

FERTIGUNGSSIMULATION DES TAPELEGEPROZESSES MIT IN-SITU KONSOLIDIERUNG VON FASERVERSTÄRKTEN THERMOPLASTI- SCHEN TAPES

D. Fricke, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Pfaffenwaldring
38-40, 70569 Stuttgart, Deutschland

ABSTRACT

Das automatische Ablegen und In-Situ-Konsolidieren von faserverstärkten thermoplastischen Tapes ist ein effizienter und schneller Prozess zur Fertigung großer und komplex geformter thermoplastischer Faserverbundbauteile. Das dafür erforderliche lokale und inhomogene Aufheizen der Tapes durch punktuelle Wärmequellen wie zum Beispiel Laser kann jedoch zu internen Spannungen und Verformungen führen, die durch die Teilkristallinität einiger Werkstoffe wie zum Beispiel PEEK noch verstärkt werden. Um diese negativen Einflüsse auf die finale Bauteilgeometrie zu minimieren und Bauteile mit akzeptablen Toleranzen zu fertigen, ist entweder eine Nachkonsolidierung in einem Autoklaven, Ofen oder einer Heizpresse erforderlich, oder die Fertigungsparameter und Werkzeuge müssen auf minimale Deformation optimiert werden. Diese Optimierung erfordert nach dem Stand der Technik langwierige Versuchsreihen, die wiederum die Kosten für die Fertigung erhöhen. Alternativ können die erforderlichen Parameter mit Fertigungssimulationen ermittelt werden. Für diese Simulationen sind einerseits komplexe Modelle erforderlich, die sämtliche dynamischen und inhomogenen Randbedingungen detailgetreu abbilden. Andererseits muss das Materialmodell thermochemische Modelle wie Kristallisierung, Schmelzen und Erstarren korrekt wiedergeben. Am deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Stuttgart wird an der Automatisierung der Simulationen mit Hilfe von Materialmodellen der Firma Convergent gearbeitet. Ziel der Arbeit ist ein vollständiger digitaler Zwilling beliebiger Tapelegebauteile. Mit der in diesem Paper beschriebenen automatisierten Simulation können über die Variation einfacher Geometrieparameter automatische Optimierungen am Prozess und Werkzeug durchgeführt werden. Die Ergebnisse werden mit Versuchen an einer Tapelege-Anlage verifiziert.

1. EINLEITUNG

Faserverstärkte Kunststoffe (FVK bzw. fiber-reinforced plastic, FRP) werden in immer größerem Umfang für Leichtbaustrukturen eingesetzt. Daher steigt auch der Bedarf an schnellen und kostengünstigen Fertigungsmethoden. Mit einer Matrix aus Duromeren ist häufig ein hoher Zeitaufwand verbunden, da der Kunststoff vollständig aushärten und bei Bedarf auch getempert werden muss. Hinzu kommt der Infiltrationsprozess, falls kein Prepreg-Material verwendet wird.

Die Verwendung einer thermoplastischen Matrix kann diesen Zeitaufwand verringern, da der Aushärtezyklus mit längerer konstanter Temperatur entfällt. Nur Aufheizen und Abkühlen sind erforderlich. Zudem ermöglichen thermoplastische Werkstoffe weitere Bearbeitungsmethoden wie Heißumformen und Schweißen [1]. Das automatische Ablegen von faserverstärkten thermoplastischen Tapes mit In-Situ-Konsolidierung (Automated Fiber-Placement, AFP) ist ein schnelles und effizientes Verfahren, mit der komplexe Geometrien gefertigt werden können.

Dieser Prozess stellt eine große Herausforderung dar [2].

Beim AFP-Verfahren wird ein Prepreg-Tape von einem Roboter erhitzt und auf einer Form abgelegt und mit einer Druckrolle angepresst. Auf dem Werkzeug kühlt es anschließend ab, während daneben oder auf der nächsten Lage das nächste Tape platziert wird. Auf diese Weise wird das Bauteil additiv gefertigt. Im Anschluss erfolgt üblicherweise eine Konsolidierung im Autoklaven oder Ofen, bei der die durch das Ablegen entstandenen inneren Spannungen minimiert werden sollen [3]. Bei der In-Situ-Konsolidierung entfällt dieser Schritt. Das Tape wird direkt beim Ablegen konsolidiert. [4]

Durch den hohen Temperaturgradienten zwischen dem beheizten und unbeheizten Teil des Tapes bzw. zwischen dem von der Wärmequelle erhitzten Teil und dem vom Werkzeug beheizten Teil des Tapes sowie durch die extrem kurze Prozesszeit, in der die Verbindung zwischen Tape und Laminate hergestellt werden muss, entsteht eine hochgradig inhomogene Temperaturverteilung. Diese induziert

innere Spannungen im Bauteil, die nach der Fertigung und dem Abkühlen Deformationen und bei sehr hohen Spannungen auch Delaminationen hervorrufen [5]. Außerdem beeinflusst die hohe Aufheiz- und Abkühlrate den Kristallinitätsgrad der Matrix, der weiteren Einfluss auf die Spannung und Deformation hat. Für eine verlässliche Bauteilqualität ist eine Vorhersage und Minimierung dieser Spannung und Deformation unerlässlich.

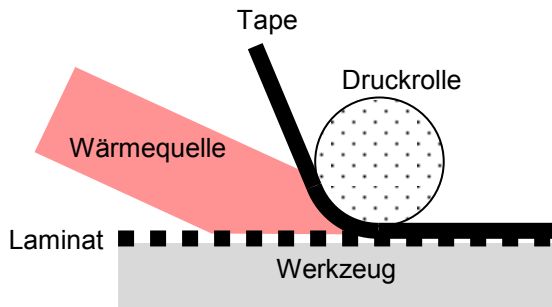


BILD 1. Schematische Darstellung des AFP-Prozesses

Diese Vorhersage erfordert nach aktuellem Stand umfangreiche Versuche. Diese müssten zudem für jedes neue Bauteil wiederholt werden, da die Deformationen auch von der Bauteilkontur abhängig sind. Im Falle von Einzelteilen und Kleinserien kann der Aufwand für diese Vorversuche den eigentlichen Fertigungsaufwand übersteigen. Gerade in der Luft- und Raumfahrt sind kleine Stückzahlen aber weit verbreitet, während gleichzeitig die Anforderungen an die Bauteile hoch und die erforderlichen Toleranzen niedrig sind. Einer automatisierten Fertigung von faserverstärkten Thermoplasten mit der AFP-Technologie steht somit die beschriebene Problemstellung im Weg und verhindert bisher ihre flächendeckende Verwendung.

Die Vorhersage der Spannung und Deformation mittels Simulationen kann diese Probleme minimieren. Anstatt umfangreiche Versuche zur Ermittlung der optimalen Fertigungsparameter und der Werkzeuggeometrie durchzuführen, können derartige Optimierungen durch Variationen in der Simulation erreicht werden. Zusätzlich kann der gesamte Fertigungsprozess in Simulationen abgebildet und Abweichungen frühzeitig festgestellt werden. Ein solcher „Digital Twin“ ist nicht nur für den AFP-Prozess, sondern auch für die gesamte FVK-Fertigung von Relevanz.

