



## 1. Zwischenbericht

|   |   |
|---|---|
| Zuwendungsempfänger:<br><b>Deutsches Zentrum für Luft-<br/>und Raumfahrt e.V.</b>   | Aktenzeichen:<br><b>47-6665g/1203/2-NW-1803-0012</b><br>Förderkennzeichen:<br><b>07 03/683 62/384/18/135/20/136/21/137/22</b> |
| Vorhabenbezeichnung:<br><b>CosiMo - Verbundwerkstoffe für nachhaltige Mobilität<br/>(Composites for sustainable Mobility)</b> |   |
| Laufzeit des Vorhabens:<br><b>01.06.2018 – 31.05.2021</b>   |   |
| Berichtszeitraum:<br><b>01.06.2018 – 31.12.2018</b>   | Erstellt am:<br><b>08.02.2019</b>   |

Augsburg, den 08.02.2019

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 |
| 0.1.   | AP 0.1 - Definition der Anforderungen – Zielsetzung.....  | 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 .....                          | 4 |
| 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. | Definition Bauteil.....   | 4 |
| 3.1.2. | Simulation Teilprozesse .....   | 5 |
| 3.2.   | AP 3.2 - Konzeptionierung eines Sensornetzwerkes .....  | 7 |
| 3.3.   | AP 3.3 - Werkzeugauslegung und Sensorintegration .....  | 7 |
| 3.4.   | AP 3.4 - Maschinenintegration und Demonstrator-Fertigung.....   | 7 |
| 3.5.   | AP 3.5 - Prozessvalidierung und -optimierung mittels QS .....   | 8 |
| 4.     | HAP 4 – Datengetriebene Prozesssteuerung .....  | 8 |
| 4.1.   | AP 4.1 - Entwicklung eines durchgängigen Datenmodells.....  | 8 |
| 4.2.   | AP 4.2 - Umsetzung des digitalen Prozess-Zwillings.....   | 9 |
| 4.3.   | AP 4.3 - Anbindung und Betrieb einer Cloud-Infrastruktur zur Datenerfassung und – analyse.....  | 9 |
| 4.4.   | AP 4.4 - Lernen echtzeitfähiger Modelle zur Prozessanalyse & -steuerung.....  | 9 |
| 4.5.   | AP 4.5 - Virtuelle Prozessanalyse .....   | 9 |

## Wissenschaftliche und technische Ergebnisse

### 0. HAP 0 – Definition der Anforderungen

#### 0.1. AP 0.1 - Definition der Anforderungen – Zielsetzung

Es wurden Abstimmungsgespräche mit den Projektpartnern zum Lastenheft des Demonstratorbauteils (Struktur mit Merkmalen eines Batteriekastens) durchgeführt. Dabei wurden vom DLR die Bauteilanforderungen in Bezug auf die Möglichkeit einer Umsetzung an der im Projekt genutzten Heißpresse bewertet und Vorschläge für Umsetzungsvarianten erarbeitet, die für eine automatisierte Fertigung geeignet sind. Es erfolgte die Ableitung von Maßnahmen für die weiteren Arbeitspakete des DLR, die für eine Realisierung der geplanten Bauteileigenschaften notwendig sind.

Die Tätigkeiten wurden im Berichtszeitraum mit dem Erreichen des Meilensteins M 0.1 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

Als Vorbereitung zur Entwicklung eines Konzepts für die Anordnung der Sensorik im Platten- und Demonstratorwerkzeug in AP 3.3 wurde eine Literaturrecherche zu den Eigenschaften und Einbauvoraussetzungen der für die Prozessverfolgung genutzten Sensorarten durchgeführt (Dielektrik, Ultraschall, Temperatur, Druck). Des Weiteren wurden Druck- und Temperatursensoren recherchiert, die für die Prozessbedingungen geeignet sind.

