

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

Aufgabenstellung

Im laufenden Jahr wurden die folgenden Aufgabenstellungen des Teilprojekts bearbeitet:

- Entwicklung und Validierung einer hybriden Prozesssimulation zur schnellen Berechnung der geometrischen Form der Schweißnaht
- Auswahl einer numerischen Methode zur Beschreibung der Strahlungspropagation innerhalb der Schweißkapillare
- Implementation und Validierung eines Level-Set-Algorithmus zur dynamischen Beschreibung freier Ränder
- Entwicklung eines Modells für die Schmelzeströmung

Vorgehensweise

Für die hybride Prozesssimulation wird aus einem reduzierten Modell für große Péclet-Zahlen eine parametrisierte, stationäre Kapillarform berechnet und mithilfe der im Vorjahr entwickelten Embedded-Boundary-Methode als Fläche konstanter Temperatur (Verdampfungs-temperatur) durch ein fixes numerisches Rechenetz bewegt. Die Schmelze wird im ersten Schritt vernachlässigt. In den resultierenden dreidimensionalen Temperaturverteilungen wird die geometrische Form der Schweißnaht als Isotherme identifiziert. Zur Validierung des Modells unter den extremen Bedingungen des Laserstrahlmikroschweißens (kleiner Strahldurchmesser, großer Vorschub) dienen Experimente aus Teilprojekt A1.

Der im Vorjahr erarbeitete Algorithmus zur Lösung der Level-Set-Gleichung für eine Beschreibung der zeitlichen Entwicklung

freier Ränder wird in einer C++-Klasse implementiert und anhand analytischer Flächen, die sich mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit bewegen, getestet. Dabei werden die Geschwindigkeitswerte auf dem Rand vorgegeben und zusammen mit den Level-Set-Funktionswerten durch das Fast-Marching auf die übrigen Knoten des Narrow-Bands erweitert.

Die Strahlungsausbreitung innerhalb der Kapillare wird im geometrisch-optischen Grenzfall betrachtet. Dazu werden die Ray-Tracing-Methode und die Beam-Tracing-Methode verglichen. Auf der Basis von Testrechnungen in vorgegebenen geometrischen Kapillarformen wird eine Auswahl des zu bevorzugenden Verfahrens getroffen. Als Bewertungskriterien dienen Genauigkeit, Robustheit und Rechenzeit der Methode.

Zur Beschreibung der Schmelzeströmung wird ein mathematisch-physikalisches Modell entwickelt, das die wesentlichen Phänomene zum Antrieb der Schmelze enthält. Zur numerischen Berechnung der Strömungsgrößen wird ein geeignetes Diskretisierungsverfahren ausgewählt.

Ergebnisse

Die mit dem hybriden Prozessmodell berechneten Temperaturverteilungen wurden für verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten mit den Schmelzlinien der experimentellen Querschliffe verglichen. Es zeigten sich Abweichungen bei der Einschweißtiefe und der lateralen Ausdehnung der Schmelzbäder. Die Abweichungen der Einschweißtiefe konnten durch eine Anpassung des Fresnel-Absorptionsgrads korrigiert werden. Die Abweichungen verdeutlichen die Anwendbarkeitsgrenzen des Kapillarmodells bei kleinen Péclet-Zahlen. Eine prädiktive Simulation erfordert die Berücksichtigung weiterer physikalischer Effekte wie Mehrfachreflexionen und Schmelzefluss.

Für die Level-Set-Gleichung wurde ein C++-Löser mit Finite-Differenzen-Schemata erster und zweiter Ordnung für den Ort und einem expliziten Euler-Verfahren für die Zeit implementiert. Die Level-Set-Gleichung wurde dabei in drei Teile separiert: eine PDG für die Level-Set-Funktionswerte zur Erfüllung der Abstandsbedingung, eine PDG zur Berechnung der Geschwindigkeiten jenseits des Randes (engl. extension velocities) und eine ODE für den Zeitschritt. Die beiden ersteren werden mithilfe des Fast-Marching-Algorithmus behandelt. Die Berechnung erfolgt

auf einem kartesischen Gitter. Zur Reduktion des numerischen Aufwandes wurde eine Klasse für die Narrow-Bänder erstellt. Der Algorithmus wurde anhand von Testrechnungen mit bewegten Zylindern und Kugeln validiert.

