

Simulation des Verzugs infolge des schichtweisen Aufbaus im 3-D-Druck

Christoph Schmutzler, Christian Zeller, Sebastian Amann, Christian Seidel, Michael F. Zäh

iwb Anwenderzentrum Augsburg, Augsburg, Deutschland

Summary

Additive manufacturing technologies, like 3D printing, enable the build-up of parts by successively adding layers. In 3D printing each powder layer is solidified by the selective deposition of binder with an ink-jet print head. The chemical reaction of the binder with the polymer powder causes local solidification. By repeating the steps of layer deposition and selectively depositing binder, parts are fabricated.

The chemical reaction of the powder with the binder leads to a phase change of the binder from liquid to solid state, resulting in shrinkage. Due to its layered structure, parts produced by 3D printing are prone to process-related deformations. The consequence is a degradation of the size and shape accuracy. By using simulation techniques, forecast of the resulting warpage offers the opportunity to reduce the deviations by adapting the component geometry data.

In this paper a finite element based method is introduced to predict the deformations caused by time delayed shrinkage of the layers. Initially, the physical effects and the reasons for distortions are described and an example is shown. Then the assumptions for the model are defined and possibilities for implementation in ANSYS 14.5 are discussed. After this, the chosen approach is presented and parameters as well as functions are introduced. As a result, a simple geometry can be generated and disassembled in several layers within ANSYS. To simulate the layered fabrication process, single layers are activated in a time-delayed mode. The process shrinkage is represented by thermal shrinkage. Thus, for each layer a specific temperature is assigned for each time point, following a predefined shrinkage function. The resulting stresses due to the different changes in the length of the layers results in a distortion of the geometry. For this, some examples are shown und subsequently evaluated. Finally, an outlook on future developments is given.

Keywords

Simulation, 3-D-Druck, Verzug, Schwindung, Schichtaufbau.

1. Einleitung

Additive Fertigungsverfahren ermöglichen die wirtschaftliche Herstellung komplexer Bauteile und Objekte in kleinen Stückzahlen, ohne bauteilspezifische Formen und Werkzeuge, direkt aus den CAD-Daten [1]. Die Fertigungsprozesse nutzen das Prinzip des Zerlegens einer Geometrie in Einzelschichten oder Elemente, welche sukzessive aufgetragen und verfestigt werden [2, 3]. Der Einsatz additiver Fertigungsverfahren in der Produktion eröffnet neue technologische Möglichkeiten hinsichtlich des Produktdesigns und der Funktionsintegration, wodurch neue Anwendungen und Märkte für diese Technologien geschaffen werden [4]. Somit entstehen neben dem Einsatzgebiet der Prototypenerzeugung zunehmend Applikationen im Bereich der Kleinserienfertigung von Formen, Werkzeugen und Endprodukten [5]. Dementsprechend steigen auch die Anforderungen hinsichtlich der Maßhaltigkeit und der Reproduzierbarkeit an die Produktionsergebnisse [6].

Im pulverbettbasierten 3-D-Druck erfolgt der Aufbau in einem sich stetig wiederholendem Kreislauf. Dieser besteht aus dem Auftragen einer dünnen Pulverschicht, welche im Anschluss mit einem Tintenstrahldruckkopf selektiv mit einem Binder bedruckt wird, sowie dem Absenken der Bauplattform um eine Schichtstärke nach jedem Arbeitsschritt [2], vergleiche Fig. 1. Der in diesem Manuskript betrachtete Kunststoffprozess der Firma voxeljet AG, bezeichnet als PolyPor A, verwendet ein feinkörniges Pulver auf Polymethylmethacrylat-Basis (PMMA), welches beim Pulverauftrag gleichmäßig mit einem Beschichter in der eingestellten Schichtstärke aufgebracht und nivelliert wird [1]. Der entsprechend der Schichtkontur aufgebrauchte Binder reagiert bei Kontakt mit dem Pulver und bewirkt eine chemische Verfestigung an den Kontaktstellen der einzelnen Pulverkörner [7]. Durch das Auftragen weiterer Pulverschichten und die Wiederholung der Prozessschritte werden Objekte schrittweise aufgebaut.

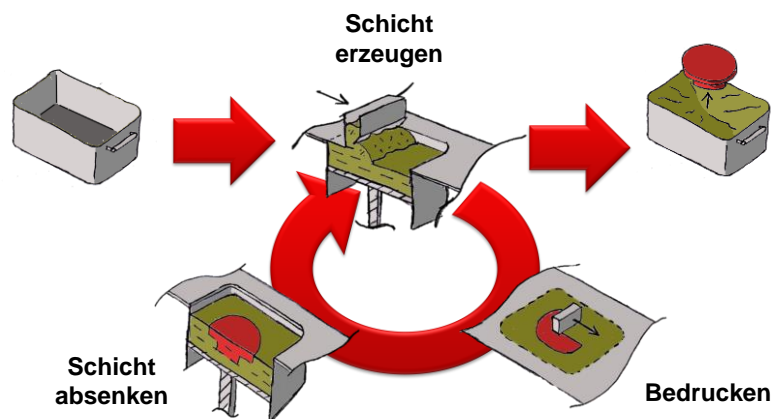


Fig. 1 Schematischer Prozessablauf im 3-D-Druck [8, 9]

2. Ursachen für den Verzug infolge der Prozessschwindung

Die Verfestigung erfolgt durch eine Reaktion des Binders mit dem Pulver, woraus ein Phasenübergang von einem flüssigen in einen festen Zustand resultiert. Die Folge ist eine Schwindung bedruckter Bereiche einer Schicht, also die Abnahme des spezifischen Volumens [10]. Durch den schichtweisen Aufbau von Bauteilen tritt die Schwindung örtlich und zeitlich versetzt ein [7]. Unter der Annahme, dass die höchste Schwindungsrate direkt nach der Aufgabe des Binders vorliegt und diese mit zunehmender Verfestigung abnimmt, führt die zeitversetzte Verfestigung zu unterschiedlichen Längenänderungen zwischen den Schichten und somit zu Eigenspannungen im Bauteil sowie innerhalb einer Schicht. Das Schichtmodell in Fig. 2 zeigt schematisch die resultierenden Interaktionen für den Aufbau von drei repräsentativen Schichten.

