

## eFAM4Ind

endless fiber reinforced additive manufacturing for industrial applications

<b>Programm / Ausschreibung</b>	Produktion der Zukunft, Produktion der Zukunft, 32. AS PdZ - Nationale Projekte 2019	<b>Status</b>	abgeschlossen
<b>Projektstart</b>	01.04.2020	<b>Projektende</b>	31.12.2023
<b>Zeitraum</b>	2020 - 2023	<b>Projektlaufzeit</b>	45 Monate
<b>Keywords</b>	additive manufacturing; fused filament fabrication; industrial applications; reliability; prediction		

### Projektbeschreibung

Die Additive Fertigung polymerer Werkstoffe hat es geschafft sich in Märkten wie dem "Prototyping", für Design-Studien, oder auch im Medizin-Bereich zu etablieren. In mechanisch hoch belasteten industriellen Anwendungen, ist diese relativ neue Technologie jedoch noch selten anzufinden. Die Zurückhaltung in diesem Bereich kann auf zwei Hauptgründe zurückgeführt werden: Zum einen verfügen die verwendbaren Materialien oft nicht über ausreichende Eigenschaften und zum anderen können Zuverlässigkeit und Lebensdauer nur schwer abgeschätzt werden.

Eine Möglichkeit die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen zu erhöhen ist der Einsatz von verstärkenden Füllstoffen, wie zum Beispiel organische oder anorganische Fasern. Aufgrund der Prozessführung, ist dies in der Stereo-Lithographie, sowie bei Pulverbetttechnologien nur schwer umsetzbar. Im Gegensatz dazu konnte bereits gezeigt werden, dass Fasern sehr gut mittels der „Fused Filament Fabrication“ (FFF) verarbeitbar sind. Der Prozess selbst erlaubt es verschiedene Arten von Fasern (Kohlestoff-, Glas-, Natur-, ...), sowie Längen zu verwenden. Es können sowohl Kurz-, Lang- und sogar Endlosfasern verwendet werden. Unabhängig von der verwendeten Faser zur Erhöhung der Eigenschaften, müssen Produzenten jedoch immer noch die Zuverlässigkeit Ihrer Produkte garantieren können. Eine Möglichkeit dazu ist die Prüfung der Komponente unter realen Belastungsbedingungen selbst. Diese Art der Bauteilprüfung ist jedoch sehr aufwändig, sowohl was Zeit als auch Kosten betrifft. Daher steht diese Art der Zuverlässigkeitsbestimmung klar im Widerspruch zu den ursprünglichen Gedanken der additiven Fertigung – schnelle und effiziente Herstellung.

Zur Vermeidung dieser Bauteilprüfungen, sowie zur Beschleunigung des Entwicklungsprozesses werden normalerweise Versuche an Prüfkörpern mit finite Elemente Berechnung gekoppelt um ein Produkt zu designen und dessen Lebensdauer im Einsatz zu eruieren. Während es für in der Industrie etablierte Herstellungsmethoden, wie dem Spritzgussverfahren, bereits ausgefeilte Methoden und Routinen dazu gibt, existieren im Bereich der additiven Fertigung diese noch nicht. Allerdings gibt es bereits Möglichkeiten zur Beschreibung der Prozessgeschichte während des Herstellungsprozesses. Daher ist die fehlende Verbindung, und erklärtes Projektziel, zwischen Prozessgeschichte und Lebensdauerberechnung die exakte Polymerphysikalische Beschreibung der Schweißnahtqualität.