Gerade für komplexe Geometrien im Leichtbau wie in der Luftfahrt ist eine frühe Erkennung von Defekten und Abweichungen wichtig. Je nach Art der Abweichung kann diese korrigiert oder das Bauteil als

Ausschuss kategorisiert werden, bevor die gesamte kostspielige Fertigung abgeschlossen wurde. Dies erfordert neben der Fertigungssimulation und dem Digital Twin auch eine kontinuierliche Überwachung der relevanten Fertigungsparameter.

2. STAND DER TECHNIK

2.1. AFP und Simulation

Die Vorhersage der Fertigung vollständiger Bauteile mit dem AFP-Prozess ist ein neues Forschungsgebiet. Teilaspekte der Fertigung wurden jedoch schon ausgiebig untersucht. Insbesondere die Modellierung der Wärmequelle ist Bestandteil bestehender Forschungen. Die niederländische Universität Twente beschäftigt sich beispielsweise mit der Wärmequelle und dem Wärmeeintrag in das Tape [3]. Dabei wurde unter anderem ein Tool entwickelt, welches die Reflexion des Lasers und die daraus folgenden Aufheizung des Tapes mittels Raytracing berechnet. Eine Berücksichtigung der Materialeigenschaften und Berechnung der mechanischen Bauteilparameter ist bisher nicht erfolgt.

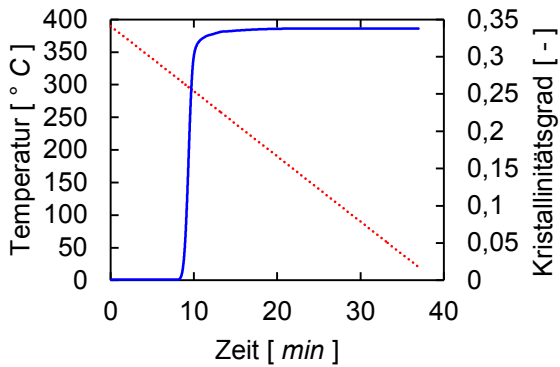
Am Lehrstuhl für Carbon Composites der Technischen Universität München werden vollständige Prozesssimulationen des AFP-Prozesses entwickelt. Der Fokus dieser Arbeiten liegt allerdings auf dem Wärmeeintrag durch Laser und insbesondere das Umformen des Tapes beim Ablegen und weniger auf den Einfluss der thermochemischen Prozesse auf die Bauteilqualität. Besondere Aufmerksamkeit wurde unter anderem der Scherung des Tapes bei variablen Ablegepfaden gewidmet [6].

Am DLR werden Platten aus faserverstärkten thermoplastischen Tapes experimentell und numerisch untersucht. Dabei liegt der Fokus auf den thermochemischen Prozessen beim Ablegen und Abkühlen und ihre Auswirkungen auf die finale Bauteilgeometrie und -qualität. Mit Hilfe eines detaillierten Materialmodells (siehe 2.2) wird über die Temperaturhistorie das Bauteil und der Fertigungsprozess analysiert. Die Ziele sind die Bereitstellung einer Toolkette zur Optimierung der Fertigungsparameter und die Entwicklung eines Digital Twins des gesamten Fertigungsprozesses [7].

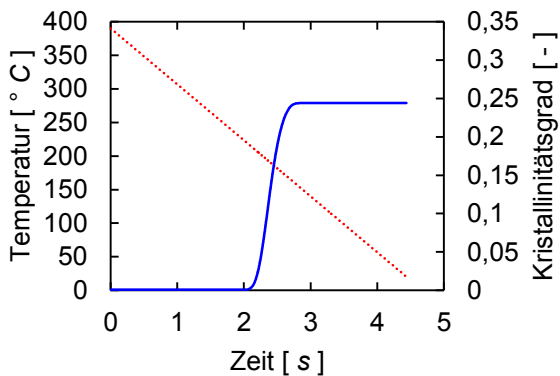
2.2. Verwendetes Materialmodell

Das für die Arbeit am DLR verwendete Materialmodell für die Poly-Ether-Ether-Keton-Matrix (PEEK) wurde von Gordnian in [8] entwickelt und wird von der Firma Convergent Inc. zur Verfügung gestellt.

Insbesondere das Kristallisationsmodell wurde im Vergleich zu früheren Arbeiten deutlich überarbeitet [9]. In diesem Materialmodell werden die Materialwerte in Abhängigkeit von der Temperatur, der Heizrate und weiteren thermochemischen Prozessen wie zum Beispiel dem Kristallisationsgrad berechnet. Die modifizierten Materialwerte werden an die Simulation zurückgegeben und die Berechnung des nächsten Zeitschritts erfolgt, dessen Ergebnisse ebenfalls an das Materialmodell weitergeleitet werden. In BILD 2 wird der simulierte Kristallinitätsgrad von PEEK bei langsamer Abkühlung, wie zum Beispiel in einem Ofen, und bei schneller Abkühlung, wie sie beim AFP-Prozess auftritt, dargestellt.



..... Temperatur — Kristallinitätsgrad

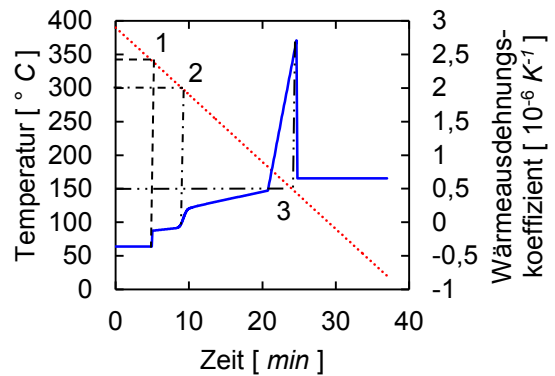


..... Temperatur — Kristallinitätsgrad

BILD 2. Simulation der Änderung des Kristallinitätsgrads von PEEK bei langsamer (oben) und schneller (unten) Abkühlung

Die erhöhte Abkühlrate im zweiten Szenario beeinflusst sowohl bei dem realen Prozess als auch in der Simulation den finalen Kristallisationsgrad. Dieser wiederum beeinflusst zusammen mit dem Temperaturverlauf die Wärmeausdehnung und damit die innere Spannung und Verformung in mehreren Schritten (siehe BILD 3). Oberhalb der Schmelztemperatur bewirkt jede Krafteinwirkung eine plastische

Deformation. Die Wärmeausdehnung bleibt dabei konstant. Unterhalb der Schmelztemperatur beginnt mit zunehmender Abkühlung ein linearer Anstieg der Wärmeausdehnung. Zwischen 300° C und 150° C sorgt der Kristallisationsprozess dann für eine sprunghafte Steigerung. In diesem Bereich ist der Einfluss der Abkühlrate sehr hoch und beeinflusst die finale innere Spannung und Deformation. Die letzte Änderung der Wärmeausdehnung erfolgt im Bereich der Glasübergangstemperatur. Anschließend kann wieder von einem linearen Verlauf ausgegangen werden.



