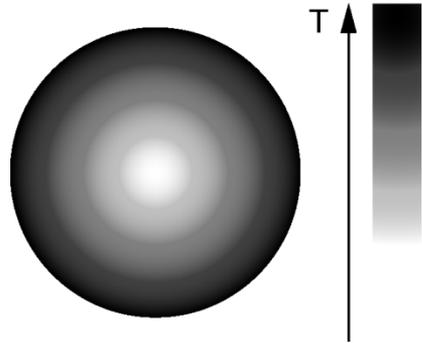


Der Einfluss von Vorwärmung auf den Lasersinterprozess



Gasch, M.

Die Lasersinterertechnologie ist heutzutage als Generatives Fertigungsverfahren nicht mehr wegzudenken. Lasersinterverfahren sind Bestandteil zahlreicher Forschungs- und Entwicklungsvorhaben. Ein Schwerpunkt ist die Vorwärmung im Lasersinterprozess und deren Auswirkung.

The laser sintering technology is nowadays indispensable as Layer Manufacturing Technology. Laser sintering processes are part of numerous research and development projects. One focus is the preheating in the laser sintering process and its impact.

1 Energieeinkopplung und Wärmeleitung

Durch Energieeinkopplung wird die Pulverschüttung erwärmt. Ziel ist es, an der Bearbeitungsstelle einen Wärmestau zu bewirken.

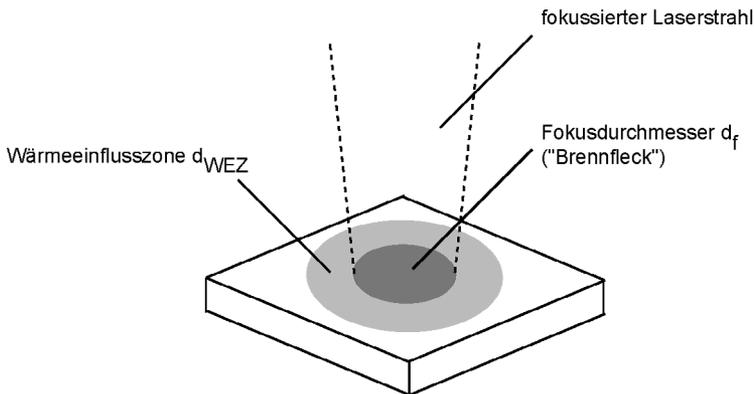


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Wärmeeinflusszone durch Laserstrahlen /1/

Die Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung der Wärmeeinflusszone. Es muss mehr Wärme erzeugt werden, als durch Wärmeleitung an die Umgebung abgegeben werden kann. Folglich beeinflusst die Wärmeleitfähigkeit den Bearbeitungsprozess erheblich. Je geringer diese Wärmeleitfähigkeit ist, desto wirksamer kann das Material lokal erwärmt werden. Auch mit geringerer Laserleistung lässt sich das Material so einfacher bearbeiten /2/. Für typische metallische Pulverlegierungen ist die Wärmeeinflusszone beim Aufschmelzen durch Laserstrahlen stets größer als der Fokusbereich /3/. Die Wärmeeinflusszone ist direkt abhängig vom Fokusbereich beziehungsweise Brennfleck. Durch die Vorschubbewegung der Laserstrahlung verlagert sich die Wärmeeinflusszone entsprechend der Vorschubrichtung. Dadurch entstehen einzelne Spuren, in denen der Materialbearbeitungsprozess stattfindet.

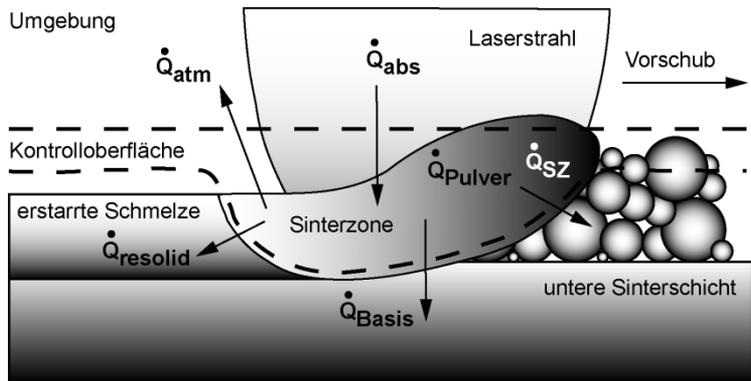


Abbildung 2: Wärmestrombilanz an der Sinterzonenoberfläche im Lasersinterprozess /4,5/

