

2. Zwischenbericht

Zuwendungsempfänger: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.	Aktenzeichen: 47-6665g/1203/2-NW-1803-0012 Förderkennzeichen: 07 03/683 62/384/18/135/20/136/21/137/22
Vorhabenbezeichnung: CosiMo - Verbundwerkstoffe für nachhaltige Mobilität (Composites for sustainable Mobility)	
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2018 – 31.05.2021	
Berichtszeitraum: 01.01.2019 – 30.06.2019	Erstellt am: 12.08.2019

Augsburg, den 12.08.2019

Andreas Buchheim
Projektleiter

Matthias Beyrle
Jan Faber
Michael Vistein

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP)



Inhaltsverzeichnis

0.	HAP 0 – Definition der Anforderungen	3
1.	HAP 1 – Tailored Nonwovens	3
2.	HAP 2 – Reaktive Systeme	3
2.1.	AP 2.1 - In-situ Monitoring der Prozessparameter und des Prozessfortschrittes während der Polymerisation von Caprolactam	3
2.2.	AP 2.2 - In-situ Monitoring der Prozessparameter und des Prozessfortschrittes während der Polymerisation von faserverstärktem Caprolactam	3
2.3.	AP 2.3 - Korrelation von Prozessparametern und Materialeigenschaften	3
2.4.	AP 2.4 - Einfluss von Faserhalbzeug und metallischen Elementen auf den Infiltrations- und Polymerisationsprozess	3
2.5.	AP 2.5 - Optimierung des Faser/Schlichte/Metall/Polymer-Systems	4
3.	HAP 3 – Intelligentes Werkzeug	4
3.1.	AP 3.1 - Bauteil- und Prozessengineering	4
3.1.1.	Simulation Teilprozesse	4
3.2.	AP 3.2 - Konzeptionierung eines Sensornetzwerkes	5
3.3.	AP 3.3 - Werkzeugauslegung und Sensorintegration	6
3.4.	AP 3.4 - Maschinenintegration und Demonstrator-Fertigung	7
3.4.1.	Maschinen- und Sensorintegration	7
3.4.2.	Planung Versuchsreihe	8
3.5.	AP 3.5 - Prozessvalidierung und -optimierung mittels QS	9
4.	HAP 4 – Datengetriebene Prozesssteuerung	10
4.1.	AP 4.1 - Entwicklung eines durchgängigen Datenmodells	10
4.2.	AP 4.2 - Umsetzung des digitalen Prozess-Zwillings	10
4.3.	AP 4.3 - Anbindung und Betrieb einer Cloud-Infrastruktur zur Datenerfassung und -analyse	10
4.4.	AP 4.4 - Lernen echtzeitfähiger Modelle zur Prozessanalyse & -steuerung	10
4.5.	AP 4.5 - Virtuelle Prozessanalyse	10

Wissenschaftliche und technische Ergebnisse

0. HAP 0 – Definition der Anforderungen

Die Arbeiten in HAP 0 wurden im zweiten Halbjahr 2018 abgeschlossen.

1. HAP 1 – Tailored Nonwovens

Im Berichtszeitraum erfolgten keine Tätigkeiten in diesem Hauptarbeitspaket.

2. HAP 2 – Reaktive Systeme

2.1. AP 2.1 - In-situ Monitoring der Prozessparameter und des Prozessfortschrittes während der Polymerisation von Caprolactam

Im Berichtszeitraum erfolgten keine Tätigkeiten in diesem Arbeitspaket.

2.2. AP 2.2 - In-situ Monitoring der Prozessparameter und des Prozessfortschrittes während der Polymerisation von faserverstärktem Caprolactam

Auf Basis der Recherche zu den Anforderungen an die im Werkzeug zur Prozessverfolgung zu integrierenden Sensoren (vgl. 1. Zwischenbericht, Abschnitt 2.1.) wurden Temperatur- und Drucksensoren für den Einsatz im Plattenwerkzeug ausgewählt und beschafft. Diese sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Übersicht der im Plattenwerkzeug genutzten Druck- und Temperatursensoren

Sensortyp	Bezeichnung	Hersteller	Anzahl	Temperatur [°C]	Druck [bar]
Widerstandsthermometer Pt100	Werkzeugfühler GF-7103	Gräff	1	≤ 400	-
Thermoelement Typ K	6192BG	Kistler	5	≤ 450	≤ 2000
Werkzeuginnendruck-sensor	6162AAE	Kistler	3	≤ 200 (Front ≤ 450)	0 - 200
Hydraulikdrucksensor	4080B	Kistler	1	≤ 150	≤ 130

Da der Hydrauliksensoren außerhalb der Kavität positioniert wird, ist bei diesem ein niedrigerer Temperaturbereich erforderlich.