..... Temperatur — Wärmeausdehnung

BILD 3 Simulierter Verlauf des Wärmeausdehnungskoeffizienten von CF-PEEK in Faserichtung in Abhängigkeit von der Temperatur. 1: Schmelztemperatur; 2: Beginn des Kristallisationsprozesses; 3: Glasübergangstemperatur

Das Materialmodell stellt die Veränderung der Eigenschaften von PEEK mit der Temperatur gut dar. Aus diesem Grund wird es für die folgenden Simulationen des AFP-Prozesses verwendet.

3. METHODEN

Ein „Digital Twin“ des AFP-Prozesses muss naturgemäß alle relevanten Parameter der Fertigung und des gewünschten Bauteils berücksichtigen. Am Ende des Prozesses muss das Bauteil die gewünschten Toleranzen einhalten und die erforderliche Festigkeit erfüllen. Daher sind die wichtigsten Ausgabeparameter die Deformation nach der Fertigung sowie die innere Spannung und der Kristallinitätsgrad. Diese Parameter sind auch untereinander abhängig. Der Kristallinitätsgrad beeinflusst die innere Spannung, die wiederum durch Deformation wieder verringert werden kann.

Alle gewünschten Parameter sind das Ergebnis der thermischen Geschichte des Bauteils. Um zu den gewünschten Ergebnissen zu gelangen, muss zunächst der Temperaturverlauf samt Aufheiz- und Abkühlraten für jeden Punkt des Bauteils ermittelt werden. Über diese thermische Geschichte werden mit dem in [8] entwickelten Materialmodell die Materialkennwerte und der Kristallinitätsgrad iterativ für jeden Zeitpunkt berechnet. Diese Werte können für die abschließende Bestimmung der inneren Spannung und der finalen Deformation herangezogen werden. Für eine Optimierung der Fertigungsparameter muss die gesamte Rechnung mit unterschiedlichen Inputs mehrfach wiederholt werden.

Bei dem verwendeten Ansatz wird die Simulation in zwei übergeordnete Teile aufgespalten. Zuerst erfolgt eine thermische Simulation. Dabei wird das Temperaturprofil des AFP-Prozesses aufgebracht und die thermochemischen Änderungen der Materialeigenschaften und der Kristallinitätsgrad iterativ im Materialmodell berechnet. Der zweite Teil der Simulation übernimmt die Ergebnisse der ersten Simulation und betrachtet die mechanischen Effekte des Fertigungsprozesses wie die innere Spannung und die Deformation berechnet. Auch hier werden die Materialeigenschaften iterativ vom Materialmodell abgefragt. Alle Simulationen werden in ANSYS durchgeführt, wobei sowohl Workbench als auch Classic zum Einsatz kommen.

3.1. Thermische Simulation

Das Setup der thermischen Simulation muss den dynamischen und inhomogenen Wärmeeintrag in das Modell durch die Wärmequelle abbilden. Zusätzlich muss beachtet werden, dass die Tapes nach und nach zum Modell hinzugefügt werden und noch nicht gelegte Tapes keinen Einfluss auf den Prozess haben. Das Grundmodell bildet dabei eine Platte mit einem unidirektionalen Lagenaufbau, so dass alle Fasern in die 0°-Richtung zeigen. Die Platte besteht aus 12 Lagen des 0,16 mm starken Tapes, wobei jede Lage aus 12 Tapes mit je 1 Zoll (=25,4 mm) Breite aufgebaut ist, was zu einer Gesamtbreite von 304,8 mm führt. Die Plattenlänge ist 300 mm, so dass die gesamte Platte näherungsweise als quadratisch betrachtet werden kann. Der Laser als Heizquelle fährt mit einer Geschwindigkeit von 150 mm/s über das Tape und erzeugt im Brennpunkt eine Temperatur von 420° C. Nach dem Ablegen eines Tapes folgt eine Pause von 5 s, in der der Roboter das alte Tape abschneidet und zum Startpunkt des

nächsten Tapes fährt. Das Werkzeug, auf dem gefertigt wird, ist unbeheizt. Die erste Lage Tapes wurde bereits gelegt, so dass die Simulation mit dem ersten Tape der zweiten Lage startet. Dieser Simulationsaufbau entspricht einem der ersten Fertigungsversuche mit der AFP-Maschine am DLR Stuttgart.

Die thermische Simulation stellt vor allem zwei Herausforderungen dar. Erstens muss die Wärmerandbedingung realistisch modelliert werden. Zweitens dürfen nicht alle Tapes zu Beginn im Modell sein, sondern müssen nach und nach eingebracht werden. Um das optimale Setup für die gewünschten Randbedingungen zu erhalten, wurden zunächst kleinere Simulationen durchgeführt. Das erste Simulationsmodell besteht lediglich aus 6 Tapes mit jeweils 2 Zoll Länge, aufgeteilt in insgesamt 3 Lagen. Diese Simulation wurde zum Test der Wärmequelle erstellt.

3.1.1. Modellierung der Wärmequelle

Die Modellierung der sich bewegenden Wärmequelle stellt in ANSYS eine besondere Herausforderung dar, da sie einerseits die auftretenden Heizgradienten korrekt abbilden soll, aber gleichzeitig mit vertretbarem Aufwand modelliert werden soll. Die Entwicklung der Randbedingung erfolgte somit in mehreren Iterationsschritten. In allen Iterationen erfolgt die Wärmeübertragung selbst mittels Konvektions-Randbedingungen. Diese Art von Randbedingung lässt sich detaillierter einstellen als andere Wärmerandbedingungen und kann die auftretenden Wärmeströme und Temperaturprofile gut darstellen. Parameter wie Absorptionsgrad des Tapes oder Lichtreflexion werden damit allerdings nicht berücksichtigt. Es wird eine konstante Umgebungstemperatur in Höhe der Verarbeitungstemperatur (Referenzbauteil: 420° C) eingestellt. Im Bereich der Wärmequelle wird der Wärmeübergangskoeffizient sehr hoch eingestellt, so dass das Tape in diesem Bereich ebenfalls diese Temperatur aufweist. Der unbeheizte Teil des Tapes wird je nach Iteration mit einem Wärmeübergangskoeffizienten von nahe oder exakt 0 W/(m²K) versehen.

Randbedingungen in ANSYS werden stets zu Beginn eines Zeitschritts für bestimmte, vorher definierte Netzknoten oder -elemente eingestellt und sind für den gesamten Zeitschritt gültig. Für viele Randbedingungen kann aber statt eines Zahlenwertes eine Formel oder eine Tabelle mit Werten angegeben werden, die den Wert der Randbedingung in

Abhängigkeit von Ort oder Zeit ändern. Im normalen User Interface von ANSYS Workbench Mechanical war es zum Zeitpunkt der Modellerstellung nicht möglich, eine derartig eingestellte Randbedingung mit tabellarisch eingegebenen Werten (siehe TAB 1) sowohl vom Ort als auch von der Zeit abhängig zu machen. Für den ersten Ansatz wurde daher die Ablage eines einzelnen Tapes in viele einzelne Zeitschritte aufgeteilt. In jedem Zeitschritt ist genau eine Randbedingung aktiv, die einen annähernd linienförmigen Bereich auf die Verarbeitungstemperatur erhitzt und auf den übrigen Bereich mit einem Wärmeübergangskoeffizienten von $0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ keinen Einfluss hat. Im nächsten Zeitschritt wird diese Randbedingung deaktiviert und eine neue wird aktiviert, die einen Bereich etwas weiter am Tape entlang erhitzt. Mit ausreichend Zeitschritten kann so eine Wärmequelle simuliert werden, die sich am Tape entlang bewegt, bei der aber einzelne Randbedingungen nur von einer Variablen abhängig sind (siehe BILD 4).

