waren in einem monolithischen Programm implementiert, so dass der Aufwand zur Weiterentwicklung enorm ist. Auch werden die Daten so nur lokal gespeichert und können auch nur dort während einer Messung dargestellt werden.

Auch durch die neue Messhardware wurden die Softwarearchitektur und der Programmcode neu gestaltet hin zu sogenannten Microservices und webbasierten APIs (Abbildung 47). Statt alle Funktionen in einem Programm zu vereinen, werden die Funktionen auf unterschiedliche Services (Dienste) verteilt, die über Schnittstellen miteinander kommunizieren. So wird der Dienst zur Steuerung der Messhardware und zur Erfassung der Rohsignale auf dem Raspberry Pi im PiFeZ vorgenommen. Allein die Auswertung zur Erfassung der Fließfront wird hierbei bereits bei der Messhardware vorgenommen. Die Daten werden mit einigen Metadaten über eine MQTT-Nachricht drahtlos zu einem Server geschickt und dort in einer Datenbank gespeichert. Ein weiterer Dienst ist die Visualisierung der abgespeicherten Daten, hierfür wurde im Projekt „Grafana“¹ und auch „ThingsBoard“² erprobt.

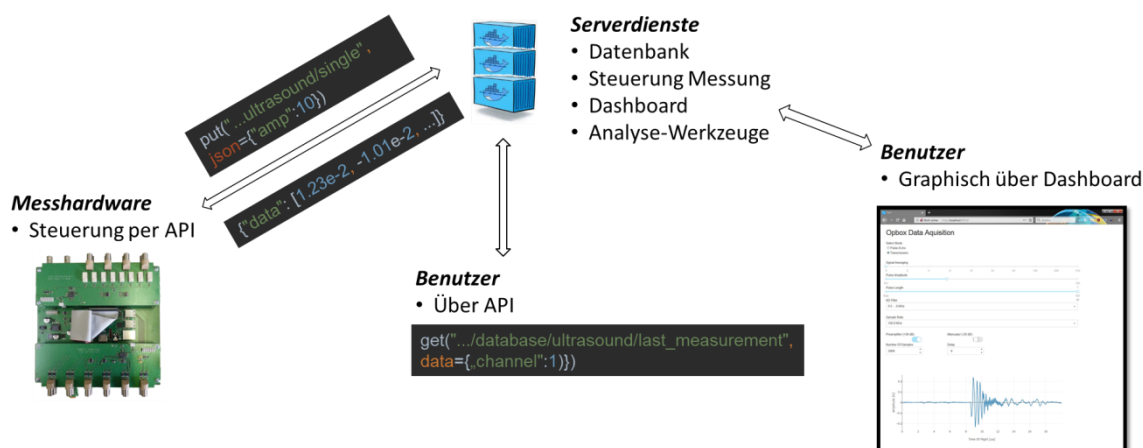


Abbildung 47: Unterteilung der Programmfunktionen in Microservices zur Einstellung und Erfassung der (Ultraschall-)Messdaten, der Übertragung und Speicherung in Datenbanken, Analyse und Visualisierung der Daten

In Abbildung 48 ist die Darstellung der Ergebnisse der Fließfronterkennung in einem Grafana-Dashboard demonstriert. Zur Einstellung der Messparameter und Darstellung der Rohsignale wurde ein Dashboard mit Hilfe des Python-Moduls „plotly-Dash“³ erstellt (Abbildung 49).

Diese Visualisierungen browserbasiert und können damit von jedem Endgerät im Netzwerk aufgerufen werden. Durch die Modularität wird der Entwicklungsprozess vereinfacht und nachhaltiger. Auch ist weniger Expertenwissen notwendig, um die Messtechnik zu bedienen und die Ergebnisse auszuwerten. Durch

¹ <https://grafana.com/>

² <https://thingsboard.io/>

³ <https://dash.plotly.com/>

die unmittelbare Übermittlung aller Sensormessdaten über Netzwerkschnittstellen werden diese zeitsynchron abgespeichert und alle Messdaten können einfach miteinander verglichen und analysiert werden.

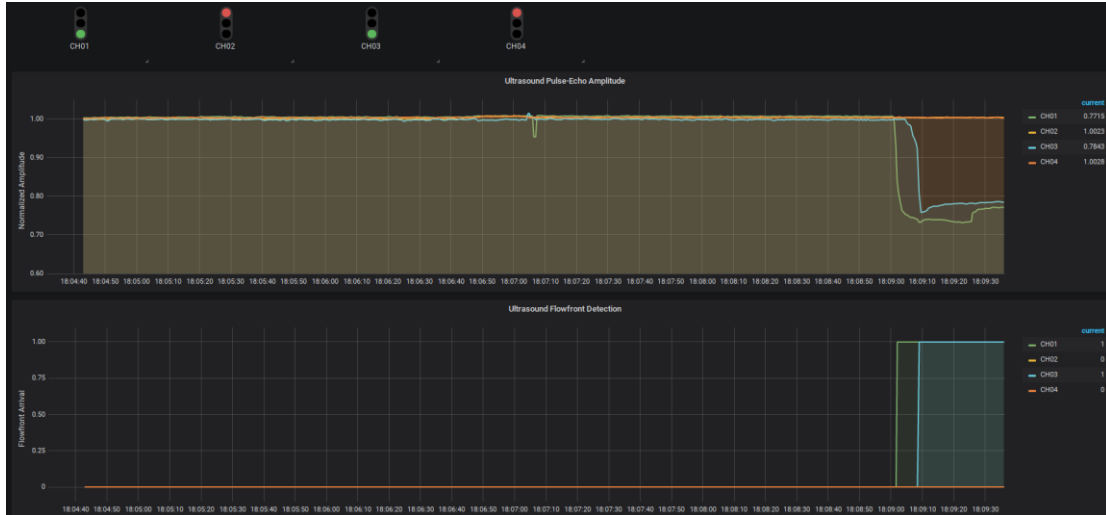


Abbildung 48: Beispiel der Darstellung mit Grafana der ultraschallbasierten Fließfrontdetektion im Dashboard in Form von Ampeln und Diagrammen

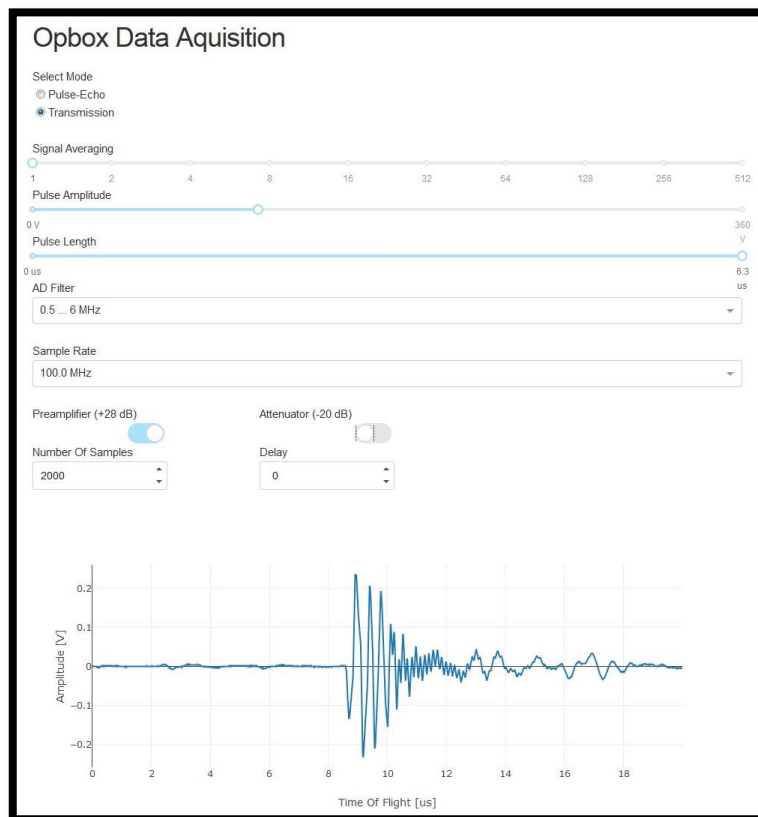


Abbildung 49: Dashboard mit „plotly-Dash“ zur Einstellung der Messparameter und Visualisierung der Rohsignale

Integration und Kombination Mischgütesensor und Formwerkzeug

Aufgabe der Mischungsanalyse ist es, während der Injektion den Verlauf des Mischungsverhältnisses von Harz und Härter zu dokumentieren. Dazu muss der Sensor zwischen Mischkopf und Formwerkzeug positioniert werden, um alles in das Werkzeug einströmende Harz zu erfassen. Alle Formwerkzeuge der EVO-Forschungsplattform verfügen über einen Angussadapter (Abbildung 50), der in das Werkzeug eingesetzt wird und an den der Mischkopf der Injektionsanlage andockt. Diese Schnittstelle ist für jedes der in Stade vorhandenen RTM-Werkzeuge verwendbar und kann mit entsprechenden Modifikationen neu gefräst werden.



Abbildung 50: Standard-Angussadapter der EVO-Forschungsplattform am DLR-Standort Stade

Zur Integration eines Refraktometers in den Injektionsprozess sind grundsätzlich zwei Varianten denkbar:

- Variante A: Integration in den Heizkanal

Ein Prozessrefraktometer wird direkt in einen Angussadapter integriert. Der Saphir-Sensor hat dabei direkten Kontakt zum Harzkanal und misst das vorbeiströmende Harz.

Vorteile:

- Es wird genau das Material analysiert, das in das Werkzeug injiziert wird.
- Die Messung findet zeitgleich mit der Injektion statt

Nachteile

- Es muss untersucht werden, ob sich ein Harzfilm auf dem Sensor ablagert, der die Messung dahingehend verfälschen kann, als dass immer dasselbe Material (die Ablagerung) vermessen wird
- Es muss eine Temperaturkompensation durchgeführt bzw. sichergestellt werden, dass die Temperatur konstant gehalten werden kann. Standardrefraktometer haben eine Temperaturkompensation bis 80°C. Das vorbeiströmende Harz kann je nach Prozessführung eine Temperatur von 80° bis 120°C haben.

- Variante B: Bypass Probennahme

In den Angussadapter wird ein 3-Wege-Ventil integriert, welches diskontinuierlich kleine Probemengen aus dem eigentlichen Harzstrom separiert und nach außen führt. Alternativ zu einem Ventil kann eine definierte Leckage vorgesehen werden, aus der kontinuierlich Harz nach außen dringt. Das ausgetretene Harz tropft bzw. läuft auf ein Förderband, welches das Material zum Sensor bzw. daran vorbei befördert.

Vorteile

- Geringere Anforderungen an den Sensor bzgl. Dichtheit und Temperaturkompensation
- Leichtere Reinigung

Nachteile

- Die Problematik von Harzablagerungen kann ebenfalls eintreffen, kann aber verglichen mit Variante A leichter beobachtet und behoben werden
- Es werden nur Begleitproben analysiert, nicht exakt dasselbe Material, das in das Werkzeug injiziert wird.
- Die Probennahme kann durch sich verändernde Druckverhältnisse einen negativen Einfluss auf die Prozessstabilität haben

Die Beschaffung des Prozessrefraktometers, die hardware- als auch softwareseitige Integration in die Injektionsanlage, sowie die Erstellung von Eichkurven sollten ursprünglich vom Projektpartner H&K durchgeführt werden. Nach dem Ausscheiden des Projektpartners mussten die offenen Arbeiten vom DLR übernommen werden, wofür ein Aufstockungsantrag gestellt wurde. Die ersten Anzeichen für ein Ausscheiden von Hilger und Kern waren bereits im März 2018 erkennbar, die finale Bewilligung der Aufstockung wurde jedoch erst im November 2019 offiziell. In den 1,5 Jahren dazwischen sind die Arbeiten wegen finanzieller Unklarheiten sehr ins Stocken geraten.