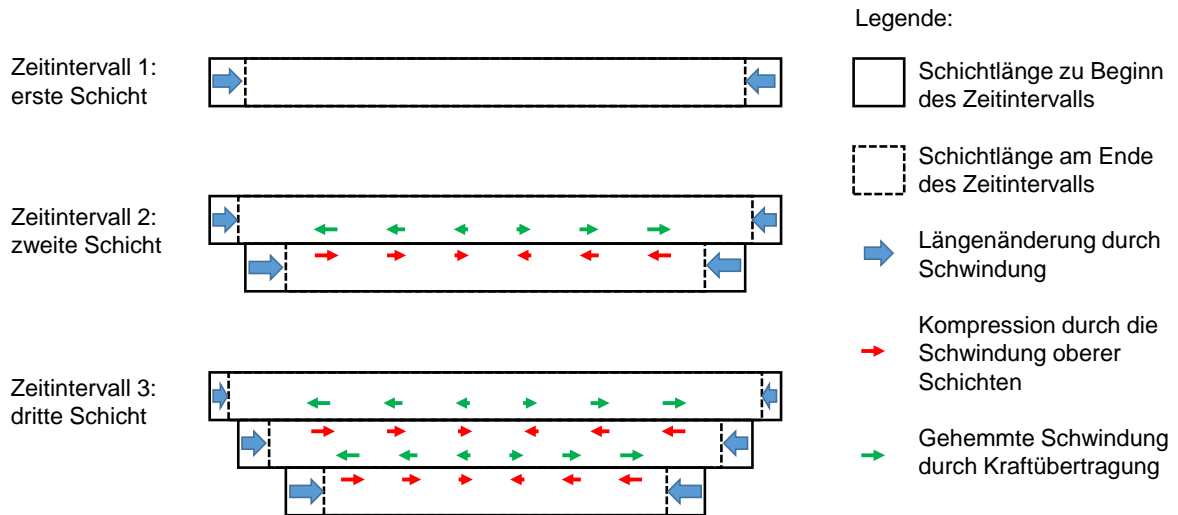


Fig. 2 Interaktionen zwischen den Schichten infolge der zeitversetzten Schwindung

Die unterste Bauteilschicht kann, ohne eine Beeinflussung durch anliegende Schichten, frei schwinden. Wird eine weitere Schicht aufgebracht, so führt deren größere Längenabnahme pro Zeitintervall einerseits zu einer zusätzlichen, durch den stoffschlüssigen Kontakt über die Eigenschwindung hinausgehenden Kompression der untersten Schicht. Andererseits wird infolge der Kraftübertragung die Schwindung der zweiten Schicht gehemmt. Dieser Vorgang setzt sich bei der Aufbringung weiterer Schichten fort. Somit wirkt auf jede Schicht, mit Ausnahme der ersten und letzten Bauteilschicht, auf der Unterseite eine Zug- und auf der Oberseite eine Druckspannung. Das daraus resultierende Moment führt innerhalb der Einzelschichten und somit auch im gesamten Bauteil zu einer Aufbiegung in Aufbaurichtung. Dieser Verzug wird nachfolgend als Curling bezeichnet. Darüber hinaus werden durch diesen Effekt Schichten im unteren Bauteilbereich stärker komprimiert, als dies infolge der Eigenschwindung der Fall wäre, während Schichten im oberen Bauteilbereich nicht den vollständigen Wert der Schwindung erreichen können. Die Folge ist eine trapezförmige Verformung der Seitenkanten, nachfolgend als Trapezeffekt bezeichnet.

Der Curling-Effekt kann in idealisierter Darstellung als eine Aufbiegung des Bauteils vergleichbar zu einem Bi-Metall infolge der unterschiedlichen Längenänderungen der Schichten betrachtet werden [11], was auf eine parabelförmige Verzugsform schließen lässt. In der Realität tritt dieser Effekt im 3-D-Druck besonders auf der Bauteilunterseite im Randbereich auf. Dies liegt darin begründet, dass jede neue aufgetragene Schicht durch den Beschichter nivelliert wird. Dadurch werden Fehler auf der Bauteiloberseite ausgeglichen und infolge des zunehmenden Biegezugmoments schwächt sich der Fehler mit zunehmender Bauteilhöhe ab. Darüber hinaus härten Randschichten durch die Diffusion der Binderdämpfe in das umliegende Pulverbett schneller ab, während innen liegende Bauteilbereiche über einen längeren Zeitraum niedrige Festigkeitswerte aufweisen [9]. Folglich bauen sich Eigenspannungen im Bauteilinneren leichter durch Kriechvorgänge ab, wodurch Randbereiche und sehr dünne Strukturen besonders stark von dem Effekt betroffen sind.

In vereinfachter Darstellung kann der Trapezeffekt als eine lineare Abschrägung der Bauteilseitenflächen beschrieben werden, wobei die unteren Bauteilecken in horizontaler Richtung zur Bauteilmitte hin verschoben sind. Häufig kommt es dabei an den unteren Bauteilkanten zu einer Überlagerung mit dem Curling, was zu einer Abrundung führt. Nachfolgend ist in

Fig. 3 ein beispielhaftes Bauteil gezeigt, an welchem sowohl das Curling als auch der Trapezeffekt auftreten.

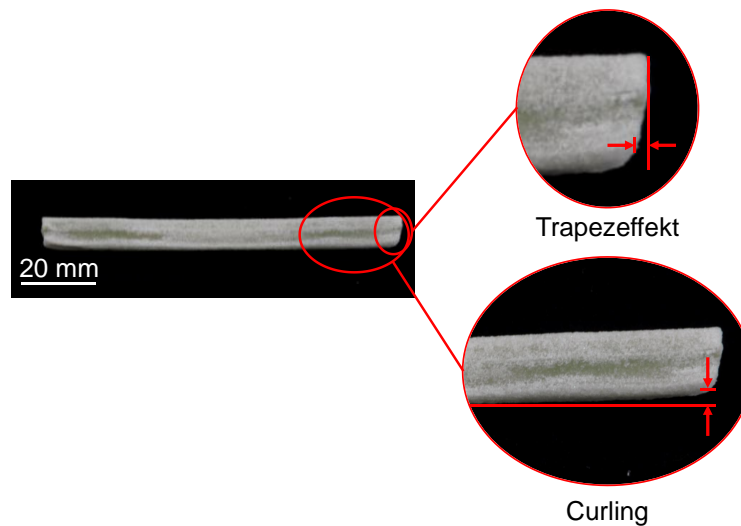


Fig. 3 Verzugseffekte im 3-D-Druck

3. Anforderungen an das Simulationsmodell

Die Überführung der physikalischen Zusammenhänge in ein numerisches Simulationsmodell erfordert die Idealisierung des strukturellen Aufbaus, der Randbedingungen, des Lastfalls sowie des zugrunde liegenden mechanischen Verhaltens, des Materialverhaltens und der Einflussfaktoren [12]. Die Anforderungen dafür werden nachfolgend aufgezeigt.

Für eine realitätsnahe Abbildung des Prozesses im Simulationsmodell muss dieses, analog zur realen Herstellung eines Bauteils, schichtweise aufgebaut sein. Hierfür ist eine Diskretisierung des Objekts in einzelne Elemente erforderlich. Die Schichten der Geometrie sind im Laufe des simulierten Druckprozesses nacheinander zu aktivieren, um den zeitversetzten Aufbau der einzelnen Schichten darzustellen. Außerdem ist eine Verknüpfung der Schichten bei der Aktivierung notwendig, um eine Verbindung zu einem Globalkörper zu realisieren und somit die Interaktion mit den jeweiligen Nachbarschichten zu ermöglichen.