x \ t	0%	50%	100%	Wartezeit
0%	420° C	20° C	20° C	20° C
50%	20° C	420° C	20° C	20° C
100%	20° C	20° C	420° C	20° C

TAB 1. Beispielhafte Darstellung der effektiven Temperatur einer tabellarisch aufgebrachten Wärmerandbedingung abhängig von Tapelänge x und Zeit t

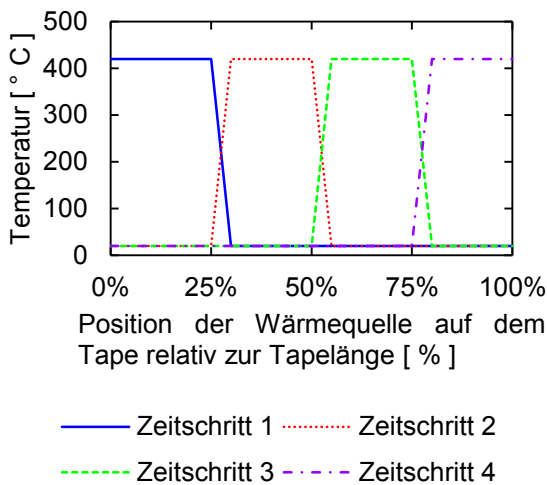


BILD 4. Schematische Darstellung der ersten Iteration der Randbedingung für die Wärmequelle

Der Nachteil bei dieser Modellierung der Wärmequelle ist die hohe Anzahl von Zeitschritten und so-

mit auch Randbedingungen, die erforderlich ist, um die Bewegung der Wärmequelle über die gesamte Tapelänge hinreichend genau aufzulösen. Für das beschriebene reduzierte Modell sind bereits 40 einzelne Zeitschritte pro Tape erforderlich. Neben dem offensichtlichen hohen Rechenaufwand für eine derart hohe Anzahl von Zeitschritten ist der Aufwand für das manuelle Setup nicht vertretbar, da jede Randbedingung einzeln definiert werden muss. Für ein Bauteil in der geplanten Größe mit 144 Tapes ist dieser Ansatz nicht praktikabel.

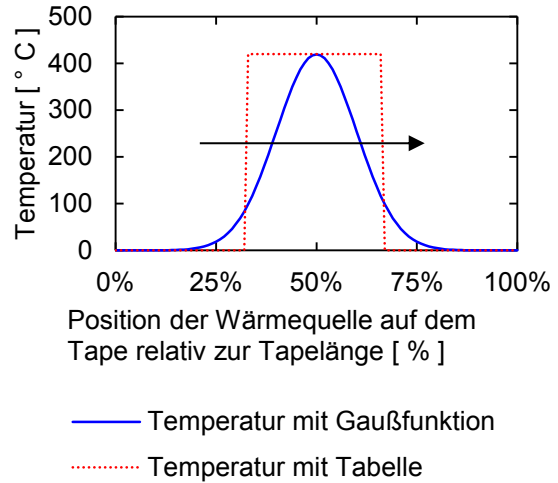
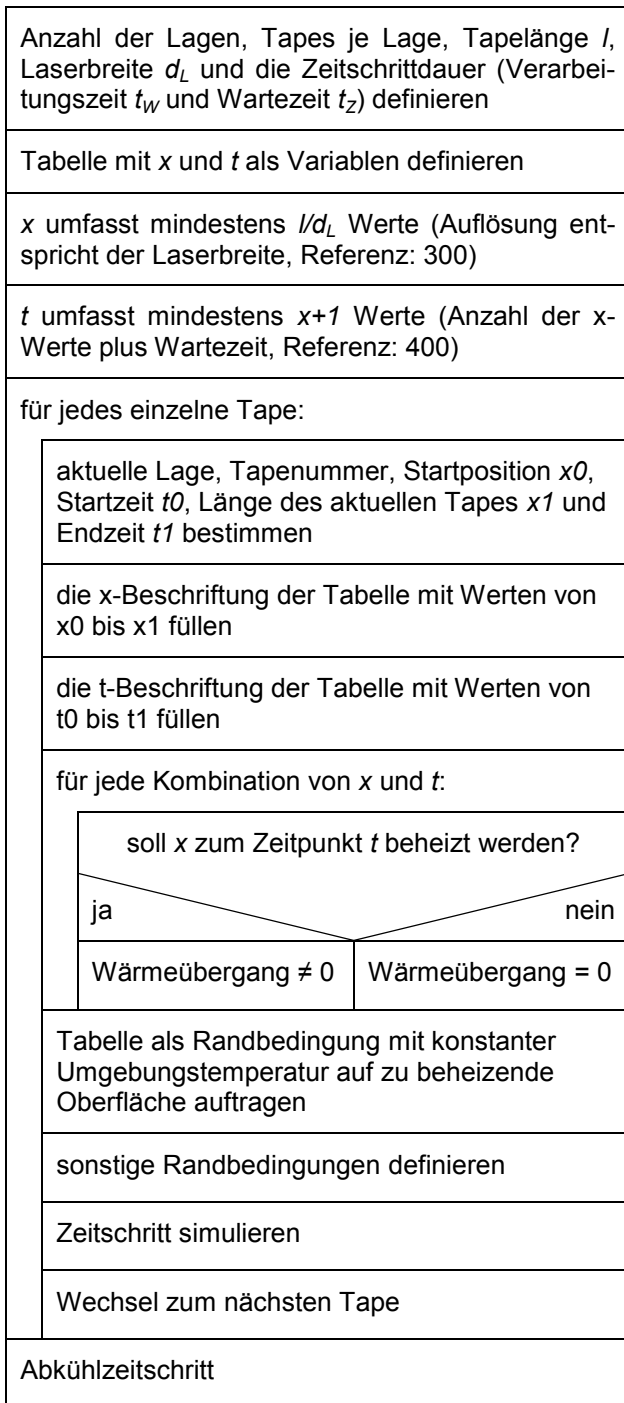


BILD 5. Schematische Darstellung der zweiten Iteration der Wärmerandbedingung im Vergleich mit der ersten Iteration

In der zweiten Iteration wurde versucht, die Einschränkung der gleichzeitigen temporalen und lokalen Abhängigkeit einer Randbedingung zu Umgehen. Randbedingungen können auch in Form von mathematischen Formeln aufgebracht werden, in denen sowohl die Zeit t als auch die Koordinaten x , y und z als Variablen verwendet werden. Mit Hilfe einer passenden Formel wie zum Beispiel der Gauß-Verteilung ist somit die Modellierung der Wärmequelle mit einer Randbedingung pro Tape möglich. Nachfolgend ist die verwendete Gleichung (1) dargestellt. Dabei wird der Wärmeübergangskoeffizient α in Abhängigkeit der Laserbreite d_L , der Verfahrgeschwindigkeit v_L , der Position auf dem Tape x , der Zeit t und einem Umrechnungsfaktor für einen möglichst hohen Wärmeübergang k berechnet. Das Ergebnis ist in BILD 5 schematisch dargestellt.

$$(1) \quad \alpha = \frac{1}{\sqrt{2\pi d_L^2}} e^{-\frac{(x-v_L t)^2}{2d_L^2}} k$$



TAB 2. Struktogramm der automatisierten Tabellenerstellung für die Wärmerandbedingung

Diese Variante reduziert den Aufwand zum Setup der Randbedingung deutlich. BILD 5 verdeutlicht aber bereits ein Problem mit der Formel. Im Vergleich mit der ersten Variante, bei der die Grenzen der Wärmequelle klar definiert werden konnten, läuft sie hier an den Rändern allmählich aus. Das Maximum der Wärmeübertragung wird außerdem lediglich im Peak in der Mitte erreicht.

