

## Teilprojekt A 03

### 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 University

### Aufgabenstellung

Im Berichtsjahr wurden folgende Aufgabenstellungen des Teilprojekts adressiert:

- Implementierung eines performanten Navier-Stokes-Lösers
- Entwicklung eines vereinfachten Strömungsmodells für das Schmelzbad
- Prozessuntersuchungen zur geometrischen Form der Kapillare beim Mikroschweißen von Kupferwerkstoffen mit infraroter und grüner Laserstrahlung

### Vorgehensweise

Zur Lösung der inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen wird ein neues Lösungsverfahren mit hoher Zeitintegrationsordnung implementiert<sup>1</sup>. Dieses verwendet im Gegensatz zum bisher verwendeten Projektionsverfahren eine künstliche Kompressibilität, die über einen kleinen Störungsparameter eingebracht wird und Druck und Geschwindigkeit entkoppelt, und ein Operatorsplitting, das zu einer Entkopplung der einzelnen Geschwindigkeitskomponenten führt. Dadurch wird das Lösen eines elliptischen Problems für den Druck umgangen und ein System von skalaren parabolischen Gleichungen mit besserer Konditionszahl erhalten. Die hohe zeitliche Ordnung wird durch eine Taylor-Approximation der Zeitableitung erreicht. Die räumliche Approximation erfolgt über die Finite-Elemente-

---

<sup>1</sup> J.-L. Guermond and P. Mineev, SIAM J. Sci. Comput., vol. 41, no. 2, pp. A770–A788, Jan. 2019, doi: 10.1137/18M1209301.

Methode. Der Löser wird in der Numerik-Toolbox DUNE implementiert.

Zur weiteren Effizienzsteigerung bei der Berechnung der Schmelzströmung wird ein vereinfachtes 3D-Strömungsmodell für das Schmelzbad entwickelt. Dieses verwendet eine Potentialströmung, für die in jedem Zeitschritt lediglich eine Laplace-Gleichung zu lösen ist. Das Ein- bzw. Ausströmen von Schmelze über die Schmelzberandung in Normalenrichtung wird über eine Neumann-Bedingung modelliert. Die Oberfläche der Schweißkapillare wird zunächst als stationärer, umströmter Rand vorgegeben. Freie Ränder werden mit einer dynamischen Randbedingungen (Vorgabe des Drucks) versehen<sup>2</sup>. Die Schmelzberandung resultiert aus einer Berechnung der Temperaturverteilung mit einem bereits implementierten Enthalpie-Löser unter Berücksichtigung der konvektiven Wärmeleitungsanteile.

Begleitend zu experimentellen Prozessuntersuchungen beim Mikroschweißen von Cu und Cu-ETP mit 515 nm und 1030 nm Laserstrahlquellen werden in Abhängigkeit der Prozessparameter Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit Kapillartiefen berechnet und auf ihre Sensitivität gegenüber einer Änderung der Vorschubgeschwindigkeit untersucht. Hierzu werden mit einem vereinfachten Kapillarmodell stationäre Kapillarformen berechnet und mit den experimentellen Ergebnissen verglichen, die aus Röntgenaufnahmen am IFSW Stuttgart stammen. Das bestehende Kapillarmodell wird hierzu um ein Lambert-Beer-Gesetz erweitert, um die Extinktion von Laserstrahlung im Metaldampf zu berücksichtigen. Für die Berechnungen werden zwei Materialparameter aus den experimentellen Daten kalibriert: der Absorptionsgrad der Metalloberfläche (bei senkrechtem Einfall) und der Extinktionskoeffizient des Metaldampfes.

### **Ergebnisse**

Die Berechnungsergebnisse von dreidimensionalen Testproblemen (u. a. eine 3D lid-driven cavity mit Reynolds-

---

<sup>2</sup> A. Prosperetti and J. W. Jacobs, Journal of Computational Physics, vol. 51, no. 3, pp. 365–386, Sep. 1983, doi: 10.1016/0021-9991(83)90159-6.

Zahl 100) mit dem neu implementierten Navier-Stokes-Löser zeigen ein stabileres und performanteres Verhalten als mit den bisher eingesetzten Lösern. Die Performanzsteigerung ist im Wesentlichen auf die Entkopplung der Geschwindigkeitskomponenten durch das Operatorsplitting zurückzuführen, welche zu einer deutlich verringerten Besetzung der Systemmatrizen und damit einem reduzierten Speicheraufwand (min. Faktor 3) für die resultierenden skalaren Gleichungen führt. Weiterhin sind die Operatoren der Gleichungen für konstante Materialparameter ebenfalls konstant, sodass mit einem direkten Löser nur eine Lösung (Invertierung) für jede Geschwindigkeitskomponente benötigt wird! Der Löser wurde dimensionsunabhängig (2D und 3D) und für Tetra- bzw. Hexaeder implementiert. Eine Erweiterung um einen linearen Darcy-Term zur Beschreibung von Reibung in der Mushy-Zone steht aus und beeinträchtigt nicht die Eigenschaften des Lösungsverfahrens.