Während dielektrische und Schall-Sensoren der Projektpartnern Materialänderungen während der Injektion und Polymerisation erfassen können, dienen die Druck- und Temperatursensoren dazu, Zustandsänderungen in der Kavität vergleichend zu messen, sodass ebenfalls Rückschlüsse auf die Materialeigenschaften und den Prozessverlauf gezogen werden können.

Im Berichtszeitraum wurde Meilenstein M 2.2 für das Plattenwerkzeug erreicht.

2.3. AP 2.3 - Korrelation von Prozessparametern und Materialeigenschaften

Keine Arbeitsanteile des DLR.

2.4. AP 2.4 - Einfluss von Faserhalbzeug und metallischen Elementen auf den Infiltrations- und Polymerisationsprozess

Keine Arbeitsanteile des DLR.

2.5. AP 2.5 - Optimierung des Faser/Schlichte/Metall/Polymer-Systems

Im Berichtszeitraum erfolgten keine Tätigkeiten in diesem Arbeitspaket.

3. HAP 3 – Intelligentes Werkzeug

3.1. AP 3.1 - Bauteil- und Prozessengineering

Auf Basis der Erfahrungen aus bereits realisierten Bauteilen im Heißpressverfahren wurde ein von Faurecia bereitgestellter Entwurf für das Demonstratorbauteil bewertet und aus Sicht des DLR notwendige Anpassungen erarbeitet, die sich primär aus werkzeug- und anlagenspezifischen Anforderungen ergeben.

3.1.1. Simulation Teilprozesse

Mit Abschluss der Festlegung des Sensorkonzepts für das Plattenwerkzeug im Berichtszeitraum (vgl. Abschnitt 3.3) konnten das Modell für die Simulation der Fließfront weiter detailliert werden. Die insgesamt 38 Druck-, Temperatur-, dielektrischen und Schall-Sensoren befinden sich im Unterwerkzeug. Für die Integration in das PAM-RTM Modell wurden die Sensorpositionen im CAD-Modell der neu erstellen Einlegeplatte vermessen. Diese Information wurde genutzt, um virtuelle Sensoren in das Simulationsmodell zu integrieren (siehe Abbildung 1). Dadurch wird zu jedem Zeitpunkt an allen Sensorpositionen ein Vergleich zwischen Realität und Simulation möglich. Auf Grundlage dieses Vergleichs kann ein Rückschluss auf die Qualität des Simulationsmodells gezogen werden und eine weitere lokale Optimierung erfolgen.

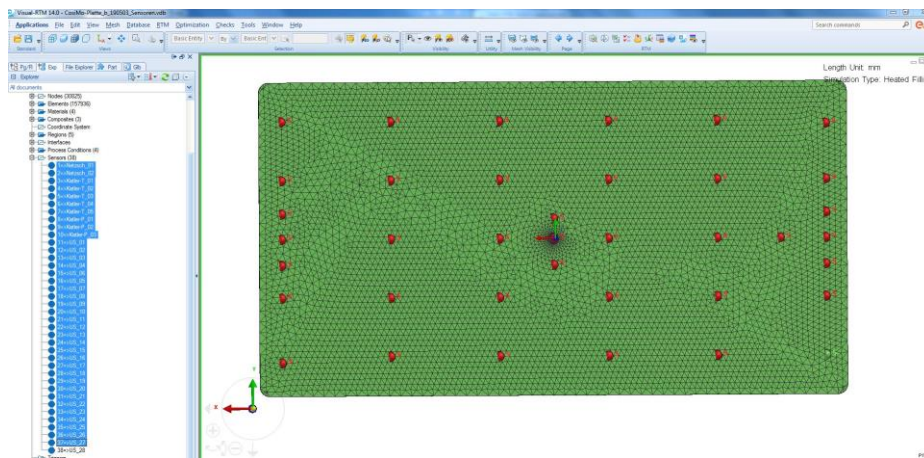


Abbildung 1: Darstellung der virtuellen Sensoren (rot) im PAM-RTM Modell

Aufgrund neuer Erkenntnisse zum Aufbau des Plattenwerkzeugs wurden die Randbedingungen des Simulationsmodells in der Form angepasst, so dass der gesamte umlaufende Rand und nicht nur die Längsenden als Entlüftung dienen (siehe Abbildung 2).

