

STATISCHE PRESSVERSUCHE ZUR RESSOURCENSCHONENDEN WERKZEUGAUSLEGUNG FÜR INTERVALLHEISSPRESSEN VON PREFORMS AUS THERMOPLASTISCHEN TAPES

F. Röder*, M. Eckrich*, A. Krämer*, D. May[§], A. Gebhard*

* Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Erwin-Schrödinger-Straße 58, 67663 Kaiserslautern, DE

§ Faserinstitut Bremen e.V., Universität Bremen, Gebäude IW3, Am Biologischen Garten 2, 28359 Bremen, DE

Zusammenfassung

Der Intervallheißpressprozess ist ein höchst leistungsfähiger Prozess zur effizienten Herstellung quasi endloser thermoplastischer Profile. Trotz der einzigartigen Möglichkeiten dieses Prozesses und seiner herausragenden Prozessstabilität konnte er sich unter anderem durch den stark limitierten Einblick in die Vorgänge innerhalb des Presswerkzeugs noch nicht auf breiter Linie durchsetzen. Einer der erfolgreichsten Ansätze zur Abbildung des Prozesses in der Vergangenheit war die Nachbildung des Intervallheißpressprozesses durch statische Pressprozesse. Hierzu wurden Betrachtungen der Werkzeugbewegung eines einfacher zugänglichen, variothermen thermoplastischen Pressprozesses bei vergleichbaren konstanten Heiz- und Kühlraten zum Vergleich herangezogen. Im Fokus standen dabei klassische, gewebebasierte Organobleche. Auf diesem Ansatz basierend soll die Optimierung des Intervallheißprozesses zur Co-Konsolidierung thermoplastischer Tapes durchgeführt werden. Hierbei wird gleichzeitig die Abbildung des Prozesses verbessert indem reale, aus dem Intervallheißpressprozess aufgenommene Temperaturkurven und simulativ erzeugte Temperaturkurven durch eine hochdynamische Temperaturregelung approximiert werden. Nicht vollständig darstellbare Temperaturgradienten werden gestützt durch statistische Untersuchungen rechnerisch auf die Zieltemperaturkurven angepasst. Der dargestellte Temperaturgradient liegt so näher an realen, im Prozess vorliegenden Temperaturen. Durch Simulationen wird zusätzlich die Kavitätsänderung während des Erhitzen des Werkzeugs betrachtet. Im Vergleich zu früheren Lösungsansätzen soll so die Konstruktion eines vollständig kompensierten Werkzeugs für das Co-Konsolidieren thermoplastischer Tape-Halbzeuge ermöglicht werden, das kein nachträgliches Einstellen der Werkzeugkavität durch Shimming benötigt. Die Untersuchungen zeigen, dass der werkstoffbedingte Anteil der Kavitätsänderung durch die durchgeführten Versuche gut angenähert werden kann. Sie schaffen somit die Ausgangssituation für eine einfachere Auslegung des Prozesses für die Co-Konsolidierung thermoplastischer Tape-Halbzeuge im Intervallheißprozess. Ein weiterer Nutzen des somit etablierten Pressversuchs, ist das Testen und Validieren von Sensoren für den Intervallheißpressprozess in einem unkomplizierten Prozess.

Keywords

Faserverbundwerkstoffe; Intervallheißpressen; Volumetrische Expansion; Kristallisation; Fertigungsverfahren

1. EINLEITUNG

Der Intervallheißpressprozess ist ein Prozess zur effizienten Herstellung endloser, faserverstärkter Profile mit beliebigem Lagenaufbau. Ist der Prozess korrekt eingestellt, läuft er mit hoher Stabilität, deutlich demonstriert durch Ausschussraten unter einer Promille. Durch seine niedrigeren Investitionskosten und die hohe Produktflexibilität konnte sich das Intervallheißpressen auch gegenüber verschiedenen anderen kontinuierlichen Systemen zur Halbzeugherstellung durchsetzen. [1] [2]

Eine entscheidende Herausforderung beim Intervallheißpressen stellt die Einstellung korrekter Prozessparameter dar. Durch die gleichzeitige Bearbeitung großer Materialabschnitte ergeben sich neben Vorteilen in der Effizienz gleichzeitig hohe Anforderungen

an die Prozessführung. In der Praxis ist jede neue Einstellung des Prozesses mit hohem Versuchsaufwand verbunden. Insbesondere für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt ist dies durch die verwendeten Materialien eine besonders kostspielige Angelegenheit. Mit den in diesem Beitrag untersuchten Methoden soll das Einstellen des Prozesses erheblich beschleunigt und erleichtert werden, wodurch die Flexibilität des Prozesses erhöht und dessen Robustheit gesteigert werden sollen.

Hierfür soll gezeigt werden, dass die Darstellung der Zustände im Inneren der Intervallheißpresse durch einen entsprechend optimierten variothermen Pressprozess untersucht werden können. Die Abbildung der Rahmenbedingungen des Prozesses auf ein einzelnes, repräsentatives Laminat soll deutliche Aussagen

über das Materialverhalten in einer praktischen Herangehensweise ermöglichen. Schwerpunkt der Untersuchungen stellt dabei insbesondere die Untersuchung des volumetrischen Ausdehnungsverhaltens dar, da dieses einen Schwerpunkt der Herausforderungen im aufwändig zu korrigierenden Werkzeugdesign des Prozesses darstellt. Die Arbeit steht dabei unter dem Grundsatz der praktikablen Anwendbarkeit. Die Autoren möchten zeigen, dass die untersuchte Methode eine praktikable und nachvollziehbare Alternative zum aufwändigen Einstellprozess durch ausschließliche Nutzung der eigentlichen Intervallheißpresse darstellt. Die erzielte Genauigkeit somit erwartungsgemäß durchaus hinter der vergleichbarer Messverfahren zurückbleiben.

2. STAND DER TECHNIK

Beim Intervallheißpressen handelt es sich um einen Prozess aus der Gruppe der semi-kontinuierlich arbeitenden Pressprozesse. Im Prozess wird Material in stets gleicher Richtung durch eine Presse gefördert. Auf der Seite des Materialeinlaufs wird endloses Halbzeug zugeführt, auf der Seite des Materialauslaufs wird das fertige Endprodukt durch einen Greifmechanismus abgezogen. Durch die Verwendung endloser Halbzeuge stellt das Abziehen des Materials gleichzeitig die Nachführung von frischem Halbzeug sicher. Die Richtung der Materialbewegung entspricht dabei der Prozessrichtung. Entlang dieser wird durch einen am Werkzeug eingestellten Temperaturgradienten Wärme in das Halbzeug übertragen. Durch die Kombination mit der Bewegung des Halbzeugs erfährt dieses somit einen zeitlichen Temperaturverlauf. In diesem wird das hier verwendete, thermoplastische Material aufgeschmolzen um gegen Ende des Prozesses wieder eingefroren zu werden. Dies ermöglicht die Imprägnierung und Konsolidierung des verwendeten Halbzeugs zum Endprodukt. Die Temperatur wird durch in der Maschine integrierte, separat regelbare Heiz- und Kühlplatten eingestellt. Zur Konsolidierung in der Intervallheißpresse wird zusätzlich Druck über die gesamte Pressfläche appliziert. Dieser wird in Intervallen ab- und wieder aufgebaut, um eine schädigungsfreie Bewegung des Materials in Produktionsrichtung durch Abziehen des fertigen Materials zu ermöglichen. Der Druckabbau erfolgt dabei getaktet mit der Bewegung, so dass diese im entlasteten Zustand durchgeführt werden kann. Die Form des verwendeten Werkzeugs bestimmt die Geometrie des Endprodukts, wobei neben verschiedenen Dicken und Breiten auch komplexere Formen wie Profile gefertigt werden können. Vor allem bei der Fertigung von diesen kommen dabei bereits imprägnierte Tape-Halbzeuge zum Einsatz. Falls möglich werden bevorzugt nicht imprägnierte Halbzeuge in Kombination mit Polymerfolien oder aufgetragenen Polymerpulver eingesetzt, da diese günstiger und verfügbarer sind. [1, 3–6]

2.1. Zusammenhänge der Prozessgrößen und Relevanz der Sollkavität

Die entscheidenden Parameter für den Intervallheißpressprozess sind das Material, die Vorschubgeschwindigkeit, die Temperatur, der Druck und die Werkzeuggeometrie. Sie unterliegen verschiedenen Randbedingungen, die durch unterschiedliche Anforderungen vorgegeben werden. Material und Form des Produkts werden durch den Anwendungsfall definiert. Die Vorschubgeschwindigkeit wird aus ökonomischen Gründen in den möglichen Grenzen maximiert. Diese folgen wiederum aus Anforderungen an die Qualität der Bauteile, resultierend aus dem Zusammenspiel von Druck, Temperatur und Zeit. Für die Optimierung des Prozesses steht somit die Form des Werkzeugs als einziges frei zu Verfügung.

