



## Bachelorarbeit/Masterarbeit

**Thema:** Untersuchung der Gefügebildung im festen Zustand unter dem Einfluss alternierender Wärmeeinträge bei der DED-LB-Prozessierung eines Warmarbeitsstahls

**Betreuer:** Jonathan Hann, M.Sc.

**1. Prüfer:** Univ.-Prof. Dr.-Ing. Arne Röttger (Bergische Universität Wuppertal)

### Einleitung/Hintergrund:

Die Directed Energy Deposition (DED) zählt zu den vielversprechendsten Technologien im Bereich der additiven Fertigung. Sie zeichnet sich durch eine hohe Materialauftragsrate und Bauraumfreiheit aus, was DED insbesondere für industrielle Anwendungen attraktiv macht. Im Kontext der Verarbeitung von Warmarbeitsstählen für die Werkzeugproduktion stellt jedoch die Kaltrissbildung eine bedeutende Herausforderung dar. Neben der Optimierung der Prozessparameter bietet der Low-Transformation-Temperature (LTT)-Ansatz eine vielversprechende Möglichkeit, die Kaltrissbildung zu minimieren. Dies erfolgt durch gezielte Anpassungen der Legierungszusammensetzung.

Ein fundiertes Verständnis des Einflusses des alternierenden Wärmeeintrags, der durch die schichtweise Materialapplikation entsteht, ist essenziell für die Entwicklung solcher Werkstoffe. Diese Arbeit untersucht den Einfluss des Wärmeeintrags während der DED-Prozessierung eines LTT-Warmarbeitsstahls auf die Gefügeausbildung im festen Zustand. Ziel ist es, die Zusammenhänge zwischen Wärmeeintrag, Wärmeableitung und der resultierenden Gefügestruktur zu analysieren, um ein tieferes Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Prozessparametern und Werkstoffverhalten zu schaffen.

### Ziel:

Das Hauptziel dieser Arbeit besteht darin, experimentell zu untersuchen, wie der alternierende Wärmeeintrag infolge der schichtweisen Materialapplizierung während der DED-LB-Prozessierung den Gefügebildungsprozess eines LTT-Warmarbeitsstahls beeinflusst.

### Wissenschaftlich-technologische Fragen:

- Wie lässt sich das Erstarrungsverhalten eines Warmarbeitsstahls unter dem Einfluss des alternierenden Wärmeeintrags systematisch beschreiben?
- In welcher Weise beeinflussen variierende Probengeometrien die Entstehung von Wärmeakkumulationen oder Wärmesenken während der DED-LB-Prozessierung?
- Welche Erkenntnisse über das Erstarrungsverhalten und die zyklische In-Process-Wärmebehandlung können mithilfe von DED-System-Analytik (z. B. Pyrometer, Highspeed-Kameras, Infrarotkameras) gewonnen werden?
- Welche Zusammenhänge bestehen zwischen unterschiedlichen Scanstrategien, der Anzahl der Schichten und den resultierenden Gefügestrukturen im Bauteil?
- Wie gut stimmen thermodynamisch berechnete Erstarrungsverläufe, basierend auf experimentell ermittelten Temperatur-Zeit-Profilen, mit den tatsächlich beobachteten Werten überein?



## Vorgehen:

### **AP1            Literaturrecherche**

Zu Beginn wird der aktuelle Stand der Forschung zu den Themen „Directed Energy Deposition (DED)“, „additive manufacturing“, „hot work tool steel“, „Low-Transformation-Temperature (LTT) Steels“ und „cycling heat input“ erfasst. Die Recherche erfolgt auf Plattformen wie Google Scholar, Elsevier, Springer und Wiley, um relevante Studien und Veröffentlichungen zu identifizieren, die als Grundlage für die Analyse des Erstarrungsverhaltens dienen.

### **AP2            DED-LB-Probenfertigung**

Zur Untersuchung der Gefügebildung werden mehrlagige Proben mit unterschiedlichen Geometrien durch DED-LB gefertigt, wobei systematisch verschiedene Scanstrategien eingesetzt werden. Der Fertigungsprozess wird dabei unter Verwendung thermographischer und bildanalytischer Methoden überwacht, um die Prozessdynamik zu identifizieren. Vorab wird ein Forschungsplan entwickelt, der die Auswahl der Strategien und Geometrien begründet.

### **AP3            Durchführung von thermodynamischen Berechnungen unter Verwendung der Software Thermo-Calc® (in Masterarbeit vertieft)**

Thermodynamische Simulationen der Gefügeentwicklung unter Berücksichtigung des zyklischen Wärmeeintrags stehen im Fokus dieses Arbeitsschritts. Mithilfe der Software Thermo-Calc® und des Zusatzmoduls DICTRA® sowie aktueller thermodynamischer und Mobilitätsdatenbanken werden die Simulationen durchgeführt. Zu Beginn erfolgen grundlegende Berechnungen, wie die Erstellung von Phasenmengendiagrammen und die Analyse der Stabilität von Martensit und Restaustenit für den ausgewählten Warmarbeitsstahl. Darauf aufbauend werden DICTRA-Simulationen entwickelt, um die Wärmeeinbringung auf basierend auf Temperatur-Zeit-Profilen aus AP2 realitätsnah zu modellieren.

### **AP4            Analyse des Gefügebildungsprozesses im Festen anhand von werkstoffkundlichen Untersuchungen**

Die in AP2 gefertigten Proben werden hinsichtlich ihres Gefügebildungsprozesses unter dem Einfluss des alternierenden Wärmeeintrags untersucht. Für die Analyse werden unterschiedliche methodische Ansätze genutzt, darunter metallographische Verfahren wie Licht- und Rasterelektronen-mikroskopie. Zur Phasen- und Eigenspannungsanalyse kommen röntgendiffraktographische Verfahren sowie Elektronenrückstreubeugung (EBSD) zum Einsatz. Diese Untersuchungen werden durch mechanische Prüfverfahren, insbesondere Härteprüfungen, ergänzt, um die Korrelation zwischen Gefüge und mechanischen Eigenschaften zu bewerten. Gegeben falls werden zusätzlich in-site und ex-situ Experimente zur Phasenquantifizierung unter Nutzung des Elektronenbeschleunigers DELTA am Zentrum für Synchrotronstrahlung in Dortmund durchgeführt.

### **AP5            Vergleich der simulativ gewonnenen Erkenntnissen mit den experimentellen Ergebnissen**

Dieses Arbeitspaket widmet sich dem systematischen Vergleich der mittels Thermo-Calc® erzielten Ergebnisse aus AP3 mit den experimentellen Erkenntnissen aus AP2 und AP4. Dabei werden die Simulationsergebnisse kritisch analysiert, mögliche Abweichungen aufgezeigt und auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse interpretiert. Ziel ist es, die Ursache von Abweichungen zu identifizieren und Rückschlüsse auf die Modellannahmen oder experimentellen Bedingungen zu ziehen, um das Verständnis für die zugrunde liegenden Gefügebildungsprozesse zu vertiefen.



## **AP6**      **Verschriftlichung**

Abschließend werden die Ergebnisse ausgewertet und die Fragestellungen in einer Diskussion beantwortet. Der Fokus liegt auf dem Einfluss des zyklischen Wärmeeintrags sowie dem Vergleich simulativer und experimenteller Daten. Abschließend werden Empfehlungen für Forschung und Praxis formuliert und die Ergebnisse in einem wissenschaftlichen Bericht zusammengefasst.