Je nach Anwendungsfall sind Dirichlet- und gegebenenfalls Neumann-Randbedingungen zu berücksichtigen. Diese ergeben sich aus dem Lastfall und den Forderungen nach Ausbreitungsmöglichkeiten und Restriktion der in Schichten zerlegten Geometrie, beispielsweise der Ebenheitsbedingung neu erzeugter Schichten. Eine Anforderung an die Knoten der generierten Elemente stellt deren selektive Fixierung dar. Dies ist nicht nur für die Fixierung im Raum notwendig, sondern auch für die Restriktion von Flächen, um Einschränkungen zu implementieren. Zur Darstellung der Deformationen muss ein Lastfall auf die Geometrie aufgebracht werden. Wie im vorherigen Kapitel dargelegt, wird sich aufgrund der zeitversetzten Schwindung ein aus der Bauebene biegendes Bauteilverhalten ausprägen. Durch den Lastfall müssen entsprechend Schubkräfte zwischen den Schichten entstehen, welche zu einem Biegemoment führen und somit die Deformationen erzeugen. Diese resultieren aus der Schwindung des Verfestigungsprozesses (siehe Fig. 2).

Ferner ist das Simulationsmodell mit variablen Materialeigenschaften zu versehen, um die Zustände über den Verfestigungsprozess hinweg sowie unterschiedliche Bindereinträge und Materialien abzubilden. Auch können sich aus verschiedenen Lastfällen beziehungsweise Verfestigungsszenarien Abhängigkeiten der Materialeigenschaften ergeben, die zu berücksichtigen sind. Darüber hinaus sind bei der Betrachtung verschiedener Lastfälle beziehungsweise Verfestigungsszenarien Abhängigkeiten der Materialeigenschaften zu beachten, wie beispielsweise Kriechvorgänge aufgrund hoher Eigenspannungen. Abschließend muss für die aufgeführten Idealisierungen und Anforderungen eine Geometrieunabhängigkeit gewährleistet sein, um das Modell später auch auf realitätsnahe Beispiele anwenden zu können.

4. Aufbau des Modells

Hinsichtlich der Erstellung eines Modells sind mehrere Ansätze zur Erfüllung der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Anforderungen möglich. Zunächst werden die grundsätzlichen Möglichkeiten für eine Realisierung erläutert, gefolgt von der spezifischen Umsetzung des Modells.

4.1 Möglichkeiten der Umsetzung

Der schichtweise Aufbau der Geometrie beziehungsweise die Schichtdatengenerierung für die spätere Simulation ist prinzipiell über zwei Wege erreichbar. Entweder wird jede Schicht einzeln erstellt oder die Schichten werden durch einen programmierten Schneid-Prozess aus einer Geometrie erzeugt [13]. Die Verbindung dieser Schichten kann über Zwangsbedingungen erfolgen, sogenannte constraint equations. Zwangsbedingungen regulieren die relative Beweglichkeit von sich berührenden Flächen, wie zwischen den Schichten vorhanden. Damit können auch Kräfte übertragen werden. [14]

Die Aktivierung der Schichten zur Abbildung des zeitversetzten Druckens der Schichten ist über eine sogenannte „Birth-Life“-Funktion realisierbar. Dabei werden die Materialdaten betroffener Elemente gegen null gesetzt. Die Folge ist, dass sich diese Elemente des Bauteils rein elastisch, das heißt ohne Widerstand gegen äußere Belastungen, verhalten. [15]

Die Materialeigenschaften lassen sich über verschiedene Abhängigkeiten steuern. Hierfür müssen Matrizen mit Materialdaten hinterlegt werden. Die benötigten Werte sind aus der Literatur, beispielsweise aus [7], zu entnehmen oder durch Reverse Engineering zu ermitteln.

Zur Realisierung der Schwindung ist eine Volumenabnahme der Elemente in jeder Schicht zu verwirklichen. Die in ANSYS 14.5 hinterlegten Funktionen bieten hierzu zwei Möglichkeiten. Zum einen kann über eine „Schwell“-Funktion eine direkte Volumenabnahme der Elemente durch die Aufgabe einer negativen Expansion simuliert werden. Diese Funktion ist jedoch in ANSYS 14.5 unüblich und wird deshalb nur für Spezialfälle verwendet [14]. Zum anderen besteht die Möglichkeit, die Schwindung indirekt unter Verwendung der Wärmeausdehnung abzubilden. In diesem Fall wird eine äquivalente thermische Last aufgegeben und die Temperatur entsprechend einer vorgegebenen Schwindungsfunktion angepasst.

4.2 Umsetzung des Modells

In Fig. 4 ist der Aufbau der Simulation zu sehen. Realisiert wurde der Code mittels Makro-Dateien, die in unterschiedliche Bereiche zusammengefasst sind. Makro-Dateien enthalten eine Abfolge von Befehlen im ANSYS-üblichen APDL-Format.

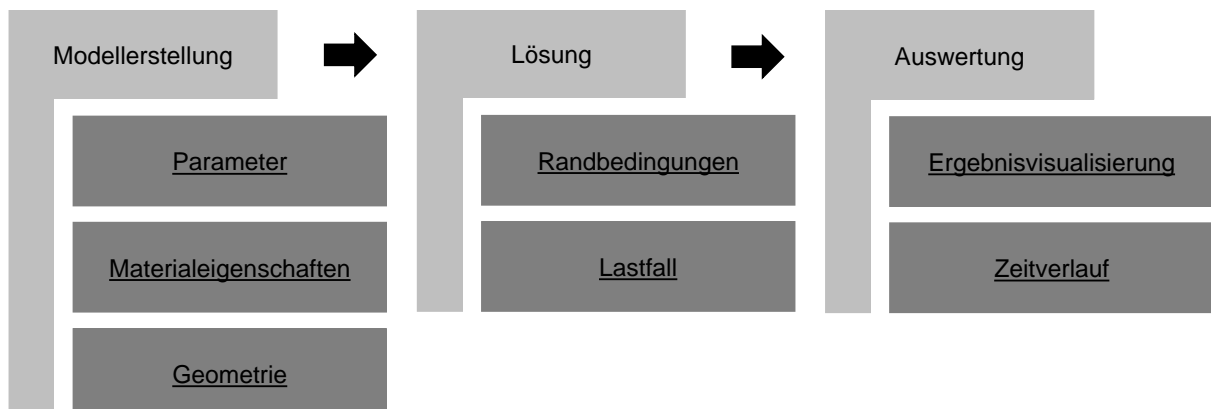


Fig. 4 Aufbau des Programmcodes für das Simulationsmodell

Der Aufbau und die Funktionen dieser Makro-Dateien sind nachfolgend näher erläutert.

Materialeigenschaften

In der Makro-Datei Materialeigenschaften wurde als Element das Multiphysik-Element *SOLID5* gewählt. Dieses ist aufgrund von Freiheitsgraden (DOF) sowohl für die Temperaturen als auch für Verschiebungen bei transienten Berechnungen im 3-D-Druck geeignet. Die Elementgröße wird der Größe der Schichten angepasst.

Zur Modellierung der Materialeigenschaften wurden Literaturwerte [7] herangezogen und anhand eines Referenzbauteils angepasst. Die verwendeten Werte sind in Tabelle 1 gezeigt.