Der ausschlaggebende Einfluss des Werkzeugs besteht im Kontakt dessen mit der Oberfläche des zu verarbeitenden Materials. In aller Regel wird dieser über einen Druck quantifiziert, der an der Werkzeugoberfläche wirkt. Er resultiert aus der Differenz des im Werkzeug zu Verfügung stehenden Volumens relativ zu dem vom Material im druckfreien Zustand eingenommenen Volumen. Wird das zu Verfügung stehende Volumen durch Verkleinerung des Werkzeugspalts (auch Kavität genannt) reduziert, steigt der Druck. Sinkt hingegen das eingenommene Volumen, beispielsweise durch Imprägnierung, fällt der Druck. Durch vertikale Bewegungen des gesamten Werkzeugs kann das Volumen zwischen den Werkzeughälften jedoch nur gleichmäßig erhöht oder reduziert werden. Lokale Unterschiede im wirkenden Druck müssen stattdessen über entsprechend vorzusehende Unterschiede in der Werkzeugkavität berücksichtigt werden.

Hier gibt es eine Reihe von wünschenswerten Effekten, die über lokale Druckunterschiede erzeugt werden sollen, wie die von Piott et al. und Christmann et al. erzielte Ausbildung der elliptischen Fließfront bei der Materialverdrängung und Imprägnierung durch den Pressprozess, aber auch die zugrundeliegende Richtung des Druckaufbaus entgegen der Förderrichtung [3, 4]. Die Grundlage für die entsprechende Einstellung des gewünschten Verhaltens ist jedoch der quasi-stationäre Zustand ohne Polymerbewegungen in der Werkzeugebene. Dieser stellt sich ein, wenn innerhalb des Werkzeugs keinerlei Druckunterschiede vorliegen. Die entsprechende Soll-Kavität resultiert dann allein aus dem durch das Material eingenommenen Volumen. Dieses unterliegt jedoch selbst wiederum den Effekten von Material, Temperatur, Druck und Zeit. Es muss somit individuell für die Parameter des jeweiligen Intervallheißpressprozesses bestimmt werden.

2.2. Bestimmung der volumetrischen Expansion von Faserverbundwerkstoffen

Die gewünschte Form des Werkzeugs wird demzufolge durch die Zieldicke des Laminates und dessen zugehörige thermisch-mechanische Eigenschaften definiert. Insbesondere ist hier die Ausdehnung des

Materials in Richtung des Pressenhubs entscheidend. Diese tritt näherungsweise ohnehin alleinig auf, da benachbarten Bereiche des Laminats näherungsweise den gleichen Effekten unterliegen und die im Intervallheißpressverfahren hergestellten Profile und Lamine üblicherweise ein sehr hohes Breiten zu Höhen-Verhältnis aufweisen (>30). Der entscheidende Koeffizient der thermischen Ausdehnung ist demzufolge weiterhin der Koeffizient der volumetrischen thermischen Expansion (Eng.: Coefficient of volumetric thermal expansion, CVTE), eingeschränkt auf eine einzige Richtung der Expansion.

Der CVTE kann über verschiedene Modelle berechnet und simuliert werden, allerdings nur unter der Kenntnis einer erheblichen Anzahl an Eigenschaften des Polymers, der Fasern und der Struktur des Materials. Insbesondere der Erstarrungsprozess des Materials und die damit einhergehende Schwindung sind zusätzlich noch in hohem Maße von den Prozessparametern des verarbeitenden Prozesses abhängig. Praktischen Messungen des CVTE sind hingegen durch die vorhandene Messtechnik Grenzen gesetzt. Die primär hierfür eingesetzte thermomechanische Analyse (TMA) kann die thermische Expansion eines Laminates in allen drei Richtungen des Raums während der Aufbringung verschiedener Temperaturen kontinuierlich vermessen. Dabei wird jede einzelne Richtung separat über einzelne Messfühler gemessen, die in leichtem Kontakt zur ansonsten offen aufgestellten Probe stehen. Die Messung ist hiermit nur bei Festkörpern möglich.

Einen umfassenderen Messbereich auch im schmelzflüssigen Zustand erlauben bestimmte Verfahren der Dilatometrie, in der Proben in einem abgeschlossenen Volumen unter variablen Drücken aufgeheizt und abgekühlt werden können. Hier kann einerseits eine Probe in einer Flüssigkeit einem hydrostatischen Druck ausgesetzt werden. Durch die Änderung der Temperatur der Flüssigkeit ändert sich gleichzeitig auch die Temperatur der Probe, durch die Änderung des verdrängten Flüssigkeitsvolumens kann gleichzeitig die volumetrische Expansion der Probe aufgezeichnet werden. Durch diese Messmethode kann ein deutlicher Zusammenhang des CVTE von Polymeren mit dem aufgetragenen Druck nachgewiesen werden. Die Vergleichbarkeit des Verfahrens zur Bestimmung der gesuchten Ausdehnung senkrecht zur Laminebene ist durch den direkten Kontakt zu einer Flüssigkeit zweifelhaft, gleichzeitig sind die mit üblichen Versuchsaufbauten erreichbaren Kühlraten von bis zu 2.5 K min^{-1} nicht in der Lage, die in der Intervallheißpresse vorherrschenden Prozessbedingungen abzubilden. [7,8]

Am besten dargestellt wird die gesuchte Form der volumetrischen Expansionsmessung durch die Dilatometrie als Messung der volumetrischen Expansion in einem geschlossenen Behältnis. Hier wird zumeist pulverförmiges oder flüssiges Material in ein zylindrisches Behältnis gegeben, das mit einem eng gepassten Deckel verschlossen wird. Der gesamte Aufbau wird unter verschiedenen Temperaturen gemessen, die Bewegung des Deckels kann über den Durchmesser

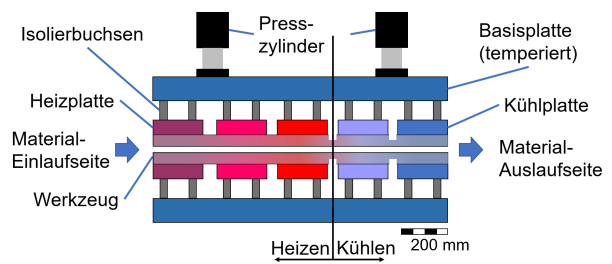


BILD 1. Schematisch dargestellter Aufbau einer Intervallheißpresse

und die Höhe des Gefäßes in den volumetrischen Ausdehnungskoeffizienten des Materials umgerechnet werden. Die Ausdehnung der Probe wird somit in zwei Richtungen begrenzt und zwingend in die einzig verschiebbare Richtung umgewandelt. Eine Anpassung dieses Verfahrens wird zuerst von Christmann zur Messung der volumetrischen Expansion, angelehnt an die Gegebenheiten der Intervallheißpresse, angewandt. Als Werkzeug kommt ein flaches Edelstahl-Ringwerkzeug zum Einsatz, das aus einem zylindrischen Ring mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Höhe von 13.75 mm sowie zwei passenden Deckeln mit einer Höhe von je 6.3 mm besteht. Es wird auf einer eigens konstruierten Presse in mehreren Versuchen mit verschiedenen Drücken, aber der stets gleichen Temperaturkurve aufgeheizt und wieder abgekühlt. Christmann verfolgt damit das oben beschriebene Ziel, vor allem die Schwindung des Materials und somit deren Anforderungen an Kompensationen der Kavität des Intervallheißpressprozesses durch eine experimentelle Nachstellung eben jener in einem angelehnten Versuch zu messen. Die von Ihm demonstrierte Messung ermöglicht eine Anpassung des vorhandenen Werkzeugs durch Shimming auf der Werkzeugoberfläche und zeigt dadurch eine Verstetigung der Druckverteilung und somit eine Verbesserung des Endprodukts. [3]

2.3. Aufbau einer Intervallheißpresse

Die Anforderungen an den Prozess innerhalb einer Intervallheißpresse spiegeln sich im Aufbau der Anlagen, dargestellt in Bild 1, wider. Im Grundsatz besteht die Presse aus zwei Basisplatten, die übereinander an Linearführungen aufgehängt sind. Die obere Platte ist dabei beweglich ausgeführt und kann durch zwei daran angreifende Presszylinder die erforderlichen Prozesskräfte aufbringen. Die Verwendung von zwei getrennten Zylindern entlang der Produktionsrichtung erlaubt das Aufbringen eines linearen Druckgradienten entlang dieser. Auf der Basisplatte über isolierende Abstandshalter (Isolierbuchsen in Abbildung 1) montiert, folgen die Heiz- und Kühlplatten. An diesen werden die Prozesstemperaturen eingestellt um die erforderlichen Temperaturverläufe im Prozess zu erreichen. Insbesondere Heiz- und Kühlzonen sind dabei als geteilte Elemente ausgeführt, um einen schärferen Temperaturgradienten zu ermöglichen und direkte konduktive Wärmeübertragung dieser Bereiche

miteinander zu minimieren sowie Auswirkungen thermischer Dehnungen zu reduzieren. Bei der betrachteten Anlage folgen auf drei einzeln steuerbaren Heizzonen in Prozessrichtung zwei individuell temperierbare Kühlzonen. In der Breite der Presse sind die Platten zudem erneut unterteilt, einerseits zur effizienten Verwendung unterschiedlich breiter Werkzeuge, andererseits auch zur Einstellung eines Temperaturgradienten über die Breite. Auf der Oberfläche dieser Platten wird oben und unten jeweils eine Hälfte des Werkzeugs montiert. Zwischen diesen verbleibt dann die Kavität. Als Hilfsmittel wird hier analog zu kontinuierlichen Pressprozessen zusätzlich noch eine Trennschicht (z.B. Polyimidfolie) gemeinsam mit dem Halbzeug durch den Prozess gefördert. Diese verhindert ein Anhaften des Halbzeugs an der Presse. Die Anlage kann somit vergleichbare Geometrien zur Pultrusion herstellen, erlaubt aber durch die Trennschicht und den Druckabbau in der Halbzeugbewegung die Herstellung von Profilen mit nahezu beliebigen Faserorientierungen.