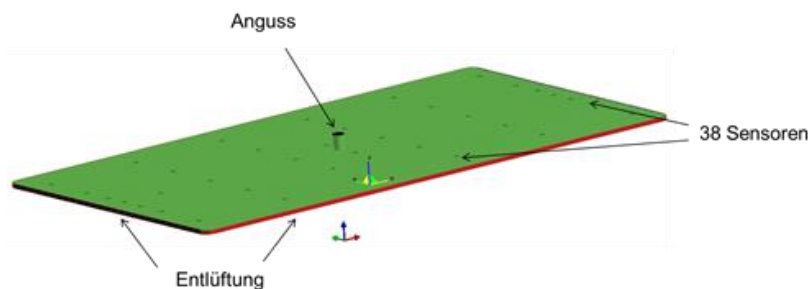


Abbildung 2: PAM-RTM Modell mit Sensoren, Anguss und Entlüftung

Zusätzlich zum Modell der 3D-Simulation wurde ein weiteres Modell für eine 2D-Simulation aufgebaut. Die Simulation ist notwendig, da die vom Projektpartner Universität Augsburg (ISSE) benötigten Sensor- und Simulationsinformationen nur aus einer 2D-Simulation extrahiert werden können. Zudem musste für dieses Modell das Mesh deutlich verfeinert werden. In Abbildung 3 sind die verwendeten Parameter sowie ein Ausschnitt des Mesh im Bereich des Angusses dargestellt.

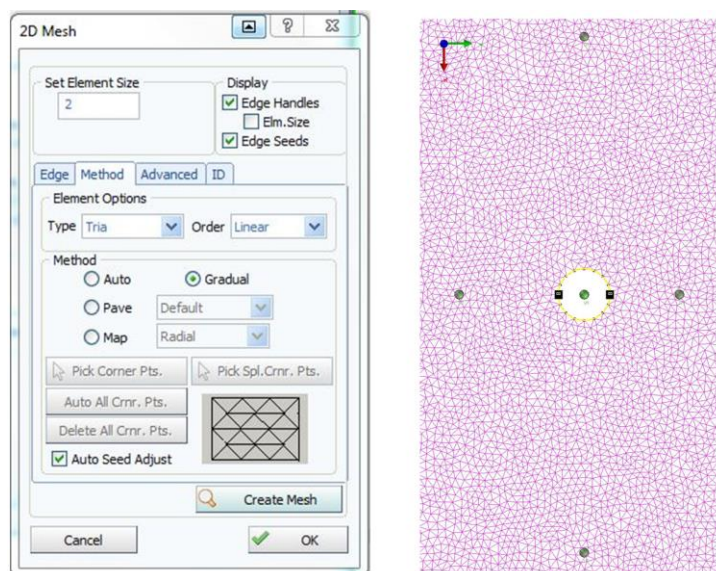


Abbildung 3: Parameter zu 2D-Mesh Erstellung und Mesh-Ausschnitt im Bereich des Angusses

3.2. AP 3.2 - Konzeptionierung eines Sensornetzwerkes

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Universität Augsburg (MRM), Netzsch, KraussMaffei Technologies (KMT) und der iba AG wurde ein Konzept zur Prozessdatenerfassung und -verarbeitung auf Grundlage der ausgewählten Sensorsysteme erarbeitet. Basierend auf den Versuchen am Plattenwerkzeug bestand das erste Teilziel darin, die Prozessdatenerfassung und -analyse zu ermöglichen. Das maßgeblich vom DLR entwickelte Sensornetzwerk für die Versuchsreihe mit dem KMT-Plattenwerkzeug ist schematisch als Flussdiagramm in Abbildung 4 dargestellt.