##### Anforderungen an Sensoren:

- Druck: ca. 0,1 bar (evakuierte Kavität der Werkzeugform) bis 90 bar (Injektionsdruck)
- Temperatur: 20 °C bis 180°C (auch Temperaturbeständigkeit der Kabelummantelung muss gegeben sein)
- Beständig gegen das Eindringen eines niedrigviskosen Fluids

Bei den Drucksensoren kommen vor allem Membransensoren in Betracht, die gegen ein Eindringen des Monomers geschützt sind. Dabei stellt der große Messbereich besondere Anforderungen. Sensoren, die für den Injektionsdruck geeignet sind, weisen meist eine nur niedrige Genauigkeit bei Drücken im Bereich des Grob- bis Feinvakuums auf. Die Druckmessung vor dem Prozessstart ist aber für die Bauteilqualität von großer Relevanz, da hier Undichtigkeiten des Werkzeugs festgestellt werden können, die negative Auswirkungen auf die Bauteilqualität haben, da das hydrophile Caprolactam mit der in der Kavität noch vorhandenen Luftfeuchtigkeit reagiert. Auf Grund der hohen Anzahl geplanter Sensoren auf kleiner Fläche (siehe Abschnitt 3.3) wurden auch Möglichkeiten ermittelt, kombinierte Sensoren einzusetzen.

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

Im Berichtszeitraum erfolgten keine Tätigkeiten in diesem Arbeitspaket.

#### 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

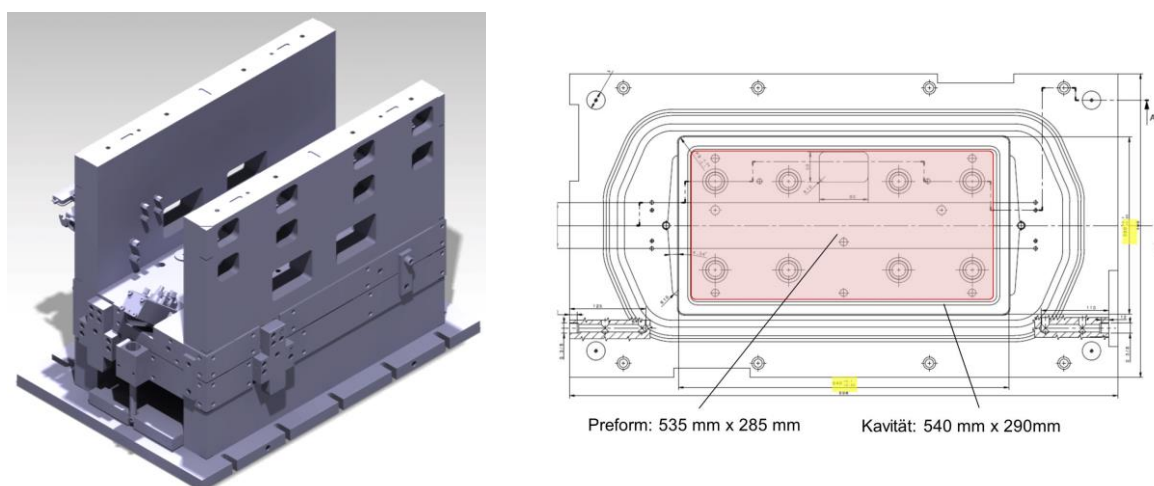
Im Rahmen des durchgeführten HAP Kick-off wurde zusammen mit den Partnern u.a. ein Zeit- und Ablaufplan für die im Projekt genutzten Anlagen und Werkzeuge festgelegt.

### 3.1. AP 3.1 - Bauteil- und Prozessengineering

Es wurden Zwischenergebnisse in Bezug auf die Festlegung des Bauteils erzielt, an dem die Validierung des Funktionsprinzips des Gesamtprozesses erfolgt. Auch wurden erste Schritte zur Simulation von Teilprozessen durchgeführt.