2.4. Herausforderungen im Werkzeugdesign verwandter Prozesse

Neben der thermoplastischen Pultrusion kann auch der reguläre Heißpress-Prozess als verwandt angesehen werden. Für beide Prozesse sowie den Autoklav-Prozess mit Pressplatten existieren verschiedene Betrachtungen der Prozessparameter, die gemeinsam die Erkenntnisse der wenigen Untersuchungen zum eigentlichen Intervallheißpressprozess stützen. So gilt generell in den druckgestützten Prozessen, dass Temperatur und Zeit den größten Einfluss auf die Qualität der Imprägnierung und Konsolidierung ausüben. Druck übt dabei einen geringeren Einfluss auf die Imprägnierung aus, der beim Überschreiten eines Prozess- und Materialspezifischen Maximalpunkts auch negative Effekte auf die Qualität des produzierten Bauteils bewirkt. Entscheidend für den Porenvolumengehalt ist der Druck, der während der eigentlichen Konsolidierung und dem Erstarren der Matrix wirkt. [9, 9–15] Der Fokus der Untersuchungen zur Optimierung des Pultrusions-Prozess liegt auf der Auslegung eines korrekten Werkzeugdesigns und der damit verbundenen Prozessführung. Durch die stetige Verengung der Kavität des Werkzeugs in Prozessrichtung wird auch hier der nötige Druck aufgebaut, der die Imprägnierung der Fasern gewährleistet. Dieser wird durch den Öffnungswinkel des Werkzeugs und die Fördergeschwindigkeit des Materials eingestellt und bewirkt nach gängigen Modellvorstellungen lediglich Polymerbewegungen quer zur Förderrichtung. Durch die konstante Verengung des Querschnitts wird trotz der stetig fortschreitenden Imprägnierung weiterhin ein effektiv wirkender Druck aufrecht erhalten. Können bereits imprägnierte Tape-Halbzeuge verwendet werden, reicht bereits ein sehr kleiner Öffnungswinkel des Werkzeugs aus. [16–18]

Somit ist eine deutliche Verwandtschaft mit dem Intervall-Heißpressprozess gegeben. Da der gesamte

Prozess mit einem starr zusammenhängenden Werkzeug durchgeführt wird, können einzelne Bereiche der Presse ebenso wie im Pultrusionsprozess nicht verschiedentlich positioniert werden. Eine entsprechenden Druckregelung kann nur auf der ganzen Presse durchgeführt werden. Die Positionierung des Werkzeugs wirkt sich somit zeitgleich auf alle Abschnitte des Materials in der Presse aus. Somit muss die Form des Werkzeugs die später benötigten Unterschiede in der Höhe der Kavität ebenso berücksichtigen.

2.5. Temperaturverlauf im Intervallheißpressprozess

Neben der reinen Einstellung der Kavität, ist die Problematik der im Material wirkenden Temperatur als der andere entscheidende Faktor zu betrachten. Ähnlich zu den zuvor genannten Prozessen folgt diese direkt aus der Einstellung der Werkzeugtemperatur.

In der ersten Phase soll diese schnellstmöglich auf einen Wert der oberhalb der Schmelztemperatur steigen, um den Interfaces zwischen einzelnen Tapelagen die Möglichkeit zum Verschweißen zu geben. Im Allgemeinen gilt hierbei der Grundsatz, dass die Dauer des Kontaktes der Interfaces oberhalb der Schmelztemperatur die entscheidende Rolle für den Fügeprozess spielt. Eine weitere Steigerung der Temperatur über den Schmelzpunkt hinaus beschleunigt den Vorgang zusätzlich, während das Aufbringen von Druck die Bildung der Kontaktfläche und die Evakuierung von Luft aus dem Laminat fördert. [19–22]

Nach dem Abschluss des Imprägnierens und einer ausreichenden Dauer für Diffusionsprozesse an der Grenzfläche der Polymere, wechselt der Prozess in die zweite Phase, das Abkühlen. Hier liegt der Schwerpunkt auf der Konsolidierung des Materials. Vor allem über die Einstellung der Temperaturen in der ersten Kühlzone wird durch einen entsprechenden Temperaturgradienten eine zuverlässige Konsolidierung während der Aufbringung des Prozessdrucks ermöglicht und gleichzeitig der gewünschte Grad an Kristallinität in teilkristallinen Werkstoffen eingestellt. In der zweiten Kühlzone wird das Material zusätzlich weiter abgekühlt. Auch wenn der Konsolidierungsprozess hier bereits abgeschlossen ist, kann somit zusätzlich sichergestellt werden, dass Bauteile unmittelbar weiterverarbeitet werden können.

Die Besonderheit beim Einstellen von Pressprozessen mit der Intervallheißpresse ergibt sich wieder aus der bereits hervorgehobenen, unmittelbaren Kopplung der Vorschubgeschwindigkeit mit dem zeitlichen Temperaturverlauf über die Werkzeugtemperatur. Insbesondere letzterer sind durch konstruktive Aspekte wie Länge der einzelnen Zonen, des gesamten Aufbaus oder der Platzierung von Heiz- und Kühlelementen Grenzen gesetzt.

2.6. Formkompensation von Intervallheißpresswerkzeugen

Eine weitere Herausforderung, die aus dem mechanischen Aufbau der Anlage resultiert, ist die durch Wär-

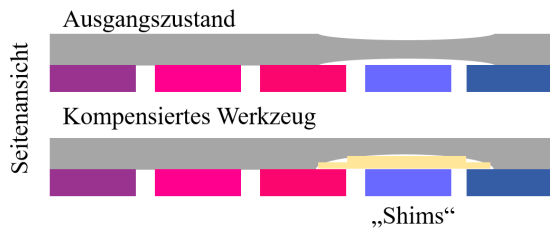


BILD 2. Schematische Darstellung der durch „Shimmen“ erreichten Kompensation der Werkzeugverformung. Dargestellt ist die Kompensation der Schrumpfung im Kühlbereich durch zwei Lagen gelb dargestellter Polyimidfolie

meausdehnung bedingte Verformung dieser. Innerhalb des Werkzeugs kommt es durch die prozessbedingten Temperaturen zu örtlich starken, deutlich unterschiedlichen Dehnungen. Da es aber die verschiedenen Heiz- und Kühlzonen mechanisch miteinander verbindet, bewirkt die überwiegende Längsdehnung des Werkzeugs durch die Kopplung an die Anlage Verformungen des Gesamtsystems, was auch zu deutlichen Abweichungen in der Kavität des Werkzeugs führt. Diese konnten beispielsweise bereits bei Piott et al. auf eine entsprechende Druckverteilung innerhalb des Werkzeugs zurückgeführt werden. Können diese nicht wie dort vorgestellt aktiv kompensiert werden, muss das Werkzeug entweder in der Konstruktionsphase so ausgelegt werden, dass die Kavität des Werkzeugs im Betriebszustand der im temperierten Zustand gewünschten Endkontur entspricht oder aber bei der Montage auf der Anlage durch entsprechende Unterlagen in die gewünschte Form gebracht werden. [4]

Bei diesem Prozess, der als „Shimmen“ bezeichnet wird, wird durch das gezielte Einbringen verschiedener Lagen aus Metall- oder Polymerfolien zwischen der Werkzeugrückseite und den Platten zur Temperierung die Kavität des Werkzeugs angepasst. Im Betrieb der Anlage bewirken diese unter Prozessdruck lokale Verformungen des Werkzeugs und ermöglichen somit eine Regulierung der Kavität. Diese in Abbildung 2 dargestellte Methode des Einstellens ist zwar etabliert und konnte sich als zuverlässig erweisen, ist aber aktuell auch an einen iterativen Verbesserungsprozess geknüpft, der den gleichen, wiederholt genannten Einschränkungen unterliegt. Zudem ist eine Einstellung der Werkzeugkavität auf diese Weise nur bei dünnen Werkzeugen möglich, da die Verformbarkeit der üblicherweise verwendeten Stahlwerkzeuge durch den Prozessdruck nur beschränkt möglich ist. Somit sind sowohl die im ersten Schritt korrekte Einstellung des Werkzeugs durch „Shimmen“ als auch die Herstellung vollständig kompensierter Werkzeuge, in deren Konstruktion bereits alle später auftretenden Dehnungen korrekt berücksichtigt werden und die somit keine weiteren Einstellungen benötigen, erklärte Ziele dieses Beitrags.

3. UNTERSUCHUNGEN

Die nachfolgenden Untersuchungen wurden im Rahmen des Projekts „LuFo-ZEUS“ Zero Emission aircraft with sustainable fuselage concept and technology (20W2106F) für einen Fertigungsprozess mit Toray Cetex® TC1225 (Toray Advanced Composites, Nijverdal, The Netherlands) durchgeführt. Die Prozessdaten entstammen der Entwicklung eines realen Serienprozesses und wurden mit freundlicher Genehmigung von der Xelis GmbH (XELIS GmbH, Bermatingen, Deutschland) zu Verfügung gestellt.