Diese Probleme können zwar minimiert werden, indem die Variable d_L möglichst klein gewählt wird, aber die reale Breite der Wärmequelle wird dadurch nicht abgebildet. Zudem ist in dieser Iteration immer noch eine Randbedingung pro Tape erforderlich, was im Fall des Referenzbauteils mit 144 Tape zwar einen reduzierten, aber immer noch hohen Aufwand für das Setup bedeutet. Entweder müssen die Randbedingungen weiter konsolidiert werden, so dass mit einer einzigen Randbedingung mehrere Tapes abgedeckt werden, oder das Setup muss zumindest teilweise automatisiert erfolgen.

Automatisiertes Setup ist in ANSYS Workbench Mechanical nicht direkt vorgesehen. Es lassen sich aber Befehle in der Skriptsprache Ansys Parametric Design Language (APDL) einfügen. Damit können über Schleifen automatisiert Randbedingungen erstellt, aufgebracht und wieder gelöscht werden. Es ist daher möglich, für jedes Tape einen Zeitschritt zu definieren und in diesem Zeitschritt eine Randbedingung zu erstellen, die die Wärmequelle für das Ablegen dieses Tapes darstellt. Zudem ist es in APDL-Tabellen möglich, Randbedingungen von beliebig vielen Variablen abhängig zu definieren, so dass die Definition als Gaußkurve nicht mehr erforderlich ist. In TAB 2 ist die automatisierte Erstellung der tabellarischen Randbedingung als Struktogramm dargestellt.

Mit diesem automatisierten Setup können präzise definierte Wärmerandbedingungen auf nahezu beliebig viele Tapes aufgebracht werden. Es muss allerdings sichergestellt sein, dass nicht alle Tapes von Beginn an mit dem Bauteil verbunden sind.

3.1.2. Modellierung der Tapes

Die Modellierung der Tapes hat ebenfalls mehrere Iterationen durchlaufen. Es stellt sich dabei die Herausforderung, den additiven Prozess angemessen zu modellieren. Nicht alle Tapes sind von Beginn an mit dem Bauteil verbunden. Temperaturänderungen an bereits gelegten Tapes dürfen daher nicht per Wärmeleitung Einfluss auf noch zu legende Tapes nehmen. Dies trifft natürlich auch in der entgegengesetzten Richtung zu. In ANSYS existieren zwei Möglichkeiten, um die Verbindung zwischen den Tapes zu unterbinden. Erstens kann der Kontakt zwischen den einzelnen Tapes deaktiviert werden. Zweitens können die Elemente, die die Tapes definieren, ebenfalls deaktiviert werden.

Welche der beiden Methoden verwendet werden kann, ist unter anderem davon abhängig, wie das

Bauteil an sich modelliert wird. In den ersten Iterationen wird jedes Tape als einzelner Körper modelliert. Wärmeleitung zwischen den Tapes erfolgt über Kontakte mit fest eingestellter Wärmeleitfähigkeit. Zu Beginn der Simulation sind alle Kontakte deaktiviert. Wird ein neues Tape gelegt, werden alle Kontakte reaktiviert, die das neue Tape mit der bestehenden Struktur verbinden. Das Deaktivieren und Aktivieren von Kontakten ist mit den Zeitschritten verbunden, so dass pro Tape ein Zeitschritt erforderlich ist. Bei dem reduzierten Modell funktioniert dieser Ansatz problemlos. Eine größere Anzahl an Tapes und somit an Kontakten führt allerdings zu instabilen Simulationen und hohen Rechenzeiten.

Anzahl der Lagen, Tapes je Lage, Tapelängen l , Tapebreite b und Tapedicke d definieren
alle Elemente oberhalb der ersten Lage ($z > d$) deaktivieren
für jedes einzelne Tape:
aktuelle Lage und Tapenummer bestimmen
Startpunkt x_0, y_0, z_0 des aktuellen Tapes bestimmen
alle Elemente mit den Koordinaten zwischen x_0+l, y_0+b, z_0+d auswählen
alle ausgewählten Elemente reaktivieren
Randbedingungen definieren
Zeitschritt simulieren
Wechsel zum nächsten Tape
Abkühlzeitschritt

TAB 3 Struktogramm der automatisierten Tape-Modellierung

Bei der zweiten Variante werden stattdessen die Solid-Elemente, aus denen die Tapes aufgebaut sind, de- und reaktiviert. Auch dies erfolgt zeitschrittgesteuert. Dies ändert zunächst nichts an der hohen Anzahl an Kontakten, die die vorherige Variante instabil werden lassen. Allerdings ist es nun nicht mehr erforderlich, jedes Tape als einzelnen Körper zu modellieren. Das gesamte Bauteil kann als einzelner Körper erstellt werden. Die Vernetzung muss anschließend so erfolgen, dass die Tapebreite ein ganzzahliges Vielfaches der Elementgröße ist.

Dadurch können zu Beginn der Simulation alle Elemente deaktiviert werden, die nicht Bestandteil der ersten Lage sind. Anschließend wird in jedem Zeitschritt ein weiteres Tape wieder aktiviert. Um das Setup zu vereinfachen und zu automatisieren, kann dieser Schritt auch in APDL-Kommandos erfolgen, wie in TAB 3 dargestellt. Für ebene Platten mit UD- oder $0^\circ/90^\circ$ -Lagenaufbau ist dieser Ansatz gut anwendbar.

3.1.3. Modellierung der Umgebung

Zu dem bisher besprochenen Aufbau muss noch die Modellierung der Umgebung hinzugefügt werden, um eine vollwertige Prozesssimulation zu erhalten. Im Vergleich mit den in 3.1.1 und 3.1.2 erläuterten Herausforderungen ist diese einfacher zu erstellen. Auf das Bauteil wirken neben der Wärmequelle zwei Umgebungsfaktoren ein. Zunächst liegt die Platte auf der Werkzeuoberfläche, die beheizt oder unbeheizt sein kann. Im Falle des Referenzbauteils ist sie unbeheizt. Es wird davon ausgegangen, dass die thermische Masse des Werkzeugs zu groß ist, als dass seine Temperatur durch den vergleichsweise schnellen AFP-Prozess nennenswert beeinflusst werden kann. Daher wird das Werkzeug als konvektive Randbedingung auf der Unterseite modelliert. Diese Randbedingung ändert sich über die gesamte Simulationsdauer nicht.