Die Konzeptionierung einer hardwareseitigen Integration wurde im Rahmen der Aufstockung vom DLR übernommen und mit dem Werkzeugbauer Grunewald konstruiert und umgesetzt. Abbildung 51 zeigt das Konzept, Abbildung 52 die finale Konstruktion und Abbildung 53 die gelieferten Teile.

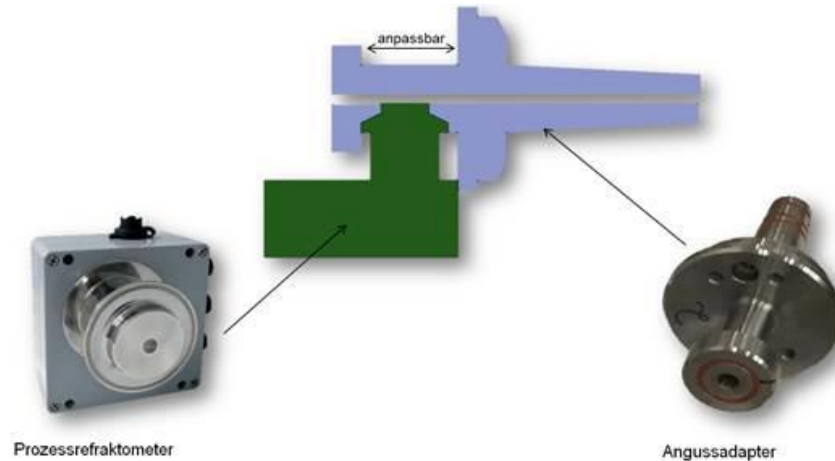


Abbildung 51: Integrationskonzept des Prozessrefraktometers in Angussadapter

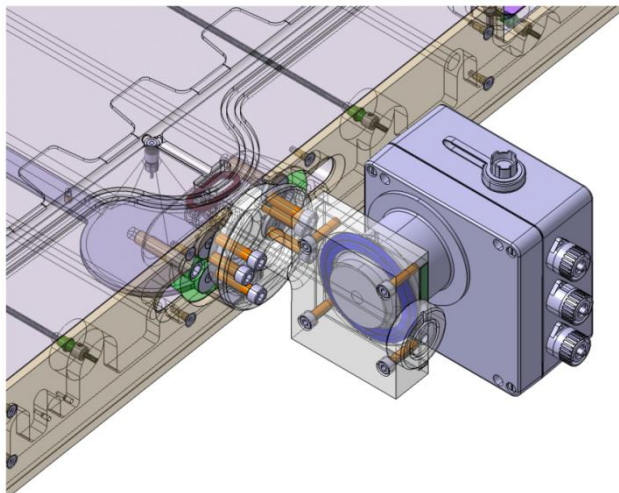


Abbildung 52: Konstruktion Angussadapter mit Prozessrefraktometer



Abbildung 53: geöffneter Angussadapter (1), Prozessrefraktometer (2), Prisma (3) ProfiNet-Kabel zur Anbindung an SPS

Das Mischungsverhältnis ist ein anlagenseitiger Parameter. Er wird daher nicht über das Formwerkzeug selber und dessen Datenkonzentrator PiFeZ überwacht. Stattdessen werden die Signale über die Speicher-Programmierbare Steuerung (SPS) der Anlagensteuerung ausgelesen und zusammen mit den Maschinendaten (z.B. Pumpenleistung) über die interne Anlagenkommunikation weiter gegeben. Die EVO-Forschungsplattform wird derzeit um Schnittstellen des moderneren OPC-UA Standards erweitert. Er ermöglicht eine frei konfigurierbare Datenverwaltung. Die Erweiterungen sind jedoch von anderen Projekten (LuFo-ISENGART, DLR-Cube) abhängig und konnten nicht rechtzeitig innerhalb der iFeZ-Projektlaufzeit umgesetzt werden. Dennoch wurden alle Voraussetzungen für eine spätere Integration des Prozessrefraktometers bereits geschaffen.

Das Prozessrefraktometer konnte für Vorversuche direkt mit einer SPS verbunden und die Messsignale darüber ausgelesen werden. Es wurden Messungen mit Vergleichslösungen durchgeführt. Zunächst in einem statischen Versuchsaufbau, später dann in einer Durchflussmessung.

Unabhängig von einander wurden die folgenden Voraussetzungen validiert:

1. Das Mischungsverhältnis kann über den Brechungsindex bestimmt werden.
2. Mit einem Prozessrefraktometer können inline Messungen im Durchflussverfahren mit einem modifizierten Angussadapter durchgeführt werden
3. Messungen des Prozessrefraktometers können über eine angeschlossene SPS ausgeführt werden.
4. Kombination 1. bis 3. Hierzu soll eine reale Injektion mit der EVO-RTM-Anlage durchgeführt werden, wobei das Refraktometer über den Angussadapter ans RTM-Werkzeug angeschlossen ist und über die Anlagen-SPS ausgelesen wird.

Zu 1. Das Mischungsverhältnis kann über den Brechungsindex bestimmt werden

Die vorliegende Arbeit hat nachgewiesen, dass das MV der untersuchten Harzsysteme abhängig von den optischen Kennwerten ist und über die erstellte Ersatzfunktion berechnet werden kann. Das Refraktometer ist dafür gut geeignet. Es weist eine sehr gute Übereinstimmung der Messwerte mit der daraus ermittelten Funktion auf. Wie sich das Messsystem letztlich im Fertigungsprozess verhält, muss getestet werden, die Ergebnisse aus HAP3 zeigten die grundlegende Anwendbarkeit der Methode.

Zunächst wurden Proben des Harzsystems RTM6 und Epikote / Epikure auf das offenliegende Prisma des Prozessrefraktometers gegeben und über ein Multimeter bzw. die SPS des „CoReHeat“-Versuchsstandes ausgelesen. Die Anbindung erfolgte über das Mapping auf eine 4-20 mA Stromschnittstelle. Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse:

Tabelle 3: Versuchsreihe Epikote / Epikure

Substanz	Harz [ml]	Härter [ml]	Härter [%]	Ausgabe [nD]
Epikote/Epikure	1	0	0	1.53
Epikote/Epikure	0	1	100	-
Epikote/Epikure	5	2	28.57	-
Epikote/Epikure	6	2	25.00	-
Epikote/Epikure	7	2	22.22	-
Epikote/Epikure	8	2	20.00	-
Epikote/Epikure	9	2	18.18	-
Epikote/Epikure	10	2	16.67	-

Das Prozessrefraktometer konnte keine anderen Werte als die des reinen Harzes aufnehmen. Nach Rücksprache mit dem Hersteller ist das Prozessrefraktometer nur für den bei RTM6 benötigten Messbereich eingerichtet worden und kann keine Werte anzeigen, die wesentlich unter 1,53 nD liegen.

In einem vereinfachten Aufbau (Abbildung 54) wurde Komponente A des 2-Komponenten Injektionsharzes RTM6-2 als Probe verwendet.



Abbildung 54: von links nach rechts: Durchflussbuchse mit angeschlossenen Schläuchen und Heizplatten; gläserner Drucktopf mit Harzfaller mit angeschlossenen Schläuchen der Vakuumanlage; Vakuumanlage

Durch das Anlegen eines Vakuums wurde das auf 80°C vorgewärmte Harz durch den ebenfalls vorgewärmten Versuchsaufbau gedrückt. Dabei floß es am Prisma des Prozessrefraktometers vorbei. Es wurde eine sehr geringe Durchflussrate erreicht. Nachdem das Harz das Prisma erreicht hatte, wurde ein Wert von 13.42 mA auf dem Multimeter ausgegeben, was einem Wert von etwa 1.59 nD entspricht. Im Lauf der nächsten 30 Minuten fiel der gemessene Wert auf 13.33 mA (1,58nD), da der Versuchsaufbau nicht temperiert war und das Harz mit fallender Temperatur seinen Brechungsindex ändert. Tabelle 4 zeigt die gemessene Abhängigkeit. Die Starttemperatur betrug 80°C, aber die Harztemperatur konnte während des Versuchs nicht gemessen werden. Daher werden die Temperaturen <80, <<80 und <<<80 nicht angegeben. Nach Ende des Versuchs wurden Temperatur und Brechungsindex nochmals gemessen.

Tabelle 4: Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex

Messung	Temperatur [°C]	Brechungsindex
1	<80	1.5881
2	<<80	1.5886
3	<<<80	1.5887
4	21	1.5888
5	21.8	1.5886
6	21.9	1.5885
7	21; kristallisiert	-

Durch die gute Übereinstimmung des Brechungsindex der reinen Harzkomponente ist die Anwendbarkeit der Eichkurve zur Bestimmung des Mischungsverhältnisses bestätigt. Mit einem Mindestmesswert des Brechungsindex von 1,53 können beide Komponenten des RTM6-2 und alle Mischungen daraus charakterisiert und berechnet werden. Die Messung der Temperatur ist hierfür notwendig und zu berücksichtigen. Aus den drei Messwerten mit bekannter Temperatur ergibt sich eine Abweichung zum Laborrefraktometer von -0,01403.

Prinzipiell können inline-Messungen im Durchflussverfahren durchgeführt werden. Nicht sichergestellt werden kann jedoch, dass es zu keiner Filmbildung auf dem Prisma kommt. Das Risiko, immer (in Teilen) dasselbe Harz zu messen bleibt bestehen und konnte innerhalb der Projektlaufzeit nicht mehr durch weitere Untersuchungen ausgeschlossen werden. Alternativ kann die in AP2.5 beschriebene Variante mit Probenentnahme und Offlinemessung weiterverfolgt werden.

Die Versuche haben ebenfalls die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Temperaturmessung aufgezeigt. Da während des Projektverlaufs die Verfügbarkeit von Drahtlos-Temperatursensoren bekannt wurde, sollten diese im Rahmen der Aufstockung getestet werden.

Die Messstrecke

Der SAW-Reader (Datenerfassungssystem) erzeugt über die integrierte Elektronik einen Abfrage-Wechselstromimpuls, der aus einer Bandbreite von Frequenzen besteht. Über das Reader-Koaxialkabel wird der Impuls an die Reader-Antenne geleitet und als elektromagnetische Strahlung in die Umgebung abgestrahlt. Die Sensor-Antenne empfängt die Strahlung und erzeugt daraus wieder ein Wechselstromsignal. Über das Sensor-Koaxialkabel wird der SAW-Sensor angeregt und erzeugt, nachdem der Abfrageimpuls abgeklungen ist, ein Antwortsignal. Dieses wird über das Sensor-Koaxialkabel an die Sensor-Antenne geleitet, von dort abgestrahlt und von der Reader-Antenne empfangen. Über das Reader-Koaxialkabel gelangt das Antwort-Signal, als Wechselstromsignal, zum SAW-Reader. Dort wird über elektronische Komponenten und die Software ein Temperaturwert generiert. Aus dem Antwortsignal werden noch weitere relevante Informationen gewonnen, welche die Qualität der Signalübertragung beschreiben. Über gängige BUS-Systeme, wie 4 bis 20 mA oder 0 bis 10 V-Schnittstellen, oder auch über WLAN (*engl. wireless local area network*) und Ethernet, können die Daten zur SPS übertragen werden, die die Temperaturwerte analysiert und Befehle generiert, die in eine Regelung eingespeist werden (Abbildung 55).

