

Konzeption, Aufbau und Kalibrierung eines multimodalen Messsystems zur In-situ-Rekonstruktion von Temperatur und Geometrie im induktiven Sinterprozess

Johannes Stegmann*, Lennart Hinz*, Johanna Uhe**

*Institut für Mess- und Regelungstechnik, Leibniz Universität Hannover

**Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Leibniz Universität Hannover

mailto:johannes.stegmann@imr.uni-hannover.de

Zur Untersuchung des Schrumpfungsverhaltens und der inhomogenen Temperaturverteilung eines Werkstücks während des induktiven Sinterns werden eine Thermokamera und zwei Lasertriangulationssensoren eingesetzt. Vorgestellt werden der messtechnische Aufbau sowie ein Verfahren zur extrinsischen Kalibrierung des multimodalen Messsystems einschließlich der Rotationsachse.

1 Sinterschmiedeprozess

Die Prozesskette aus Pulverpressen, induktivem Sintern und anschließender Umformung ermöglicht die ressourcen- und energieeffiziente Herstellung von Bauteilen mit hoher geometrischer Komplexität [1]. Die Kombination einer mehrstufigen Prozesskette mit den stochastischen Eigenschaften des pulverförmigen Ausgangsmaterials führt jedoch zu komplexen Wechselwirkungen zwischen den Teilprozessen. So kann beispielsweise eine beim Pulverpressen entstandene Inhomogenität zu Verzug des Bauteils beim Sintern führen und damit eine anisotropen Krafteinwirkung beim Umformen hervorrufen [2]. Durch Material- und Prozessschwankungen akkumuliert das Bauteil entlang der Prozesskette ein Unsicherheitsbudget, dessen Auswirkungen bislang nur unzureichend erforscht sind. Für eine systematische Untersuchung dieser Zusammenhänge ist die messtechnische Akquise relevanter Prozessgrößen in den einzelnen Teilprozessen erforderlich. Im vorliegenden Beitrag liegt der Fokus auf dem induktiven Sinterprozess.

2 Induktiver Sinterprozess

Ein zuvor gepresster Grünling wird induktiv auf etwa 60% bis 80% seiner Schmelztemperatur erwärmt [3]. Die dabei entstehende Temperaturverteilung innerhalb des Bauteils ist in der Regel inhomogen [4]. Durch die Erwärmung kommt es zu Diffusionsvorgängen und einem teilweisen Verschmelzen der Pulverpartikel, wodurch Schrumpfungsprozesse ausgelöst werden [5]. Zur Vermeidung von Oxidation wird der Sinterprozess unter Schutzgasatmosphäre durchgeführt [4]. Neben der Bauteilgeometrie ist insbesondere auch die Temperaturverteilung als Prozessgröße zur zeitaufgelösten Analyse des Sintervorgangs relevant. Im Folgenden wird demnach ein Verfahren vorgestellt, welches eine rückwirkungsfreie In-situ-Messung während des laufenden Sinterprozesses ermöglicht.

3 Messtechnischer Aufbau

Da die Temperatur im Inneren des Bauteils nicht direkt erfasst werden kann, wird zunächst die Oberflächentemperatur mittels einer Thermokamera (TK) aufgenommen. Hierfür kommt eine InfraTec ImageIR8300 mit einem Spektralbereich von $1.5\mu\text{m}$ bis $5.7\mu\text{m}$ und einer Bildfrequenz von 205 Hz bei einer Auflösung von $640\text{px} \times 512\text{px}$ zum Einsatz. Auf Basis der Oberflächentemperatur soll ein Softsensor entwickelt werden, der die Temperaturverteilung im Inneren des Bauteils prädiziert. Zur Rekonstruktion der Bauteilgeometrie wird ebenfalls optische Messtechnik eingesetzt. Zwei Micro-Epsilon LLT8500-100 Lasertriangulationssensoren (LTS) tasten jeweils 4048 Messpunkte pro Profil bei einer Profillfrequenz von 125 Hz linienhaft an. Zur flächenhaften Objektantastung wird das Bauteil um eine Rotationsachse gedreht, wobei der Rotationswinkel synchron akquiriert wird. Der messtechnische Aufbau mit Demonstratorbauteil ist in Abb. 1 dargestellt.

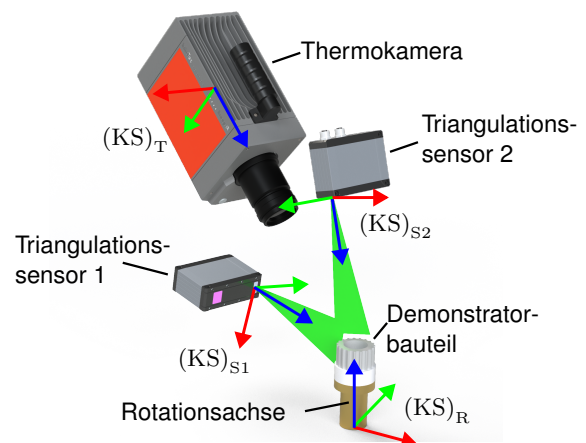


Abb. 1 Thermokamera, Lasertriangulationssensoren und Rotationsachse einschließlich der Koordinatensysteme.

Da die Induktionsspule die Sicht auf das Bauteil einschränkt, wird eine Linearachse integriert. Diese ermöglicht eine Verschiebung des Bauteils entlang

der Rotationsachse (RA) zwischen einer unteren Sinterposition innerhalb der Spule und einer oberen Messposition außerhalb der Spule. Die Dauer eines Messvorgangs beträgt lediglich wenige Sekunden, sodass der Prozess nur kurzzeitig unterbrochen wird. Die Messung wird zu mehreren Zeitpunkten der einige Minuten dauernden Sinterphase durchgeführt. Da der Sinterprozess unter Schutzgasatmosphäre abläuft, sind für die optische Messtechnik Schaugläser in die Sinterkammer integriert.