3.1. Thermische Kompensationsrechnungen

Das Shimmen ist ein Prozess, der auf der Veränderung eines vorhandenen Werkzeugs basiert. Durch das Shimmen soll dessen Oberflächenkontur an die Soll-Kavität aus der Materialauntersuchung angepasst werden. Möglich wird eine solche Einstellung der Kavität durch „Shimmen“ oder thermische Kompensation in der Werkzeugkonstruktion nur durch die Kombination einer korrekten Vorhersage der benötigten Kavität zur Reaktion auf thermische Ausdehnung des Materials mit der korrekten Berücksichtigung der Verformungen der Werkzeugo-berfläche unter den thermischen und mechanischen Rahmenbedingungen des Prozesses. Als entscheidend wird dabei die Ausweitung der in Simulationen berücksichtigten Geometrie von der Werkzeugo-berfläche hin zur festen und temperierten Basisplatte gesehen. Nur eine Berücksichtigung dieser, sowie aller daran befestigten Elemente, erlaubt die Untersuchung von Verformungen die aus der unterschiedlichen Wärmeausdehnung der Komponenten resultieren. Eine Besonderheit der Simulation ist es dabei, den Einfluss der Steifigkeiten, Erwärmungen und Verformung der Maschine zusätzlich zum reinen Verhalten des Werkzeugs zu berücksichtigen.

Die Berechnung geht vom gesamten Erwärmungsverlauf von Raumtemperatur bis zur Einstellung der Endtemperatur aus. Thermische Randbedingungen werden durch das korrekte Verhalten der Heizelemente und der Kühlkreisläufe der Presse nachgebildet, ebenso wie deren Regelverhalten. An allen Montagepunkten werden Haftbedingungen vorgegeben. Wechselwirkungen mit dem Laminat werden nicht betrachtet. Eine entsprechende Voraussetzung ist demzufolge auch, dass die vorhandene Wärmeausdehnung des Werkzeugs berücksichtigt werden kann. In dieser Arbeit steht der Fokus auf der Betrachtung von Effekten entlang der Produktionsrichtung. Durch die in Vorschubrichtung größere räumliche Ausdehnung, aber vor allem durch den deutlich höheren Temperaturgradienten sind hier weitaus größere Änderungen zu erwarten. Die Simulation bildet zwar die vollständige Geometrie des Aufbaus ab, aus den genannten Gründen werden aber im Folgenden nur Ergebnisse in der Mitte des Werkzeugs in Prozessrichtung diskutiert.

In den Ergebnissen der Berechnung (vereinfacht dargestellt in BILD 3) zeigt sich vor allem der bereits erwähnte Effekt der Durchbiegung. Durch die

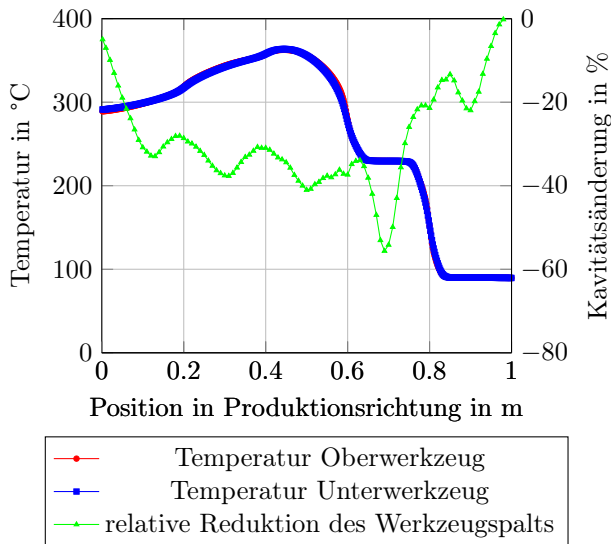


BILD 3. Darstellung der aus der Simulation hervorgehenden Verformung der Presse entlang der Mittelachse des Werkzeugs. Die Verformung beider Werkzeughälften ist hier gemeinsam als Reduktion der Kavität im Vergleich zum Ausgangszustand dargestellt

Verbindung des durch die Erwärmung ausgedehnten Werkzeugs mit der thermisch stabilen Basisplatte kommt es zu einer starken Durchbiegung der Werkzeugoberfläche. Diese entspricht somit einer stark konvexen Form, mit der größten Auslenkung in der Mitte des Werkzeugs. Die Höhe der Kavität wird durch diesen Effekt in der Mitte des Werkzeugs somit bereits auf unter 50% ihrer nominellen Höhe reduziert. Dieses Verhalten passt somit deutlich zu der von Piott et al. festgestellten Druckspitze in der Mitte des Werkzeugs [4]. Überlagert wird diese übergreifende Verformung zudem durch einzelne konvexe Ausbeulungen in den Bereichen einzelner Heiz- und Kühlzonen. Wie auch das Werkzeug selbst sind diese zur temperierten Basisplatte hin fixiert und werden durch den Unterschied in der jeweiligen thermischen Ausdehnung ausgebeult. Zusätzlich wird dieser Effekt im Bereich der Kühlzonen und deren geringer Wandstärke mit dahinterliegenden Kühlkanälen verstärkt, wodurch er auch hier trotz niedrigerem Temperaturunterschied deutlich auftritt. Die Berechnungen demonstrieren, dass eine Kompensationsrechnung des gesamten Aufbaus unerlässlich für eine genaue Bestimmung der resultierenden Werkzeugoberflächen-geometrie ist. Sie kann somit einen der Bestandteile für eine beschleunigte Kompensation des Werkzeugs durch „Shimmen“ oder aber eine Vorraussetzung für die Herstellung eines vollständig kompensierten Werkzeugs darstellen. Nicht berücksichtigt wird hingegen die Wechselwirkung mit dem Laminat. Aufgrund der hoch komplexen Natur solcher gekoppelten Simulationen wird hier ein getrennter Ansatz verfolgt.

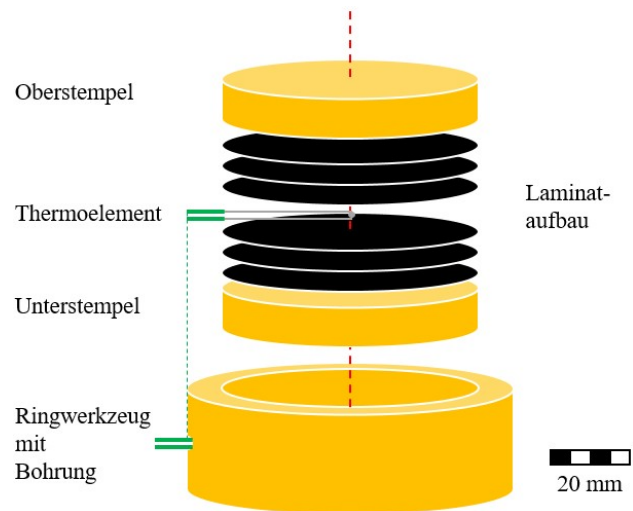


BILD 4. Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für die Bestimmung der volumetrischen Expansion als Explosionsdarstellung

3.2. Versuchsaufbau

Der durch Christmann etablierte Pressversuch zur Bestimmung der volumetrischen Expansion stellt die bislang beste Variante zur Bestimmung der Normkavität dar, unterliegt aber weiterhin gewissen Einschränkungen. Der Ansatz entspricht im Grunde der Annäherung an den realen Prozess in der Intervallheisspresse, durch die Verwendung des gleichen Materials, Lagenaufbaus, Randbedingungen und Größenverhältnissen. Durch die dort vorgenommene, erfolgreiche Optimierung der betrachteten Werkzeugkavität kann das Verfahren beweisen, dass bereits glaubwürdige Ergebnisse erzielt werden können. Herausforderungen liegen in der Bestimmung sowie Einstellung der Laminattemperatur sowie der genauen Ausdehnungsmessung. Der verwendete und untersuchte Versuchsaufbau setzt daher an diesen Punkten an.

Um eine hohe Flexibilität zu erhalten sowie die Umsetzung der Versuche zu erleichtern, kommt kein vollständig eigener Versuchsaufbau zum Einsatz. Stattdessen wird eine vorhandene Heizpresse verwendet, die auf ein rein passives Werkzeug wirkt. Bei der bereits bei Salmins et al. für ähnliche Aufgaben eingesetzten Presse handelt es sich um eine Eigenentwicklung des Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe. Die Anlage kann bis zu 20 kN Prozesskräfte über einen elektromechanischen Antrieb aufbringen, kontrolliert durch einen Kraftaufnehmer mit Membran-Federkörper. Zusätzlich verfügt die Anlage über einen absolutkodierte Glasmaßstab zur Bestimmung der Pressposition. Die Temperierung der Pressplatten erfolgt durch jeweils sechs Heizpatronen mit einer Gesamtleistung von 2,4 kW sowie einer dahinter angebrachten Kühleinheit mit einer Luft-Wasser-Gemischkühlung. Die dabei eingestellten Temperaturen werden durch ein zwischen den Heizpatronen angebrachtes Thermoelement geregelt. [23].