Aufgrund der komplexen Verarbeitungsgeschichte ist es nur schwer möglich die Eigenschaften von Prüfkörpernebene auf reale Komponenten zu übertragen. Durch unterschiedliche Druckpfade, -strategien und grobe Unterschiede in der Größe selbst, kann es zu stark unterschiedlichen Eigenschaften kommen. Abhängig von der Zeit zwischen dem Verschweiß-Prozess

zweier Stränge, und damit einhergehender Abkühlung bereits abgelegter Stränge, können sich entweder so genannte „cold welds“ mit sehr schlechten, oder „hot welds“ mit sehr guten Eigenschaften ausbilden. Der größte Unterschied von (kleinen) Prüfkörpern und (großen) Bauteilen ist meist in der Zeit zwischen dem Ablegen von Strängen begründet. Durch die stärkere Abkühlung im realen Bauteil, zeigen diese meist schlechtere Eigenschaften als Prüfkörper, die mit denselben Parametern gedruckt werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Prozessgeschichte, ist die Übertragbarkeit von mechanischen Kennwerten von Prüfkörper auf Bauteilebene nur sehr bedingt möglich. Noch wichtiger ist, dass es durch die Verwendung solcher Kennwerte zu überschätzten Eigenschaften im Bauteil kommen kann. Dies würde entweder zu einem unvorhergesehenen Versagen des Bauteils, oder zur Verwendung von exorbitant hohen Sicherheitsfaktoren führen.

Da sowohl Prozesspfad und -geschichte im FFF Verfahren bekannt sind, können mittels FE Modellen, die die Randbedingungen miteinbeziehen, die lokalen Temperaturen während des Verschweiß-Prozesses von Strängen in Bauteilen berechnet werden. Durch die Koppelung dieser Simulationen mit Prozess-abhängigen Materialkarten, die das Zusammenspiel von lokaler Temperatur und resultierender mechanischer Eigenschaft beschreiben, könnten so die Zuverlässigkeit von Bauteilen digital eruiert und auf unnötig teure Bauteiltests verzichtet werden. Dadurch könnte nicht nur die Zuverlässigkeit von additiv gefertigten Bauteilen erhöht werden, sondern auch die Bereitschaft der Industrie diese neue Technologie vermehrt in mechanische belasteten Bereichen einzusetzen.

## **Abstract**

Additive manufacturing (AM) of polymeric materials has successfully managed to penetrate into markets, such as design, rapid & functional prototyping and even medical applications. However, industry is still hesitant to use it in applications that are more critical, from a mechanical standpoint. This can mainly be attributed to two main factors: Insufficient mechanical properties of useable materials and a lack of knowledge with regard to the predictability and reliability of products processed via AM.

To increase mechanical properties in polymers, reinforcing fillers, such as organic or an-organic fibres, can be used. While this is only a limited possibility in methods such as stereo lithography or powder bed methods, it has been demonstrated to work well with the fused filament fabrication (FFF) technique. The process itself allows the use of several types of fibres. Dimensions of the fibres can range from short to endless, materials from glass and carbon to bio based. Regardless of the chosen fibre, producers have to make sure their products can endure the operational loads during their lifetime. While it is possible to do so via full-scale component testing with regard to the real application conditions, it is also very expensive and time consuming. This is in stark contrast to one of the initial ideas of AM - rapid and efficient manufacturing.

To accelerate the time to market and avoid full-scale component tests, testing of specimens is usually combined with finite element based evaluation methodologies to predict lifetimes in a digitally assisted process. While there are fully developed routines for more conventional production methods, such as injection moulding, there are none for endless fibre reinforced materials produced via AM. However, there are already tailor-made tools for the description of the processing history of AM processes. The only missing link to meet industry demands, and clear aim of this project, is the combination of both available technologies (description of process history and lifetime prediction methodologies), by including the polymer physics based description of weld strength as a function of processing history.

Due to the complex processing technique, it is quite hard to scale up properties from specimen to component level, even for unreinforced materials. Different printing paths and strategies, as well as specimen or component size, can lead to very different properties. Depending on the time between fusing of two strands, and corresponding cool down of already deposited strands, the processing can lead either to “hot welds” with good, or “cold welds” with rather bad properties. The

main difference between a (small) printed specimen and a (larger) component usually is the time that passes between the placements of filaments. This is also the main reason, why components printed with the same printing parameters as specimens usually exhibit much lower properties.

