

Zusammenfassung der Promotionsschrift

**Ein kombiniertes experimentelles und numerisches
Multiskalenverfahren zur Simulation des anisotropen
Materialverhaltens des additiv gefertigten Stahls 316L für
große plastische Verformungen und unter Berücksichtigung
der Mikrostrukturevolution**

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Amir Charmi

(externer Doktorand)

geboren am 14.04.1992 in Teheran, Iran

Akademischer Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Könke

28.03.2023

Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

1. Additive Fertigung ist ein Sammelbegriff zur Beschreibung der Herstellungsverfahren, bei denen die Bauteile schichtweise aufgebaut werden. Diese Verfahren unterscheiden sich in eingesetzten Ausgangsmaterialien und Herstellungsmethoden. Dabei gehört das pulverbettbasierte Laserstrahlschmelzen zum bekanntesten und meistverbreiteten Verfahren zur additiven Fertigung metallischer Bauteile. Bei diesem Verfahren werden dünne Schichten von metallischen Pulvern aufeinander aufgetragen und mittels einer Laserquelle zum Schmelzen gebracht. Dies ist ein innovatives und vielversprechendes Herstellungsverfahren, das neue Produktionsmöglichkeiten eröffnet, die sonst mit konventionellen Verfahren nicht möglich oder finanziell nicht tragbar wären. Dazu zählen z.B. die Herstellung von Einzelprototypen, gezielte Optimierung von Mikrostrukturen, die Herstellung gradiertener Funktionswerkstoffe oder sehr komplexer Bauteilgeometrien, die für spezielle Anwendungen optimiert sind.
2. Die Massenadaptation ist jedoch dadurch beschränkt, dass die Materialeigenschaften der additiv gefertigten Werkstoffe nicht identisch zu ihren konventionell gefertigten Gegenstücken sind. Dabei spielen Eigenspannungen, Poren, Risse, erhöhte Versetzungsdichten, Anisotropie sowie andere mögliche Faktoren eine wichtige Rolle. Für viele Anwendungen, insbesondere in sicherheitskritischen Bereichen, stellen diese Unsicherheiten eine Herausforderung dar. Dabei gehört insbesondere die Anisotropie zu den Problemen, die in additiv gefertigten Bauteilen nicht vollständig analysiert sind und oft vernachlässigt werden. Die mechanische Anisotropie beschreibt die Richtungsabhängigkeit der Materialeigenschaften, wie z.B. das Elastizitätsmodul oder die Streckgrenze, und hat somit einen großen Einfluss auf das Bauteilverhalten. Auf der Untersuchung und Modellierung der Anisotropie liegt der Fokus dieser Arbeit.
3. Die Ursache für die Existenz von Anisotropie in additiven gefertigten Bauteilen aus Stahl 316L ist bislang nicht systematisch untersucht worden. Aus diesem Grund liegt der erste Schritt dieser Arbeit in der experimentellen Charakterisierung der Ursache der Anisotropie. Danach werden numerische Methoden angewandt, um sowohl die elastische als auch die plastische Anisotropie zu modellieren und vorherzusagen. Es wird gezeigt, wie die Anisotropie auf Mikro- und auf Bauteilskala modelliert werden kann. Zudem wird die Mikrostrukturevolution bei großen plastischen Verformungen berücksichtigt, um die Genauigkeit der Simulationsergebnisse auf der Bauteilskala zu verbessern. Die Ergebnisse dieser Arbeiten führen zu einem Erkenntnisgewinn bzgl. der Anisotropieursachen sowie der Anisotropiebeschreibung, der in weitergehenden Untersuchungen bzw. Entwicklungen Eingang finden wird.

Stand der Wissenschaft

4. Es ist bereits bekannt, dass die Mikrostruktur der additiv gefertigten Bauteile im Vergleich zu ihren konventionell hergestellten Gegenstücken Unterschiede aufweisen, die sehr stark von den eingesetzten Prozessparametern, wie z.B. der Scanstrategie oder der Lasergeschwindigkeit, abhängen.
5. In der Literatur werden als Ursachen oftmals Poren, Schmelzgrenzen, Eigenspannungen, kristallografische und morphologische Texturen für die Existenz

der Anisotropie im Stahl 316L genannt. Eine umfassende experimentelle Analyse diesbezüglich existiert für den additiv gefertigten Stahl 316L jedoch nicht.

6. Es ist außerdem nicht klar, ob die bereits existierenden Materialmodelle auf der Mikro- und Makroskala, die für konventionell hergestellte Metalle entwickelt wurden, auch zur Modellierung des anisotropen Materialverhaltens des additiv gefertigten Stahls 316L verwendet werden können und ob weitere Deformationsmechanismen bzw. Modellerweiterungen ggf. zu berücksichtigen sind oder nicht.
7. Es wurde in vorangegangenen Arbeiten bereits gezeigt, dass die Texturevolution in polykristallinen Metallen auf der Mikroskala mit einem Kristallplastizitätsmodell mit hoher Genauigkeit vorhergesagt werden kann. Die Modellierung der Texturevolution auf der Bauteilskala mit einem Kristallplastizitätsmodell ist jedoch mit erheblichem Rechenaufwand und Schwierigkeiten verbunden. Daher wurden alternative Methoden entwickelt, die den Einfluss der Texturevolution während großer plastischer Verformungen für dünnwandige Strukturen berücksichtigen. Diese Ansätze wurden jedoch im zweidimensionalen Raum formuliert, wodurch der Modellierungsaufwand erheblich verringert wird. Dreidimensionale Modelle für die Bauteilskala sind nicht weiter erforscht worden.