Außerdem erfolgt eine konvektive Kühlung mit der Luft im Fertigungsbereich, die Raumtemperatur hat. Diese beeinflusst ausschließlich die Oberseite der obersten Lage bereits gelegter Tapes und die Bauteilaußenseite. Da mit jedem neuen Tape die darunter liegende Tapeoberseite abgedeckt wird und dafür eine neue Oberseite entsteht, muss diese Randbedingung in jedem Zeitschritt neu definiert werden. Dies kann ebenfalls mit APDL erfolgen, ist aber selbsterklärend, so dass auf ein Struktogramm verzichtet wird. Die genauen Zahlenwerte der Randbedingungen werden durch den Abgleich mit den Messwerten aus der Fertigung ermittelt. In Kombination mit dem iterativen Materialmodell von Convergent kann nun die Temperaturhistorie des gesamten Fertigungsprozesses berechnet werden. In BILD 6 ist das Modell vereinfacht schematisch mit allen Randbedingungen dargestellt. Drei Tapes bilden die bereits gelegte erste Lage. Das vierte Tape wird gerade auf das Bauteil aufgelegt. Das fünfte und sechste Tape wurden noch nicht gelegt und sind daher gestrichelt dargestellt. Die Wärmequelle in rot wirkt auf die Fläche zwischen dem neuen Tape und

dem existierenden Aufbau. Der Laser wandert auf dieser Fläche das Tape entlang und ist nicht separat dargestellt. Die blaue Werkzeugoberfläche auf der Unterseite kühlt oder heizt, je nach Beschaffenheit des Werkzeugs. Die gelben Flächen schließlich sind der konvektiven Kühlung durch die Umgebungsluft ausgesetzt. Die Ergebnisse werden an die mechanische Simulation als Input weitergegeben.

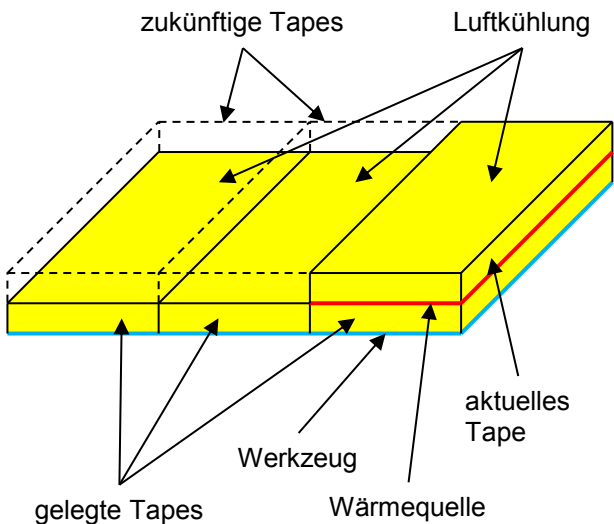


BILD 6. Vereinfachte schematische Darstellung des thermischen Simulationsmodells mit Randbedingungen

3.2. Mechanische Simulation

Die mechanische Simulation ist im Vergleich mit der thermischen Simulation sehr einfach aufgebaut und übernimmt viele der Setup-Optionen in ähnlicher Form. Wichtig ist die Verwendung des gleichen Bauteils mit der gleichen Vernetzung. Die Zeitschritte und Simulationszeit sollten ebenfalls identisch mit denjenigen der thermischen Simulation sein. Außerdem wird der Mechanismus zur Deaktivierung und Aktivierung von Tapes übernommen. Insgesamt durchlief dieser Teil der Simulationen weniger Iterationen.

Der Temperaturverlauf aus der thermischen Simulation wird als Randbedingung auf das gesamte Bauteil aufgebracht und das gleiche iterative Materialmodell verwendet, das in diesem Fall allerdings mechanische Kennwerte zurückgibt. Das Bauteil ist während des gesamten Fertigungsprozesses auf der Werkzeugoberfläche fest eingespannt. Nur kleine Dehnungen in der Ebene sind möglich. Dies entspricht dem realen Fertigungsprozess, in dem die erste Lage mit unterschiedlichen Methoden auf dem Werkzeug fixiert wird. Im letzten Zeitschritt, in dem

das Bauteil abkühlt, kann es sich aber komplett frei verformen. Die Verformung, die am Schluss auftritt, sollte der finalen Verformung des Referenzbauteils entsprechen.

Für die Auswertung wird eben diese Verformung aus der Simulation extrahiert und mit der Verformung des Referenzbauteils verglichen. Wenn 3D-Scan-Daten des Bauteils verfügbar sind, werden diese verwendet, ansonsten wird auf andere Messmethoden zurückgegriffen. Zusätzlich werden verschiedene Spannungen gespeichert. Über diese werden Rückschlüsse auf mögliche Delaminationen und Schäden innerhalb des Bauteils geschlossen. Zuletzt wird der finale Kristallisationsgrad aus dem Materialmodell exportiert. Dieser wird mit DSC-Messungen von AFP-gefertigten Bauteilen verglichen, um somit Rückschlüsse auf die Verlässlichkeit des initialen Simulationsmodells zu ziehen.

Zusätzlich wurden auf Basis der Hauptsimulationen kleinere Simulationen durchgeführt mit dem Ziel, den Simulationsablauf zu verbessern. Von besonderer Relevanz sind dabei die Untersuchungen zum Zusammenhang der Netzauflösung und des Umfangs der Tabelle für die Wärmerandbedingung. Diese bestehen aus zwei Tapes mit 0,3 m Länge, die aufeinander gelegt werden. Diese Simulation wird für unterschiedliche Elementgrößen und für unterschiedliche Tabellengrößen wiederholt. Die Temperaturverteilung der einzelnen Modelle wird untereinander verglichen und die Auflösung bestimmt, ab der keine nennenswerte Änderung mehr auftritt. Die Ergebnisse dieser Netzsensitivitätsanalyse werden in den Hauptsimulationen verwendet.

4. ABLAUF DER SIMULATIONEN UND ERGEBNISSE

In Abschnitt 3 wurden die erstellten Simulationsmodelle und die jeweiligen Herausforderungen und Lösungen detailliert beschrieben. Das finale Simulationsmodell wurde in zwei Hauptvarianten berechnet. Diese sollen den Tapeleger am DLR Stuttgart widerspiegeln. Durch einen Multitapelegekopf ist dieser in der Lage, bis zu drei Tapes auf einmal zu legen. Daher werden zwei Simulationen aufgesetzt, in denen immer ein bzw. drei Tapes auf einmal gelegt werden.

Als zusätzliche Input-Parameter diente die so genannte Nip-Point-Temperatur, also die Temperatur an der Kontaktstelle zwischen Tape und Laminat. Diese Temperatur wird als Umgebungstemperatur für die Wärmequelle genommen. Die konvektive

Randbedingung für die Luftkühlung übernimmt die Literaturwerte für natürliche Konvektion an ebenen Platten. Der Wärmeübergang am Werkzeug wird mit der Abkühlrate des Bauteils bei der realen Fertigung abgeglichen.