#### 3.1.1. Definition Bauteil

Durch die in AP 0.1 durchgeführten Arbeiten wurde deutlich, dass zur Entwicklung des Gesamtprozesses für das finale Demonstratorwerkzeug eine Zwischenstufe mit verringerter Bauteilkomplexität sinnvoll ist. An diesem Bauteil können Zusammenhänge zwischen den Teilprozessen einfacher ermittelt werden. Auch ist es möglich, bereits erste Optimierungsansätze zu verfolgen. Diese Erkenntnisse können in die Entwicklung der Prozesse für das finale Demonstratorwerkzeug einfließen, so dass schon zu Beginn ein höherer Prozessreifegrad zu erwarten ist. Hierdurch wird auch das Risiko reduziert, dass Schwierigkeiten im Prozess erst bei fortgeschrittenem Projektstand in der Validierungsphase des Demonstrators sichtbar werden. Aus diesem Grund wurde im Konsortium entschieden, die Validierung des Funktionsprinzips des Gesamtprozesses zunächst an einem bereits existenten Plattenwerkzeug durchzuführen. Das von KraussMaffei Technologies (KMT) gestellte Werkzeug ist in Abbildung 1 dargestellt.



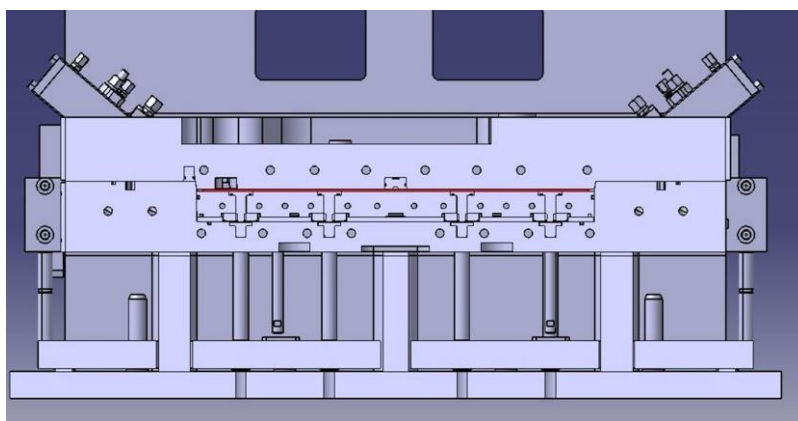
**Abbildung 1:** Schematische Darstellung des Plattenwerkzeugs und der Kavität mit maximalen Abmessungen der Preform (Quelle: KMT)

Um eine detaillierte Prozessverfolgung zu ermöglichen, wird das Werkzeug im Rahmen vom AP 3.3 mit weiterer Sensorik ausgestattet, die in Bezug auf die eingesetzten Sensorarten und den Umfang der des finalen Demonstratorwerkzeugs entspricht. Die Bauteilkomplexität kann bei Bedarf z.B. über Einleger variiert werden, so dass ein umfassendes Prozessverständnis gewonnen werden kann. Mit diesem Werkzeug können auf diese Weise Erkenntnisse u.a. zur Sensorik, der

Qualität der Simulation, des virtuellen Anlagen- und Verfahrensmodells und der prozessverlaufsabhängigen Anlagensteuerung gewonnen werden. Diese bilden die Grundlage für die parallellaufende Entwicklung der Prozesse für das finale Demonstratorwerkzeug.