Eingesetzte Methoden

8. Mechanische Versuche an Rundzug-, Scher- und Torsionsproben wurden durchgeführt, um das anisotrope elasto-plastische Materialverhalten für mehrere Raumrichtungen und Belastungsarten experimentell zu charakterisieren. Zusätzlich wurden mit Hilfe der Resonanzmethode die Elastizitätsmoduln für unterschiedliche Raumrichtungen experimentell ermittelt, um die Ergebnisse der mechanischen Zugversuche zu validieren.
9. Die Porositätsmessung in den Rundzugproben erfolgte mit der Mikro-Computertomografie (μ -CT). Die Eigenspannungen in den Rundzugproben und deren Evolution während eines Zugversuches wurden mittels Neutronenbeugung untersucht. Die kristallografischen und morphologischen Texturen in den additiv gefertigten Proben wurden mittels Elektronenrückstreubeugung (EBSD) analysiert.
10. Die Modellierung des elasto-plastischen Materialverhaltens auf der Mikroskala erfolgte durch den Einsatz eines Kristallplastizitätsmodells mit dem Versetzungsgleiten als Hauptdeformationsmechanismus. Dabei wurde das Kristallplastizitätsmodell mit den experimentellen Zugversuchsergebnissen kalibriert und validiert. Das Kristallplastizitätsmodell wurde weiterhin verwendet, um die Entwicklung der Gitterdehnungen während eines Zugversuches zu analysieren, die Evolution der kristallografischen Textur vorherzusagen und virtuelle Experimente durchzuführen. Diese virtuellen Experimente ermöglichten die Simulation beliebiger Belastungsfälle, die experimentell nicht möglich waren und dienten zur Kalibrierung des Makroskalenmodells.
11. Die konstitutiven Modelle auf der Makroskala wurden in der kommerziellen Finite-Elemente-Software Abaqus implementiert. Dabei wurde die UMAT-Schnittstelle benutzt. Die konstitutiven Materialparameter wurden mit Hilfe virtueller Experimente kalibriert. Die Validierung erfolgte durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Scher- und Torsionsversuchen.

Wesentliche Ergebnisse

12. Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Porosität und die Eigenspannungen in den additiv hergestellten Proben sehr niedrig waren und sie daher keinen nennenswerten Einfluss auf die Anisotropie haben. Zudem konnte nachgewiesen werden, dass die elastischen Eigenschaften des additiv gefertigten Stahls 316L größtenteils nur von den elastischen Eigenschaften des einkristallinen Stahl 316L und der kristallografischen Textur abhängig sind. Außerdem konnte das elasto-plastische Verformungsverhalten während des Zugversuches mittels eines Kristallplastizitätsmodells mit hoher Genauigkeit vorhergesagt werden. Dabei war die größte Abweichung zwischen den experimentellen Zugversuchsergebnissen und Kristallplastizitätssimulationen weniger als 5% nach 0,4% Dehnung und blieb unter 3% nach 2,5% Dehnung. Diese Ergebnisse zeigten, dass die Anisotropie in dem additiv gefertigten Stahl 316L infolge der kristallografischen Textur zustande kommt, die wiederum signifikant von ausgewählten Prozessparametern abhängt.
13. Außerdem konnte mit Hilfe des kalibrierten und validierten Kristallplastizitätsmodells und der Neutronenbeugungsexperimente gezeigt werden, dass die bereits existierenden Modelle auf der Mikroskala die Deformationsmechanismen im untersuchten additiv gefertigten Stahl 316L gut abbilden.
14. Ferner wurde ein neues konstitutives Modell zur Berücksichtigung der Texturevolution auf der Makroskala für dreidimensionale Bauteile formuliert. Dieser Ansatz wurde aus konsistenten mechanischen Entwicklungsgleichungen abgeleitet und war in den bereits existierenden Modellen bislang weder enthalten noch in Diskussion. Dieses Materialmodell auf der Makroskala wurde erfolgreich mit den virtuellen Experimenten kalibriert, welche die Stärke der Multiskalen-Simulationsverfahren illustrieren, da für die Kalibrierung des Mikro- und Makroskalenmodells nur wenige experimentelle Versuche nötig waren.
15. Des Weiteren wurden verschiedene Modelle und numerische Implementierungsstrategien miteinander verglichen. Dabei wurde gezeigt, dass das konstitutive Modell, welches die Mikrostrukturevolution berücksichtigte, die experimentellen Ergebnisse sehr gut vorhersagen konnte und somit das genaueste Modell war. Dies war bei dem Scherversuch und insbesondere bei größeren Verformungen deutlich zu erkennen, da die Abweichung zwischen dem Experiment und der Simulation für das Modell mit der Mikrostrukturevolution weniger als 2% und für die Standardimplementierung mehr als 10% war.
16. Diese Untersuchungen haben weiterhin verdeutlicht, dass die Mikrostrukturevolution, die elastische und die plastische Anisotropie einen erheblichen Einfluss auf die Simulationsgenauigkeit haben und dass sie selbst für relative schwache kristallografische Texturen nicht vernachlässigt werden dürfen. Es wurde ebenso demonstriert, dass die korrekte Auswahl der numerischen Implementierungsstrategie für die Simulationsgenauigkeit eine entscheidende Rolle spielt.
17. Die existierenden Simulationen und Modelle stellen für zukünftige Untersuchungen und Entwicklungen ein Instrument dar, welches grundsätzlich ermöglicht, die für die Anisotropie ursächlichen Faktoren numerisch zu studieren und das daraus resultierende Bauteilverhalten zu modellieren.