4.1. Ergebnisse

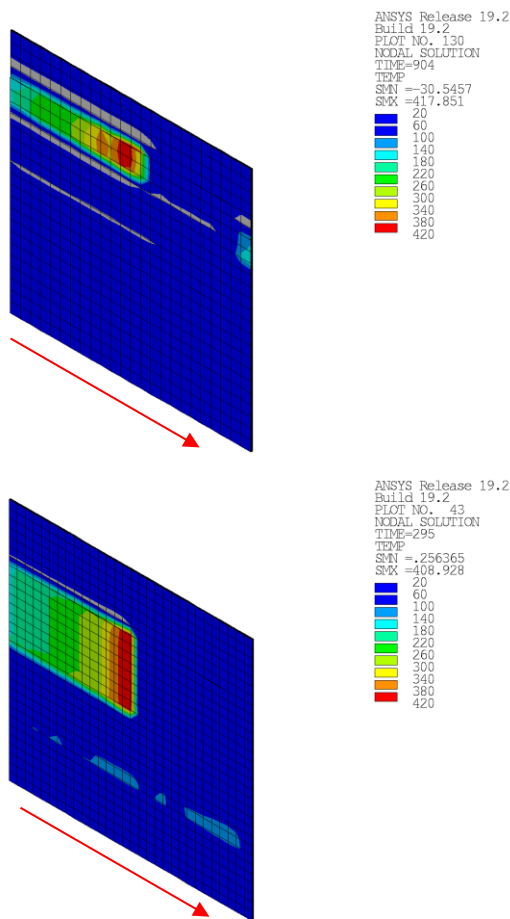


BILD 7. Temperaturverteilung der Single-Tape- (oben) und Multi-Tape-Simulation (unten) kurz vor Ende der Fertigung (in ° C)

Die Temperatur im Bauteil steigt im Bereich der Fertigung auf 420° C. Nachdem der Laser weitergeführt wurde, fällt die Temperatur bei den ersten Tapes bereits wieder auf 20° C, bevor das nächste Tape abgelegt wird. Im späteren Verlauf ist der Temperaturabfall langsamer. Das Tape hat lediglich Zeit, auf 180° C abzufallen, bevor die Wartezeit vorüber ist und das nächste Tape beheizt wird. Die Wärme wird von dem gerade bearbeiteten Tape in die benachbarte Struktur weitergeleitet und heizt diese kurzzeitig ebenfalls auf. Anschließend fließt die Wärme in die Umgebung und insbesondere in das kalte Stahlwerkzeug. BILD 7 zeigt einen beispielhaften Temperaturverlauf während eines Ferti-

gungsschritts. Durch die hohe Wärmeabfuhr in das kalte Werkzeug dringt die Wärme nicht weit in die Struktur vor.

In BILD 8 ist die Verformung der beiden Simulationsvarianten gezeigt, die sich nach dem Abkühlvorgang einstellt. Beide Varianten führen bei einem unbeheizten Werkzeug zu einer hohen Durchbiegung in der Mitte entlang der Ablegerichtung der Tapes von ca. 31-36 mm. Die Single-Tape-Variante zeigt dabei eine inhomogenere Verteilung der Deformation als die Multi-Tape-Variante bei gleichzeitiger niedrigerer Maximalverformung. Dies sorgt für eine schüsselartige Verformung im Vergleich zur trogähnlichen Verformung der zweiten Simulation.

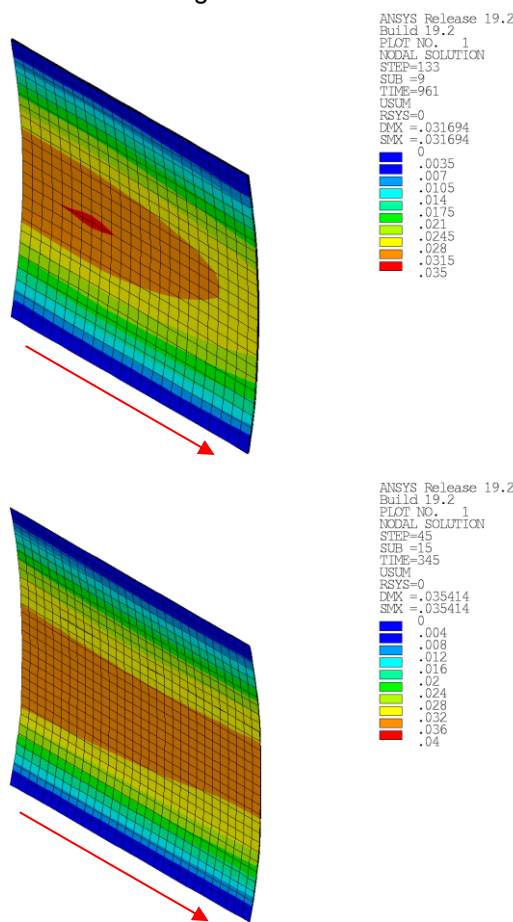


BILD 8. Verformung der Single-Tape- (oben) und Multi-Tape-Simulation (unten) nach der Abkühlung (in m)

Die gemittelte Spannung beider Varianten liegt bei 38-48 MPa mit Spitzen bis zu 340 MPa, wobei die Single-Tape-Simulation höhere durchschnittliche Spannungen bei niedrigeren Spannungsspitzen aufweist. Bei der Untersuchung dieser Spitzen in BILD 9 wird ersichtlich, dass bis auf wenige Ausnahmen diese Spannungsspitzen mit den Übergän-

gen zwischen den Tapes zusammenfallen. Das zweite Diagramm zeigt auch, dass die Spannung insgesamt in den oberen Lagen abnimmt. Zuletzt wird der durchschnittliche Kristallinitätsgrad des Bauteils ausgelesen. Bei beiden Varianten liegt dieser bei ca. 28-30%, wobei die unteren Lagen einen höheren Kristallinitätsgrad aufweisen als die oberen.

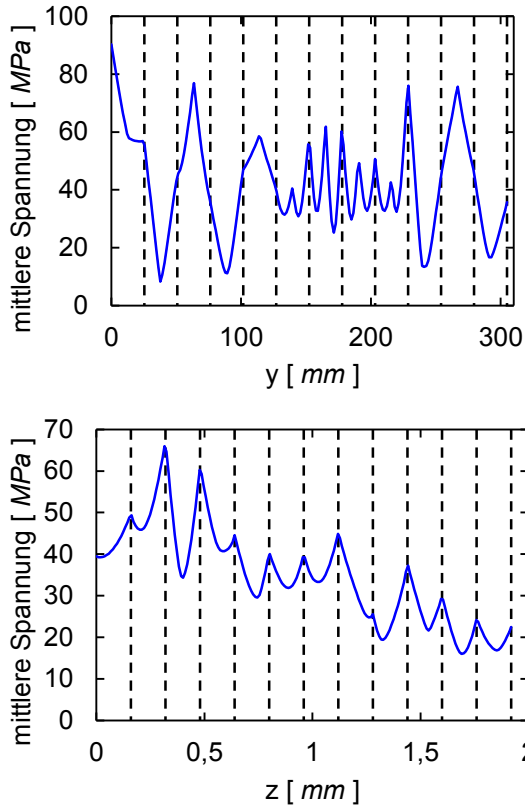


BILD 9. Mittlere Spannung einer Platte über der Plattenbreite (oben) und Plattendicke (unten); die Übergänge zwischen den Tapes sind markiert

4.2. Diskussion

Ziel der Arbeit ist der Abgleich der Simulationsergebnisse mit reellen Bauteilen. Der erste Vergleich erfolgt über die Verformung. Die Referenzplatte wurde nur per Hand vermessen, wie in BILD 10 dargestellt. Anschließend wurde die Platte in der Presse nachkonsolidiert, so dass die ursprüngliche Deformation nicht mehr existiert. Bei der Handmessung ergab sich eine maximale Deformation von ca. 55 mm. Bedenkt man allerdings, dass die Platte in BILD 10 nicht gerade liegt, weist die berechnete Deformation einen ähnlichen Wert auf und sieht qualitativ ähnlich aus. Ein aussagekräftigerer 3D-Scan wurde mit der Platte nicht durchgeführt, ist

aber für zukünftige Bauteile mit gleichen Fertigungsparametern geplant.

