

Was bislang Stunden benötigte, geht jetzt in Bruchteilen einer Sekunde: Laserprozesse dank KI in Echtzeit voraussagen

29.9.2026 - | Eidgenössisches Departement für auswärtige Angelegenheiten EDA

Thun, 29.09.2026 — Laserschweissen ist eine fortschrittliche Technik zur Herstellung hochwertiger Bauteile für eine Vielzahl von Anwendungen, von der Raumfahrt bis zur Medizin. Forschende der Empa und des Quantencomputing-Unternehmens Terra Quantum haben ein KI-Modell entwickelt, mit dem sich der komplexe Schweissprozess präzise simulieren und optimieren lässt - und das in Bruchteilen einer Sekunde.

Das Laserschweissen ist ein Präzisionsverfahren, das in der Luft- und Raumfahrt, bei der Herstellung medizinischer Geräte sowie in der Automobilindustrie zum Einsatz kommt. Die Technik ist schnell, präzise und leicht zu automatisieren – doch der Schweissprozess ist komplex und schwer vorhersehbar, da er viele verschiedene physikalische Effekte miteinander verbindet. Der Laser schmilzt eine Zone von einigen hundert Mikrometern. Innerhalb dieser Schmelzzone treibt die temperaturabhängige Oberflächenspannung die Strömung an; der durch Verdampfung verursachte Rückstossdruck führt zur Bildung tiefer und schmaler Hohlräume, die als Dampfkavitäten oder «Keyholes» bezeichnet werden. Diese «Keyholes» fangen dann reflektierende Lichtstrahlen ein und erhöhen lokal den Absorptionsanteil der Laserleistung.

Zur Optimierung des Laserschweissens werden meist physikalisch basierte Computersimulationen eingesetzt. Eine hochpräzise Simulation kann jedoch Stunden dauern, da dabei Strömung, Wärmeübertragung, Phasenwechsel und eine sich bewegende freie Oberfläche gleichzeitig berücksichtigt werden müssen. Dies macht die Optimierung kostspielig und verunmöglicht eine Echtzeit-Vorhersage des Prozessverlaufs.

Forschende der Empa und des Quantencomputing-Unternehmens Terra Quantum haben nun ein Modell des maschinellen Lernens («Machine Learning», ML) trainiert, das diesen Prozess massiv beschleunigt. Sie haben ihre Ergebnisse in der Fachzeitschrift «Journal of Intelligent Manufacturing» veröffentlicht. Was früher Stunden dauerte, lässt sich nun in Bruchteilen einer Sekunde erledigen.

Den Engpass überwinden

Das Modell, das die Forscher als «Laser Processing Fourier Neural Operator» (LP-FNO) bezeichnen, ist ein KI-«Surrogate»-Modell. Es prognostiziert die vollständige dreidimensionale Dynamik der Schmelzzone beim Laserschweissen bis zu 100'000-mal schneller als herkömmliche multiphysikalische Simulationen und beseitigt damit den Rechenengpass, der die Echtzeit-Prozesssteuerung und den Einsatz von digitalen Zwillingen in der industriellen Laserbearbeitung lange Zeit blockiert hat.

Die Steuerung der Schmelzzone – des Bereichs aus geschmolzenem Metall unterhalb des Laserstrahls – ist entscheidend für die Qualität und Konsistenz der Schweissnaht. Hochpräzise multiphysikalische Simulationen waren bislang das wichtigste Werkzeug zum Verständnis und zur Optimierung des Prozesses, doch der Rechenaufwand hat es bisher verunmöglicht, sie in Echtzeit anzuwenden. Ein einzelner Simulationsdurchgang mit den derzeitigen Tools dauert bei einer

Standardauflösung von 10 µm etwa sechs Minuten, bei einer feineren Auflösung von 5 µm über eine Stunde, wodurch Prozesssteuerung, gross angelegte Parameteroptimierung und Unsicherheitsquantifizierung für industrielle Anwender unerreichbar bleiben.

LP-FNO erlernt den Zusammenhang zwischen den Laserprozessparametern – Leistung und Abtastgeschwindigkeit – und den daraus resultierenden dreidimensionalen Temperaturfeldern sowie den Grenzen der Schmelzzone mithilfe einer Fourier-Neural-Operator-Architektur, die Informationen global über den gesamten physikalischen Bereich in einem einzigen Vorwärtsthroughlauf miteinander verknüpft. Nach dem Training liefert LP-FNO vollständige 3D-Vorhersagen in etwa acht Millisekunden bei Standardauflösung und in 88 Millisekunden bei doppelter Auflösung.

