

## Teilprojekt A3

### Titel

Massiv parallelisierte Simulation der Schmelzbaddynamik des Laserstrahl-Mikroschweißens mit modernen numerischen Verfahren

### Projektleitung/-bearbeitung

Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Schulz/M.Sc. Christoph Schöler  
Lehr- und Forschungsgebiet Nichtlineare Dynamik der Laser-  
Fertigungsverfahren NLD, RWTH Aachen

### Aufgabenstellung

Im laufenden Jahr werden folgende Aufgabenstellungen adressiert:

- Integration des Kapillarmodells in ein hybrides Prozessmodell zur Berechnung von dreidimensionalen Temperaturverteilungen
- Prozessuntersuchungen zum Mikroschweißen von Kupferwerkstoffen mit infraroter und grüner Laserstrahlung
- Entwicklung eines Strömungsmodells für die Mushy-Zone

### Vorgehensweise

Das zuvor entwickelte quasistationäre Kapillarmodell wird verwendet, um dreidimensionale Temperaturverteilungen mithilfe eines schnellen Löser für die Wärmeleitungsaufgabe zu berechnen. Hierzu werden die Absorptionsbeiträge auf der Werkstückoberseite und die auf der Kapillaroberfläche durch zwei separate Wärmequellen berücksichtigt. Der Beitrag der direkt einfallenden Strahlung auf der Werkstückoberseite wird als verteilte Oberflächenquelle behandelt. Die Anteile der absorbierten Intensität von direkt einfallender sowie reflektierter Laserstrahlung auf der Kapillaroberfläche werden integriert und in Form einer Volumenquelle mit entsprechender Gesamtleistung vorgegeben. Mit analytischen Lösungsmethoden lassen sich daraus dreidimensionale Temperaturverteilungen effizient berechnen.

Für Mikroschweißungen in den Kupferwerkstoffen Cu-ETP sowie CuSn6 werden Parameterstudien durchgeführt. Es werden das Wärmeleitungsschweißen mit Laserstrahlung im grünen Wellenlängenbereich und das Tiefschweißen mit Laserstrahlung im grünen und infraroten Wellenlängenbereich untersucht. Die Berechnung der Temperaturen beim Wärmeleitungsschweißen erfolgt mithilfe von analytischen Methoden zur Lösung der Wärmeleitungsaufgabe; die Berechnung der geometrischen Kapillarform erfolgt anhand des quasi-stationären Kapillarmodells. Die Simulationsergebnisse werden mit experimentellen Ergebnissen aus Teilprojekt A1 abgeglichen.

Zur Beschreibung der Mushy-Zone wird ein Enthalpie-Porositäts-Modell nach Voller und Prakash<sup>1</sup> verwendet. Der Phasenübergang zwischen fester und flüssiger Phase wird über den Flüssigphasenanteil, der eine kontinuierliche Funktion der Temperatur ist, modelliert. Dieser funktionale Zusammenhang wird zunächst vorgegeben. Über den Flüssigphasenanteil werden der Anteil der latenten Wärme sowie ein Druckabfall analog zur Carman-Kozeny-Gleichung ausgedrückt. Flüssige und feste Phase werden somit durch ein gemeinsames Kontinuum beschrieben, für das Randbedingungen nur am Rand des Berechnungsgebietes oder an der Kapillaroberfläche zu wählen sind. Für die Implementation des Enthalpie-Porositäts-Modells wird die quelloffene C++-Bibliothek DUNE<sup>2</sup> verwendet. Diese Wahl begründet sich durch den modularen Aufbau von DUNE mit generischen Schnittstellen für Rechengitter und Funktionsräume und durch die Möglichkeit, verschiedene gitterbasierte numerische Verfahren (FEM, FVM, FDM) verwenden zu können.