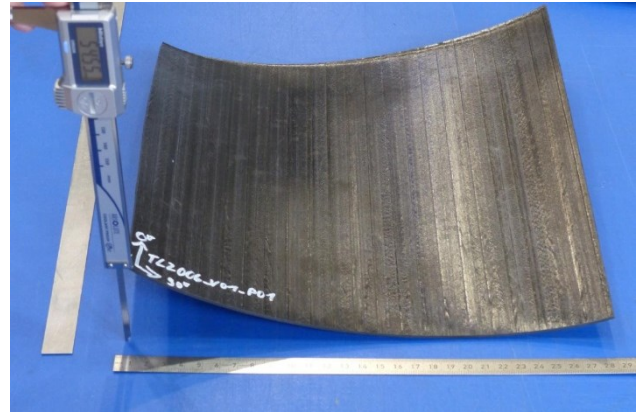


BILD 10. Deformierte Platte

Der Kristallinitätsgrad wurde mittels dynamischer Differenzkalorimetrie (differential scanning calorimetry, DSC) bestimmt. Dabei wird die Wärmeaufnahme einer Probe beim Aufheizen und Abkühlen gemessen. Aufgrund dieser Messung werden Rückschlüsse auf den Kristallinitätsgrad geschlossen, indem die Schmelzwärme der Probe in ein Verhältnis mit der Schmelzwärme einer vollständig kristallinisierten Probe gesetzt wird. Versuche ergaben einen finalen Kristallisationsgrad von ca. 27-30%, was gut mit den simulierten Ergebnissen übereinstimmt.

Die Simulationen bilden den AFP-Prozess mit guter Genauigkeit ab. Die inneren Abläufe werden ausreichend angenähert und können mit weiterer Optimierung zu prädiktiven Zwecken verwendet werden. Allerdings ist die Rechnung noch optimierungsbedürftig, da derzeit einzelne Rechnungen zu lange dauern und zu viel Speicherplatz beanspruchen, als dass umfangreiche Optimierungen für die Fertigungsparameter erfolgen können.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Simulation des Fertigungsprozesses beim Tapelegen ist sehr wichtig, um dieses Fertigungsverfahren langfristig zu etablieren. Ohne eine Optimierung der zahlreichen Fertigungsparameter ist die Bauteilqualität nicht zufriedenstellend. Große Versuchsreihen zur Ermittlung der Parameter sind jedoch aufwendig und zeitraubend. Die Anlage kann in dieser Zeit zudem nicht produktiv arbeiten, da die entsprechenden Proben gefertigt werden müssen. Mit Simulationen kann diese Optimierung abseits der eigentlichen Fertigung in kürzerer Zeit erfolgen.

Am DLR konnte gezeigt werden, dass eine detaillierte Simulation der Temperaturhistorie möglich ist und

mit entsprechend ausführlichen Materialmodellen wie dem Modell für CF-PEEK von Convergent Inc. auch die Deformation und mechanischen Eigenschaften des finalen Bauteils bestimmt werden können. Ein genauer Abgleich der Simulationsergebnisse mit dem realen Bauteil steht zwar noch aus, aber die vorläufigen Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit der Realität. Mit weiteren Optimierungen insbesondere bei der Modellgröße und der damit verbundenen Rechenzeit kann das Verfahren die Versuche an der Anlage zumindest ergänzen.

Für eine Fortführung der Arbeit sind zwei Aspekte direkt interessant. Erstens müssen die Ergebnisse mit exakten 3D-Scans der relevanten Bauteile abgeglichen und die Randbedingungen eventuell angepasst werden. Zweitens muss das Modell ausreichend vereinfacht und optimiert werden, um es für die Optimierung der Fertigungsparameter verwenden zu können. Dazu müssen vor allem die Rechenzeit und die Speichergröße deutlich reduziert werden.

Im weiteren Verlauf soll das Modell erweitert werden, so dass beliebige Geometrien und Lagenorientierungen ermöglicht werden. Dies erfordert eine Erweiterung des automatisierten Modellaufbaus mit entsprechenden Elementorientierungen und flexiblen Koordinatensystemen. Zusätzlich zu diesen Arbeiten wird mit Convergent Inc. kooperiert werden, um weitere Werkstoffe und ihr Verhalten zu charakterisieren und für die Simulation aufzuarbeiten.

QUELLEN

- [1] M. Horn, R. Keck und M. Kaden, „Influence of Production Technology on the Consolidation of Fiber Reinforced High Performance Thermoplastics,“ in *ECCM 14*, Budapest, Ungarn, 2010.
- [2] G. Doll, P. Dreher, S. Nowotny und M. Calomfirescu, „FFS - Thermoplastische Bauweisen für Sekundärstrukturen,“ in *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*, München, Deutschland, 2017.
- [3] W. J. B. Groupe, *Weld Strength of Laser-Assisted Tape-Placed Thermoplastic Composites*, Enschede, Niederlande: Universiteit Twente, 2012.
- [4] T. Kok, *On the Consolidation Quality in Laser Assisted Fiber Placement*, Enschede, Niederlande: Universiteit Twente, 2018.
- [5] F. Henne, S. Ehard, A. Kollmannsberger, B. Hoeck, M. G. R. Sause, G. Obermeier und K. Drechsler, „Thermoplastic In-Situ Fiber Placement for Future Solid Rocket Motor Casings Manufacturing,“ in *SAMPE SETEC*, Tampere, Finnland, 2014.
- [6] R. F. X. Lichtinger, *Thermo-Mechanical Coupled Simulation of the Thermoset Automated Fibre Placement Process*, München, Deutschland: Technische Universität München, 2015.
- [7] D. Fricke, G. Doll, S. Nowotny, K. Gordnian, A. Forghani und A. Poursartip, „Manufacturing Simulation of the In-Situ Tape Laying Process for Thermoplastic Carbon Fiber Reinforced Tapes,“ in *SAMPE*, Long Beach, USA, 2018.
- [8] K. Gordnian, *Crystallization and thermo-viscoelastic modelling of polymer composites*, Vancouver, Kanada: University of British Columbia, 2017.
- [9] K. Gordnian und A. Poursartip, „A Rate-Type Crystallization Kinetics Model for Process Modelling of Carbon Fibre PEEK Matrix Composites,“ in *20th International Conference on Composite Materials*, Kopenhagen, Dänemark, 2015.