Tabelle 1: Materialeigenschaften des Pulver-Binder-Systems PolyPor A in Anlehnung an [7]

Materialeigenschaft	Wert	Einheit
<i>E-Modul</i>	$390 \cdot 10^6$	N/m ²
<i>Poissonzahl</i>	0,3	-
<i>Wärmeleitfähigkeit</i> ¹	0	W/mK
<i>Dichte</i>	$0,67 \cdot 1190$	kg/m ³
<i>Wärmeausdehnungskoeffizient</i>	$2 \cdot 10^{-4}$	1/K
<i>Referenztemperatur</i>	20	°C
<i>Spezifische Wärmekapazität</i>	1470	J/kgK
<i>(Magnetische Permeabilitätszahl)</i>	0	mkg/s ² A ²
<i>(Elektrischer Leitungswiderstand)</i>	0	Ω

¹ Indirekte Abbildung der Schwindung über die Wärmeausdehnung bei Vorgabe einer definierten Temperatur pro Zeitpunkt und Schicht durch den Lastfall

Die Wärmeleitfähigkeit hat den Wert null, um Wärmeleitung zwischen den Schichten zu verhindern. Zur indirekten Abbildung der Schwindung über die Wärmeausdehnung werden die Temperaturen der jeweiligen Schichten für jedes Zeitintervall, in diesem Fall eine Stunde, rein über eine vordefinierte Funktion gesteuert. Es existiert daher keine Wärmeabfuhr zur Umgebung und kein Temperaturausgleich zwischen den Schichten. Die stündlichen Zeitintervalle sind größer gewählt als die Abstände zwischen der Schichtaktivierung (40 Sekunden Druckzeit) beim Aufbau des Modells, um die gesamte Verfestigungsdauer des Prozesses im Modell realitätsnah abzubilden. Der Übergang zwischen den Temperaturwerten jedes Zeitintervalls ist daher linear interpoliert. Der Wert der Dichte wird im Vergleich zur Dichte des Pulverkorns mit dem Faktor 0,67 verringert, um Poren in der Pulverschüttung zu berücksichtigen [7]. Der E-Modul und die Poissonzahl sind im Allgemeinen zeitabhängig. Als Abstraktion des Problems werden diese Werte für erste Untersuchungen konstant gehalten und die Auswirkungen im Verlauf der Temperaturfunktion berücksichtigt. Die Werte für die magnetische Permeabilitätszahl und den elektrischen Leitungswiderstand sind gleich null gesetzt, da die verwendeten *SOLID5*-Elemente zwar diese Freiheitsgrade berücksichtigen, diese aber nicht für das vorgestellte Modell erforderlich sind.

Parameter und Geometrie

Die Makro-Dateien für Parameter und Geometrie sind vom Bauteil abhängig. Hier sind die manuell einstellbaren Geometriedaten, die Schichthöhe, die Umgebungstemperatur und die Druckzeit hinterlegt. Zusätzlich ist ein Algorithmus zur Schichtgenerierung und zur eindeutigen Schichtbenennung vorhanden. Durch diesen implementierten Ablauf wird die Geometrie des Bauteils automatisiert in Schichten unterteilt, um den Aufwand für manuell durchzuführende Tätigkeiten zu reduzieren. Hierbei wird die Geometrie des Bauteils durch äquidistante Arbeitsflächen in Schichten unterteilt und die entstehenden Volumina werden aufsteigend nummeriert. Die Verbindung und Aktivierung der Schichten erfolgt über Zwangsbedingungen und eine „Birth-Life“-Funktion im Bereich des Lastfalls. Abschließend werden die Schichten vernetzt.

Randbedingungen

Die Makro-Datei für die Randbedingungen beinhaltet zwei Funktionen zur Fixierung des Modells im Raum. Einerseits wird die Beweglichkeit des Modells auf der Unterseite lokal beschränkt verhindert, um eine eindeutige Lösbarkeit des Gleichungssystems zu gewährleisten. Dabei werden so viele Knoten festgehalten, dass Starrkörperbewegungen, beispielsweise ein Kippen des Modells, verhindert werden. Die Anzahl der Knoten wird jedoch so gering wie möglich gehalten (beispielsweise 0,3 % der Knoten in der Mitte der Bauteilunterseite zur Fixierung eines Quaders, um den Einfluss auf die Verformung gering zu halten) und kann geometrieabhängig variieren. Andererseits wird die Oberseite aller mit der „Birth-Life“-Funktion deaktivierten Schichten in der Bauebene fixiert, um die Aufbiegung noch nicht verfestigter Schichten zu verhindern und somit die Ebenheit neu aktivierter Schichten sicherzustellen. Durch diese Restriktion kann sich die unterste Knotenreihe der deaktivierten Schicht mit der darunterliegenden Schicht verformen. Dabei entstehen allerdings keine Spannungen im Material. [16]

Lastfall

Zur Lastaufbringung sind die zeitversetzte Aktivierung und die entsprechende Temperaturzuweisung der Schichten implementiert, wodurch die Schwindung über die Temperatur gesteuert wird. Dafür werden zu Beginn alle Elemente deaktiviert. Im ersten Zeitschritt wird die stationäre Anfangsbedingung berechnet, womit allen Elementen die Umgebungstemperatur zugewiesen wird.

Die anschließende Schwindung wird über eine indirekte Schwindungsfunktion aufgegeben. Das heißt, die Volumenabnahme durch die Verfestigungsreaktionen wird über eine Umrechnungsformel auf die Volumenabnahme durch Temperaturänderungen umgerechnet. Die formelmäßigen Zusammenhänge sind gegeben durch:

$$\frac{s}{100 \%} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1)$$

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \quad (2)$$

$$\Delta T = \frac{s}{100 \% \cdot \alpha} \quad (3) \quad [7]$$

Dabei ist s die Schwindung in %, ΔL die Längenänderung in m, L_0 die Ausgangslänge in m, ΔT die Temperaturdifferenz in K und α ein Umrechnungsfaktor, welcher in Anlehnung an den Wärmeausdehnungskoeffizienten in 1/K angegeben ist. Letzterer wurde auf den Wert $5 \cdot 10^{-4}$ 1/K festgelegt, um die größere Schwindung bei der Verwendung eines höheren Bindereintrags zur Verstärkung der Verzugseffekte zu simulieren.

Für die Schwindungsfunktion wird ein exponentieller Verlauf verwendet. Die eingesetzte Funktion ist in Anlehnung an das Modell von [7] entstanden. Eine Anpassung wurde notwendig, da die Funktion einen linearen Anteil enthielt, welcher sich keiner Schranke näherte. Somit kann kein vollständiges Ende der Verfestigung nach 24 Stunden dargestellt werden. Dementsprechend wird der lineare Anteil vernachlässigt und mit einer Streckung der Exponentialfunktion ausgeglichen. Die endliche Schranke liegt bei 0,75 %, was einem typischen Wert für die Schwindung entspricht.

Die in diesem Modell verwendete Funktion ist gegeben durch:

$$s(t) = 0,75 - 0,7 \cdot e^{-\frac{1}{3}t} \quad (4)$$

Der Verlauf dieser Funktion sowie der korrelierende Temperaturverlauf sind in Fig. 5 dargestellt. Die Temperaturfunktion ist nach Formel 4 für eine Umgebungstemperatur von 20 °C berechnet.