Die Daten der vom DLR angeschafften Druck- und Temperatursensoren werden dem Auswerte-PC über verschiedene Datenkanäle zugeführt. Die Werkzeuginnendruckensensoren in der Kavität (Kistler 6162AAE) werden über die T-RTM Anlage erfasst und gemeinsam mit weiteren anlagenspezifischen Daten, wie z.B. Materialtemperatur und Mischungsverhältnis, an ein übergeordnetes Daten-Netzwerk weitergegeben. Zusätzlich sind fünf Thermoelemente (Kistler 6192BG) in der Kavität, ein Temperatursensor (Gräff GF-7103) im Werkzeug und ein Absolutdrucktransmitter (Kistler 4080B 130-LC) an der Vakuumabsaugung verbaut. Damit deren Signale an das Datennetzwerk übermittelt werden können, sind zusätzliche analoge Eingangsklemmen sowie ein Industrie-PC erforderlich. Durch die Projektpartner Universität Augsburg (MRM) und Netzsch werden zusätzlich Daten von Schall- und dielektrischen Sensoren in das Daten-Netzwerk eingespeist. Mit Hilfe einer Datenerfassungsplattform der iba AG können die gesammelten Daten ausgewertet werden. Die daraus abgeleiteten Erkenntnisse dienen anschließend der manuellen Wertekorrektur der Anlagenparameter.

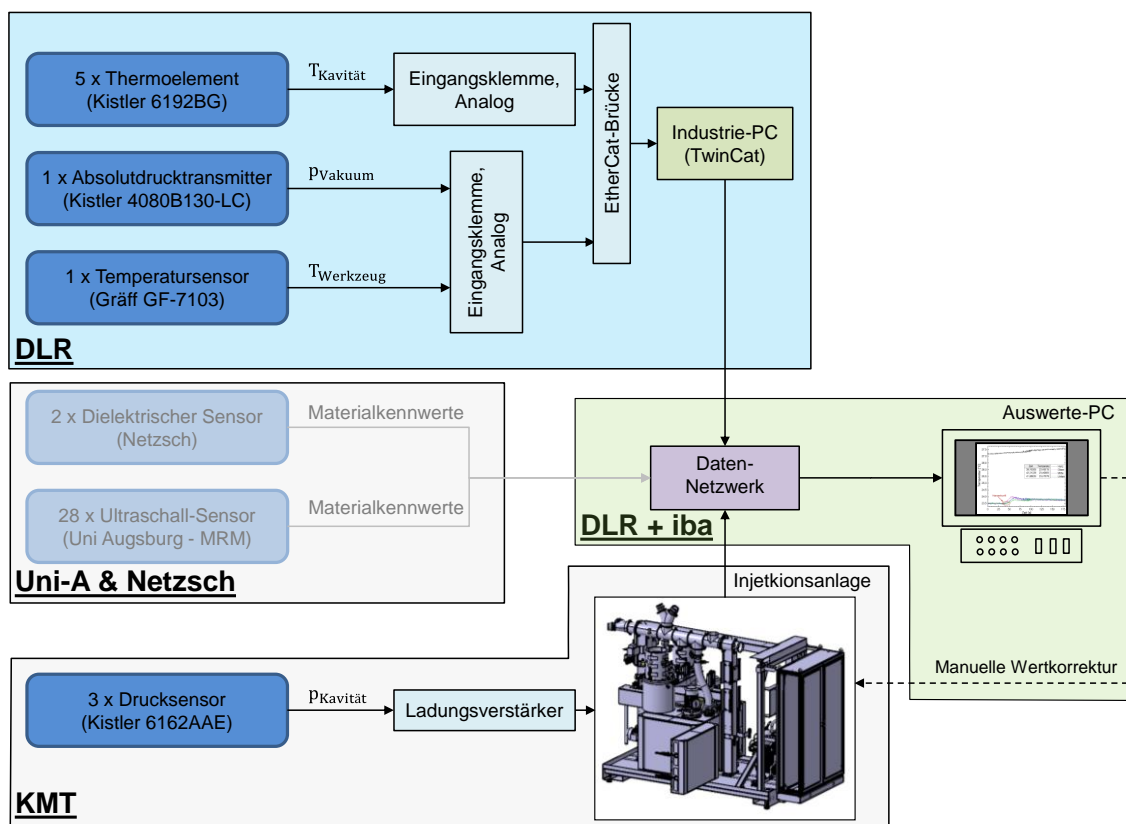


Abbildung 4: Schematisch Darstellung des Datenflusses am Beispiel der Druck- und Temperatursensoren im Plattenwerkzeug

3.3. AP 3.3 - Werkzeugauslegung und Sensorintegration

In Absprache mit den Projektpartnern wurde die Sensoranordnung im Plattenwerkzeug finalisiert und dessen Fertigung durch Siebenwurst umgesetzt. Das finale Sensorkonzept ist in Abbildung 5 dargestellt.