Auf der Presse lediglich lose positioniert, kommt ein Werkzeug zum Einsatz, dessen Hauptaufgabe in der Herstellung einer geschlossenen Kavität besteht. Das

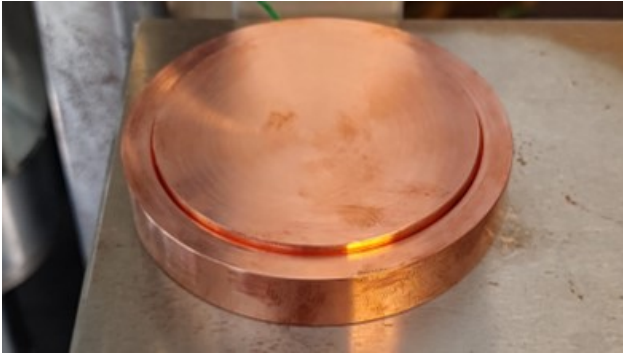


BILD 5. Abbildung des verwendeten Werkzeugs nach Vorbereitung für den Pressprozess. Rückseitig ist das Thermoelement aus dem Werkzeug geführt. Der Innendurchmesser des Rings beträgt 50 mm

in Abbildung 4 dargestellte Werkzeug besteht aus sich gegenüberstehenden Presstempeln in einem Ring, die gemeinsam eine zylindrische Kavität mit 50 mm Durchmesser und einer variablen Höhe bilden. Das Werkzeug ist dabei sehr flach gehalten, um dessen Wärmekapazität möglichst gering zu halten. Bei einer Gesamthöhe von 9 mm erlaubt das Werkzeug die Einstellung geschlossener Kavitäten von einem bis zu fünf Millimetern Höhe. Zudem wird das Werkzeug aus dem stark wärmeleitenden ($380 \frac{W}{m \times K}$) Werkstoff CuCr1Zr hergestellt. Eine Bohrung an der Seite des Werkzeugs erlaubt zusätzlich das Einbringen eines Thermoelements in das Laminats zur Nachverfolgung der Laminattemperatur. Weiterhin wird das Werkzeug mit einem engen Toleranzfeld (g8/H8) für einen minimierten Spalt angefertigt, um den konstanten Materialverlust entlang der Innenfläche zu minimieren.

Das Werkzeug wird in der Presse durch eine Aluminium-Blattfeder getragen. Durch ihre geringe Auflagefläche und Wandstärke ermöglicht diese eine thermische Isolation des Werkzeugs gegenüber der Presse. Durch das Aufbringen des Pressdrucks auf das Werkzeug wird die Rückstellkraft der Blattfeder überwunden und der vollflächige Kontakt hergestellt. Somit kann der durch konduktive Wärmeübertragung dominierte Aufheizprozess mit dem Beginn des Pressprozesses gestartet werden. Anwenderbedingte Einflüsse werden dadurch weitestgehend unterbunden und die Vergleichbarkeit zum Intervallheißpressprozess hergestellt.

Im Presswerkzeug kommt das Material als Tape-Halbzeug, passend zum untersuchten Profilwerkzeug zum Einsatz. Es ermöglicht einen noch kompakteren Aufbau. Durch die bereits erfolgte Imprägnierung kann der Fokus der Betrachtung zudem auf Zustandsänderungen und Wärmeausdehnungskoeffizienten gesetzt werden und muss in Kombination mit der erheblichen Viskosität des schmelzflüssigen Materials kaum auf Polymerbewegungen eingehen. Ein weiterer Vorteil der hohen Viskosität ist zudem, dass es während der Versuche zu keinem Austritt von Material außerhalb des Werkzeugs kommt. Die hohe Verarbeitungstemperatur des Materials erleichtert zudem die

Untersuchung an hohen Heiz- und Kühlraten. Diese werden einerseits durch das Einlegen des Versuchswerkzeugs in die vorgeheizte Presse und andererseits durch den große Temperaturunterschied zum verwendeten Kühlmedium ermöglicht. Dabei können dennoch die instationäre Abkühlungsvorgänge aus dem Intervallheißpresszyklus nicht vollständig nachgebildet werden, dessen Temperaturgradient messbar oberhalb von $360 K min^{-1}$ liegt. Für TC1225 liegt diese Kühlrate bereits in Bereichen, in denen nicht zwingend der maximale Kristallinitätsgrad erreicht wird, der seinerseits einen starken Einfluss auf die Schwindung des Polymers und somit die gesuchte neutrale Kavität aufweist [24]. Eine somit durchgeführte Untersuchung kann daher einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Bestimmung der Kavität aufweisen, der insbesondere die Schwindung des Materials in diesem entscheidenden Abschnitt der Konsolidierung falsch darstellt. Ziel der hier beschriebenen Versuche ist es, diesen Einfluss zu identifizieren und durch die Erfassung der genauen Laminattemperaturen einen Vergleich der erfassten Ausdehnungen unter Berücksichtigung der erzielten Heiz- und Kühlraten zu ermöglichen. Falls möglich, sollen unmittelbar zu einer vorhandenen Temperaturkurve aus dem Intervallheißpressprozess passende Werte ermittelt werden.

3.3. Durchführung der Versuche

Das vorgestellte Verfahren wurde anhand eines existierenden Beispielprozesses entwickelt. Der nachzustellende Temperaturverlauf lag somit bereits vor und wurde zur Definition der Temperaturkurve des Prozesses genutzt. Dieser Verlauf wurde über eine vollständige Bewegung über die gesamte Länge des Werkzeugs ermittelt und repräsentiert somit die Temperaturverteilung über die gesamte Werkzeuglänge. Gleichzeitig beinhaltet diese zeitlich basierte Aufzeichnung aber auch die reale Geschwindigkeit des Prozesses. Sie kann somit direkt für die ebenfalls zeitbasierte Auslegung des Ersatzversuchs verwendet werden. Relevante Stützpunkte für eine modellierende Funktion können daher direkt aus dieser in der passenden Zeitskala ausgelesen werden.

Da das verwendete Werkzeug im erreichbaren Temperatur- und Leistungsbereich keinen praktisch relevanten Temperaturunterschied zur Pressfläche aufweist, muss hauptsächlich die Trägheit der Presse berücksichtigt werden. Zusätzlich müssen die Einschränkungen der realisierbaren Temperaturgradienten der Presse berücksichtigt werden. Während die Aufheizphase dem Verhalten der Intervallheißpresse durch das Einlegen des kalten Werkzeugs in die vorgeheizte Presse entsprechend angepasst werden kann, sind die Abkühlraten der Intervallheißpresse aktuell nicht durch die nachstellende Presse nachzubilden. Gleichzeitig bedeuten regelnde Eingriffe der Kühlung in den Pressprozess durch die veränderte Wärmekapazität des gesamten Aufbaus bei gleichen Reglerparametern nur schwer reproduzierbare Temperaturverläufe. Diese Schwächen in der Steuerung

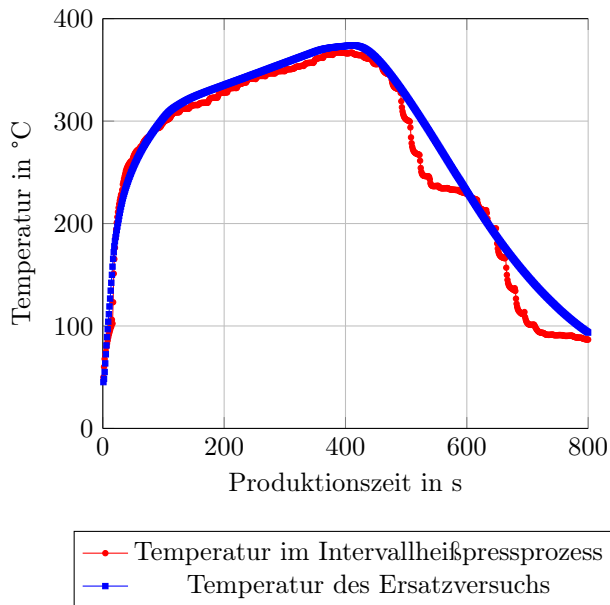


BILD 6. Gegenüberstellung des erzielten Temperaturverlaufs im Ersatzversuch und der gegebenen angestrebten Temperatur aus der Intervallheißpresse. Alle Temperaturverläufe wurden durch ins Laminat eingebettete Thermolemente ermittelt.

der Presse bedeuten, dass die Abkühlphase des Prozesses lediglich durch eine Abkühlung mit maximaler Kühlleistung dargestellt wird. Diese kann in geringem Umfang durch Begrenzung des Kühlmittelstroms eingestellt werden. Durch die vorhandenen Möglichkeiten bieten sich im Rahmen dieser Versuche lediglich zwei Einstellungen an.

Abbildung 6 zeigt einen Vergleich der vorgegeben Temperatur aus dem Intervallheißprozess mit dem Temperaturverlauf des Ersatzversuchs. Beide Temperaturverläufe werden durch Thermolemente aufgezeichnet, die hierzu in der Mitte des Laminats eingebettet werden. Beide Temperaturen werden gemeinsam über dem zeitlichen Verlauf der Versuche dargestellt. Dieser ist dabei praktisch gleichbedeutend mit der Ortsabhängigkeit im Werkzeug und unterscheidet sich lediglich durch eine Korrekturfaktor für die Vorschubgeschwindigkeit.

Mit den ermittelten Parametern wird der Pressversuch durchgeführt, zunächst ohne Material in der Kavität des Werkzeugs. Dieser Versuch dient der Bestimmung der Ausdehnung des Werkzeugs und der Presse unter Temperatur und Last. Dieser als Referenz verwendete Versuch wird mehrfach wiederholt, um die Genauigkeit dieser Referenz zu ermitteln. Die Versuche zur Ermittlung der Ausdehnung des Laminats erfolgen im Nachgang und werden mit dem identischen Materialaufbau des Intervallheißpressprozesses durchgeführt. Die Temperaturen aller Versuche werden dabei durch in das Laminat eingebettete Thermolemente überwacht.