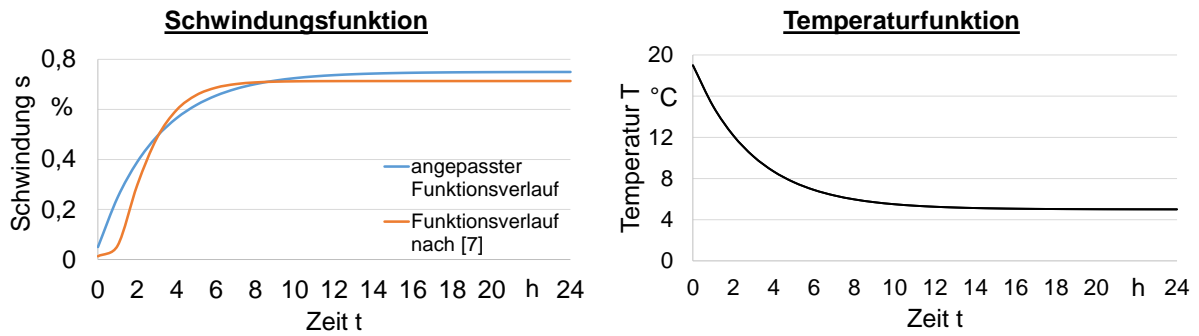


Fig. 5 Graph der berechneten Schwindungsfunktion (links) und der korrelierenden Temperaturfunktion (rechts)

Nach dem Einlesen der Funktion in die Makro-Datei folgt die Aktivierungsschleife der Schichten. Jede Schicht wird nach einem vorher festgelegten Zeitintervall aktiviert, um die Erzeugung der Schicht darzustellen. Direkt nach jeder Aktivierung folgt die Aufhebung der Ebenheitsfixierung. Der Aktivierungsschleife folgt die Temperaturschleife, die jeder Schicht nach dem festgelegten Zeitintervall die aus der Temperaturfunktion errechnete Temperatur zuweist. Folglich unterscheiden sich die Temperaturen und damit auch der aktuelle Schwindungszustand zwischen den Schichten in Abhängigkeit von deren Druckzeitpunkt. Ist die Zuweisung der Temperaturen in allen Schichten für einen Zeitpunkt erfolgt, wird zum nächsten Zeitpunkt übergegangen und es wiederholen sich die beschriebenen Prozessschritte.

5. Diskussion der Simulationsergebnisse

Nachfolgend sind in Fig. 6 die Ergebnisse der Simulation am Beispiel zweier Quader mit den Abmaßen 75 x 15 mm² und einer Dicke von 2,55 mm (oben) beziehungsweise 10,2 mm (unten) gezeigt. Der Wert für die Dicke beruht auf einer für den 3-D-Druck typischen Schichtstärke von 150 µm. Im Simulationsmodell wird eine Ersatzschichtstärke von 0,51 mm angewendet, um den überproportional steigenden Rechenaufwand zu reduzieren.

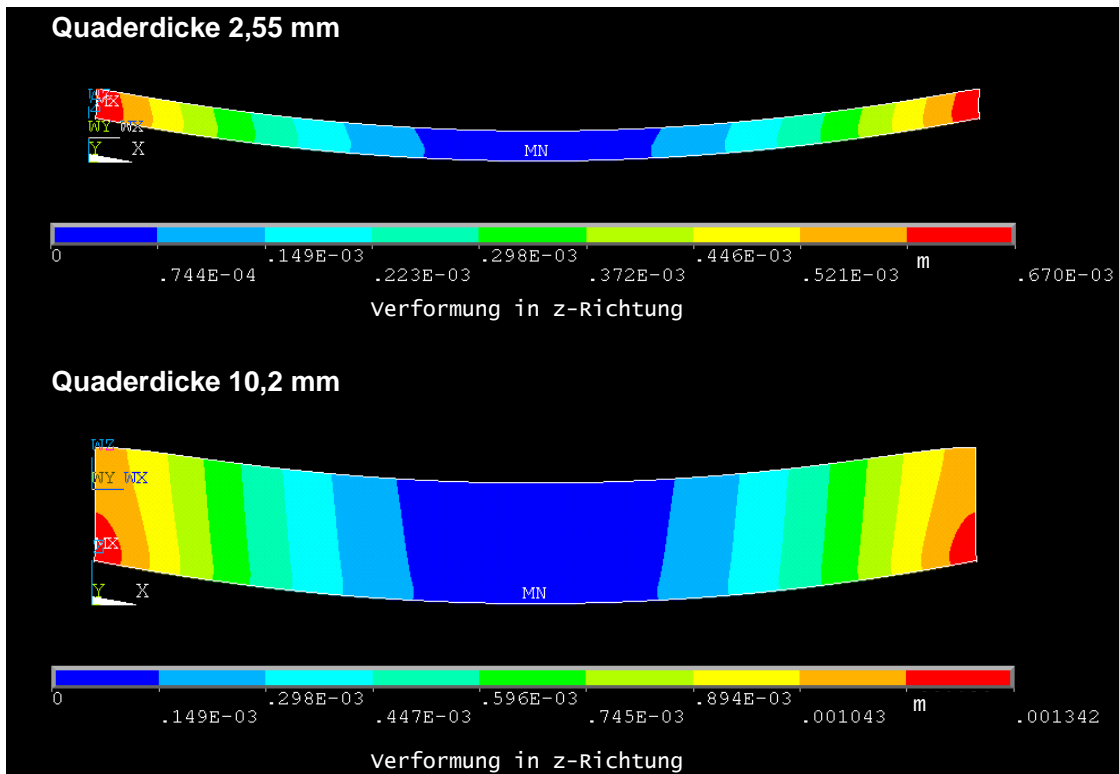


Fig. 6 Simulierte Verformungen eines Quaders mit einer Dicke von 2,55 mm und 10,2 mm

Die Abbildung zeigt, wie in Kapitel 2 beschrieben, eine parabelförmige Verformung des Bauteils infolge der induzierten Eigenspannungen. Die maximale Abweichung tritt erwartungsgemäß an den beiden Bauteilrändern auf. Zudem ist eine Abhängigkeit von der Bauteildicke festzustellen. Während bei einer Dicke von 2,55 mm (5 Schichten im Modell) die Aufbiegung des Bauteils auf Ober- und Unterseite annähernd gleich stark ist, wird bei dem Quader mit einer Dicke von 10,2 mm (20 Schichten im Modell) ein Rückgang des Fehlers auf der Oberseite festgestellt. Dies ist, wie in Kapitel 2 erläutert, auf die kontinuierliche Nivellierung der Oberfläche beim additiven Aufbau sowie die steigenden Biegesteifigkeit des Objekts mit zunehmender Höhe zurückzuführen, was im Modell durch die Fixierung der deaktivierten Schichten umgesetzt ist. Weiterhin besitzt die Bauteildicke einen Einfluss auf die Größe des Fehlers auf der Bauteilunterseite. In diesem Fall bewirkt eine Vervielfachung der Quaderdicke etwa eine Verdoppelung des maximalen Fehlers auf der Bauteilunterseite. Das lässt sich anhand der in Fig. 2 gezeigten Kraftübertragung zwischen den Schichten erklären. Durch die Fertigung einer höheren Anzahl an Schichten, welche zeitlich versetzt schwinden, steigt demnach auch das auf das Bauteil wirkende Gesamtbiegemoment. Schließlich tritt die Verformung nicht ausschließlich in Längsrichtung auf, sondern auch in der horizontalen Querrichtung dazu. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sowohl die thermisch induzierte Schwindung als auch die reale Schwindung einer Schicht in der horizontalen Ebene in allen Richtungen eintritt. Durch die geringere Länge ist der Verzug in Querrichtung jedoch schwächer ausgeprägt.