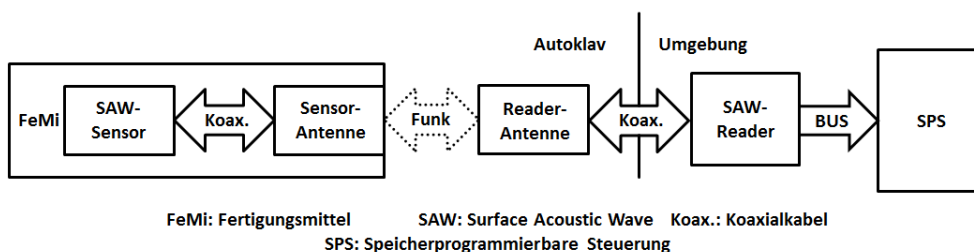




Abbildung 55: Grundsätzlicher Aufbau einer Messkette zur Temperaturmessung mit SAW-Sensoren

Weiterhin besteht die Möglichkeit, Eingabe und Anzeigeräte mit dem SAW-Reader zu verbinden, um die Parameter anzupassen und gespeicherte Daten auszulesen. Die Komponenten einer Messkette zur Temperaturmessung mit SAW-Sensoren, siehe Tabelle 5, werden anhand der zur Verfügung stehenden Messtechnik erklärt. Gleichzeitig wird auf das Messprogramm eingegangen, sowie auf die für den Anwendungsfall wichtigen, beeinflussbaren Parameter einer drahtlosen Signalübertragung.

Tabelle 5: Überblick Messtechnik SAW-Temperaturmessung

Komponente	Wichtige Parameter	
	Seriennummer:	INDUS0316510003
	Antennenanschluss:	2x SMA female
	Frequenzband:	2400 – 2483 MHz (ISM-Band)
	Schnittstellen:	LAN, Trigger (in/out), 4...20A, 0...10V, WLAN
	Betriebstemperatur:	0°C – 40°C
	Abmessungen:	200mm x 127mm x 45mm
	Seriennummer	KPTN1
	Anschlüsse:	2x N male
	Betriebstemperatur:	max. 260°C
	Material:	Kapton
	Dämpfung:	4,0 dB/m
	Abmessungen:	2000mm x Ø2,4mm

Antennen 	Seriennummer: Anschluss: Typ /Polar./ Gain: Betriebstemperatur: Material: Abmessungen:	ASTSW030LP102600NF-1907000(26/27) 1x N female Schlitzantenne/ linear/ 10 dBi -40°C - +260°C Rostfreier Stahl, Kapton 165 mm x 165mm x 30mm
SAW-Sensor 	Seriennummer: Anschluss: Resonanzfrequenz: Betriebstemperatur: Material: Abmessungen:	SCS24(52/67)BB30SF 1x SMA female Bei 25°C: 2452 MHz oder 2467 MHz -40°C – 275°C Rostfreier Stahl, Kapton, Keramik Sensor: 30mm x Ø4,0mm Kabel: 1000mm x Ø2,4mm
Koaxialadapter 	Seriennummer: Adapter: Material:	Verschiedene, normale Qualität 1x SMA male auf N female 1x SMA male auf N male 1x SMA male auf SMA male Rostfreier Stahl, Teflon

Der SAW-Reader ist der Messcomputer, der das Abfragesignal erzeugt und das Antwortsignal auswertet. In Abbildung 56 ist ein Reader der Firma SAW Components dargestellt der zwei Antennenanschlüsse bereitstellt. Bei optimalen Voraussetzungen können insgesamt bis zu 8 Sensoren von dem Reader erfasst werden. Auf dem Messrechner wird das Messprogramm ausgeführt, welches an späterer Stelle vorgestellt wird. Die ermittelten Temperaturdaten können über verschiedene Schnittstellen an eine SPS weitergeleitet werden. Über die Ethernet-Schnittstelle lässt sich über ein VNC-Programm (*engl. virtual network computing*) mit einem Computer auf den Reader zugreifen, sodass Einstellungen an der Software vorgenommen werden können, sowie der Zugriff auf das Messprogramm ermöglicht wird. Über die USB-Schnittstelle (*engl. universal serial bus*) können die gespeicherten Messdaten auf einem externen Speichermedium abgelegt werden.



Abbildung 56: SAW-Reader der Firma SAW Components Dresden mit den Anschlussbezeichnungen

Koaxialkabel (siehe Tabelle 5) sind Leiter, die zur Übertragung von hochfrequenten Signalen dienen. Sie kommen zum Einsatz, wenn die Wellenlänge des Wechselstromsignals kleiner wird als die Leiterlänge. Sie bestehen aus einem Innenleiter, Seele genannt, einem Außenleiter, einer konzentrischen Isolation und einem Mantel. Der Innenleiter führt die Signalspannung und der Außenleiter ein Referenzpotenzial. Gleichzeitig dient das Schirmgeflecht des Außenleiters zur Abschirmung gegen Störsignale. Die eigentliche Signalübertragung erfolgt über das Dielektrikum zwischen den beiden Leitern.

Die Koaxialadapter (siehe Tabelle 5) dienen zur Verbindung der Koaxialkabel mit den anderen Komponenten der Messstrecke, wenn deren Anschlüsse nach verschiedenen Verbindungsstandards ausgeführt sind. Antennen erzeugen aus einem hochfrequenten Wechselstromsignal elektromagnetische Wellen. Erst dadurch wird eine kabellose Übertragung möglich. Es gibt die verschiedensten Bauformen von Antennen, die sich für verschiedenen Frequenzen und Anwendungsfälle eignen. Die im Versuchsaufbau verwendeten Antennen sind Schlitzantennen. Sende- und Empfangsantenne sind baugleich ausgeführt. Sie sind für Temperaturen bis 260°C ausgelegt. In Abbildung 57 ist der eine der verfügbaren Schlitzantennen zu sehen.

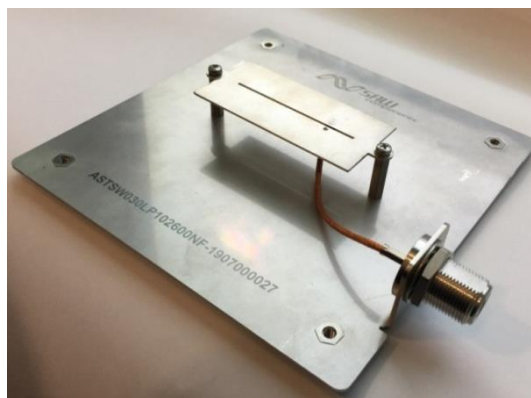


Abbildung 57: Hochtemperaturfeste Schlitzantenne

Der SAW-Sensor ist das Bauteil in der Messkette, welches die Signale so verändert, das daraus eine Temperatur ermittelt werden kann. Die vorhandenen Sensoren arbeiten nach dem Resonatorprinzip. Der Halb-

leiterchip ist in einem metallischen Mantel eingehaust, der vor äußeren Einflüssen schützt. Das Koaxialkabel, welches eine Verbindung mit der Antenne ermöglicht ist ohne Adapter an den Sensor montiert und fest mit ihm verbunden (siehe Abbildung 58).

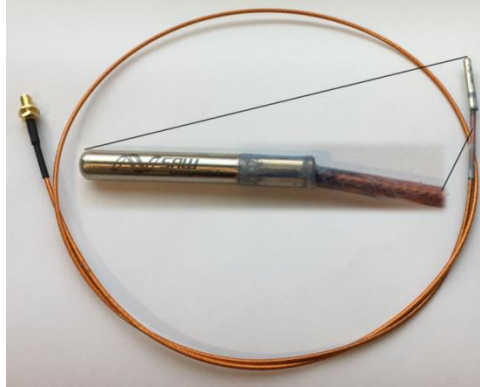


Abbildung 58: SAW-Sensor mit fest verbundenem Koaxialkabel für den Antennenanschluss

Das Messprogramm *Start2Gage* ist mit einer graphischen Benutzeroberfläche ausgestattet, die für einen Zugriff über eine VNC-Verbindung optimiert ist. In Abbildung 59 ist das Menüfenster gezeigt, welches den Frequenzverlauf und die Resonanzfrequenz eines Sensors bei Umgebungstemperatur zeigt (oberes Diagramm). Im unteren Bildbereich wird der zeitliche Verlauf der Signalstärke angezeigt. Anhand dieses Menüfensters kann die Signalqualität überwacht und angepasst werden, da die Anzeige in Echtzeit erfolgt. Weitere Informationen sind dem Bild zu entnehmen. Der Temperaturverlauf ist in Abbildung 60 zu sehen, ist aber für die Bewertung der Messung nur von zweitrangiger Bedeutung.

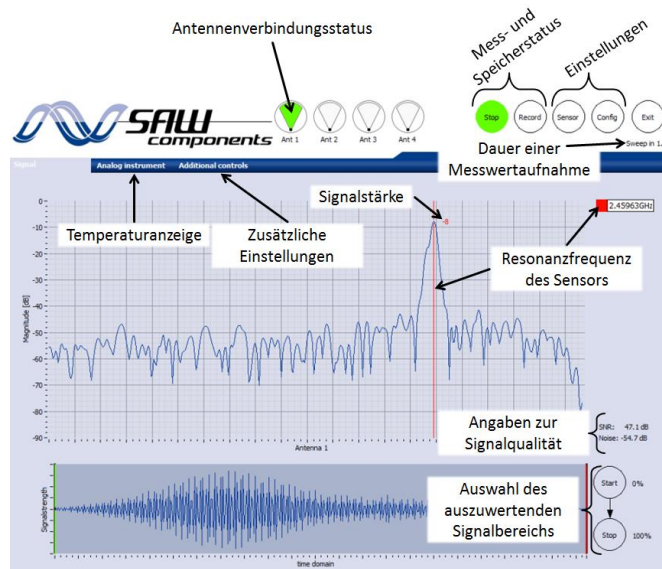


Abbildung 59: Das Messprogramm Start2Gage. Zu sehen ist der Frequenzverlauf eines Sensors bei Raumtemperatur.

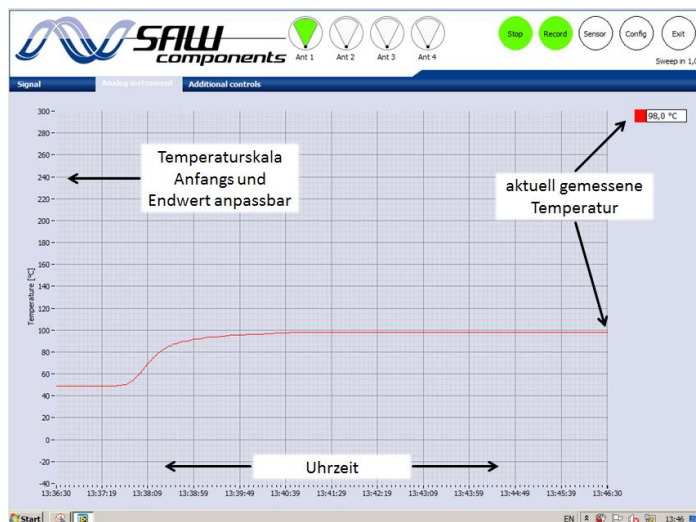


Abbildung 60: Das Messprogramm Start2Gage. Zu sehen ist der Temperaturverlauf eines Sensors von einer Temperatur von 50°C auf 98°C

Nicht durchgeführt werden konnte die Gesamtvalidierung anhand einer realen Injektion. Da in iFeZ keine Anlagenteile eingeplant wurden, sollten Synergieeffekte mit anderen Projekten genutzt werden. In diesem Fall sollten konkret die Injektionsversuche im LuFo-V3-Projekt ISENGART genutzt werden, um das Prozessrefraktometer zu validieren. Durch einen Wechsel des Zielbauteils und Verzögerungen bei der Festlegung auf ein finales Design konnte das RTM-Werkzeug erst im März 2019 geliefert werden, etwa 9 Monate nach Plan. Auf Grund der Corona-Pandemie und der damit verbundenen Einschränkungen kann das Formwerkzeug erst voraussichtlich im Juli 2020 in Betrieb genommen werden. Dennoch ist weiterhin geplant, das Refraktometer für die ISENGART-Versuche einzusetzen. Die Validierung wird im ISENGART Bericht dokumentiert.