Beim Lasersintern treten Energieströme auf. Der Bereich in dem das Pulver durch Laserstrahlung geschmolzen wird, kann als Sinterzone bezeichnet werden. Die eintretenden und austretenden thermischen Energieströme (Wärmeströme) werden durch eine Bilanzierung an der Oberfläche beschrieben. Die Wärmestrombilanz an der Sinterzonenoberfläche ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt /4,5/. Entsprechend der Energiestrombilanz wird die Wärmestrombilanz durch die eintretenden und austretenden thermischen Energieströme aufgestellt. Nach Beyer und Wissenbach /5/ lautet die Wärmestrombilanzierung in der Sinterzone wie folgt:

$$\dot{Q}_{SZ} = \dot{Q}_{abs} - \dot{Q}_{Pulver} - \dot{Q}_{Basis} - \dot{Q}_{resolid} - \dot{Q}_{atm}$$

mit:

\dot{Q}_{sz} : Wärmestrom in der Sinterzone in $J/s = W$

\dot{Q}_{abs} : absorbierter Wärmestrom der Pulverschüttung in $J/s = W$

\dot{Q}_{pulver} : Wärmestrom in die Pulverschüttung in $J/s = W$

\dot{Q}_{basis} : Wärmestrom in die untere Sinterschicht in $J/s = W$

$\dot{Q}_{resolid}$: Wärmestrom in die erstarrte Schmelze in $J/s = W$

\dot{Q}_{atm} : Wärmestrom in die Umgebung in $J/s = W$

Zugeführt wird der Sinterzone nur die von der Pulverschüttung absorbierte Laserstrahlungsenergie (\dot{Q}_{abs}). Eine Abschätzung für diesen Wärmestrom ist in der folgenden Gleichung beschrieben /5/:

$$\dot{Q}_{abs} \approx \alpha_{Pulverschüttung} \cdot P_L \quad 1.2$$

mit:

\dot{Q}_{abs} : absorbierter Wärmestrom der Pulverschüttung in W

$\alpha_{Pulverschüttung}$: Gesamter Absorptionsgrad der Pulverschüttung [/]

P_L : Laserleistung in W

Durch Konduktion, Konvektion und Radiation wird Wärme in das Pulver abgeführt (\dot{Q}_{pulver}). Dieser Wärmestrom erwärmt die Sinterkammer und die Pulverschüttung. Aufgrund der verhältnismäßig hohen Wärmekapazität der Sinterkammer kommt dem Prozess in der Sinterzone nur ein sehr geringer Anteil der Wärme zugute. Dieser Anteil verringert die Temperaturdifferenz zwischen Pulverschüttung und Sinterzone und infolgedessen fließt weniger Wärme ab. Der Wärmestrom in die untere Sinterschicht (\dot{Q}_{basis}) erwärmt alle vorher gesinterten Schichten sowie den Sinterraum. $\dot{Q}_{resolid}$ beschreibt den Wärmestrom in die erstarrte Schmelze verursacht durch Konduktion /5/. Aufgrund der Wärmeleitung von der erstarrten Schmelze in die untere Sinterschicht findet eine Selbstabschreckung statt. Dadurch kann nach Abkühlung der Schmelze ein Härtegefüge entstehen /6/. Durch Konvektion und Radiation strömt Wärme in die Umgebung (\dot{Q}_{atm}). Dieser Wärmestrom geht dem Sinterprozess vollständig verloren /5/. Durch Integration der Gleichung 1.1 wird die Änderung der Wärme in der Sinterzone deutlich:

$$\Delta \dot{Q}_{sz} = \Delta \dot{Q}_{abs} - \Delta \dot{Q}_{pulver} - \Delta \dot{Q}_{basis} - \Delta \dot{Q}_{resolid} - \Delta \dot{Q}_{atm} \quad 1.3$$

mit:

ΔQ_{Sg} : Änderung der Wärme in der Sinterzone in J

ΔQ_{abs} : Änderung der absorbierten Wärme in J

ΔQ_{pulver} : Änderung der Wärme in der Pulverschüttung in J

ΔQ_{Basal} : Änderung der Wärme in der unteren Sinterschicht in J

$\Delta Q_{resolid}$: Änderung der Wärme in der erstarrten Schmelze in J

ΔQ_{atm} : Änderung der Wärme in der Umgebung in J

Diese Wärme in der Sinterzone (ΔQ_{Sg}) kann zum Aufschmelzen der Pulverteilchen genutzt werden /5/. Das Ziel, an der Bearbeitungsstelle einen Wärmestau zu bewirken ist demzufolge erreicht. Die Änderung dieser Wärme kann in Abhängigkeit von der Dichte und vom Volumen des Pulvermaterials in der Sinterzone, von der spezifischen Wärmekapazität des Pulvermaterials sowie von der Differenz zwischen Sinterzonen- und Pulvertemperatur ermittelt werden /5/:

$$\Delta Q_{Sg} = \rho_{pulver} \cdot V_{pulver} \cdot c_p \cdot \Delta T_{Sg} \quad 1.4$$

mit:

ΔQ_{Sg} : Änderung der Wärme in der Sinterzone in J

ρ_{pulver} : Dichte des Pulvermaterials in kg/dm³

V_{pulver} : Volumen des Pulvermaterials in der Sinterzone in dm³

c_p : Spezifische Wärmekapazität des Pulvermaterials in J/(kg·K)

ΔT_{Sg} : Differenz zwischen Sinterzonen- und Pulvertemperatur in K

Die mittlere spezifische isobare Wärmekapazität des Pulvermaterials (c_p) gibt an, welche Wärme der Sinterzone (ΔQ_{Sg}) zugeführt werden muss, um seine Temperatur um die Differenz (ΔT_{Sg}) zu ändern /5,7/. Der Einkoppelprozess der Laserenergie ist abhängig von der Einwirkzeit der Laserstrahlung. Diese Einkoppelzeit lässt sich wie folgt berechnen /3/:

$$t_k = \frac{d_f}{v_s} \quad 1.5$$

mit:

t_k : Einkoppelzeit in s

d_f : Fokusbereich in mm

v_s : Vorschubgeschwindigkeit in mm/s

In der Regel ist der Fokussdurchmesser eine Konstante und demzufolge wird die Einkoppelzeit entscheidend von der Vorschubgeschwindigkeit beeinflusst. Diese Einwirkungszeit wird auch Bestrahlungsdauer, Wechselwirkungszeit oder Belichtungsdauer genannt. Die Sinterzone in Abbildung 2 ist abhängig von der zugeführten Energie und der angestrahlten Fläche (siehe Abbildung 1) der Pulverschüttung /5/. Um unterschiedliche Lasermaterialbearbeitungsverfahren vergleichen zu können, wird die Flächenenergie als ein Unterscheidungsmerkmal verwendet /8/. Die durch Laserenergie bestrahlte Fläche entspricht dem Brennfleck beziehungsweise der durch den Fokussdurchmesser begrenzten Fläche. Der Einkoppelprozess wird zusätzlich durch die Laserleistung und der Einkoppelzeit beschrieben. Diese flächenabhängige Energie wird berechnet wie in der nachfolgenden Gleichung beschrieben /5,9,10/:

$$E_A = \frac{8}{\pi} \cdot \frac{P_L}{d_f \cdot v_s} \quad 1.6$$

mit:

- E_A : Flächenenergie in J/mm²
- P_L : Laserleistung in J/s = W
- d_f : Fokussdurchmesser in mm
- v_s : Vorschubgeschwindigkeit in mm/s

Experimente haben gezeigt, dass durch die Kombination von Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit sich unterschiedliche Bauteileigenschaften und Gefüge eingestellt haben, obwohl die gleiche Flächenenergie vorhanden war /11/. Im Allgemeinen steigt die Dichte von gesinterten Schichten in dem Maße an, wie die Laserleistung zunimmt /12,13/. Aufgrund abweichender Definitionen für die radiale Ausbreitung im gaußförmigen Laserstrahl erscheinen unterschiedliche Vorfaktoren in der Gleichung für die Flächenenergie /5,9,10,13,14,15/.