Due to the different processing history of components and specimens, transferability of findings on specimen level to component level is limited or even questionable. Even more important for real applications is, that using values, determined on specimen level, to design large-scale components might lead to highly overestimated properties. Ultimately, this leads to one of two possibilities: premature failure of the structure if values from specimen level are directly used, or high safety factors have to be introduced, which might lead to unnecessary bulky components.

Since the process-path is known for each point, a local processing temperature, consisting of the temperature of the deposited strand, neighbouring strands, build chamber temperature, convection etc., can be determined and merged to a process temperature field in a digital twin of the process. Once the local process temperature is known they could be correlated to the right mechanical properties, if they are known from customized tests to predict the performance and reliability of the component. This would not only increase safety of AM components in structural applications, but might also encourage industry to increase their usage of AM.

## **Endberichtkurzfassung**

Im gegenständlichen Projekt eFAM4Ind („endless fibre reinforced additive manufacturing for industrial applications“) war das primäre Ziel die Erforschung und Erstellung einer durchgängigen Charakterisierungs- und Simulationskette, die eine Vorhersage der Lebensdauer additiv gefertigter Bauteile mit Endlosfaserverstärkung unter Ermüdungsbelastung ermöglicht. Dazu wurde das Konzept der äquivalenten Schweißzeit (z.B. Seppala 2017) verwendet, um die Schweißnahtfestigkeit abgelegter Faserverstärkter Stränge (Poly-Milchsäure mit Flachsfaser) auf Basis des Temperaturprofils während der Verarbeitung vorherzusagen. Dazu wurden tatsächliche Temperaturprofile an Prüfkörpern und kleinen Bauteilen mittels Infrarot-Kamera, sowie Thermoelementen aufgenommen. Diese dienten der Kalibrierung eines FE-Modells, das den Strangablageprozess nachbildet (Abaqus AM Modeler).

Für die Übertragung auf ein Bauteil, konnten anschließend Temperaturprofile mittels FE Modellierer simuliert und über das Konzept der äquivalenten Schweißzeit in erwartbare Festigkeiten umgelegt werden. In Kombination mit einer weiteren FE-Strukturanalyse, in der die zu erwartenden Belastungen einfließen, konnten lokale Spannungen und Festigkeiten gegenübergestellt werden. Für eine Übertragung auf zyklische Lasten, wurden zusätzlich Ermüdungskurven unter unterschiedlichen Belastungsverhältnissen ( $R=0.1$  und  $R=-1$ ) und Orientierungen (in und quer zur Faserrichtung) ermittelt. Analog zu Festigkeiten, konnten so Ermüdungseigenschaften den lokalen Schweißzeiten gegenübergestellt werden.

Zur finalen Vorhersage der Lebensdauer eines Demonstrator-Bauteils, wurden anschließend die ermittelten Material- bzw. Vorhersagemodelle und das Konzept der lokalen Wöhlerkurven verwendet und die Lebensdauer unter Ermüdungsbelastung mittels FEMFAT™ vorhergesagt. Die Gegenüberstellung von berechneter und tatsächlich am Demonstrator gemessener Lebensdauer zeigte dabei eine ausgezeichnete Übereinstimmung. Basierend auf den durch das Projekt geschaffenen Charakterisierungs- und Modellierungsketten ist es in Zukunft möglich, basierend auf an Prüfkörpern gemessenen Eigenschaften die Lebensdauer von additiv gefertigten Komponenten unter Ermüdungsbelastung vorherzusagen.

## **Projektkoordinator**

- Montanuniversität Leoben

## **Projektpartner**

- Engineering Center Steyr GmbH & Co KG
- Head Sport GmbH
- Polymer Competence Center Leoben GmbH
- Kompetenzzentrum Holz GmbH