Das Potentialströmungsmodell zeigt eine Eignung für Parameterbereiche, in denen sich eine Grenzschicht in der Umströmung der Schweißkapillare ausbildet, die klein ist gegenüber dem Abstand von der Schmelzberandung. Andernfalls verletzen relevant werdende Reibungseffekte die Voraussetzungen für eine Potentialströmung (Wirbelfreiheit). Das Modell erlaubt die effiziente Berechnung von Wärmeverteilungen in der Schmelze unter Berücksichtigung konvektiver Transportanteile. Ein wesentlicher Vorteil hierbei ist die Modellierung der Symmetriebedingung auf der Kapillaroberfläche sowie der Ein- und Auströmbedingung auf der Schmelzberandung durch eine Neumann-Randbedingung. Dadurch können diese Randbedingungen durch Rückgriff auf Embedded-Boundary-Methoden leicht auf kartesischen Gittern umgesetzt werden. Die Implementierung der Schmelzbadoberfläche als freier Rand steht noch aus. Das Modell in der jetzigen Form ist auf einkomponentige Schmelzen mit konstanter Dichte beschränkt.

Die berechneten Kapillartiefen als Funktion des Vorschubs zeigen das gleiche Verhalten wie die experimentellen Beobachtungen. Sie deuten auf einen insgesamt sensitiveren Prozess bei der Verwendung von infraroter Laserstrahlung hin.

Diese Sensitivität ist zudem für CuSn6 deutlicher ausgeprägt als für Cu-ETP. Die Ursache hierfür konnte im Rahmen einer Modellanalyse auf die Wellenlängenabhängigkeit der Fresnel-Absorptionskurven zurückgeführt werden. Diese Aussage wird durch das Kalibrierungsergebnis der Fresnel-Absorptionsgrade für senkrechten Einfall gestützt, das für 515 nm-Strahlung einen Wert von 50 % (Cu-ETP und CuSn6) und für 1030 nm-Strahlung von 10 % (Cu-ETP) und 14 % (CuSn6) lieferte. Ein weiteres wichtiges Ergebnis sind die Werte der kalibrierten Extinktionskoeffizienten. Diese deuten auf eine signifikante Absorption der grünen Laserstrahlung im Metaldampf – sowohl bei Cu-ETP als auch bei CuSn6 – hin, was auch in ersten Experimenten in-situ an optischen Prozessemissionen beobachtet werden konnte.

### **Zusammenfassung und Ausblick**

Der implementierte Navier-Stokes-Löser zeigt gute Eigenschaften hinsichtlich Stabilität und Performanz. Er dient als Grundlage für die Lösung der Impuls- und Massenbilanz im Rahmen der Enthalpie-Porositäts-Methode. Das Potentialströmungsmodell lässt sich in einem gewissen Prozessparameterbereich mit der Enthalpie-Methode kombinieren, um eine effiziente Berechnung der Temperaturverteilung unter Berücksichtigung konvektiver Anteile in einkomponentigen Schmelzen zu berechnen. Die Analyse mit einem vereinfachten Kapillarmodell lässt wesentliche Rückschlüsse auf die Abhängigkeit des Tiefschweißprozesses von der Laserwellenlänge ziehen. Die nächsten Arbeitspunkte im Teilprojekt lauten:

- Verwendung von verbesserten experimentellen in-situ Röntgenaufnahmen zur Modellvalidierung und als Referenz für die geometrische Form der Kapillare
- Analyse der Wärmeverteilung beim Tiefschweißen von Kupferwerkstoffen als Funktion der Prozessparameter
- Weiterentwicklung der Enthalpie-Porositäts-Methode

### **Veröffentlichungen**

Schöler, C.; Nießen, M.; Schulz, W. „Numerical Investigation of Keyhole Depth Formation in Micro Welding of Copper with 1030 nm and 515 nm Laser Radiation“. In: U. Reisgen et al. (Eds.):

Proceedings of the International Joint Conference EMPORIA 2020, LNME, Springer 2021. (in press)

Hummel, M.; Schöler, C.; Gillner, A. „Metallographic comparison for laser welding of Cu-ETP and CuSn6 with laser beam sources of 515 nm and 1030 nm wavelength“. In: U. Reisgen et al. (Eds.): Proceedings of the International Joint Conference EMPORIA 2020, LNME, Springer 2021. (in press)