### **Ergebnisse**

Anhand von Temperaturberechnungen wurden Prozessfenster des Wärmeleitungsschweißens unter der Variation von Laserleistung und Strahldurchmesser für die Werkstoffe Cu-ETP und CuSn6 abgeschätzt. Die Wahl der Parameter folgte mit der Absicht, verfügbare Laserstrahlquellen im grünen Wellenlängenbereich in den Parameterraum einordnen zu

---

<sup>1</sup> Voller, V. R. und C. Prakash. Int. J. Heat Mass Transfer 30, Nr. 8 (1987): 1709–19.

<sup>2</sup> <https://www.dune-project.org/>

können und somit das Potential für die Entwicklung neuer Laserstrahlquellen aufzuzeigen. Aus den Ergebnissen lässt sich entnehmen, dass ein Bedarf an leistungsstärkeren Quellen für das Tiefschweißen von Cu-ETP besteht, während dies für CuSn6 mit einigen der verfügbaren Laserstrahlquellen bereits in einem größeren Parameterbereich möglich ist. Die Ursache hierfür liegt in der um einen Faktor fünf größeren Wärmeleitfähigkeit von Cu-ETP bei ansonsten vergleichbaren Eigenschaften. Die Ergebnisse wurden in Kooperation mit Teilprojekt A1 zur Veröffentlichung eingereicht.

Zur Validierung des Kapillarmodells wurden Parameterstudien an Tiefschweißungen in Cu-ETP mit grüner Laserstrahlung durchgeführt. Die aus der Simulation berechneten Kapillartiefen wurden mit experimentell ermittelten Tiefen der Schweißnaht abgeglichen. Aufgrund experimenteller Unsicherheiten im optischen Aufbau musste der Absorptionsgrad an Referenzmessungen kalibriert werden. Nach dieser Anpassung lieferten die Berechnungen der Kapillartiefen, unter Berücksichtigung der Prozessschwankungen, mit den Experimenten verträgliche Ergebnisse. Inwieweit sich das Modell für einen größeren Parameterbereich für prädiktive Aussagen eignet und die berechneten Kapillartiefen mit den realen übereinstimmen, bleibt zu prüfen.

Anhand von Berechnungen der Kapillartiefen für verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten im Bereich 3 m/min bis 15 m/min wurde die Sensitivität des Tiefschweißprozesses auf Änderungen des Vorschubs untersucht. Hierbei konnten unterschiedliche Sensitivitäten bei Verwendung von grüner bzw. infraroter Laserstrahlung ermittelt werden. Die Ergebnisse für den infraroten Laser zeigen eine deutlich steilere Tendenz für die Abnahme der Kapillartiefe bei wachsendem Vorschub. Diese Tendenz stimmt mit experimentellen Befunden aus Teilprojekt A1 überein. Zurückzuführen ist dies auf das stark unterschiedliche Absorptionsverhalten von Kupferwerkstoffen bei den betrachteten Wellenlängen. Weiterhin deuten die Ergebnisse aus der Simulation auf eine stark unterschiedliche geometrische Form der Kapillare hin.

Das Enthalpie-Porositäts-Modell wurde in Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten in den Arbeitskreisen M2, M3 und M4 diskutiert. Hierbei wurde unter anderem ein Methodenvergleich mit anderen Modellen für die Beschreibung des Phasenübergangs zwischen fester und flüssiger Phase durchgeführt. Es lassen sich folgende Ergebnisse festhalten. Das Enthalpie-Porositäts-Modell entspricht einem Volume-of-Fluid-Ansatz mit temperaturabhängigem Flüssigphasenanteil  $f(T)$ . Der funktionale Zusammenhang  $f(T)$  kann aus Berechnungen auf der Gefügeskala abgeleitet werden. Bei kleiner Mushy-Zone, d. h. kleinen Temperaturintervallen zwischen Solidus- und Liquidustemperatur, können durch große Temperaturgradienten numerische Probleme entstehen. Eine gleichzeitige, gekoppelte strukturmechanische Berechnung im festen Material ist aufgrund der Modellgleichungen nicht möglich. Teilprojekt B5 hat einen Benchmark-Fall der Methode in einem Szenario, das durch natürliche Konvektion dominiert ist, vorgestellt.