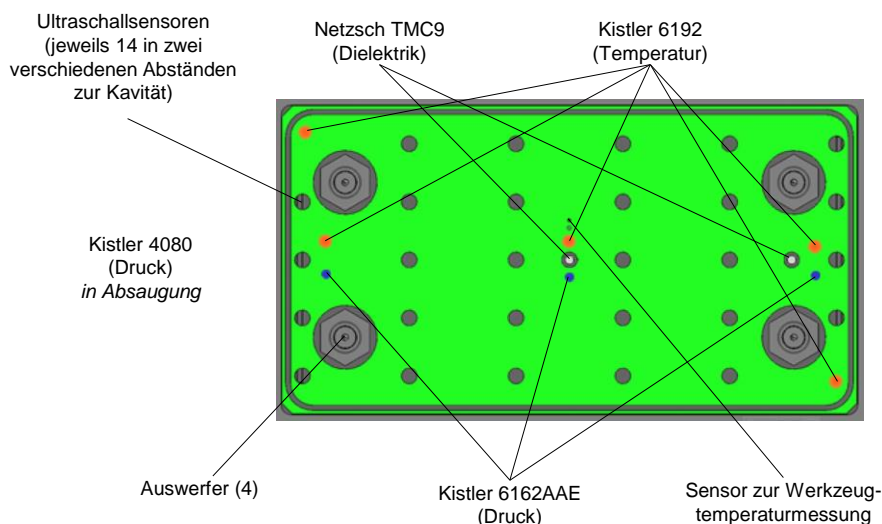


Abbildung 5: Finales Sensorkonzept im Plattenwerkzeug

Im Vergleich zum vorherigen Konzept (vgl. 1. Zwischenbericht, Abschnitt 3.3.) wurden auf Grund des geringen Bauraums Änderungen vorgenommen. Neben der Positionierung der Sensoren zueinander (u.a. Mindestabstände, Symmetrie) mussten außerdem die aus den Zu- und Abflüssen vorgegebenen Positionen der Werkzeugtemperierkanäle berücksichtigt werden. Folgende Anpassungen erfolgten:

1. Es wurde die Anzahl der Schallsensoren auf 28 reduziert.
2. Die im Urzustand des Werkzeugs verbauten Werkzeuginnendrucksensoren wurden wiederverwendet und in den neuen Einleger integriert.
3. Die Anzahl der Temperatursensoren in der Kavität wurde auf 5 erhöht und die Positionierung der Druck- und Temperatursensoren angepasst.

Im Berichtszeitraum wurde Meilenstein M 3.3 für das Plattenwerkzeug erreicht.

3.4. AP 3.4 - Maschinenintegration und Demonstrator-Fertigung

Im Berichtszeitraum wurden die Voraussetzungen für die Durchführung der Versuchsreihe mit dem Plattenwerkzeug geschaffen, mit der das Funktionsprinzip der werkzeugintegrierten Sensorik und der mess- und simulationsdatenbasierten Prozesssteuerung validiert wird.

3.4.1. Maschinen- und Sensorintegration

In Rücksprache mit KMT wurde das finale Anlagenlayout erarbeitet (siehe Abbildung 6) und eine Schnittstelle und die Kommunikation zwischen T-RTM Anlage und Heißpresse spezifiziert. Hierbei wurde sowohl die Prozesssteuerung als auch die sicherheitstechnische Anbindung berücksichtigt. Letztere sieht während des Prozesses einen erweiterten Sicherheitsbereich um die T-RTM Anlage vor. Es wurde ein Lastenheft erstellt, auf dessen Basis die Integration der Schnittstelle in die Pressensteuerung erfolgen soll. Für die Umsetzung wurde die Fa. Wickert beauftragt. Des Weiteren erfolgten Abstimmungen zur Bereitstellung aller benötigten Medien und Verbindungskomponenten. Eine Gefährdungsbeurteilung des Gesamtprozesses wurde durchgeführt und ein Sicherheitskonzept aufgestellt.