Ohne eine Fixierung der deaktivierten Schichten biegt sich das gesamte Bauteil und damit auch dessen Kanten durch den Lastfall auf, vergleiche [7]. Damit stehen die Kanten weiterhin senkrecht zur Unterseite. Die in Fig. 7 dargestellte Detailansicht der Bauteilkante aus Fig. 6 des 10,2 mm dicken Quaders zeigt ebenfalls einen Verzug, der sich einerseits aus einem Einfallen der Seitenfläche im unteren Bereich und andererseits aus einem Trapezfehler zusammensetzt. Diese Effekte sind mit der Fixierung der deaktivierten Schichten erstmalig aufgetreten und können auch bei realen Bauteilen festgestellt werden, vergleiche Fig. 10 in Kapitel 6. Ursächlich dafür sind die infolge der Fixierung auftretenden Spannungsspitzen an der Bauteilkante, siehe Fig. 7.

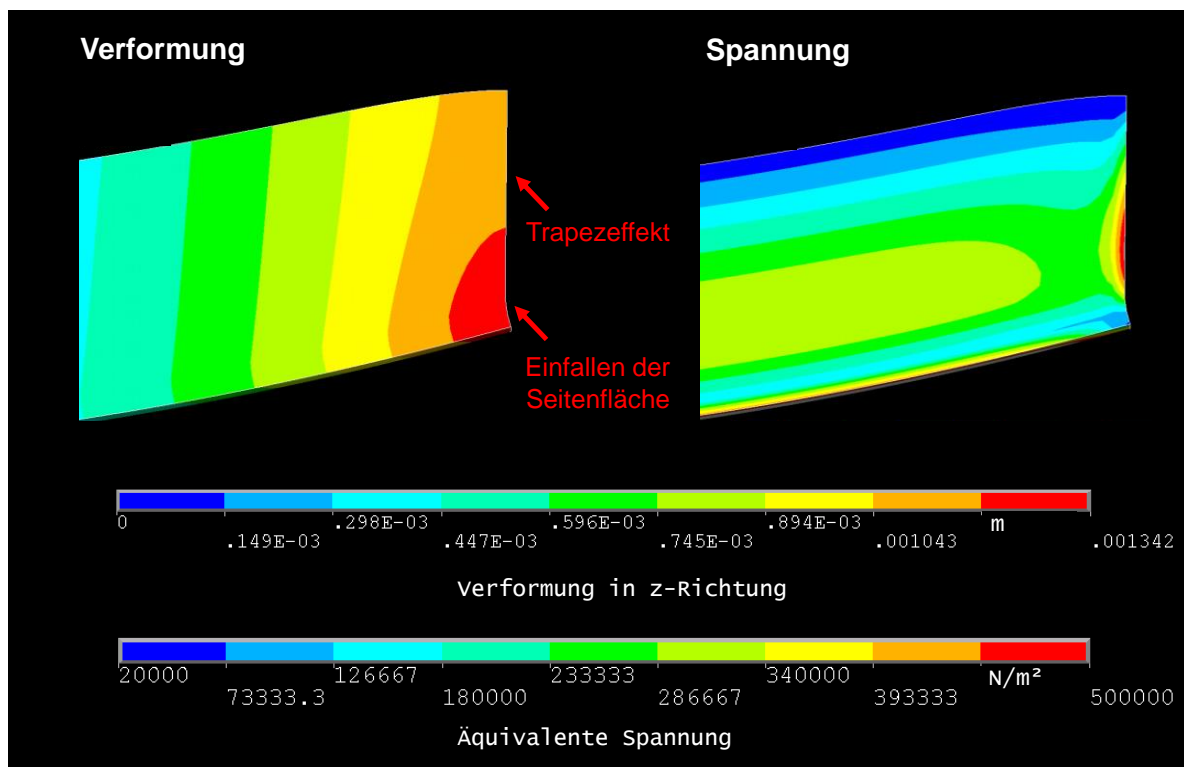


Fig. 7 Detailansicht der Verformung (links) und der Spannungen (rechts) an der Bauteilseite

6. Validierung und Bewertung der Ergebnisse

Zur Validierung des Modells wurden die Ergebnisse der Simulation mit realen Bauteilen verglichen. Als Referenz dienen die in Kapitel 5 aufgeführten Quader mit einer Dicke von 2,55 mm beziehungsweise 10,2 mm. Die Referenzobjekte wurden auf einer Testanlage für den 3-D-Druck, bezeichnet als VTS128 der Firma voxeljet AG, aus dem Materialsystem PolyPor A hergestellt. Für eine bessere Identifikation und Analyse des Verzugs wurde ein vergleichsweise hoher Bindereintrag von 25 % verwendet, um die auftretenden Deformationen zu verstärken. Im Standardprozess ist ein Eintrag von 10 – 15 % üblich. Der Bindereintrag ist definiert durch die eingebrachte Bindermenge bezogen auf die Pulvermasse in einem repräsentativen Volumenelement. Der erhöhte Bindereintrag führt zu einer größeren Schwindung von etwa 3 %, während die Schwindung unter üblichen Prozessbedingungen lediglich circa 0,7 – 1 % beträgt. Die Bauteile wurden mit einer Schichtstärke von 150 µm in flacher Orientierung bei einer mittleren Schichtzeit von etwa 40 s hergestellt und im Nachgang an den additiven Aufbauprozess mittels eines Streifenlichtprojektors der Firma Steinbichler digitalisiert. Fig. 8 zeigt die digitalisierten Messergebnisse sowie jeweils eine skalierte Seitenansicht der beiden Bauteile.

Messdaten der beiden Quader

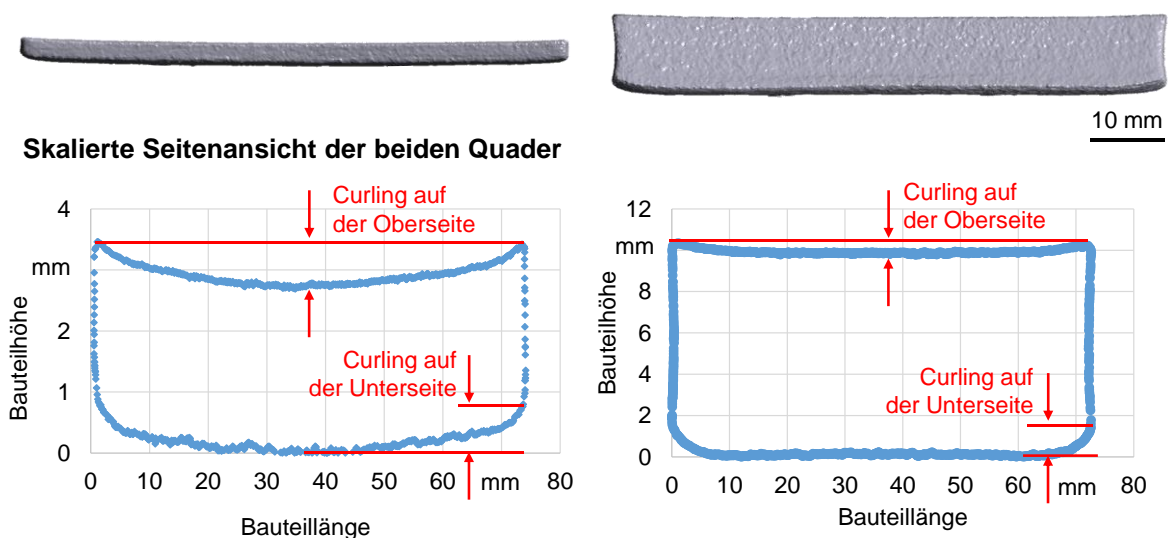


Fig. 8 Messdaten zweier repräsentativer Quader (oben) und die skalierte Seitenansicht (unten)