FVK-Fertigungsrandbedingung: Dichtigkeit

Zur Sicherstellung der Randbedingungen für den FVK-Fertigungsprozess erfolgten Dichtigkeitstests für alle Einzelkomponenten in Anlehnung an Vorgaben der Luftfahrt. Mit Hilfe des Vakuumreglers CVC3000 wurde das Anfangsvakuum von 10mbar angefahren. Nach dem Abklemmen der Druckanstieg gemessen und mit dem zulässigen Maximalwert verglichen. Hierzu wurden Wiederholungsmessungen bei Raum- und Fertigungstemperatur durchgeführt. Als kritisch erwies sich hierbei der Wirbelstromarray. Die Trennung zwischen Formwerkzeug und Sensor erfolgt über eine eingeklebte Keramik. Die Diskrepanz in den Ausdehnungskoeffizienten der verwendeten Materialien sowie das Haftverhalten unter Temperatur führten in Kombination mit dem eingelegten Preform und angelegten Vakuum zum undefinierten Ablösen und damit zur Undichtigkeit.

Harzbereitstellungsanlage

Zur Berücksichtigung des Kriteriums Mischgüte wurden nach dem Ausstieg des Projektpartners Hilger&Kern die Arbeitsinhalte neu definiert bzw. angepasst. Neben den Voruntersuchungen sowie der Identifizierung der Sensorik: Prozessrefraktometer hat das DLR eine Harzbereitstellungsanlage mit der Option zur Modifikation von Hard- und Software im Sinne der iFeZ-Projektinhalte beschafft und in Betrieb genommen.

2.6. HAP 5

Zusammenfassung zu den Zwischenberichten: ZB04_0118-0618; ZB05_0718-1218; ZB06_0119-0619

Für die im HAP5 geplanten Fertigungsversuche am Funktionsmuster Spant war die Bereitstellung passender Faserpreforms erforderlich. Auf Basis der Spantgeometrie und dem Faserhalbzeug G0926 von Hexcel wurde ein Lagenaufbau definiert, ferner eine Drapier-Simulation durchgeführt und daraus die Zuschnittdaten der Einzellagen abgeleitet. Das Preformen selbst erfolgte über ein an das Tiefziehen angelehnte Umformen mittels Diaphragma am RTM-Formwerkzeug. Neben einer Stapelumformung konnte so direkt der Endkonturzustand sichergestellt werden. Details hierzu können dem Kapitel 2.3 zum HAP2 entnommen werden.

Zur Validierung der Einzel-Prozess-Ansätze (HAP2 – HAP4) am Spant-Funktionsmuster erfolgte zuerst deren Implementierung in die vorhandene Infrastruktur. Abbildung 61 zeigt die integrierte Gesamtanlage am DLR Braunschweig bestehend aus Presse mit sensorintegriertem Formwerkzeug (Mitte), Harzbereitstellungsanlage (links) sowie Datenkonzentrator „PiFeZ“ und Visualisierungsstand (rechts).

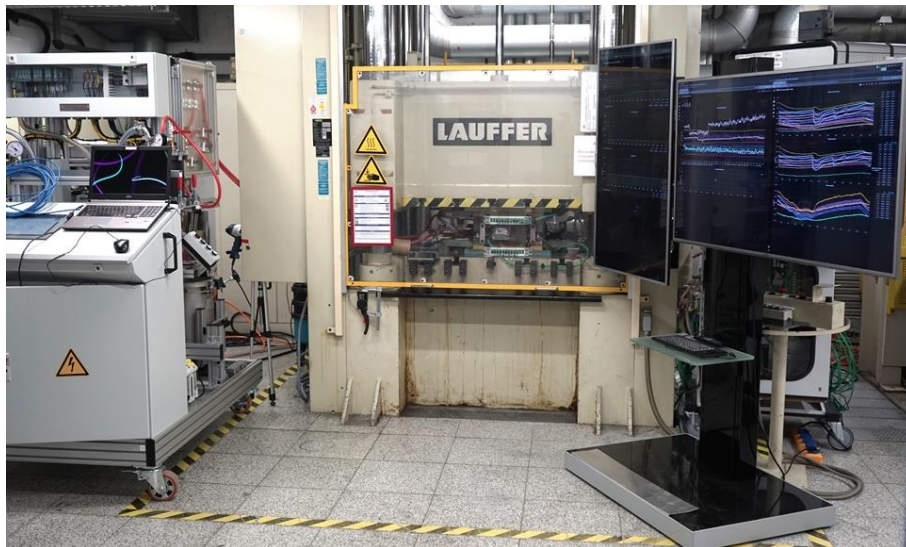


Abbildung 61: Integrierte Gesamtanlage Closed-Mould (Funktionsmuster: Bauteil Spant)

Aufgrund von Verzögerungen durch einen Providerwechsel des DLRs musste ein eigenes Maschine-zu-Maschine-Netzwerk (M2M) aufgebaut werden. Das Koffer-Setup bestehend aus Rechner, WLAN-AP, Switch und Sensorknoten erwies sich im Verlauf des Projektes als wertvolles Bindeglied. Zusammen mit einem mobilen Arbeitspult auf dem ein Schaltschrank montiert wurde konnte ein vollwertiges mobiles „Industrie 4.0“ Paket bereitgestellt werden. Der Schaltschrank des Arbeitspultes beinhaltet neben einer zentralen Stromversorgung auch die von der ESYS GmbH bereitgestellte Hardware zur Digitalisierung beliebiger Sensorensysteme „PiFeZ“. Das Gesamtpaket passt in einen handelsüblichen Transporter und lässt sich bei Industriepartnern betreiben, sofern eine 230V-Steckdose zur Verfügung steht. Neben einem Monitor des Arbeitspultes bietet das Setup auch die flexible Live-Visualisierung auf einem Tablett, Abbildung 62.



Abbildung 62: Mobile M2M-Kommunikationshardware

Im Zuge der Formwerkzeugintegration in die Gesamtanlageninfrastruktur fand in mehreren Versuchsreihen eine Prüfung die Dichtigkeit am sensorintegrierten Formwerkzeug unter Fertigungsrandbedingungen mit den gefertigten Preforms statt. Die Ergebnisse der Dichtigkeitsprüfung zeigt Abbildung 63. Ausgewertet wurde hierbei der Druckanstieg nach dem Erreichen eines Anfangs-Sollvakuums von 10mbar. Temperaturbedingt konnte für Aufbau1 ein Anschmiegen der Dichtungen und damit der Grenzwert von 5mbar/min erreicht werden. Nach einem ersten Fertigungsversuch zeigte sich für Aufbau2 bereits bei Raumtemperatur eine überhöhte Undichtigkeit, die auf ein Ablösen der Keramik am Wirbelstromarray zurückzuführen war. Aufbau3 zeigt die Versuchsreihen mit eingebautem Wirbelstromarray-Blindstopfen, welche unter Druck und Temperatur wiederholend eine hohe Dichtigkeit des gesamten Fertigungsaufbaus aufwiesen. Die Modifikationen schafften alle Voraussetzungen für die sensorgestützte Fertigung der Funktionsmuster.

Die Erstinbetriebnahme bzgl. Tränkung am iFeZ-Formwerkzeugs fand mit induktiv beheizter Harzkartusche sowie Wägezelle der Smart Work Station (SWS) zur kontinuierlichen Erfassung des Tränkungsfortschritts statt. Bei den Versuchsdurchführungen wurde eine nicht korrekt ausgeführte mechanische Bearbeitung im Bereich der hinteren Abstandssensoren zur Dichtungsnut identifiziert, in deren Folge bei Überdruck die selbige entweichen konnte. Weiterhin kam es durch gleichzeitigen Druck und Temperatur in Kombination mit Harz und Preform zur Undichtigkeit der Keramikabdeckung am Wirbelstromarray. Die Auswertung des Tränkungsfortschrittes in Abbildung 64 macht deutlich, dass bis zu 100s eine größere Menge Harz ins Formwerkzeug fließt, während danach die Tränkung langsamer fortschreitet. Erklärung hierfür ist die Ausbildung eines Ringangusses im Überlaufbereich der unteren Formwerkzeughälfte. Ist dieser vollständig gefüllt, findet nur noch eine Tränkung des trockenen Faserhalbzeuges statt. Auf Basis der durchgeführten Voruntersuchungen kann festgehalten werden, dass die integrierte Gesamtanlage bzgl. Datenerfassung und FVK-Fertigung funktionsfähig ist. Darauf aufbauend erfolgte die sensorgestützte Prozess-Betrachtung des Fertigungsprozesses: Closed-Mould auf Industrieniveau.

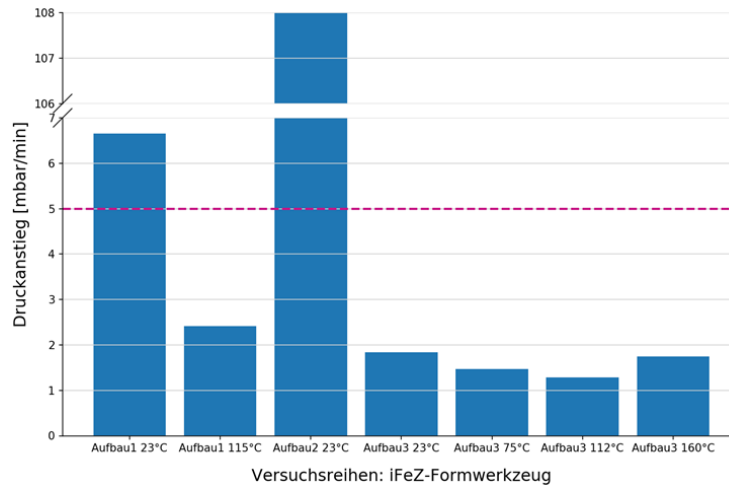


Abbildung 63: Versuchsreihen zur Dichtigkeitsprüfung am gesamten Formwerkzeug unter Temperatur

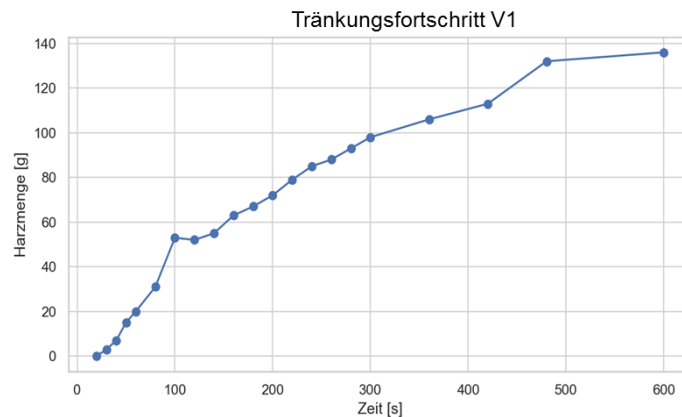


Abbildung 64: Tränkungsfortschritt zur Formwerkzeugenbetriebnahme am Funktionsmuster Spant

Das Versuchsprogramm umfasste die sensorgestützte Fertigung von insgesamt 6 Funktionsmustern. Das Faserhalbzeug G0926-bebindert wurde mit dem Harzsystem RTM6-1K getränkt, welches beides von der Firma Hexcel stammt. Die Tränkung erfolgte bei 80°C und die Aushärtung bei 160°C. Die Haltezeiten in den jeweiligen Teilabschnitten definierten sich über die erfassten Sensordaten und deren Interpretation zur lokalen Harzankunft, dem Porenwandern oder der bereitgestellten Harzmenge sowie zum Harzzustand. Abbildung 65 zeigt das Funktionsmuster nach erfolgter Tränkung und Aushärtung im Formwerkzeug sowie den entformten Endkontur-Spant.