Ein Schlüsselement des Ansatzes ist eine quasi-stationäre Neuformulierung des Laserscan-Problems. Durch die Transformation der transienten Simulation in ein Bezugssystem, das sich mit dem Laserstrahl bewegt, und durch zeitliche Mittelung wandelte das Forschungsteam ein von Natur aus zeitabhängiges Problem in eine für das Operatorlernen geeignete Form um. Dies ermöglicht es LP-FNO, die Dynamik des stabilen Keyhole-Schweissens genau abzubilden.

Eine erfolgreiche Zusammenarbeit

«Die Fähigkeit, stundenlange physikalische Simulationen auf Millisekunden zu komprimieren, ist keine kleine schrittweise Verbesserung, sondern eine Veränderung, die völlig neue Anwendungen ermöglicht», sagt Markus Pflitsch, CEO und Gründer von Terra Quantum. «Mit LP-FNO können Industrieunternehmen Prozessoptimierungen in Echtzeit durchführen, digitale Zwillinge erstellen, die mit dem physikalischen Prozess synchronisiert bleiben, und Parameterräume erkunden, deren Untersuchung bisher zu kostspielig war. So sieht der Einsatz von KI bei den schwierigsten Problemen in der Fertigung aus.»

«Diese Partnerschaft vereinte das Knowhow der Empa in den Bereichen Laserbearbeitung, Materialwissenschaft und Prozessmodellierung mit den Kompetenzen von Terra Quantum in den Bereichen fortgeschrittenes maschinelles Lernen und neuronale Operator-Methoden», sagt Elia Iseli, Leiter der Gruppe «Light-Matter Dynamics» an der Empa. «Die Genauigkeit, mit der LP-FNO die für die Fertigung relevanten Ergebnisse der High-Fidelity-Modelle – darunter Temperaturfelder, Schmelzbadgeometrie und Phasengrenzflächen – reproduziert, unterstreicht die Vorhersagekraft des Surrogate-Ansatzes. Diese Übereinstimmung spiegelt die enge Verzahnung von Machine-Learning-Entwicklung und Fachwissen in der Laserprozessmodellierung während des gesamten Projekts wider. Ein Ergebnis, das ohne diese Partnerschaft nicht hätte erzielt werden können.»

«Fourier-Neural-Operatoren eignen sich architektonisch gut für diese Problemklasse, da sie im Spektralraum lernen und Informationen über den gesamten physikalischen Bereich hinweg auf jeder Ebene vermischen, anstatt sie lokal durch Faltungsnachbarschaften weiterzugeben», fügt Florian Neukart, «Chief Technology Officer» bei Terra Quantum, hinzu. «Diese globale Perspektive verleiht dem Modell seine auflösungsunabhängige Eigenschaft: Die anhand grober Trainingsdaten erlernten spektralen Gewichte lassen sich auf natürliche Weise auf feinere Auswertungsgitter verallgemeinern. In Kombination mit der quasi-stationären Neuformulierung erhielten wir so ein einziges trainiertes Modell, das sowohl den Wärmeleitungs- als auch den Keyhole-Modus mit konsistenter Genauigkeit über das gesamte Prozessfenster hinweg abbildet.»

Die langfristige Vision besteht darin, eine wesentlich schnellere Prozessoptimierung, digitale Zwillinge und Echtzeitsteuerung für die Laserfertigung – und möglicherweise auch für andere rechenintensive Fertigungsprozesse – zu ermöglichen. Es gibt noch viele Fragen zu klären, insbesondere bei stark transienten Phänomenen wie der Porenbildung und dem Zusammenbruch der «Keyholes». Doch die Forscher haben gezeigt, wie die Kombination von Physik, KI und

Quantencomputing die Art und Weise, wie wir in Zukunft fortschrittliche Fertigungsprozesse simulieren, grundlegend verändern könnte.

Zur Pressemitteilung

Literatur

A Benoit, T Ivas, M Papierz, A Sagingalieva, A Melnikov, E Iseli: A fast and accurate fourier neural operator-based surrogate for melt-pool prediction in laser processing; Journal of Intelligent Manufacturing (2026); doi: 10.1007/s10845-026-02917-0

M Papierz, A Sagingalieva, A Benoit, T Ivas, E Iseli, A Melnikov: Hybrid Fourier Neural Operator for Surrogate Modeling of Laser Processing with a Quantum-Circuit Mixer (2026); doi:10.48550/arXiv.2604.04828

Informationen

Dr. Elia Iseli
Empa, Light-Matter Dynamics Group
Tel. +41 58 765 63 28
elia.iseli@empa.ch

Dr. Alexey Melnikov
Terra Quantum, Global Director of Artificial Intelligence
Tel. +41 71 228 12 05
ame@terraquantum.swiss

<https://www.eda.admin.ch/de/newsb/w0suufAooseh>