3.4. Wiederholbarkeit der Pressversuche

Essentiell für die spätere Auswertung des ermittelten Verhalten des Laminats ist die Betrachtung

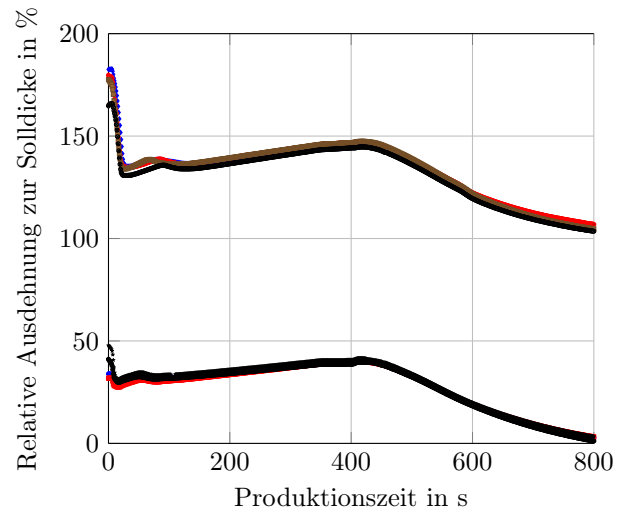


BILD 7. Darstellung gemessener Werte von jeweils 4 Messreihen für die Bewegung der Pressplatten mit (oben) und ohne (unten) eingelegtes Laminat. Bezogen auf die nominelle Zieldicke des herzustellenden Laminats.

der Genauigkeit des verwendeten Messsystems. Die hier durchgeführten Versuche stützen sich auf die Möglichkeit, den Verfahrenweg der verwendeten Presse über den darin verbauten Glasmaßstab nachzuvollziehen. Die Ausdehnung des geprüften Materials wird durch Subtraktion der gemessenen Absolutposition im Pressversuch ohne Materialeinsatz von Pressversuchen mit Materialeinsatz erzielt. Die Ausgangsbasis für das Verfahren stellt also die Fähigkeit der Presse dar, wiederholt unter selben Prozessparametern die gleichen Versuchsergebnisse zu reproduzieren. Hierfür wird in der Presse der Versuchsaufbau ohne Laminat aufgebaut, also Blattfeder und Unter- sowie Oberstempel des Werkzeugs. Der Ring muss außen vor bleiben, da dessen Höhe die gemeinsame Höhe beider Stempel überschreitet. Mit diesem Versuchsaufbau wird der gleiche Vorgang durchgeführt, wie auch in der Messung mit Laminateneinsatz. Aufgezeichnet werden die Temperaturen der Presse, deren aufgebrauchte Kraft sowie die entscheidenden Bewegungen der Presse.

Der Vergleich der Temperaturen in den Ersatzversuchen zeigt, dass Abweichungen im Bedienprozess vor allem am Anfang größere Temperaturunterschiede bedingen können. Nach einer kurzen Einlaufstrecke, die rund 5% der gesamten Versuchsdauer des Prozesses entspricht, weichen die Temperaturen der Ober- und Unterwerkzeuge der Presse im jeweiligen Vergleich nicht weiter als 3 K voneinander ab. Ebenso kann die Betrachtung der aufgezeichneten Bewegungen der Presse erfolgen, dargestellt in 7. Als Bezugsgröße wird hier für alle Werte die Solldicke des Laminates angegeben, da so direkt der mögliche Fehler des Verfahrens deutlich gemacht wird. Die durchgeführten Referenzversuche ohne Laminat weisen zueinander eine maximale Abweichung von 2,5% voneinander im Vergleich zur soll-Laminatdicke auf. Dabei weisen die Unterschiede außerhalb der Einlaufstrecke keine

Unstetigkeiten auf und weisen somit auf einen gleichmäßigen Verlauf der Versuche hin.

Die Versuche der thermischen Ausdehnung mit Laminat weisen hingegen einen maximalen Unterschied von 8% der Laminat-Solldicke über den Verlauf einer Messung auf. Der Unterschied der Versuche liegt hier aber hauptsächlich in einer Parallelverschiebung. Wird dieser Effekt kompensiert, liegt die maximale Abweichung der Versuchsergebnisse mit Laminat auf einem vergleichbaren Niveau von 3,5% der soll-Laminatdicke. Die Versuche zeigen somit, dass mit dem vorhandenen Aufbau ein wiederholt messbarer Unterschied im durch das Material eingenommen Volumen vorliegt.

4. AUSWERTUNG

Der Fokus der durchgeführten Untersuchungen liegt auf dem Bezug zur Anwendbarkeit der Ergebnisse zur Einstellung des Prozesses in der Intervallheißpresse. Die nachfolgende Auswertung kann entsprechend zeigen, dass die qualitative Betrachtung dieser eindeutige Rückschlüsse auf das Materialverhalten in verschiedenen Zeitpunkten des Prozesses zu zulässt.

4.1. Thermische Ausdehnung des Versuchsmaterials

Die in Abbildung 8 dargestellte Differenz der Messreihen mit und ohne Laminat zeigt die tatsächliche Wiederholgenauigkeit der Versuche. Dabei muss jedoch die hier vorgenommene Kompensation berücksichtigt werden. Die Dicke der dargestellten Messungen wird anhand des Produktionszeitpunkts $t = 600s$ normiert. Zu diesem Zeitpunkt stimmt die gemessene Dicke der Lamine im Endzustand mit der Messung im Versuch bis auf eine Abweichung von deutlich unter einem Prozent überein. Die nach diesem Zeitpunkt gemessene Ausdehnung ist durch einen anderen Effekt zu begründen.

Die erheblich stärkere Wärmeausdehnung des Materials des Werkzeugs bewirkt eine erheblich stärkere radiale Schwindung der Kavität, als des darin enthaltenen Materials. Durch die Rekristallisation der Polymermatrix zu diesem Zeitpunkt kann aber keine Bewegung der Fasern mehr stattfinden. Das Werkzeug wird somit in der Schwindung durch die Fasern behindert, woraus eine radiale Belastung des Materials resultiert. Diese wird durch eine Durchbiegung in der Ebene ausgeglichen. Die gemessene Höhe der Kavität steigt somit wieder an, repräsentiert allerdings nicht mehr die tatsächliche Dicke des Laminats. Der Effekt kann über den Durchmesser des entformten Materials nachgewiesen werden. Dieses behält den zur Zeitpunkt der Rekristallisation eingestellten Durchmesser des Werkzeugs von 50,175 mm bei.

Einen besseren Überblick über die Interpretation der Messergebnisse kann die gemittelte Darstellung in Abbildung 9 verschaffen. Darin sind die verschiedenen Bereiche des im Versuch messbaren Materialverhaltens eingezeichnet. Den interessantesten Punkt hinsichtlich der Optimierung der Werkzeugkavität stellt die Re-

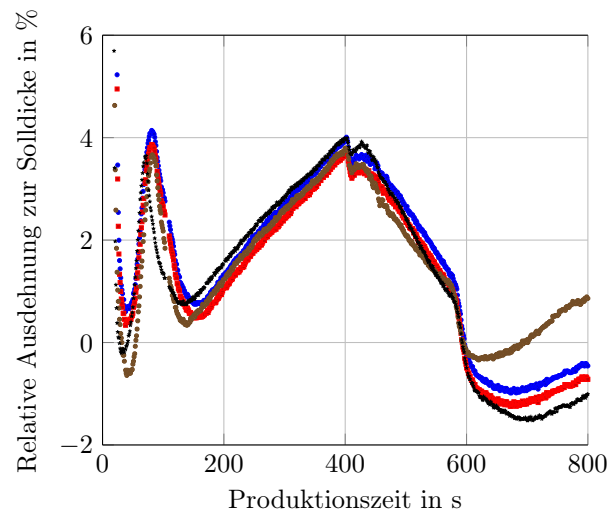


BILD 8. Darstellung der Differenz der gemessenen Werte für die Bewegung der Pressplatten mit und ohne eingelegetes Laminat als einzelne Messreihen. Die Werte wurden zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Verläufe im festen Zustand basierend auf ihrer tatsächlichen Dicke kompensiert. Alle Angaben bezogen auf die nominelle Zieldicke des herzustellenden Laminats.

stallisation bei $t = 500s$ dar. In diesem Bereich sind die am deutlichsten ausgeprägten Nichtlinearitäten zu erwarten. Hier liegt eine Schwachstelle der Versuche, da der tatsächliche Temperaturverlauf nicht genau der Vorgabe aus dem Intervallheißpressprozess entspricht. Im Intervallheißpressprozess wird in aller Regel versucht, die Kristallinität im Rahmen der ersten Temperaturstufe zu erhöhen. Im Bereich der ersten Kühlstufe liegt somit zwar ein Temperaturgradient vor, der durch den Pressprozess abgebildet werden könnte, aber aufgrund der bereits geschilderten Instabilitäten in der Regelung der verwendeten Presse hier nicht umgesetzt werden kann.