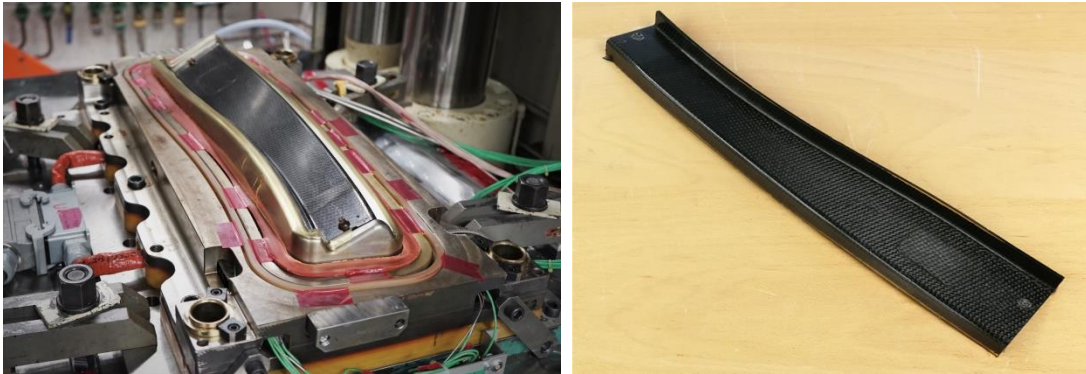


Abbildung 65: Vollständig getränktes Bauteil im Formwerkzeug (links) und Entformtes Bauteil (rechts)

Sensorgestützte Prozess-Betrachtung

Wirbelstromsensor

Die Untersuchungen und Ergebnisse zur sensorischen Prozessbegleitung seitens Wirbelstromabstands-sensor und Wirbelstrom-Array sind dem Abschlussbericht des Projektpartners Rosen zu entnehmen.

Ultraschall

Ergänzend zur Datenanalyse der Sensorkonzeptionierung und -integration nach HAP3 und HAP4 (siehe Kapitel 2.4 und Kapitel 2.5) musste die automatische Signalauswertung gelöst werden. Für die Fließfrontdetektion konnte dies umgesetzt werden. Die Laufzeitanalyse zur Bestimmung der aktuellen Aushärtung ist hingegen noch offen. Die meisten Sensoren lieferten gute Signale trotz des Aufwandes bei der Sensorintegration sowie dem Versagen der Klebschicht zur Sensoranbindung am Formwerkzeug unter Temperatur. Eine deutliche Steigerung der Zuverlässigkeit und Standfestigkeit der Sensoren konnte durch eine verbesserte Klebverbindung umgesetzt werden. Während der Hauptversuche konnte so die Harzankunft identifiziert werden. Neben dem Rückschluss auf den Fließfrontverlauf wird die Gefahr für Einschlüsse sichtbar.

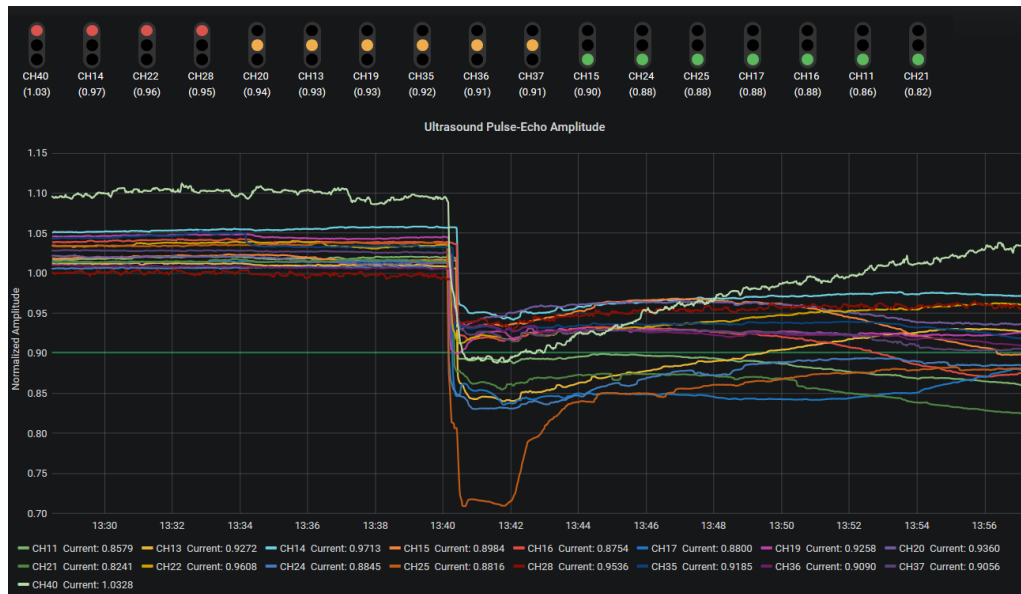


Abbildung 66: Automatische Fließfront-Auswertung ermöglicht Visualisierung und einfache Prozesskontrolle für den Anwender mittels Ampel-Anzeige

Die im Projekt erzielten Ergebnisse stellen nun die US-Daten zur Fließfrontankunft und -geschwindigkeit unmittelbar und verarbeitbar noch während der Herstellung zur Verfügung. Die Kopplung mit dem RINSE-System ermöglicht außerdem bereits während der Fertigung eine Aussage zu möglichen Fehlstellen in Bereichen ohne Sensoren. Auch der Faservolumengehalt kann bereits während der Herstellung bestimmt werden, sowie der Harzzustand durch die Kopplung mit den materialabhängigen Aushärtemodellen (FA-Services/CureSim).

Temperatursensor

Die Temperatur ist eine der wichtigsten Größen hinsichtlich vollständiger Tränkung und Aushärtung. Sie trägt damit maßgeblich zu den finalen Bauteileigenschaften bei. Neben dem erforderlichen Soll-Temperaturniveau gehören daher auch minimale zeit- und ortsabhängige Abweichungen im Temperaturfeld. Die selektive, zonenbasierte Temperatureinstellung am Formwerkzeug ermöglicht eine Anpassung der identifizierten Temperaturabweichungen für alle Thermoelemente hin zu einem Toleranzband mit maximal 5K um den Sollwert. Zur schnellen und einfachen Visualisierung des Sachverhaltes der Zeitreihen aller 48 Thermoelemente eignet sich die Verwendung einer Heatmap für das Grafana Dashboard, Abbildung 67.

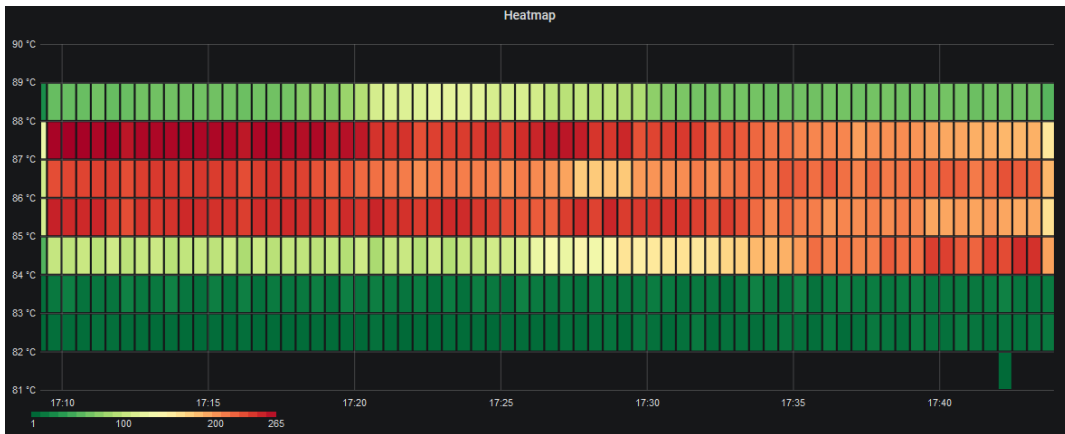
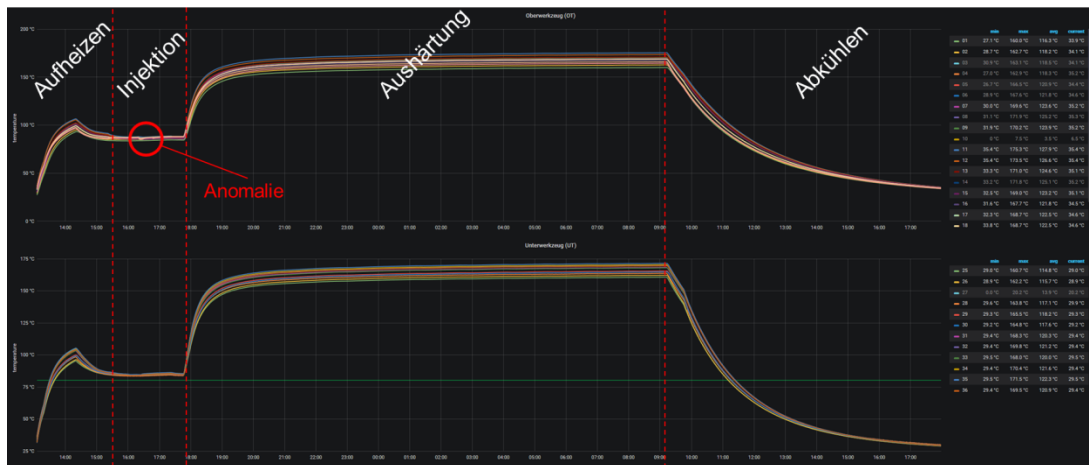


Abbildung 67: Grafana Heatmap: Direkte Darstellung der Häufigkeitsverteilung gemessener Formwerkzeugtemperaturen während des Prozessschrittes: Tränkung

Klassisch wird bei der nachträglichen Datenauswertung zur besseren Übersicht die gesamte Messkurve betrachtet und damit über einen Temperaturbereich zwischen 25°C und 180°C dargestellt. Hierdurch kann qualitativ der Kurvenverlauf überprüft werden. Die Skalierung lässt jedoch keine detaillierte Aussage zu möglichen Abweichungen zu. Die Live-Visualisierung der Temperaturen während des Versuches hingegen brachte eine Besonderheit hervor, die auf Grund der geringen Abweichungen im Temperaturverlauf von weniger als 2K bei der klassischen Betrachtung im Rauschen untergeht. Abbildung 68 stellt die Darstellungsvarianten gegenüber. Deutlich zu erkennen ist hierbei das aufeinander folgende Absinken einzelner Temperaturen. Dieser Vorgang wiederholt sich im Prozessschritt Nachdrücken, bei dem durch die Harzbereitstellungsanlage zyklisch gespült wird.