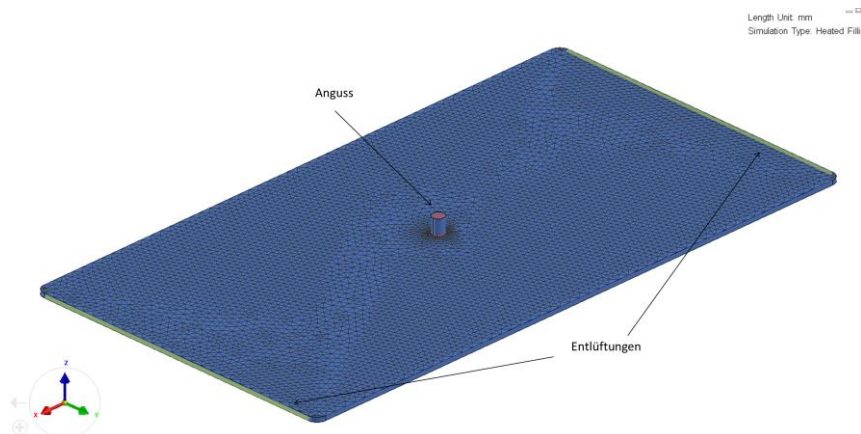
### 3.1.2. Simulation Teilprozesse

Innerhalb des Arbeitspakets ist das Ziel, verschiedene Teilprozesse der Bauteilherstellung (Verformung, Fließfrontverlauf) in einer Simulationsumgebung abzubilden. Dazu erfolgte die Beschaffung und Inbetriebnahme des Softwarepakets PAM Composites mit den Modulen PAM-Form, -RTM und -Distortion. Im Rahmen einer 5-tägigen Schulung bei Engineering System International (ESI) wurden die Grundlagen der Nutzung der Softwaremodule erarbeitet, sowie ein Einblick in die Möglichkeiten und derzeitigen Grenzen der Software gegeben. Die Schulung erfolgte anhand von Beispielmodellen, welche verdeutlichten, dass das Ergebnis der Simulation nicht nur von den Inputparametern wie Einspritzdruck und Werkzeugtemperatur, sondern auch maßgeblich von den Materialeigenschaften des verwendeten Harzsystems und den Verstärkungselementen beeinflusst wird. Durch Variation der Prozessparameter wurde ersichtlich, dass ohne exakte Materialkennwerte eine realistische Simulation nicht möglich ist. Aus diesem Grund ist es notwendig, dass Materialkennwerte wie Permeabilität des Vliesstoffes, sowie die Viskosität, Dichte und Reaktionskinetik des Harzes exakt ermittelt und in die Simulation eingebracht werden. Da diese Kennwerte für den betrachteten In-Situ-Polymerisationsprozess bisher in der Literatur nicht vorliegen, ist die Nutzung der in HAP 1 und HAP 2 noch zu ermittelnden Werte notwendig. Da diese Materialparameter zusätzlich zu den CAD-Daten des finalen Demonstratorwerkzeugs noch nicht vorlagen, wurden die ersten Arbeiten zur Aufstellung eines Simulationsmodells an den Bauteildaten des Plattenwerkzeugs mit generischen Kennwerten durchgeführt. Hiermit wurde ein funktionsfähiges Modell einer Füllsimulation aufgebaut, welches im weiteren Verlauf des Projektes detailliert und mit den noch zu ermittelnden Materialparametern optimiert wird. Abbildung 2 zeigt die für die Simulation in PAM-RTM genutzte Kavität im Plattenwerkzeug. Ein Vorteil hierbei ist, dass durch die Nutzung einer weniger komplex geformten Bauteilgeometrie eine bessere Kontrolle der Qualität der Simulation möglich ist.



**Abbildung 2:** Schnitt durch das Plattenwerkzeug mit rot markierter Bauteilkavität

Da allgemein eine Bewertung des Simulationsergebnisses ohne Abgleichmöglichkeit mit Ergebnissen einer realen Versuchsdurchführung schwierig ist, wurde im ersten Schritt zusätzlich mit vereinfachten Randbedingungen gearbeitet, um die Komplexität des Modells zu verringern. Auch konnte auf diese Weise die benötigte Rechenzeit verringert werden, um schnell verschiedene Ansätze testen zu können. In Abbildung 3 ist die in der Simulationsumgebung vernetzte Kavität des Plattenwerkzeugs abgebildet. Der Anguss des Fluids erfolgt mittig über den rot markierten Bereich. Die zylinderförmige Erhebung stellt hierbei einen Teil des Angusskanals dar. Dies ist notwendig, da das Harz bereits im Angusskanal einer erhöhten Temperatur ausgesetzt ist und so Einfluss auf die Polymerisation des Caprolactam hat. Für die Simulation wurde angenommen, dass auf die Oberflächen des Werkzeuges eine konstante Temperatur wirkt. Die Entlüftungen befinden sich jeweils an den Längsseiten des Werkzeuges und sind in grün dargestellt.