Die Implementation des Enthalpie-Porositäts-Modells in DUNE erfolgt schrittweise. Zunächst wurden die Gleichung für die Enthalpie sowie die Navier-Stokes-Gleichung separat behandelt, um die Lösungseigenschaften vorhandener Löser an Testfällen zu untersuchen. Die Diskretisierung der Differenzialgleichungen wurde mithilfe des Moduls PDELab umgesetzt. Die Berechnung der Enthalpie konnte damit effizient realisiert werden. Durch eine Parallelisierung mit einer Domain-Decomposition-Methode ließ sich ein hier Speedup erzielen. Die Lösung der Navier-Stokes-Gleichung konnte ebenfalls mit den Funktionalitäten von PDELab durchgeführt werden. Allerdings ließ sich hier die Parallelisierung nicht zielbringend umsetzen, da sie unter anderem keinen Speedup brachte. Zudem zeichnen sich durch die Berechnungen in drei Dimensionen Rechenzeiten für das volle Schweißproblem ab, die maximal zu Einzelergebnissen führen können, jedoch nicht für Parameterstudien geeignet sind.

### **Zusammenfassung und Ausblick**

Die Berechnungen der Temperaturverteilungen beim Wärmeleitungsschweißen und die Berechnungen der Kapillartiefen beim Tiefschweißen mithilfe des reduzierten

Kapillarmodells liefern wichtige Erkenntnisse über das Mikroschweißen von Kupferwerkstoffen. Hierzu zählen die Einordnung verfügbarer Laserstrahlquellen in den Prozessparameterraum des Wärmeleitungsschweißens und die Parameterabhängigkeiten der Kapillartiefe bzw. der damit korrelierenden Einschweißtiefe unter Verwendung von Laserlicht im grünen bzw. infraroten Wellenlängenbereich. Berechnungen der dreidimensionalen Temperaturverteilungen beim Tiefschweißen in Abhängigkeit von den Prozessparametern und ein Vergleich der resultierenden Schmelzbäder mit Quer- und Längsschliffen aus Experimenten stehen aus.

Bei der Implementation des Enthalpie-Porositäts-Modells in DUNE lassen sich erste Erfolge verzeichnen. Die Performanz der einzelnen Löser für Enthalpie und Strömungsgeschwindigkeit wurde getestet. Aufgrund der Einschränkung bei der Lösung der Navier-Stokes-Gleichung werden im weiteren Verlauf auch andere Lösungsverfahren als die von PDELab bereitgestellten in Betracht gezogen. Ein besonderes Augenmerk liegt hierbei auf die Parallelisierbarkeit. Die Kopplung der Teilaufgaben wird zunächst für das Wärmeleitungsschweißen geschehen. Bei erfolgreicher Umsetzung folgt die Beschreibung des Tiefschweißprozesses, bei dem die Schweißkapillare als zusätzlicher Rand in das Berechnungsgebiet eingebettet wird.

Die nächsten Arbeitspunkte lauten:

- Berechnung von 3D-Temperaturverteilungen beim Tiefschweißen von Kupferwerkstoffen in Abhängigkeit von Prozessparametern
- Berechnung eines Wärmeleitungsschweißprozesses mit der Enthalpie-Porositäts-Methode
- Evaluation weiterer Navier-Stokes-Löser zur Steigerung der Performanz

### **Veröffentlichungen**

Schöler, C., Nießen, M., Hummel, M., Olowinsky, A., Gillner, A. und W. Schulz. „Modeling and simulation of laser micro welding“. In: Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik e.V. (ed.) Lasers in Manufacturing 2019 : Munich ICM,

**SFB 1120**

**Jahresbericht 2019**



Internationales Congress Center München, Germany, June 24-27, 2019 : World of Photonics Congress. Lasers in Manufacturing, Munich, June 24-27, 2019, Erlangen (2019)