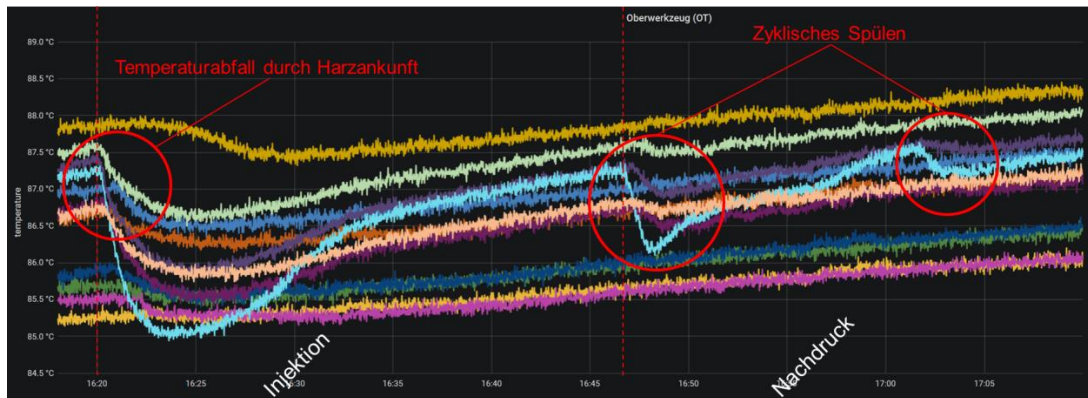


Abbildung 68: Klassische Darstellung zum Temperaturverlauf mit Teilprozessschritten sowie möglicher Anomalie im Tränkungsbereich (oben); Live-Darstellung des Temperaturverlaufs während der Fertigung mit markanten Temperaturabfällen für einzelne Thermoelemente (unten)

Die nachgeschaltete Zuordnung der Thermoelementpositionen zu den Zeitreihen zeigt hierbei, dass die Harzankunft mit dem Zeitpunkt sowie dem Gradienten des Temperaturabfalls zusammenfällt, so dass der Tränkungsverlauf hieraus rekonstruiert werden kann. Abbildung 69 stellt die Auswertung der Zeitreihen den Positionen der Thermoelemente für das obere Formwerkzeug dar.

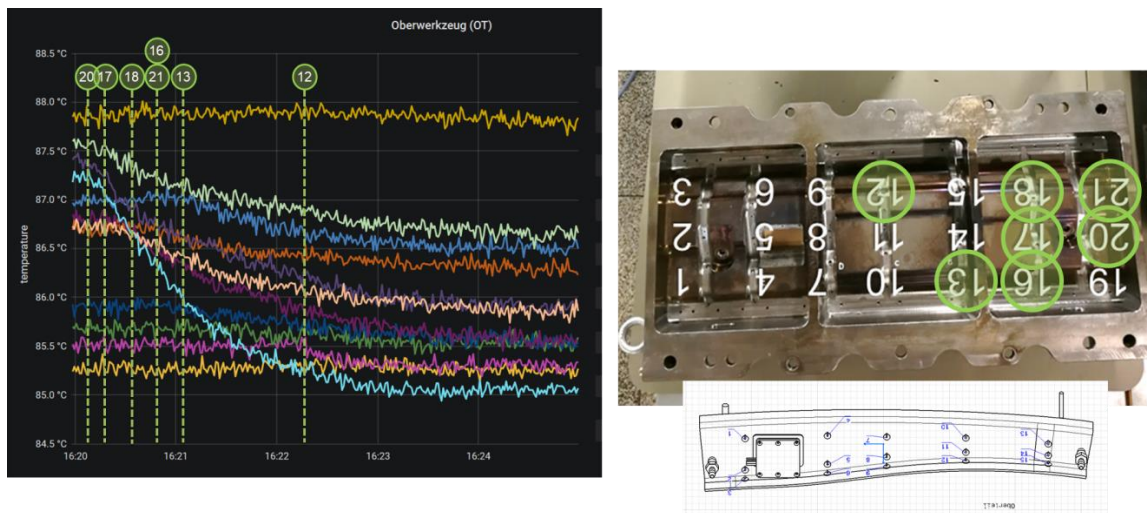


Abbildung 69: Rekonstruktion des Tränkungsverlaufs aus Temperaturzeitreihen und Thermoelementposition

Indirekt kann durch den „thermisch-sensierten Tränkungsfortschritt“ in erster Näherung Rückschluss auf mögliche Fehlstellen beziehungsweise die Oberflächengüte gezogen werden. Gleiches gilt für den Harzzustand und die Formtreue, welche als annähernd einheitlich in Folge gleichen Temperaturniveaus und geringen Temperaturschwankungen angesehen werden kann. Die Temperatur ist ein, wenn nicht sogar der, wesentliche Parameter für die Herstellung als auch die entstehende Qualität des Bauteils, so dass die lückenlose Überwachung der Temperatur zwingend erforderlich ist.

Prozessrefraktometer

Auf Grund der unter Kapitel 2.5 (HAP4) beschriebenen Punkte konnte keine Anbindung des Prozessrefraktometers an die Gesamtanlage sowie Fertigungsversuche am Funktionsmuster zur Validierung des Messsystems erfolgen. Die Vorversuche zeigten jedoch, dass bereits während der Mischung und Dosierung des Mehrkomponenten-Harzsystem dessen Zustand über den linearen Zusammenhang zwischen Mischungsverhältnis und Brechungsindex beschrieben werden kann. Zu berücksichtigen ist hierbei die Temperatur sowie die Alterung des Harzes als größte Einflussparameter seitens Material und Prozess. Seitens des Messgerätes stellten der verfügbare Messbereich sowie die unzureichende Messgeschwindigkeit die größten Herausforderungen dar.

Drucksensor

Aus dem LuFo-V Projekt VTP-InCoDa (Sandwich²) war bekannt, dass sich trockene Bereiche in einem Laminat mit niedrigem Faservolumengehalt während eines fortschreitenden Injektionsprozesses vollständig auflösen können. Der negative Einfluss von Fehlstellen auf die mechanischen Eigenschaften eines faserverstärkten Bauteils ist damit vermutlich durch eine geschickte Prozessführung zu beeinflussen. Die Auflösung lässt sich in zwei Stufen einteilen - Auflösung des trockenen Bereiches und Abführung der mobilen Poren. Manche Restporen bleiben allerdings zwischen Filamenten gefangen und verbleiben vorerst im Bauteil. Diese Restporen können sich jedoch bei stetigem Harzfluss auflösen, vermutlich durch diffusionsgesteuerte Lösungseffekte. Während der Auflösung eines trockenen Bereiches gibt es Anomalien im aufgezeichneten Druckdiagramm.

Im Projekt iFeZ konnte verifiziert werden, dass sich das Auflösen einer trockenen Stelle auch für Faserverbundbauteile mit hohem Faservolumengehalt im Drucksignal niederschlägt, siehe Abbildung 70. Neben der Bestimmung der Leckagerate zur Dichtigkeit gibt die Höhe des Druckabfalls beim Spülen Auskunft über den Füllzustand des Bauteils. Allerdings zeigten die temperaturkompensierten Drucksensoren für Hochtemperaturanwendungen bei den Untersuchungen eine vernachlässigbare Sensitivität gegenüber den Vibrationen des Open-Mold-Formwerkzeuges und eine signifikante Temperaturabhängigkeit. Selbst nach einer mechanischen Überarbeitung der Hardpoints und des CM-Werkzeuges blieb die Temperaturabhängigkeit bestehen. Wie der Hersteller später zugab, ist die Temperaturkompensation der Drucksensoren mit den Heizraten des Prozesses überfordert. Die Temperaturkompensation wurde nur für leichte Temperaturschwankungen ausgelegt. Aus diesem Grund sind die im Projekt gemessenen absoluten Druckwerte nicht valide. Der Signalverlauf ist allerdings belastbar. Weiterhin stellte sich im closed-Mould-Szenario heraus, dass die Abdeckung des Drucksensors mit einem gelochten knopfähnlichen Plättchen nicht notwendig ist. Das Fasermaterial bzw. der Preform ist steif genug und drückt nicht auf die Sensorfläche. Es kann daher auf eine aufwendige Formwerkzeugbearbeitung der Kavität mit Bauteilkontakt verzichtet werden.

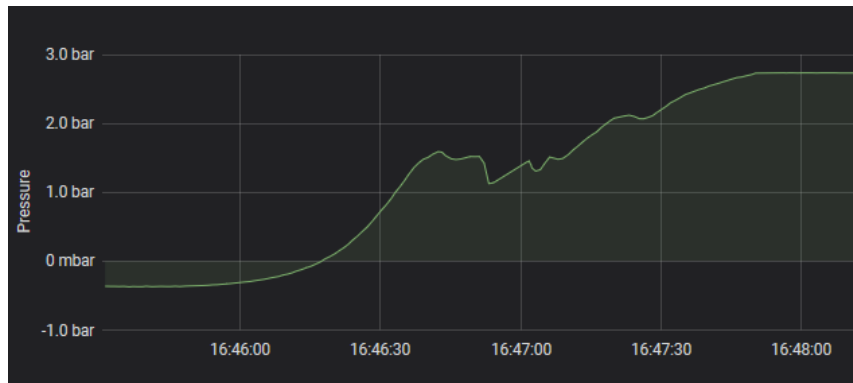


Abbildung 70: Gemessener Matrixdruck während einer Infusion inklusive charakteristischem Schwingen bzw. Anomalie durch die Auflösung trockener Bereiche

Zur sensorgestützten Prozess-Betrachtung des Tränkungsprozesses und zur Beurteilung der Tränkungsqualität wurde das „Resin ImpregNation SystEm (RINSE)“ weiterentwickelt. Aufbauend auf den Ergebnissen des Projektes LuFo-V VTP-InCoDa (Sandwich2) beruht das System auf der Verknüpfung von Fließsimulation und Sensordaten. Das Ergebnis der Verknüpfung ermöglicht die simulative Bestimmung von Größe und Position gegebenenfalls vorhandener Gaseinschlüsse. Wie in Abbildung 71: Systemkomponenten des Resin ImpregNation SystEms (RINSE) dargestellt, werden die erfassten Daten und die Fließsimulationsergebnisse verarbeitet und anschließend visualisiert. Der Eingriff in den Prozess wurde im Rahmen des Projektes „iFeZ“ nicht untersucht, soll allerdings in zukünftigen Projekten implementiert werden. Ziel des Vorhabens ist das „gläserne Werkzeug“ bzw. ein digitaler Zwilling des Tränkungsprozesses und die verständliche Darstellung der gewonnenen Daten für jedes Bauteil.