Die Untersuchung verdeutlicht, dass bei dünnen Bauteilen das Curling auf Unter- und Oberseite etwa gleich stark ausgeprägt ist. In diesem Fall beträgt die maximale Abweichung bei einer Bauteildicke von 2,55 mm an der seitlichen Kante etwa 0,75 mm. Mit zunehmender Bauteildicke steigt der Fehler an der Bauteilunterseite weiter an, während dieser auf der Oberseite abnimmt. Für eine Bauteildicke von 10,2 mm wurde auf der Bauteilunterseite ein maximaler Fehler von 1,2 mm und auf der Oberseite von 0,5 mm festgestellt. Durch Analyse zweier weiterer Referenzobjekte mit einer Dicke von 5,1 mm und 20,4 mm wurde in grober Näherung ein linearer Zusammenhang hinsichtlich der Fehlerzunahme auf der Oberseite und der Fehlerabnahme auf der Unterseite ermittelt, vergleiche Fig. 9. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, tritt der Fehler ab einer Dicke von etwa 20 mm auf der Oberseite nicht mehr auf, da sich der Fehler durch das kontinuierliche Aufbringen neuer, nivellierter Bauteilschichten ausgleicht.

Bei der Simulation ist eine Abweichung von etwa 0,67 mm auf Unter- und Oberseite für den 2,55 mm dicken Quader zu ermitteln, was einer Abweichung von etwa 10 % entspricht. Beim 10,2 mm starken Quader liegt die Verformung auf der Oberseite bei etwa 1 mm und auf der Unterseite bei etwa 1,3 mm. Der Vergleich mit den Messwerten, siehe Fig. 9, zeigt, dass der maximale Fehler auf der Unterseite mit dem bestehenden Modell bereits mit einer Ungenauigkeit von 10 % abgeschätzt werden kann. Auf der Oberseite wird ebenfalls ein Rückgang der maximalen Verformung im Vergleich zur Unterseite erreicht. Die bei den realen Bauteilen ermittelte Degression wurde mit den aktuell verwendeten Parametern noch nicht nachgebildet. Eine mögliche Verbesserung könnte durch eine Anpassung der Materialdaten, der Schwindungsfunktion und der Dauer eines Zeitintervalls erreicht werden.

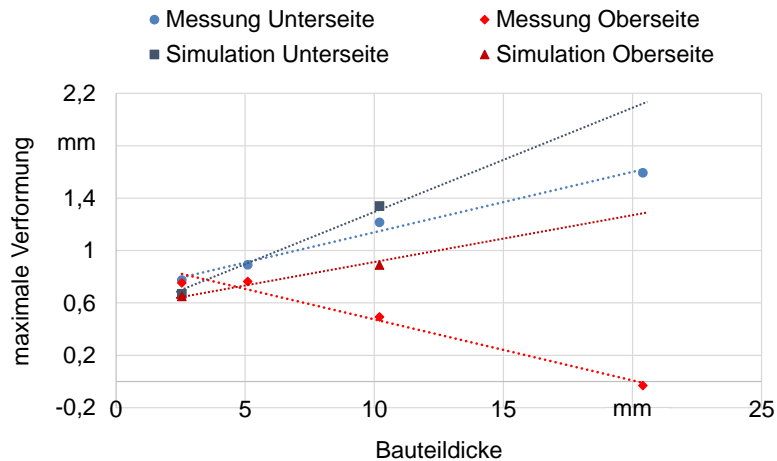


Fig. 9 Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messwerten

In der Simulation folgt die Verformung einer Parabel. In der Realität entsteht der Verzug mit zunehmender Bauteildicke vorrangig in den Randregionen des Bauteils. Dies ist auf die in Kapitel 2 angesprochene, schnellere Aushärtung von Randschichten sowie das Kriechen des Materials im Bauteilinneren zurückzuführen. Diese Effekte werden durch das vorgestellte Modell noch nicht abgebildet. Demnach können durch das aktuelle Modell zwar anhand des maximalen Fehlers Abhängigkeiten hinsichtlich der Geometrie ermittelt werden, die Formgenauigkeit der Simulation nimmt jedoch mit steigender Bauteildicke ab.

Ein weiterer Aspekt ist die Verformung der Seitenflächen infolge des schichtweisen Aufbaus. Fig. 10 zeigt eine Detailansicht der in Fig. 8 dargestellten Messdaten des 10,2 mm dicken Quaders. Die Abbildung veranschaulicht einerseits den in Kapitel 2 beschriebenen Trapezeffekt. Andererseits kann auch das in Kapitel 5 anhand der Simulationsergebnisse beschriebene Einfallen der Seitenflächen infolge des schichtweisen Aufbaus festgestellt werden.

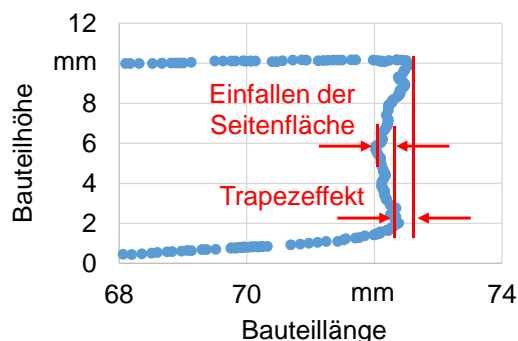


Fig. 10 Verformung der Bauteilkante des realen Testkörpers

Die Ergebnisse der Simulation entsprechen den Erwartungen auf der Basis des aufgegebenen Lastfalls. Durch das Modell konnten grundlegende Wirkmechanismen reproduziert und die getroffenen Annahmen für die Ursache des Verzugs validiert werden. Aufgrund der hohen Komplexität der physikalischen und chemischen Vorgänge bei der Verfestigung sind noch Abweichungen hinsichtlich der gewählten Parameter sowie der Verzugsform festzustellen. Die geplanten Maßnahmen zur Steigerung der Modellgüte werden nachfolgend aufgeführt.

7. Ausblick

Für eine Steigerung der durch die Verwendung des Modells erreichbaren Ergebnisgenauigkeit sollen die Materialeigenschaften an die Temperatur gekoppelt werden. Dadurch wird der Festigkeitsgewinn des Binders infolge der Aushärtungsreaktion über die Zeit simuliert. Demnach ist der E-Modul bei einer hohen Temperatur, was einem Zeitpunkt direkt nach dem Bedrucken entspricht, sehr niedrig zu wählen.