Testrechnungen mit einem Beam-Tracer-Programm in vorgegebenen Kapillaren haben gezeigt, dass der Verwaltungsaufwand für die Strahlenbündel nach der ersten Reflexion stark ansteigt. Dies ist zum einen auf eine große Divergenz der Strahlenbündel zurückzuführen, die durch die Krümmung der Kapillaroberfläche bedingt ist. Zum anderen können einzelne Randstrahlen die Kapillare wieder verlassen, ohne die Oberfläche erneut zu treffen. In beiden Fällen ist eine aufwendige Reinitialisierung der Strahlenbündel mittels Rückverfolgung (engl. backtracing) erforderlich. Dies führt zur Verringerung von Robustheit und Rechenzeit der Methode. Dagegen zeichnet sich das Ray-Tracing-Verfahren durch eine erheblich effizientere Berechnung von mehrfachen Reflexionen aus. Die Stetigkeit der resultierenden Intensitätsverteilung auf der Kapillaroberfläche hängt dabei von der Anzahl der verwendeten Strahlen ab, welche sich aufgrund der hervorragenden Parallelisierbarkeit der Methode leicht skalieren lässt.

Die Schmelze wurde als inkompressibles Fluid modelliert. Für eine Beschreibung der dynamischen Wechselwirkung von Kapillare und Schmelzeströmung sind dynamische Randbedingungen auf der Kapillaroberfläche zu berücksichtigen. Neben einer Wärmestrombilanz, welche die Absorption der Laserstrahlung beinhaltet, wurden als physikalisch dominante antreibende Kräfte der Verdampfungsrückstoßdruck und der Kapillardruck identifiziert. Zur Berechnung des Rückstoßdrucks wurde der Grenzfall der schwachen Verdampfung gegen Atmosphärendruck angenommen. Für die Diskretisierung der Navier-Stokes-Gleichung wurde ein Finite-Elemente-Verfahren gewählt. Die Implementation des Teilmodells ist Gegenstand laufender Arbeiten.

Zusammenfassung und Ausblick

Das entwickelte hybride Prozessmodell erlaubt die Berechnung der geometrischen Form der Schweißnaht in Abhängigkeit der Prozessparameter. Der Vergleich mit dem Experiment zeigt den Forschungsbedarf für eine Erweiterung des verwendeten Kapillarmodells auf und verdeutlicht die Notwendigkeit einer genauen Prüfung der Anwendbarkeitsgrenzen der Modelle. Mithilfe des parallelisierten Ray-Tracers lassen sich Mehrfachreflexionen innerhalb der Kapillare effizient berechnen. Die Handhabbarkeits-

und Geschwindigkeitsvorteile des Ray-Tracers überwiegen den Genauigkeitsgewinn des Beam-Tracers. Mithilfe der entwickelten C++-Klasse für die Level-Set-Methode lässt sich die zeitliche Entwicklung freier Ränder numerisch berechnen. Die Geschwindigkeiten auf dem Rand müssen im Rahmen des Prozessmodells zukünftig aus den Lösungen der kinetischen Größen sowie den Bilanzgleichungen des Phasenübergangs bestimmt werden. Der FEM-Löser für die inkompressible Navier-Stokes-Gleichung wird anhand eines Benchmarks validiert. Die Verdampfungsrandbedingungen werden auf der Kapillaroberfläche vorgegeben. Die Implementation geschieht mithilfe von Embedded-Boundary-Methoden.

Die nächsten Arbeitspunkte des Teilprojekts lauten:

- Erweiterung des Kapillarmodells
- Benchmarking des Navier-Stokes-Lösers
- Implementation der Verdampfungsrandbedingungen
- Experimentelle Validierung der Schmelzeströmung
- Untersuchung der Oberflächenrauheit

Veröffentlichungen

Schöler, C., A. Haeusler, A. Gillner, V. Karyofylli, M. Behr, W. Schulz und M. Niessen, 2017. Hybrid Simulation of Laser Deep Penetration Welding. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 48, 2017, 12.

Haeusler, A., A. Schürmann; C. Schöler, A. Olowinsky, A. Gillner und R. Poprawe, 2017. Quality improvement of copper welds by laser microwelding with the usage of spatial power modulation. In: *Journal of Laser Applications* [online]. 29, 2017, 2, S. 022422. ISSN 1042-346X. DOI: 10.2351/1.4983505

Pustal, B., A. Schwedt, D. Arntz, A. Haeusler, U. Jansen, C. Schöler, T. Vossel, A. Gillner, A. Bührig-Polaczek, J. Mayer, W. Schulz und R. Poprawe, 2017. Modelling Approach towards Tailored Grain Structure in Laser Processing. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 48, 2017, 12.

Pirch, N., M. Niessen, S. Linnenbrink, T. Schopphoven, A. Gasser, R. Poprawe, C. Schöler, D. Arntz und W. Schulz, 2017. Temperature field and residual stress distribution for laser metal deposition. In: *Proceedings of the ICALEO Conference*. Atlanta, 22. bis 26. Oktober 2017. 48, 2017, 12.