4 Kalibrierung des Messsystems

Zur Fusion der multimodalen Messdaten werden die Transformationen zwischen den in Abb. 1 dargestellten Koordinatensystemen (KS) benötigt. Zu deren Bestimmung wird ein Verfahren, welches alle KS durch die Aufnahme eines Datensatzes zueinander kalibriert und dabei auf die in die LTS integrierten Kameras verzichtet, vorgestellt. Dies ist erforderlich, da die Schaugläser deren Sichtfeld auf das Kalibrierobjekt (Target) einschränken.

Als Target wird ein TK kompatibles optisches Muster verwendet [6]. Dieses wird an der RA befestigt und während einer vollständigen Umdrehung simultan von TK und beiden LTS erfasst. Hierbei entsteht eine Anzahl n_r synchronisierter Aufnahmen der TK, Messungen beider LTS sowie zugehörige Rotationswinkel. Nach jeder Umdrehung wird das Target um die X-Achse des $(KS)_R$ verkippt. Insgesamt ergibt sich ein Datensatz aus n_k Verkipnungen mit jeweils n_r Messungen.

Da die Marker des Targets in den Aufnahmen der TK identifizierbar sind, kann die Transformation zwischen $(KS)_T$ und dem Target direkt bestimmt werden. Unter Ausnutzung der Aufnahmen einer vollständigen Rotation lässt sich daraus die Lage der Rotationsachse im $(KS)_T$ schätzen.

Zur Kalibrierung einer Kamera gegenüber einem LTS wird üblicherweise die Projektion der Laserlinie auf ein Target ausgewertet. Dies ist im vorliegenden Fall nicht anwendbar, da die TK das von den LTS emittierte grüne Laserlicht aufgrund ihres Spektralbereichs nicht detektieren kann. Da die Transformation zwischen $(KS)_T$ und $(KS)_R$ bereits bekannt ist, genügt die Bestimmung der Transformation zwischen $(KS)_S$ und $(KS)_R$. Diese kann direkt aus den Messdaten der LTS ermittelt werden.

Die LTS erfassen Punktkoordinaten auf der Schnittlinie zwischen Laserebene und Targetebene. Aus diesen Messpunkten werden zunächst die Parameter der jeweiligen Schnittgeraden bestimmt. Anschließend wird ein Optimierungsproblem formuliert, dessen Startwert aus dem CAD-Modell des Versuchsaufbaus abgeleitet wird. Die Lösung dieses Optimierungsproblems liefert die Transformation zwischen $(KS)_S$ und $(KS)_R$. Dabei werden der Orts- und Richtungsvektor der RA im $(KS)_S$ und für

jede der n_k Targetverkipnungen sowohl ein Orts- als auch Normalenvektor der Targetebene bei einem Rotationswinkel von 0° geschätzt.

Während der Optimierung werden die gemessenen Schnittgeraden mithilfe der geschätzten Transformation sowie des jeweils aufgezeichneten Rotationswinkels in die Referenzlage bei 0° zurücktransformiert. Das Residuum des Optimierungsproblems wird als Abstand dieser derotierten Geraden zur geschätzten Lage der Targetebene definiert.

5 Validierung

Zur Validierung des vorgeschlagenen Kalibrierverfahrens wird die Messtechnik unter Laborbedingungen aufgebaut. Da die in die LTS integrierten Kameras ohne Schutzgläser freie Sicht auf das Target haben, können die optischen Marker analog zur Auswertung der TK detektiert und zur Bestimmung der Targetpose herangezogen werden.

Somit lässt sich für die LTS eine Referenzkalibrierung durchführen. Die Ergebnisse werden mit den mittels des vorgeschlagenen Verfahrens bestimmten Transformationen verglichen, um dessen Genauigkeit und Validität zu bewerten.

6 Zusammenfassung

Vorgestellt wird ein Verfahren zur In-situ-Erfassung von Temperatur- und Geometrieänderungen während des induktiven Sinterns. Darüber hinaus wird die extrinsische Kalibrierung des multimodalen Messsystems beschrieben. Hierzu werden die TK mittels optischer Marker sowie die LTS durch die Lösung eines Optimierungsproblems in das KS der Rotationsachse transformiert. Dies ermöglicht die Fusion der Messdaten in einem gemeinsamen KS.

References

- [1] F. Planitzer, "Entwicklung umformtechnischer Verfahren zum Nachverdichten von Sinterformteilen," (2011).
- [2] K. Hanini, E. Doege, and R. Schmidt-Jürgensen, "Numerische und experimentelle Untersuchungen zum Pulverpressen von Aluminium," *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* **34**(8), 729–735 (2003).
- [3] H. Exner and H. Danninger, "Powder metallurgy of steel," *Gmelin Handbook of Inorganic Chemistry, Metallurgy of Iron*, fourth totally revised edition **10** (1992).
- [4] V. Gemenetis, R. Gräber, and F. Thümmel, "Induktionssintern von Formteilen," *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* **10**(12), 436–441 (1979).
- [5] F. V. Lenel, "The role of plastic deformation in sintering," in *Sintering Key Papers* (Springer, 1990).
- [6] P. O. Shobowale, L. Hinz, and M. Kästner, "Cheap targets for expensive equipment: a novel, integrated, high-contrast approach to LWIR camera calibration," in *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XIV*, vol. 13567 (SPIE, 2025).