Mit dem Absenken der Temperatur zur Realisierung der Schwindung steigt somit auch die Festigkeit. Eine Weiterentwicklung dieses Ansatzes ist es, dem Material eine definierte Fließgrenze zuzuweisen, um Kriechvorgänge innerhalb des Objekts zu realisieren. Dadurch lässt sich der Spannungsabbau im Material modellieren, womit die Formgenauigkeit des Modells gesteigert werden kann. Als weiterer wichtiger Einflussfaktor auf das Verformungsverhalten ist die schnellere Aushärtung von Randschichten zu berücksichtigen. Diese könnte durch eine das Referenzobjekt umschließende Randschicht umgesetzt werden, welche als zusätzlicher Körper mit dem Bauteil gekoppelt ist. Durch eine raschere Abkühlung schwindet diese zeitlich schneller, womit auch früher höhere Festigkeitswerte erreicht werden.

Darüber hinaus sind die Materialdaten sowie das Schwindungsmodell weiter anzupassen, um die Genauigkeit der Simulation zu erhöhen. Daraufhin ist das wie beschrieben erweiterte Modell für verschiedene Geometrien und Bindereinträge zu validieren und zu dokumentieren. Abschließend werden die geplanten Weiterentwicklungen aufgrund der steigenden Komplexität des Modells zudem Maßnahmen zur Steigerung der Recheneffizienz erfordern.

8. Zusammenfassung

Der schichtweise Aufbau von Bauteilen führt im pulverbettbasierten 3-D-Druck zu Eigenspannungen und Verzug infolge der ortsabhängigen, zeitversetzten Schwindung der einzelnen Schichten während der Verfestigung des Materials. Die Folge sind Abweichungen in der Maß- und Formgenauigkeit der erzeugten Bauteile. Durch eine Vorhersage des zu erwartenden Verzugs mithilfe eines Simulationsmodells können Maßnahmen getroffen werden, um diesen Fehlern entgegenzuwirken.

Für die Realisierung eines Modelles wurde im Rahmen der hier beschriebenen Arbeiten, ausgehend von den für den Verzug ursächlichen Wirkprinzipien, das Problem für die Simulation abstrahiert und es wurden Anforderungen sowie Möglichkeiten für die Umsetzung vorgestellt. Der ausgewählte Ansatz bildet die Schwindung indirekt über die Wärmeausdehnung eines Materials ab. Die Geometrie wird dafür zu Beginn der Simulation in horizontal orientierte Schichtelemente zerlegt und vernetzt. Zur Abbildung der zeitversetzten Schwindung wird eine sogenannte „Birth-Life“-Funktion verwendet. Diese deaktiviert zunächst alle Schichten, indem die Materialeigenschaften gegen null gesetzt werden. In den nachfolgenden Schleifen werden die Schichten zeitversetzt aktiviert, wobei diese die im Materialmodell hinterlegten Eigenschaften erhalten. Zudem wird jeder Schicht basierend auf einer vorher definierten Schwindungsfunktion eine Temperatur zugewiesen, wobei die Wärmeleitung deaktiviert wurde. Als Folge der unterschiedlichen Längenänderungen durch die zeitversetzte Aktivierung entstehen Eigenspannungen im Bauteil, was sich durch eine Verformung äußern.

Durch das Modell kann sowohl ein aufbiegendes Verhalten, das sogenannte Curling, als auch eine Verformung der Bauteilkanten infolge des schichtweisen Aufbaus nachgebildet werden. Sowohl im Modell als auch bei realen Bauteilen tritt der stärkste Curling-Fehler in den Randbereichen der Bauteilunterseite auf. Mithilfe des vorgestellten Modells ist eine Vorabschätzung des maximalen Fehlers in Aufbaurichtung mit einer Abweichung von 10 % möglich. Darüber hinaus konnten Fehler infolge des zeitversetzten Aufbaus an den vertikalen Seitenflächen der Bauteile mithilfe der Simulation abgebildet werden. Als zukünftige Weiterentwicklungen des Modells werden eine Anpassung der Modellparameter zur Steigerung der Genauigkeit der Simulationsergebnisse und eine Verbesserung der Formgenauigkeit durch die Implementierung definierter Fließgrenzen sowie orts- und zeitveränderlicher Materialdaten angestrebt.

9. Danksagung

Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsprojekts „Intelligente Deformationskompensation im 3-D-Druck“ erarbeitet. Die Autoren danken der Bayerischen Forschungsförderung sowie den beteiligten Partnern herzlich für ihre Unterstützung und die gute Zusammenarbeit. Informationen zum Projekt sowie zu den beteiligten Partnern sind unter folgendem Link zu finden:

<http://www.forschungsforderung.de/index.php/Projekte/Details/Intelligente-Deformationskompensation-im-3D-Druck-IDe3D.html>

10. References

- [1] Gebhardt, A.: "Generative Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion", 4. Aufl., Carl Hanser 2013.
- [2] Zäh, M. F.: „Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien: Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren“, Carl Hanser 2006.
- [3] VDI 3404: „Additive Fertigung - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen“, Beuth 2014.
- [4] Gibson, I.; Rosen, D. W.; Stucker, B.: “Additive Manufacturing Technologies”, Springer 2010.
- [5] Wohlers, T.: „Wohlers Report 2014: 3D Printing and Additive Manufacturing State of industry“, Wohlers Associates 2014.
- [6] Eschey, C.: „Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung“, Utz 2013.
- [7] Kellner, I.: „Materialsysteme für das pulverbettbasierte 3D-Drucken“, Utz 2013.
- [8] Günther, D.; Heymel, B.; Günther, J. F.; Ederer, I.: „Continuous 3D-printing for additive manufacturing“, Rapid Prototyping Journal Vol. 20 Iss 4, 2014, S. 320-327.
- [9] Schmutzler, C.; Günther, D.; Zäh, M. F.: „Minimierung der Deformationen von 3-D-gedruckten Bauteilen“, 18. Augsburger Seminar für Additive Fertigung, Utz 2014.
- [10] Jacobs, P.: „The effects of random noise shrinkage on rapid tooling accuracy“. Materials & Design vol. 21, 2000, S. 127-136.
- [11] Held, M.; Pfligersdorffer, C.: „Correcting warpage of laser-sintered parts by means of a surface-based inverse deformation algorithm“, Engineering with Computers 25 (4), 2009, S. 389-395.
- [12] Hughes, T. J. R.: „The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis“, Dover Publ. 2000.
- [13] Seidel, C.; Zaeh, M. F.; Weirather, M.; Krol, T. A.; Schilp, J.; Groth, C.; Stroebele, B. S.: „Simulation of the laser beam melting process – an approach for an efficient geometry modelling of complex lightweight parts“, Procedia CIRP 25, 2014, S. 146–153.
- [14] Müller, G.; Groth, C.: „FEM für Praktiker – Band1: Grundlagen“, Expert 2007.
- [15] Müller, G.; Groth, C.: „FEM für Praktiker – Band3: Temperaturfelder“, Expert 2009.
- [16] Branner, G.: „Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren“, Utz 2010.