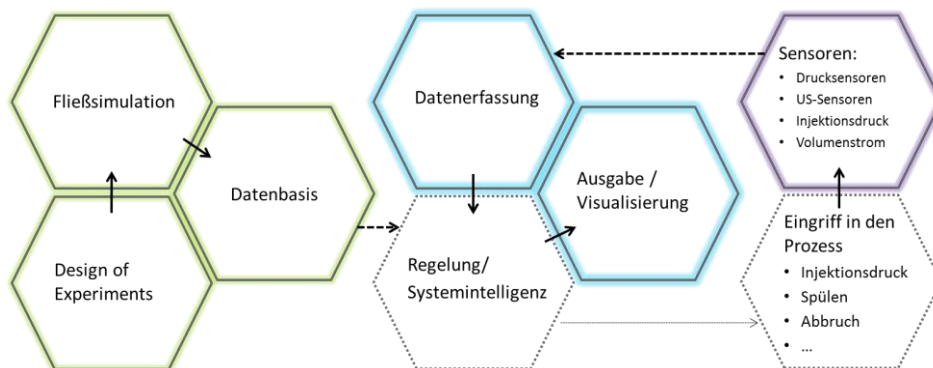


Abbildung 71: Systemkomponenten des Resin ImpregNation SystEms (RINSE)

Das zuvor rudimentär existierende System wurde weitestgehend auf skalierbare open-source Software umgestellt und um quelloffene Schnittstellen erweitert (Implementierung einer REST API, MQTT und JSON; Container basierte Virtualisierung; mongoDB; Redis). Die Integration weiterer Auswertungen und die Möglichkeit der flexiblen und verständlichen Visualisierung wissenschaftlicher Inhalte sind hierdurch zukünftig gesichert. Auch der Transfer auf weitere Fertigungsverfahren ist möglich. Als Front-End des Systems wurde eine Web-Applikation geschrieben, welche auf allen webfähigen Endgeräten lauffähig ist. Abbildung 72 zeigt das Front-End für das Closed-Mould Szenario während der Tränkung eines Bauteils.

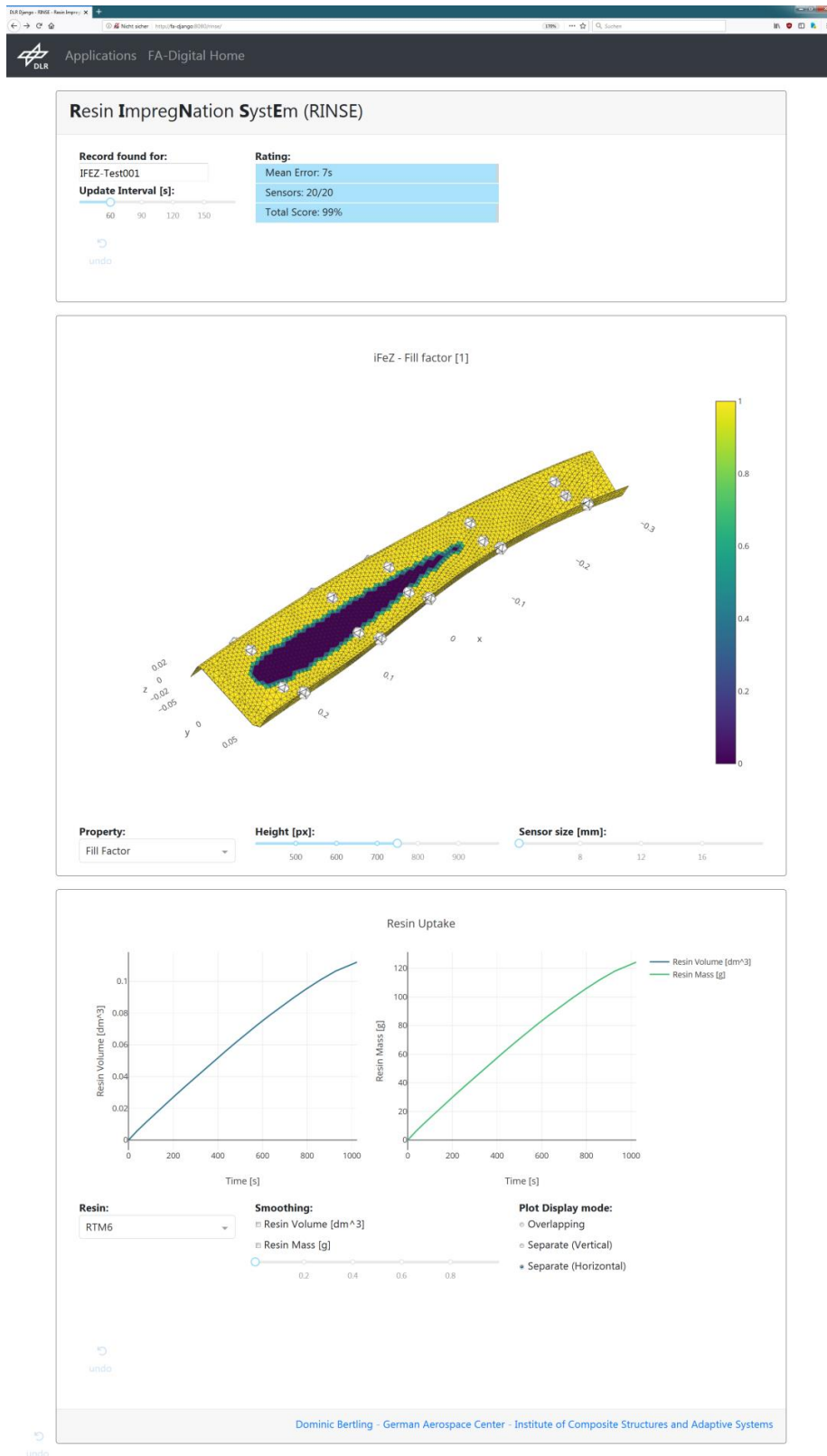


Abbildung 72: Front-End des Resin ImpregNation SystEms (RINSE) während der Tränkung

In der ersten Ausbaustufe wird das System der Fertigung zur Verfügung gestellt und verständlich die komplexen Zusammenhänge des Tränkungsprozesses visualisieren. Perspektivisch sollen kostspielige Vorversuche, lange Produktionsanläufe und die hohen Qualitätssicherungsaufwände mit dem System reduziert werden.

Erstmalig ergab sich durch die Live-Visualisierung die Möglichkeit der vergleichenden Betrachtung im Prozess. Markante Verläufe oder Auffälligkeiten konnten untereinander verglichen werden, Fehlsignale identifiziert und so ausgeschlossen werden. Gleichmaßen aber auch die nachträgliche Änderung von Sollwertvorgaben bei der Temperatur. Ebenfalls aus der Gesamtheit der Daten ist der durchgängige Prozessablauf rekonstruierbar. Zum besseren Verständnis zeigt Abbildung 73 schematisch die charakteristischen Kurvenverläufe alle Größen. Jedem Kurvenabschnitt kann ein Prozesszustand zugeordnet werden, so dass dessen Fertigungsteilschritt nachvollziehbar ist. Gleiches gilt für das Bauteil, da direkte Werkstoffzustände erfasst werden. Hieraus ergibt sich dann auch die Methode zur robusten Prozessgestaltung. Zu unterscheiden ist dabei die Möglichkeit der Prozessanpassung durch / nach dem Erreichen eines definierten Prozess- oder Bauteilzustandes oder anhand sensoridentifizierter Streuungen. Die im Projekt inkludierten Sensoriken ermöglichen hierbei die Bestimmung der folgenden Prozess- und Bauteilzustände:

- Formwerkzeug geschlossen
- Position & Orientierung Preform
- Temperaturverhalten
- Harzankunft
- Kavitätsfüllung
- Formwerkzeug-Druck / Nachdruck
- Kavitätshöhe
- Reaktionsfortschritt / Aushärtegrad
- Entformungszeitpunkt

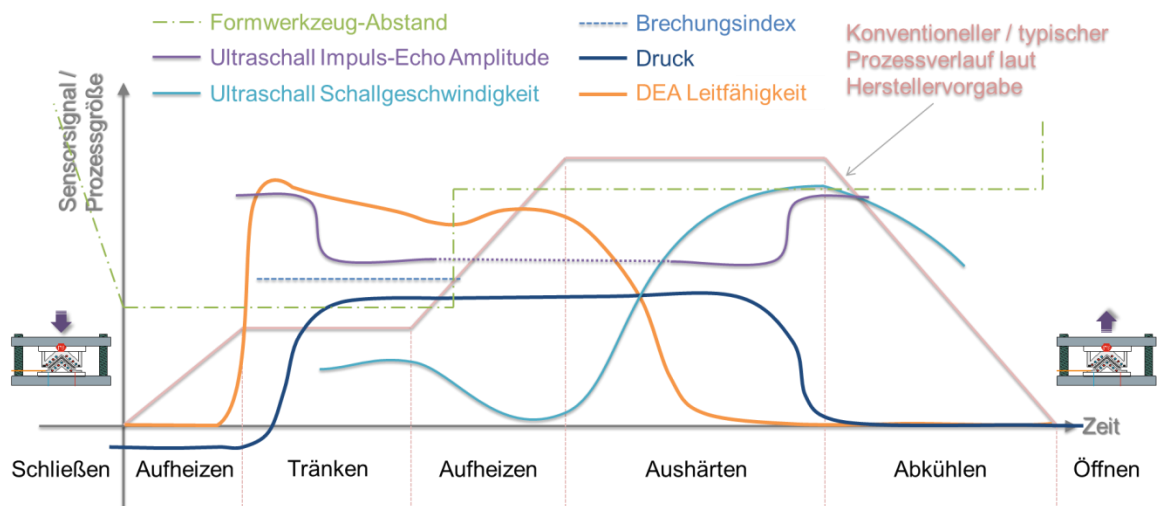


Abbildung 73: FVK-Fertigungsprozess mit charakteristischen Kurvenverläufen am sensorintegrierten Formwerkzeug

Zur Auswertung der durchgeführten Fertigungsversuche am Funktionsmuster Spant und zur allgemeinen Projektbewertung wurde ein 12-seitiger Fragebogen entwickelt. Neben der Rekapitulation der Arbeiten und des Erreichten wird so der Bezug zu den bei Projektbeginn spezifizierten Anforderungen hergestellt sowie ein transparentes und partnerübergreifendes Monitoring der Projektfortschritte sichergestellt.

Innerhalb des Projektes konnte die Umsetzung verschiedener Sensoriken und Messsysteme in die vorhandene Formwerkzeughardware und Anlageninfrastruktur sowie das Potential der erfassten Daten gleichermaßen gezeigt werden. Eine höhere Sensordichte steht dabei für mehr und genauere Informationen. Durch die Kombination mit virtuellen Sensoren kann jedoch deren Anzahl bei gleichem Informationsgehalt auf ein Minimum reduziert werden. Andererseits wird durch die Modularität der Sensorsysteme selbst, deren Integration und Datenverarbeitung über ein mobiles Erfassungssystem auf Open-Source Basis hoher Invest und nicht abschätzbare Folgekosten vermieden. Der Einsatz passgenauer und aussagefähiger Sensorik in der Produktion ermöglicht über die Aufnahme reiner Fertigungsdaten, also Anlagendaten hinaus, die spezifischen Eigenschaften von Material und Geometrie am Bauteil direkt während der Fertigung zu dokumentieren. Für eine Vielzahl der relevanten Größen ist eine Verbesserung hinsichtlich Messzeitpunkt und deren Einflussparameter identifiziert worden. Dies macht die Fertigung transparent, verbindet reale und virtuelle Welt miteinander und reduziert Risiken enorm. Allen voran die übergreifende und durchgängige Erfassung von System-, Anwendungs- und Fachmetriken hilft bei der feinmaschigen Überwachung des Gesamtsystems und erlaubt so eine schnellere Reaktion auf mögliche Herausforderungen aktueller und zukünftiger Fertigungsprozesse.