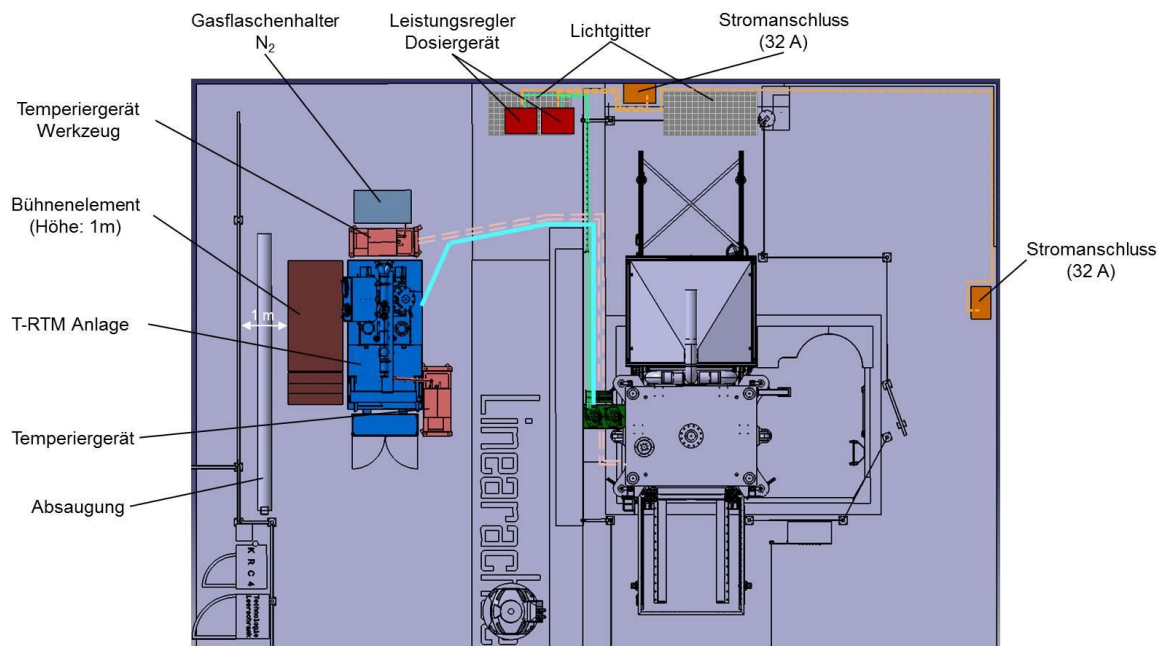


Abbildung 6: Anlagenlayout für Versuchsreihe mit Plattenwerkzeug

Für die Messung des Drucks in der evakuierten Kavität des Werkzeugs vor Prozessstart wurde ein zusätzliches Ventil zwischen Vakuumpumpe und Drucksensor integriert. Hierfür wurde ein Konzept für eine prozesssynchrone automatisierte Ansteuerung erarbeitet.



Mit den beteiligten Projektpartnern wurden folgende Festlegungen für die Versuche mit dem Plattenwerkzeug getroffen:

- Im ersten Schritt erfolgt kein automatisches Rückspielen von Prozessparametern an die T-RTM Anlage und Heißpresse. Ermittelte Parameter aus der Sensordatenauswertung (digitales Prozessmodell) werden vor der nächsten Bauteilfertigung manuell in die Anlagen eingegeben. Alternativ erfolgt eine Anwahl von bereits erstellten Anlagenprogrammen (teilautomatisiert).
- Es wird ein Triggersignal bei Prozessstart für die werkzeugintegrierte Sensorik umgesetzt.
- Ein zentraler PC wird für die Sensordatenspeicherung verwendet.