Weitere, deutlich zu erkennende Punkte sind der Abschluss der vollständigen Kompression der Einzellagen bei $t = 40s$, das Überschreiten des Schmelzpunkts bei $t = 50s$ sowie die vollständige Kompression des Materials als Indikator für den Beginn des Verschweißens bei $t = 160s$. Alle dieser Punkte sind als lokale Extrema deutlich zu erkennen. Dabei muss beachtet werden, dass gleichzeitig bereits ein deutlicher Einfluss der Wärmeausdehnung sowohl im festen als auch im flüssigen Zustand des Polymers wirkt. Ersterer ist zwischen der Kompression der Einzellagen und dem darauffolgenden Beginn des Schmelzpunkts zu erkennen, wird durch den nachfolgenden Evakuierungsvorgang aber wieder überlagert und geht im Zuge dessen in den Wärmekoeffizient im schmelzflüssigen Zustand über. Dieser lineare Bereich erlaubt auch die Auswertung des volumetrischen Wärmeausdehnungskoeffizienten im schmelzflüssigen Zustand.

Bis zum Umschaltzeitpunkt, der die höchste im Prozess erreichte Temperatur und gleichzeitig auch die größte Ausdehnung des schmelzflüssigen Polymers darstellt, bildet der Versuch die gemessenen Zustände in der In-

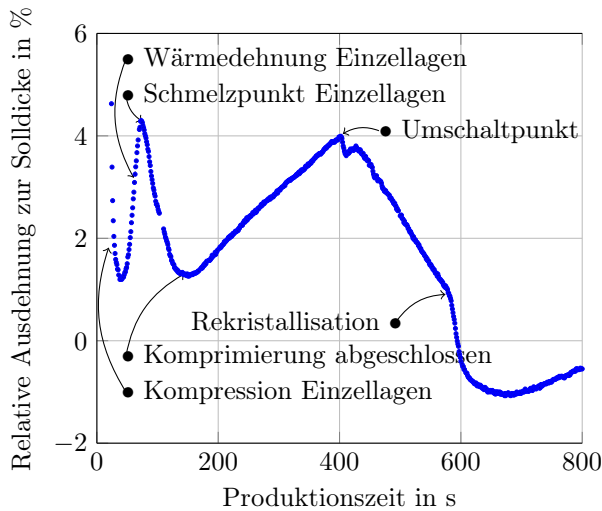
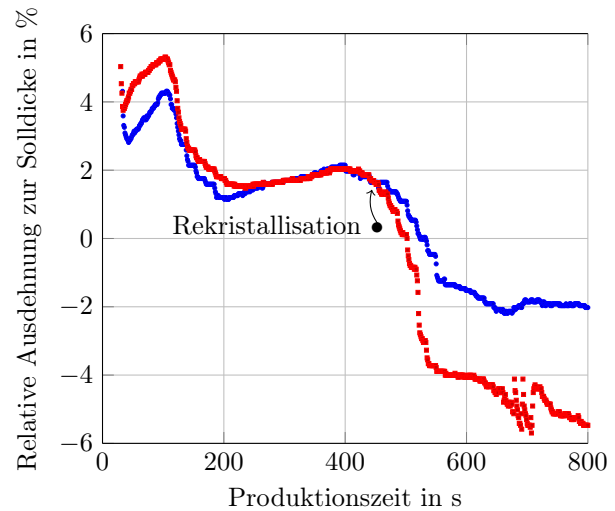


BILD 9. Darstellung des Durchschnitts der gemessenen Werte für die Ausdehnung des Materials, bezogen auf die nominelle Zieldicke des herzustellenden Laminats.

tervallheißpresse somit überzeugend ab und erlaubt in einer einzelnen Messung die Ermittlung des entscheidenden Verhalten des Laminats. Der für die Bauteilqualität entscheidende zweite Bereich kann jedoch aus mehreren Gründen nicht zu voller Zufriedenheit abgebildet werden. Eine Abbildung der korrekten Abkühlrate des Versuchs wäre lediglich durch erhebliche konstruktive Änderungen an der verwendeten Presse und/oder des eingesetzten Werkzeugs zu erreichen.

4.2. Abbildung auf den Intervallheißpressprozess

Eine Möglichkeit, die Unterschiede in der Abkühlgeschwindigkeit zwischen Intervallheißpresse und Ersatzversuch auszugleichen, besteht in einer Zuweisung der ermittelten Werte für die Ausdehnung aus dem Ersatzversuch auf die entsprechenden Positionen in der Intervallheißpresse. Hierzu kann ausgenutzt werden, dass die thermische Ausdehnung des Materials zu den allermeisten Zeitpunkten lediglich von der anliegenden Temperatur abhängt. Vor allem im Bereich der Kristallisation sind durch diese auch zeitliche Einflüsse, speziell die Heiz- bzw. Kühlrate zu berücksichtigen. Entsprechend ist es daher möglich, jedem in der Intervallheißpresse gemessenen Temperaturwert einen im Laminat gemessenen Temperaturwert aus dem Ersatzversuch, sowie die dazugehörige Ausdehnung des Materials zuzuweisen. Aufgrund der zusätzlichen Unterschiede im Verhalten vor dem Aufschmelzen und Überschreiten der Glasübergangstemperatur macht es zudem Sinn, die Temperaturwerte hierzu am Umschaltunkt in die Schmelz- und Abkühlphase zu unterteilen. Entsprechend wird durch eine hierzu entwickelte Software für jede ermittelte Temperatur im Intervallheißpressprozess unter der Berücksichtigung der Position in dieser eine anhand der Gleichen im Ersatzversuch gemessenen Laminattemperatur ausgewählten Ausdehnung ermittelt. Durch die Anordnung dieser ausgewählten



- Abbildung mit hoher Heiz- und Kühlrate
- Abbildung mit niedriger Heiz- und Kühlrate

BILD 10. Vergleich verschiedener auf den Intervallheißpressprozess abgebildeter Ersatzversuchsvarianten. Die Ersatzversuche unterscheiden sich im Wesentlichen durch die realisierte Heiz- und Kühlrate im Prozess. Die Kavität des Versuchs mit niedriger Kühlrate wurde am Umschaltunkt zwischen Heizen und Kühlen beidseitig an die Höhe des Vergleichsversuchs angepasst.

Ausdehnungen über der Position- bzw. Zeitachse des Durchlaufs in der Intervallheißpresse können somit besser zum tatsächlichen Temperaturverlauf passende Verläufe der thermischen Materialausdehnung erzeugt werden, dargestellt in Bild 10. Diese zeigen insbesondere in zwei Bereichen deutliche Unterschiede. So ist erwartungsgemäß im Temperaturbereich der Rekristallisation, der hier aufgrund der höheren Abkühlrate im Intervallheißpressprozess deutlich früher erreicht wird eine erhebliche Verschiebung zu sehen. Neben der zu erwartenden zeitlichen Verschiebung ist durch die mehrstufige Abkühlung auch eine Änderung im Verlauf des Schwindungsverhaltens dargestellt, die in diesem Bereich auf die Kristallisation optimierte Haltezeit vergrößert den Effekt dieser zudem deutlich. Ersteres gilt ebenfalls für das Aufschmelzen des Materials, das noch in den Bereich der Einlaufphase fällt. Hier zeigt die Zuweisung der Werte auf den Temperaturverlauf aus der Intervallheißpresse vor allem verbliebenes Optimierungspotential bei der Abbildung des Versuchs durch das hier vorgestellte Vorgehen auf.

Die interessantesten Beobachtungen in Bezug auf diese Zuweisung ermöglicht aber das Hinzuziehen eines Vergleichs aus Versuchen einer erheblich niedrigeren Heiz- und Kühlrate. Diese zusätzlich durchgeführten Versuche wurden auf die gleiche Weise wie die bisher beschriebenen Versuche durchgeführt, wurden aber ohne vorgeheiztes Werkzeug und mit einer erheblich reduzierten Kühlleistung durchgeführt. Dabei stellen sich rund 20% der Heizrate und 3% der Kühlrate

der vergleichenden Versuche ein. Ebenso wird in gleichem Maße durch die Prozesssteuerung auch eine um 400% erhöhte Verweilzeit auf Maximaltemperatur eingestellt.

Werden diese Versuche ebenfalls auf die Temperaturen der Intervallheißpresse abgebildet, können durch den Vergleich mehrere Punkte deutlich beobachtet werden. Erwartungsgemäß entsteht durch die langsamere Abkühlung ein höherer Kristallanteil im Laminat, der sich einerseits in einer deutlich stärkeren Schrumpfung äußert, andererseits aber auch bereits in einem kleineren Temperaturbereich abgeschlossen ist. Der stark unterschiedliche Verlauf der beiden Abbildungen des Materialverhaltens mit dem Einsetzen der Rekristallisation unterstreicht nochmal deutlich das Bedürfnis nach einer angepassten Presse für die Darstellung des Kühlverhaltens in diesem Bereich.

Im Bereich der Schmelze weisen beide Versuchstypen das erwartete, vergleichbare heiz- und kühlratenunabhängige Verhalten auf. Lediglich wird durch den längeren Versuch die Ausdehnung der Schmelze geringer dargestellt. In der Untersuchung der Versuche kann dieser Effekt dem erheblich längeren Zeitraum oberhalb der Schmelztemperatur zugeordnet werden, in dem letztlich doch eine relevante Menge der Polymermatrix durch den Werkzeugspalt nach außen dringt. Hierdurch entsteht zwischen beiden Hälften der Zuordnung auch ein deutlicher Sprung, der durch die Verweilzeit auf Maximaltemperatur verursacht wird. Darüber hinaus zeigt das Verhalten im Bereich der Schmelze jedoch praktisch keine Unterschiede, so dass diese Seite bereits für eine Kompensation zum Einsatz kommen könnte.