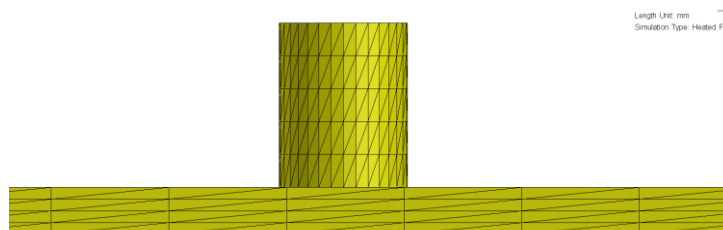


**Abbildung 3:** Modellierter Kavität mit Anguss (rot) und Entlüftungen (grün)

Da der Preformaufbau noch im Rahmen des Projekts festgelegt werden muss, wurde für die Simulation ein Lagenpaket aus 4 Einzelschichten angenommen (siehe Abbildung 4). Dabei wurde folgende Materialpaarung genutzt, für die Materialkennwerte vorliegen:

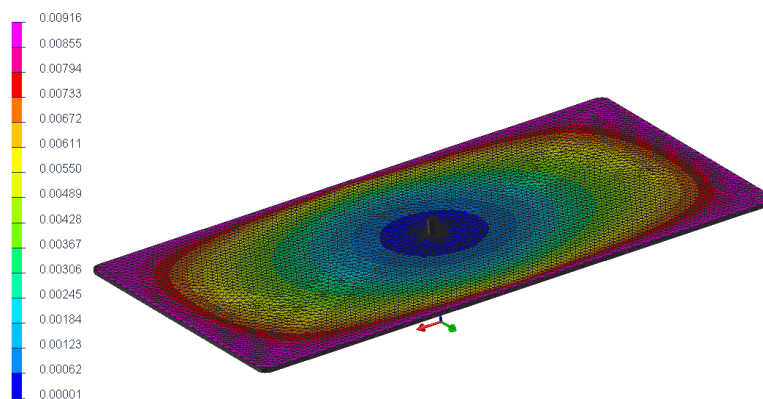
Matrix: Hexcel-3501-6 (Dichte: 1265 kg/m<sup>3</sup>; Viskosität: 0.425 Ns/m<sup>2</sup>)

Fasertextil: Hexcel-AS4 UD (Aufbau: 0/+45/-45/90)



**Abbildung 4:** Schematische Darstellung der Vernetzung einer generischen Preform

Aus den Simulationsergebnissen lassen sich verschiedene Ergebnisse wie Fließfrontverlauf, Druckverhältnisse, Temperaturen ableiten. Beispielhaft ist in Abbildung 5 das Aushärtungsverhalten des exemplarischen Harzsystems dargestellt. Der Farbcode gibt den Grad der Aushärtung von noch nicht ausgehärtetem (blau) bis zu bereits ausgehärtetem Harz (pink) wieder.



**Abbildung 5:** Schematische Darstellung des Aushärtungsgrades eines exemplarischen Harzsystems

### 3.2. AP 3.2 - Konzeptionierung eines Sensornetzwerkes

Im Berichtszeitraum erfolgten keine Tätigkeiten in diesem Arbeitspaket.

### 3.3. AP 3.3 - Werkzeugauslegung und Sensorintegration

Um die Funktionsfähigkeit des Gesamtprozesses im Gebiet der sensorgestützten Prozessverfolgung mit dem Plattenwerkzeug nachweisen zu können, wird das Werkzeug mit vergleichbarer Sensorik wie das finale Demonstratorwerkzeug ausgestattet. Als Vorbereitung wurden die Anforderungen der einzelnen Sensortypen recherchiert (siehe Abschnitt 2.1) und die von Projektpartnern übermittelten Informationen zu den verschiedenen Sensorarten zusammengestellt. Es wurden zwei Ansätze zur Vorgehensweise bei der Sensorintegration aufgestellt:

#### Variante 1: Maximale Ausstattung mit Sensoren

##### Vorteile:

- Sofortiger Beginn der Arbeiten möglich (Konstruktion, Beschaffung, Prozessmodell)
- Besseres Prozessverständnis möglich
- Geringere Wahrscheinlichkeit für notwendige weitere Anpassungen des Werkzeugs