3.4.2. Planung Versuchsreihe

Auf Grund der vielen an den Versuchen beteiligten Projektpartner mit zugleich begrenztem Versuchszeitraum wurde im ersten Schritt eine Übersicht der relevanten Prozessparameter erstellt (siehe Tabelle 2). Hierin erfolgte gemeinsam eine Festlegung Prozessparameter in Variablen und Konstanten. Der Hintergrund dabei war der Ansatz, möglichst Versuchsblöcke einzelner Partner mit unabhängigen oder kombinierbaren Ansätzen zu ermitteln. Ein Ausschnitt aus der Übersicht aller Versuchsblöcke zeigt Tabelle 3. Auf dieser Basis erfolgte die Festlegung eines Versuchsplans und daraus resultierend die Ermittlung der benötigten Materialmengen.

Tabelle 2: Übersicht über klassifizierte Prozessparameter

Versuchsparameter:		
	= variabel, in Versuchsreihe konstant gehalten	
	Variablen	Konstanten
Anlagen:		
KraussMaffei T-RTM Injektionsanlage	Prozessmethode (z.B. Spaltinjektion, Nachdrücken) Injektionsdruck Mischungsverhältnis Additive Injiziertes Volumen (abhängig von Versuchsaufbau)	3K System Temperatur Caprolactam bei Injektion (115 bis 120°C) Temperatur Additive bei Injektion (Raumtemperatur)
Wickert Heißpresse WKP 4400 S	Position Haltezeit	Presskraft Temperatur Druckplatten (Raumtemperatur) Nutzung Gleichlaufregelung (ja/nein)
Werkzeug:		
KraussMaffei Plattenwerkzeug	Kavität: Höhe (2 / 4 mm) Art der Dichtung Werkzeugtemperatur (Ober- / Unterwerkzeug)	Kavität: Fläche (540 x 290 mm ²) Anguss mittig Sensoranordnung
Sensoren (Werkzeug / Anlagen):		
US, Dielektrik, Temperatur, Druck	Art des Betriebs (einzeln / simultan) Art der Datenverarbeitung (u.a. Speicherung) Art der Datennutzung (u.a. Prozessregelung)	
Preformhalbzeuge:		
Vlies, UD	Art der Faser (Material, Typ, Zustand) Art der Schlichte Verarbeitungsart Binder (ja/nein; Art)	Hersteller (begrenzte Anzahl)
Preformaufbau:		
	Verwendung Preform (ja/nein) Fasertextilien: Abmessungen Einzellagen Fasertextilien: Position Einzellagen Verwendung metallische Einsätze (ja/nein) Einsätze: Art (Material, Form, Oberfläche, Vorbehandlung) Einsätze: Position Art Fixierung Einzelbestandteile	Vorformgrad der Preform Zustand Preform (getrocknet)
Caprolactam und Additive:		
		Art der Additive Hersteller
Prozessvorbereitung:		
	Stickstoffspülung (ja/nein)	Reinigung der Kavität vor Bestückung mit Preform Art der Reinigung Kavität (Druckluft) Position Prefom in Kavität Evakuierung Druck in Kavität bei Injektionsstart



Tabelle 3: Ausschnitt aus Übersicht Versuchsblöcke

Teilziele						Versuchsparameter																
Nr.	Ziel	Priorität (1 = hoch bis 3 = niedrig)	Anzahl Versuchs-durchläufe	Organisator	aktiv teilnehmende Partner	Prozess: Methode	Prozess: Injektionsdruck	Prozess: Mischungsverhältnis	Prozess: Ablauf	Prozess: Steuerung	Werkzeug: Höhe Kavität	Werkzeug: Dichtung	Werkzeug: Temperatur	Sensoren: Betrieb	ja	nein	Preform: Faserhalbzweig	Preform: Aufbau				
6	Untersuchung der Prozesskenngroßen (Monomererkennung, Fließfrontverlauf, Polymerisationsgrad, Porosität,...)	1	120	DLR	(MRM), (ISSE)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
	a) Kann die Fließfront detektiert werden? (Ableich von Druck- u. Temperaturmessungen)					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	b) Wie ist der Fließfrontverlauf abhängig von					-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	i. Temperatur					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	ii. Druck					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	iii. Preform (Faserrichtung, Fasermaterial,...)					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	c) Welche Fließgeschwindigkeiten ergeben sich im Bauteil?					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	d) Wie verhält sich der Druck in der Kavität bei Injektion? (konst. Druck und konst. Fließgeschwindigkeit möglich?)					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	e) Kann die Polymerisation aufgrund Reaktionswärme detektiert werden?					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	f) Wie ist der Polymerisationsablauf abhängig von					-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	i. Temperatur					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	ii. Druck					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
iii. Preform (Faserrichtung, Fasermaterial,...)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■					