2.7. F&E Ergebnisse von Seiten Dritter

F&E-Arbeiten Dritter sind den jeweiligen Themen in den Halbjahresberichten zu entnehmen.

2.8. Patente und Veröffentlichungen, Vorträge, Abschlussarbeiten, Konferenzen

- Liebers, N (2018): Ultraschallsensorgeführte Infusions- und Aushärteprozesse für Faserverbundkunststoffe. Dissertation, TU Braunschweig.
- Liebers, Nico; Kleineberg, Markus; Wiedemann, Martin (2017): Ultrasonic flow front, thickness and cure monitoring of liquid composite molding processes. In: PFAM26. Jeonju, Südkorea. Online verfügbar unter <https://elib.dlr.de/114886/>.
- Liebers, N.; Bertling, D. (2018): Ultrasonic Resin Flow and Cure Monitoring. FPCM14. Lulea, Sweden, 30.05.2018.
- Liebers, N.; Bertling, D. (2019): Reducing NDT Effort by Coupled Monitoring and Simulation of Liquid Composite Molding Processes. 11th International Symposium on NDT in Aerospace. Paris, France, 13.11.2019. Online verfügbar unter <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=25037>.
- Liebers, N.; Bertling, D. (2020): Auf dem Weg zur smarten Fertigung - Sensoren, Datenfluss, Architektur und Auswertung. Bitkom & BDLI Webinar: „Smart Factory – 'Wie verändern IoT und Sensorik die Produktion und Logistik in der Luftfahrt?“. 13. Mai 2020

- Liebers, N.; Bertling, D. ; Opitz, M.(2020): Towards smart production: sensors, information flow, architecture and analysis. LightCon Preview Week. Webinar. 26. Juni 2020, online verfügbar unter <https://youtu.be/ZzJs356wzUo>
- Bertling, Dominic und Liebers, Nico und Opitz, Mark (2019): „iFeZ“ Live-Presentation at the International Airbus Composite Expert Day, 13.06.2019, Stade
- Bertling, Dominic und Liebers, Nico und Opitz, Mark (2019): „RINSE“ Live-Presentation at the International Airbus Composite Expert Day, 13.06.2019, Stade
- Bertling, Dominic und Liebers, Nico und Opitz, Mark (2019): Vernetzte Formwerkzeuge für maximale Produktivität und Effizienz. sonstiger Bericht. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR).
- Bertling, Dominic (2018): In-situ Überwachung und Bewertung von Tränkungsprozessen. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2018, 4. - 6. Sep. 2018, Friedrichshafen, Deutschland.
- Bertling, Dominic und Jose, Siby und Liebers, Nico (2018): Analysis and simulation of dry-spot behavior in Liquid Composite Molding. 14th International Conference on Flow Processes in Composite Materials, 30. Mai - 01. Juni 2018, Luleå, Sweden
- Sarrach, Lara und Opitz, Mark (2017): Untersuchung des Deformationsverhaltens von Faserverbundstrukturen unter fertigungsbedingten Temperaturgradienten. Bachelorarbeit.
- Baucke, Jan und Schmidt, Jochen (2018): Entwurf und Umsetzung einer Versuchsreihe zur Geometriekorrektur von Faserverbundproben im Temperprozess. DLR-Interner Bericht.
- Backmann, Vincent und Schmidt, Jochen (2016): Entwicklung einer Regelungsstrategie zur Formadaption aktiver Werkzeugsysteme. Diplomarbeit. DLR-Interner Bericht.
- Korbmacher, Sven und Schmidt, Jochen (2016): Entwicklung einer Softwarelösung zur Erfassung von Prozessparametern während der Aushärtung von Faserverbundbauteilen mit Epoxidharzmatrix. Bachelorarbeit. DLR-Interner Bericht.
- Korbmacher, Sven und Schmidt, Jochen (2016): Einarbeitung in das Messsystem zur Erfassung des Aushärtegrades, der Dehnung sowie der Temperatur von CFK Bauteilen während des Aushärtevorgangs. andere. DLR-Interner Bericht.
- Torstrick-v.d.Lieth, Sven (2019): Digitale Zwillinge: Von der Wetterkarte zum virtuellen Leitstand. DLRK 2019, 30.Sep. - 02.Okt., Darmstadt.
- Torstrick-v.d.Lieth, Sven und Stüve, Jan (2018): Process calibration – the missing link between an RTM-production line and its digital twin. ISCM 2018 8th International Symposium on Composites Manufacturing for High Performance Applications, 21.-22.Nov.2018, Marknesse, Niederlande.

- Torstrick-v.d.Lieth, Sven (2018): Prozesskalibrierung als fehlendes Glied zwischen realer Produktion und digitalem Zwilling. Wissenschaftstag 2018: Vom virtuellen Produkt zum digitalen Zwilling – Faserverbundleichtbau 4.0, Braunschweig.
- Kroos, Karina und Kühn, Alexandra (2019): Mischungsanalyse von 2-Komponentenharzsystemen mittels dielektrischer Analyse (DEA) und Refraktometrie. Bachelorarbeit. DLR-Interner Bericht. DLR-IB-FA-BS-2019-111, 98 S.
- *In Progress:* Schmidt, J. (2020): Die Geometriekorrektur von Faserverbundbauteilen auf Epoxidharzbasis im modifizierten Temperprozess – Prozessentwurf und Auswirkungen, Dissertation, TU Braunschweig

Folgende Konferenzen wurden in Folge Corona abgesagt oder verschoben und konnten bis dato trotz erfolgreicher Anmeldung nicht besucht werden:

- Opitz, Mark, Bertling, Dominic und Liebers, Nico (2020): "iFeZ" - The easy way to maximum production efficiency of composite parts! LIGHTCON - International Convention for Lightweight Solutions, Hannover, Deutschland
- Opitz, Mark, Bertling, Dominic und Liebers, Nico (2020): "iFeZ" - The easy way to maximum production efficiency of composite parts! Live Presentation at LIGHTCON - International Convention for Lightweight Solutions, Hannover, Deutschland
- Opitz, Mark (2020): Digitaler Wandel: Die clevere Art zur maximalen Produktionseffizienz bei Faserverbunden, Composites for Europe, Stuttgart, Deutschland

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Sensorintegriertes Multifunktionswerkzeug zur Prozessoptimierung (SiMP) im Verbundvorhaben „iFeZ“ - Intelligentes Formwerkzeug der Zukunft	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Opitz, Mark Bertling, Dominic Kühn, Alexandra Liebers, Nico Schmidt, Jochen Torstrick-von der Lieth, Sven Ucan, Hakan	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2019
	6. Veröffentlichungsdatum 26.08.2020
	7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Institut für Faserverbundeleichtbau und Adaptronik Lilienthalplatz 7 38108 Braunschweig	9. Ber. Nr. Durchführende Institution --
	10. Förderkennzeichen 20W1521E
	11. Seitenzahl 77
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 43
	14. Tabellen --
	15. Abbildungen 73
16. Zusätzliche Angaben --	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) --	
18. Kurzfassung Im Rahmen des Vorhabens „iFeZ“ - Intelligentes Formwerkzeug der Zukunft widmete sich das DLR vor dem Hintergrund einer erfahrungsbasierten Fertigung von FVK-Luftfahrtbauteilen mit einem hohen Anteil manueller und damit variierender Prozessschritte der Umsetzung eines sensorintegrierten und multifunktionalen Formwerkzeuges innerhalb einer intelligent vernetzten Produktionsumgebung zur aktiven Prozessgestaltung mit dem Ziel einer nachhaltigen Komponentenfertigung. Die Aktivitäten im Teilvorhaben „Sensorintegriertes Multifunktionswerkzeug zur Prozessoptimierung“ (SiMP) konzentrieren sich auf Untersuchungen zur Sensierung der Fertigungsteilprozesse Tränkung und Aushärtung von Faserverbundbauteilen und umfasste die Definition geometrischer und laminatspezifischer Bauteilqualitätskriterien sowie die Sensorauswahl und -entwicklung zur Erfassung der relevanter Größen. Neben dem Nachweis zur Funktionsfähigkeit der Einzeltechnologien erfolgte die Implementierung in ein vorhandenes Formwerkzeug mittels Digital Mock Up. Weiterhin wurde die Integration in die Gesamtanlageninfrastruktur vorgenommen sowie eine vollständig vernetzte Systemumgebung auf Basis bereitgestellter Services aufgebaut. Die Analyse und Validierung erfolgte in Fertigungsversuchen am Funktionsmuster: Spant. Neben dem Potential der Live-Visualisierung der erfassten Daten konnte deren Kopplung mit der Prozesssimulation zur Bauteil-Zustandsbeschreibung auf Basis von Sensorstützstellen und Simulationsmodellen gezeigt werden. Die Ergebnisse zeigen gleichermaßen die Möglichkeit der digitalen Transformation für vorhandene Produktionssysteme als auch das Potential der Daten für mehr Produktionseffizienz bei Faserverbunden.	
19. Schlagwörter Faserverstärkter Kunststoff (FVK), Harztränkungsverfahren (LCM), Resin Transfer Molding (RTM), Nachrüstung (Retrofit), Bauteilqualität, Prozesskontrolle, effiziente Fertigung, Smart manufacturing, Industrie4.0, Sensorsystem, Virtueller Sensor, Service	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report	
3. title “Sensor-integrated multifunctional mold for process optimization” (SIMP) within the joint research project “iFeZ – Intelligent Mold of the Future”		
4. author(s) (family name, first name(s)) Opitz, Mark Bertling, Dominic Kühn, Alexandra Liebers, Nico Schmidt, Jochen Torstrick-von der Lieth, Sven Ucan, Hakan	5. end of project 31.12.2019	6. publication date 26.08.2020
	7. form of publication Final report	
	8. performing organization(s) (name, address) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik Lilienthalplatz 7 38108 Braunschweig	
9. originator's report no. --		10. reference no. 20W1521E
11. no. of pages 77		12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn
13. no. of references 43		14. no. of tables --
15. no. of figures 73		16. supplementary notes --
17. presented at (title, place, date) --		
18. abstract Within the framework of the project "iFeZ - Intelligent mold of the future", the DLR, against the background of an experience-based production of FRP aerospace components with a high proportion of manual and thus varying process steps, devoted itself to the implementation of a sensor-integrated and multifunctional mold within an intelligently networked production environment for active process design with the aim of sustainable component production. The activities in the sub-project "Sensor-integrated multifunctional mold for process optimisation" (SIMP) focus on investigations into the sensing of the sub-processes impregnation and curing of fibre composite components and include the definition of geometric and laminate-specific component quality criteria as well as sensor selection and development to record the relevant variables. In addition to the verification of the functionality of the individual technologies, the implementation in an existing mold was carried out by means of digital mock-up (DMU). Furthermore, the integration into the overall plant infrastructure was carried out and a fully networked system environment was set up on the basis of services. The analysis and validation was realised in experiments on the functional model: Z-frame. In addition to the potential of live visualization of the collected data, its coupling with process simulation for state description based on sensors and simulation models could be shown. The results demonstrate both the possibility of digital transformation for existing production systems and the potential of the data for more production efficiency in fiber composites.		
19. keywords carbon fiber reinforced plastic (cfrp), liquid composite molding (LCM), resin transfer molding (RTM), retrofit, part quality, process control, efficient manufacturing process, smart manufacturing, industry4.0, sensor systems, virtual sensor, service		
20. publisher	21. price	