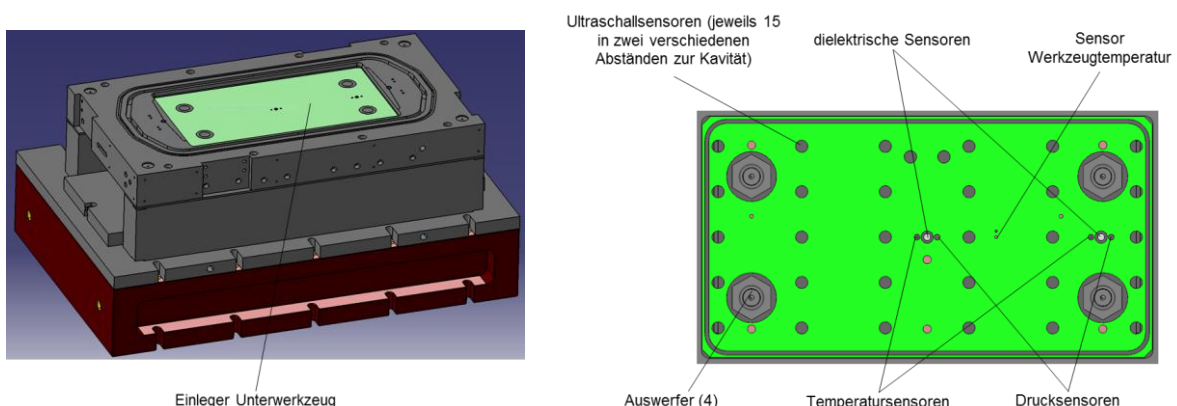
#### Variante 2: Ausstattung basierend auf Versuchsergebnissen aus HAP 2

##### Vorteile:

- Platzierung der Sensoren basierend auf bereits erlangtem Prozessverständnis
- Geringere Kosten

In einem Workshop mit den Projektpartnern wurde beschlossen Variante 1 umzusetzen. Der Grund liegt vor allem in der größeren Flexibilität bei Durchführung der experimentellen Untersuchung. Hierdurch ist es möglich, ein umfassenderes Prozessverständnis zu erlangen und so den Prozessreifegrad zu steigern.

Zusammen mit Siebenwurst erfolgte die Entwicklung von Konzepten für die Anordnung und Integration der Sensoren in das Plattenwerkzeug. Hierbei musste auch die Möglichkeit zur Weiternutzung der Werkzeugform für andere Anwendungen durch KMT berücksichtigen werden. Dies wurde erreicht, in dem ein Einleger im Unterwerkzeug (siehe Abbildung 6 links) ausgetauscht wird, in den die Sensoren integriert werden. Ein Konzept für die Sensoranordnung, das alle Anforderungen erfüllt, ist in Abbildung 6 (rechts) dargestellt.