5. FAZIT UND AUSBLICK

Die Auswertung der durchgeführten Versuche zeigt deutlich, dass eine Vorhersage der thermischen Materialdehnung im Intervallheißpressprozess mit dem vorgestellten Versuch prinzipiell durchführbar erscheint. Das Aufschmelzverhalten kann bereits korrekt abgebildet werden, für das Abkühlen muss zunächst noch eine technische Lösung zur präzisieren Abkühlung im Ersatzversuch realisiert werden. Ebenso liefert die Simulation des Werkzeugs im Gesamtsystem der Intervallheißpresse plausible Werte für die erforderliche Temperaturkompensation des Werkzeugs. Gleichzeitig sind aber beide Näherungen der Berechnung noch zu abstrakt und unpräzise um eine Fertigung des Werkzeugs mit den ermittelten Werten zu rechtfertigen. Betrachtet man jedoch die im Shimmen typischen Ausmaße der Verformung, sind beide Prozesse gemeinsam durchaus aussagekräftig genug, um den Prozess dieser manuellen Kompensation der Kavität erheblich zu beschleunigen. Wird der Ersatzversuch in dieser Form zudem regelmäßig genutzt werden, liefert der Vergleich aus diesem mit dem Intervallheißpressprozess gleichzeitig wiederum praktische Erfahrungen, anhand deren die Methoden verfeinert werden können. Zusätzlich ermöglicht der Aufbau des Ersatzversuchs auch das Herstellen

von Bedingungen vergleichbar zum Zustand in der Werkzeugmitte der Intervallheißpresse für weitere Anwendungen. So ist beispielsweise die Nutzung eines leicht abgewandelten Versuchsaufbaus für die Untersuchung von Sensoren für die Prozessüberwachung der Presse geplant.

Kontaktadresse:

fabian.roeder@leibniz-ivw.de

Literatur

- [1] Ginger Gardiner. Aerospace-grade compression molding : Composites world. 18, 07 2010.
- [2] L. Medina, J. Mack, and M. Christmann. Imprägnierte Halbzeuge, pages 135–199. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014. DOI: [10.3139/9783446436978.005](https://doi.org/10.3139/9783446436978.005).
- [3] Marcel Christmann. Optimierung der Organoblechherstellung durch 2D-Imprägnierung. PhD thesis, 2014. <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:hbz:386-kluedo-47142>.
- [4] Florian Piott, Andreas Krämer, André Lück, Leo Hoffmann, Peter Mitschang, and Dietmar Drummer. Increasing the performance of continuous compression moulding by local pressure adaptation. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 7(1):1–14, 2021. ISSN: 2055-0340, 2055-0359. DOI: [10.1080/20550340.2021.1888209](https://doi.org/10.1080/20550340.2021.1888209).
- [5] Christoph Mayer. Prozeßanalyse und Modellbildung bei der Herstellung gewebeverstärkter, thermoplastischer Halbzeuge. doctoralthesis, Technische Universität Kaiserslautern, 2017. <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:hbz:386-kluedo-47342>.
- [6] Andreas Wöginger. Prozesstechnologien zur Herstellung kontinuierlich faserverstärkter Halbzeuge. PhD thesis, Technische Universität Kaiserslautern, 2019. <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:hbz:386-kluedo-55417>.
- [7] J. He and P. Zoller. Crystallization of polypropylene, nylon-66 and poly(ethylene terephthalate) at pressures to 200 mpa: Kinetics and characterization of products. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 32(6):1049–1067, 1994. DOI: [10.1002/polb.1994.090320610](https://doi.org/10.1002/polb.1994.090320610).
- [8] Jing He, Y. A. Fakhreddine, and Paul Zoller. Maintaining hydrostatic conditions during solidification of polymers in a high-pressure dilatometer. *Journal of Applied Polymer Science*, 45(4):745–747, 1992. DOI: [10.1002/app.1992.070450421](https://doi.org/10.1002/app.1992.070450421).
- [9] Satoshi Kobayashi, Takamasa Tsukada, and Tetsuya Morimoto. Resin impregnation behavior in carbon fiber reinforced polyamide

- 6 composite: Effects of yarn thickness, fabric lamination and sizing agent. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 101:283–289, 2017. ISSN: 1359-835X. DOI: [10.1016/j.compositesa.2017.06.030](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.06.030).
- [10] Julien Patou, Rébecca Bonnaire, Emmanuel De Luycker, and Gérard Bernhart. Influence of consolidation process on voids and mechanical properties of powdered and commingled carbon/pps laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 117:260–275, 2019. ISSN: 1359-835X. DOI: [10.1016/j.compositesa.2018.11.012](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.11.012).
- [11] T.G. Gutowski, Z. Cai, S. Bauer, D. Boucher, J. Kingery, and S. Wineman. Consolidation experiments for laminate composites. *Journal of Composite Materials*, 21(7):650–669, 1987. DOI: [10.1177/002199838702100705](https://doi.org/10.1177/002199838702100705).
- [12] J.M. Zhang, C.T. Reynolds, and T. Peijs. All-poly(ethylene terephthalate) composites by film stacking of oriented tapes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(11):1747–1755, 2009. ISSN: 1359-835X. DOI: [10.1016/j.compositesa.2009.08.008](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.08.008).
- [13] S.T. Jespersen, M.D. Wakeman, V. Michaud, D. Cramer, and J.-A.E. Månson. Film stacking impregnation model for a novel net shape thermoplastic composite preforming process. *Composites Science and Technology*, 68(7):1822–1830, 2008. ISSN: 0266-3538. DOI: [10.1016/j.compscitech.2008.01.019](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.01.019).
- [14] S. Suresh and V.S. Senthil Kumar. Experimental determination of the mechanical behavior of glass fiber reinforced polypropylene composites. *Procedia Engineering*, 97:632–641, 2014. ISSN: 1877-7058. "12th Global Congress on Manufacturing and Management" GCMM - 2014. DOI: [10.1016/j.proeng.2014.12.292](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.292).
- [15] Shota Kazano, Toshiko Osada, Satoshi Kobayashi, and Ken Goto. Experimental and analytical investigation on resin impregnation behavior in continuous carbon fiber reinforced thermoplastic polyimide composites. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*, 4(1):6, Oct. 2018. ISSN: 2198-7874. DOI: [10.1186/s40759-018-0039-3](https://doi.org/10.1186/s40759-018-0039-3).
- [16] G. Bechtold, S. Wiedmer, and K. Friedrich. Pultrusion of thermoplastic composites - new developments and modelling studies. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 15(5):443–465, 2002. DOI: [10.1177/0892705702015005202](https://doi.org/10.1177/0892705702015005202).
- [17] B. Tomas Åström. Development and application of a process model for thermoplastic pultrusion. *Composites Manufacturing*, 3(3):189–197, 1992. ISSN: 0956-7143. DOI: [https://doi.org/10.1016/0956-7143\(92\)90082-6](https://doi.org/10.1016/0956-7143(92)90082-6).
- [18] Kirill Minchenkov, Alexander Vedernikov, Yulia Kuzminova, Sergey Gusev, Artem Sulimov, Artem Gulyaev, Anastasia Kreslavskaya, Ilya Prosyanyoy, Guijun Xian, Iskander Akhatov, and Alexander Safonov. Effects of the quality of pre-consolidated materials on the mechanical properties and morphology of thermoplastic pultruded flat laminates. *Composites Communications*, 35:101281, 2022. ISSN: 2452-2139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coco.2022.101281>.
- [19] PM Schaefer, T Guglhoer, MGR Sause, and K Drechsler. Development of intimate contact during processing of carbon fiber reinforced polyamide-6 tapes. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 36(8):593–607, 2017. DOI: [10.1177/0731684416687041](https://doi.org/10.1177/0731684416687041).
- [20] Arthur Levy, Dirk Heider, John Tierney, and John W Gillespie. Inter-layer thermal contact resistance evolution with the degree of intimate contact in the processing of thermoplastic composite laminates. *Journal of Composite Materials*, 48(4):491–503, 2014. DOI: [10.1177/0021998313476318](https://doi.org/10.1177/0021998313476318).
- [21] L. J. Bastien and J. W. Gillespie Jr. A non-isothermal healing model for strength and toughness of fusion bonded joints of amorphous thermoplastics. *Polymer Engineering & Science*, 31(24):1720–1730, 1991. DOI: [10.1002/pen.760312406](https://doi.org/10.1002/pen.760312406).
- [22] F. Yang and R. Pitchumani. Interlaminar contact development during thermoplastic fusion bonding. *Polymer Engineering & Science*, 42(2):424–438, 2002. DOI: [10.1002/pen.10960](https://doi.org/10.1002/pen.10960).
- [23] Maximilian Salmis, Florian Gortner, and Peter Mitschang. Challenges in manufacturing of hemp fiber-reinforced organo sheets with a recycled PLA matrix. *Polymers*, 15(22):4357, 2023. ISSN: 2073-4360. DOI: [10.3390/polym15224357](https://doi.org/10.3390/polym15224357).
- [24] Rodolfo Ledesma, Christopher Wohl, and Brian Grimsley. Crystallization kinetics analysis and modeling of aerospace paek materials. *Polymer Engineering & Science*, 64(8):3802–3816, 2024. DOI: [10.1002/pen.26813](https://doi.org/10.1002/pen.26813).