Legende	Kennzeichnung Priorität:	Kennzeichnung Partner:	Kennzeichnung Versuchsparameter:
	1 = hoch (für Schikanen) () = nur Nutzung	() = nur Nutzung	■ = variabel
	2 = mittel (für Schikanen Messwerte)	() = nur Nutzung	■ = konstant
	3 = niedrig (Nebenaspekt, dessen Untersuchung interessant)	() = nur Nutzung	■ = nicht relevant, Größe beliebig
(Details siehe Kommentare und erstes Tabellenblatt)			

Es wurden zusammen mit den Projektpartnern zwei mögliche Prozessabläufe für die Versuchsreihe mit dem Plattenwerkzeuge festgelegt (Injektion bzw. Spaltinjektion). Der jeweilige Ablauf ist in Tabelle 4 dargestellt. Nach Abschluss des untersten Arbeitsschrittes wiederholt sich der Prozess.

Tabelle 4: Übersicht über betrachtete Varianten des Prozessablaufs

Spaltinjektion	Injektion
Einlegen der Preform in Unterwerkzeug (T = 150 - 160°C)	
Schließen des Werkzeugs in erste Dichtungsstufe	Schließen des Werkzeugs (Endkontur)
Spülen der Kavität mit Stickstoff (<i>fakultativ</i>)	
Evakuieren der Kavität	
Injektion Caprolactam (T = 115 - 120°C) und Additive (T = Raumtemperatur)	
Schließen des Werkzeugs (Endkontur)	
Polymerisation	
Öffnen des Werkzeugs	
Entnahme des Bauteils	
Reinigen des Werkzeugs	

3.5. AP 3.5 - Prozessvalidierung und -optimierung mittels QS

Im Berichtszeitraum erfolgten noch keine Tätigkeiten in diesem Arbeitspaket.

4. HAP 4 – Datengetriebene Prozesssteuerung

4.1. AP 4.1 - Entwicklung eines durchgängigen Datenmodells

In Zusammenarbeit mit den anderen Projektpartnern wurden verschiedene Möglichkeiten zur (zeitsynchronen) Erfassung sämtlicher Messwerte der im Plattenwerkzeug integrierten Sensoren (vgl. Abschnitt 3.3) sowie sonstiger in den Anlagen vorhandener Sensoren (z.B. Wegsensoren der Heißpresse) ermittelt. Es wurde entschieden, das ibaPDA System des Projektpartners iba AG zur zentralen Datenerfassung und Speicherung zu verwenden. Hiermit können die Messwerte von unterschiedlichen Sensorsystemen zentral erfasst, mit einem Zeitstempel versehen und gespeichert werden. Anschließend können die so gewonnenen Daten analysiert und ausgewertet werden. Auch eine Konvertierung in andere Datenformate ist möglich, so dass die so gewonnenen Daten als Grundlage für das in AP 4.4 geplante Machine-Learning Verfahren dienen können.

4.2. AP 4.2 - Umsetzung des digitalen Prozess-Zwillings

Es wurde eine Möglichkeit erarbeitet, die Siemens S7-315 CPU der Wickert-Heißpresse in das System zur Prozessdatenerfassung (siehe Abschnitt 4.1) zu integrieren. Dies wird über Profinet realisiert. Damit wurde die Funktion geschaffen, alle in der Pressensteuerung vorhandenen Messdaten (z.B. Position der oberen Druckplatte, aktuell aufgebrachte Kraft) mit hoher Frequenz (im Taktzyklus der Presse, ca. 20ms) zu erfassen und zeitsynchron mit den Daten der werkzeugintegrierten Sensoren zu speichern.

4.3. AP 4.3 - Anbindung und Betrieb einer Cloud-Infrastruktur zur Datenerfassung und -analyse

Keine Arbeitsanteile des DLR.

4.4. AP 4.4 - Lernen echtzeitfähiger Modelle zur Prozessanalyse & -steuerung

Im Berichtszeitraum erfolgten keine Tätigkeiten in diesem Arbeitspaket.

4.5. AP 4.5 - Virtuelle Prozessanalyse

Keine Arbeitsanteile des DLR.