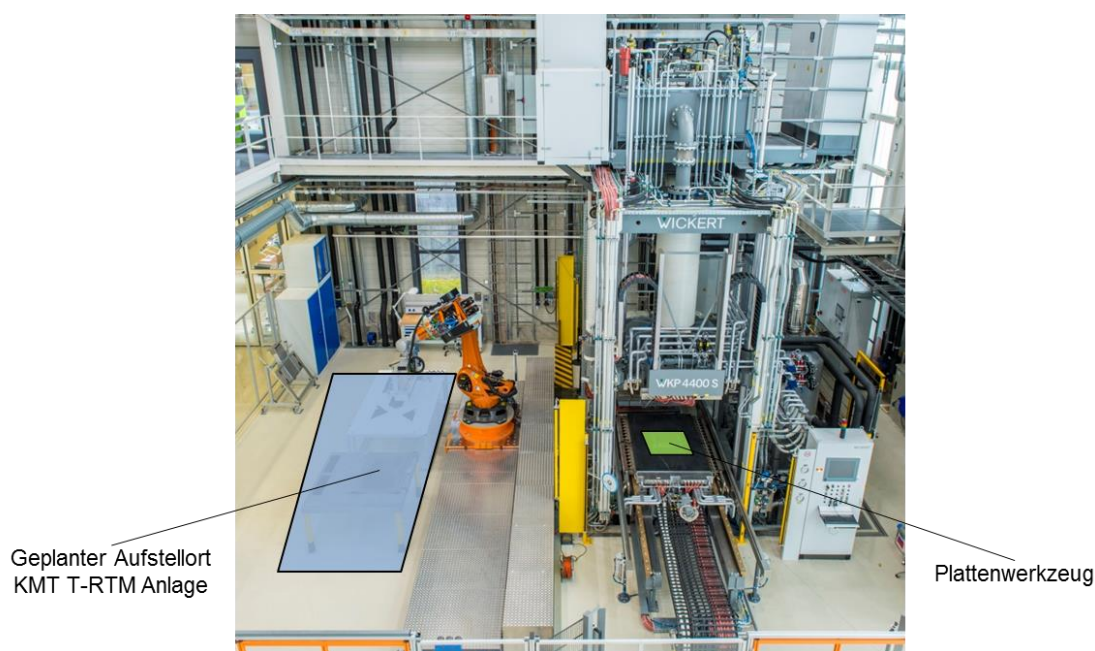
**Abbildung 6:** Untere Werkzeughälfte Plattenwerkzeug (links), Konzept Sensoranordnung (rechts)

### 3.4. AP 3.4 - Maschinenintegration und Demonstrator-Fertigung

Als Vorschritt für die Planung der Integration der KMT T-RTM Anlage und des Plattenwerkzeugs in die Technologieerprobungszelle des DLR wurde eine Besichtigung der Komponenten bei KMT



durchgeführt und der Ablauf einer Bauteilherstellung mit einem In-Situ Polymerisationsprozess besprochen. Bei einem vor Ort Termin am DLR erfolgte zusammen mit KMT und Siebenwurst die Erörterung möglicher Varianten für die Anordnung und Montage der einzelnen Anlagen- und Werkzeugkomponenten an die Heißpresse. Ein Konzept für die Vorgehensweise wurde festgelegt (siehe Abbildung 7). Für die Detailplanung wurden Daten zu den Anlagen ausgetauscht (u.a. CAD-Daten, E/A-Schnittstellenbeschreibung, Arbeitssicherheitsmaßnahmen).



**Abbildung 7:** Konzept für Aufstellung T-RTM-Anlage und Plattenwerkzeug in Technologieerprobungszelle des DLR

### 3.5. AP 3.5 - Prozessvalidierung und -optimierung mittels QS

Im Berichtszeitraum erfolgten noch keine Tätigkeiten in diesem Arbeitspaket.

## 4. HAP 4 – Datengetriebene Prozesssteuerung

Zusammen mit dem Institut für Software & Systems Engineering (ISSE) der Universität Augsburg wurde in mehreren Workshops die inhaltliche und zeitliche Herangehensweise in Bezug auf die in HAP 4 durchzuführenden Arbeiten erarbeitet und mit den Inhalten in HAP 3 abgestimmt.

### 4.1. AP 4.1 - Entwicklung eines durchgängigen Datenmodells

Für die Entwicklung eines durchgängigen Datenmodells, das für alle im Projekt genutzten Anlagen und Systeme nutzbar ist, wurde zusammen mit ISSE ein Informationsbogen zur Abfrage von technischen Informationen (u.a. Schnittstellen, Sensorik, Aktorik) bei den Projektpartnern erarbeitet. Diese Informationen wurden für die am DLR im Projekt genutzte Heißpresse zusammengestellt (siehe Tabelle 1).





Tabelle 1: Auszug aus Informationsbogen für Heißpresse des DLR

| Sensor / Aktor?   | Funktion / Aufgabe | Einheiten (SI)                | Wertebereich   | Toleranzen / Genauigkeit   | manipulierbar während Prozess?  | Art Datenbereitstellung (eventbasiert / kontinuierlich) | Verfügbarkeit in Echtzeit während Prozess? | Hersteller (fakultativ) | Typ (fakultativ) | weitere Informationen                       |   |
|-------------------|--------------------|-------------------------------|--|--|---|---|--|-------------------------|------------------|---|---|
| Wickel WIP 4800 S | Sensor             | Druckmessung                  | bar  | 0 bis 400  | Nichtlinearität: $\leq \pm 0,125\%$ des Wertebereichs<br>Genauigkeit: $\leq \pm 0,25\%$ des Wertebereichs   | -   | kontinuierlich                             | ja                      | WIKA             | S20   | Aus den Messdaten von mehreren Sensoren (Position an Hydraulikzylindern) wird in der Steuerung eine resultierende Kraft berechnet (Anzeigeeinheit: kN). Dieser Wert wird für die Berechnung eines spezifischen Drucks in Abhängigkeit von der eingegebenen Druckfläche des Werkzeugs genutzt (Anzeigeeinheit: bar). |
|                   | Sensor             | Wegmessung                    | mm   | 0 bis 1600   | Auflösung: 0,001 mm   | -   | kontinuierlich                             | ja                      | TR-Electronic    | LA-46-K 1600 SSI (Artikelnummer: 321-01563) | Einsatz für die Wegsteuerung der oberen Druckplatte   |
|                   | Sensor             | Wegmessung                    | mm   | 0 bis 240  | Auflösung: 0,1 $\mu\text{m}$<br>Genauigkeitsklasse: $\pm 5 \mu\text{m}$                                     | -   | kontinuierlich                             | ja                      | TR-Electronic    | LT-240-S SSI (Artikelnummer: 3200-00012)    | Nur aktiv, wenn Gleichlaufzylinder genutzt werden. Dies ist eine Zusatzfunktion, die nicht zwingend aktiviert sein muss. Dabei wird während des Pressens die Parallelität der oberen Druckplatte durch 4 Zusatzzylinder (je ein Sensor pro Zylinder) geregelt.  |
|                   | Sensor             | Temperaturmessung             | $^{\circ}\text{C}$                                       | -196 bis +600  | Grenzabweichung: $\pm [0,3 + 0,0050 \cdot  t ]$<br> t  = Wert der Temperatur ohne Beachtung des Vorzeichens | -   | kontinuierlich                             | ja                      | Gräff            | 7112 (Klasse B)                             | Insgesamt 18 eigenständig geregelte Heizzonen (je ein Sensor pro Zone)  |
|                   | Aktor              | Pressen                       | bar<br>mm<br>s<br>kN/s<br>mm/s                           | 0,1 bis 3276,7<br>-1 bis +100<br>5 bis 86399<br>1 bis 300<br>0,1 bis 250 | 0,1<br>0,1<br>1<br>1<br>0,1   | ja  | -  | -                       | -                | -   | Komponenten zusammengefasst; Funktion wird durch mehrere Hydraulikzylinder ausgeführt.<br>Einstellbare Werte: spezifischer Druck, Position, Haltezeit / Kraftänderungsrate, Geschwindigkeit   |
|                   | Aktor              | Temperieren (Heizen / Kühlen) | $^{\circ}\text{C}$<br>s<br>$^{\circ}\text{C}/\text{min}$ | 20 bis 450<br>5 bis 86399<br>0 bis 10                                    | 0,1<br>1<br>0,1   | ja  | -  | -                       | -                | -   | Komponenten zusammengefasst; Funktion wird über 18 eigenständig geregelte Heizstäbe (9 pro obere/untere Druckplatte) ausgeführt. Die Kühlung kann nur über eine gesamte Druckplatte ausgeführt werden.<br>Einstellbare Werte: Temperatur (je Druckplatte), Haltezeit / Heizrate (je Druckplatte)                    |

4.2. AP 4.2 - Umsetzung des digitalen Prozess-Zwilling

Im Berichtszeitraum erfolgten keine Tätigkeiten in diesem Arbeitspaket.

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.