2 Vorwärmen der Pulverschüttung

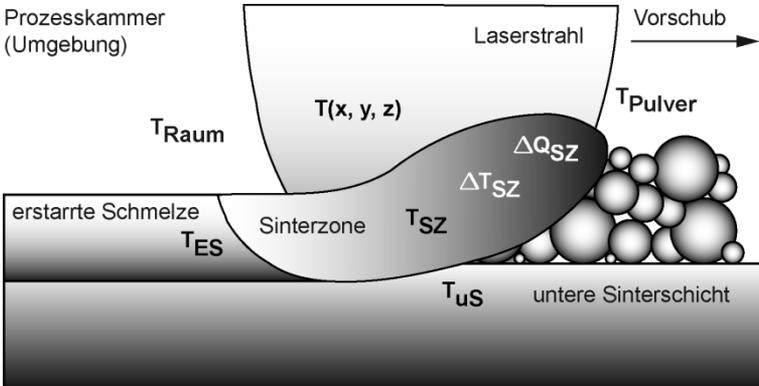
Beim Lasersintern von Kunststoffen wird die Pulverschüttung auf eine Temperatur unterhalb der Sintertemperatur vorgewärmt. Die Laserenergie trägt lediglich die Differenzwärmemenge zum Aufschmelzen der Pulverteilchen bei /5,16/. Metallische Pulver führen bei dieser Vorgehensweise zu Schwierigkeiten im Auslegen der Sinteranlagen. Die Vorwärmtemperatur müsste je nach Pulver ungefähr zwischen 800 und 2000°C liegen. Um eine einfache anlagentechnische Umsetzung des Lasersinterns zu ermöglichen, wurde beispielsweise das Di-

rekte-Metall-Laser-Sintern (DMLS) entwickelt /5/. In diesem Verfahren wird ein niedrig schmelzendes Metallpulver mit einem hoch schmelzenden metallischen Pulver mechanisch gemischt. Die Pulverkomponente mit der niedrigen Schmelztemperatur wird durch die Laserenergie geschmolzen. Die Pulverteilchen mit dem hohen Schmelzpunkt werden dadurch verbunden und es entsteht eine Struktur /17, 18/. Die niedrighschmelzenden Pulverpartikel "funktionieren" demzufolge als Binder- und Strukturmaterial. In der Mikrostruktur treten eine Phase mit niedrigem Schmelzpunkt, eine Phase mit hohem Schmelzpunkt, nicht-geschmolzene Pulverteilchen sowie Hohlräume auf /17/. Eine Restporosität der generierten Bauteile bleibt prozessbedingt unvermeidbar /5,19/. Durch Beimengen von Additiven wie zum Beispiel Kupfer-Phosphor (Cu-P) oder Eisen-Phosphor (Fe-P) kann die Oberflächenspannung der Schmelze reduziert werden. Folglich sinkt der Schmelzpunkt und eine bessere Benetzung der Pulverteilchen wird erzielt /5,17,20,21/.

Durch das Ansteigen der Vorwärmtemperatur verringert sich der Temperaturgradient zwischen der bereits belichteten Pulverschicht und der aktuell aufgeschmolzenen Pulverschüttung in der Sinterzone. Infolgedessen werden die thermisch verursachten Eigenspannungen reduziert und vorhandene innere Spannungen werden abgebaut /22/. Aus einer konstanten Erstarrungsgeschwindigkeit und einem geringeren Temperaturgradienten resultiert eine kleinere Abkühlrate. Im Abkühlprozess mit hoher Erstarrungsgeschwindigkeit (Selbstabschreckung) entsteht folglich eine Vergrößerung in der Gefügestruktur einer Legierung. Ein grobkörniges Gefüge entsteht auch, wenn die Vorschubgeschwindigkeit gemindert wird. In diesem Fall verringert sich die Erstarrungsgeschwindigkeit und somit wird die Abkühlrate reduziert. Diese genannten Gefügeänderungen wirken sich unter anderem auch auf die Härte aus. Durch den Einfluss der Vorwärmtemperatur nimmt der Härtegrad weiter ab /22,23/.

Die nachfolgende schematische Abbildung 3 fasst die wesentlichen Temperaturen im Lasersinterprozess unter Vorwärmung zusammen. In der Temperaturbilanz bleiben die Raumtemperatur (Umgebungstemperatur), die Temperaturverteilung durch eingekoppelte Laserenergie sowie die Sinterzonentemperatur unverändert. Im Anwendungsfall a) mit gleichmäßiger Vorwärmung kühlen die erstarrte Schmelze und die untere Sinterschicht auf Vorwärmtemperatur ab. Die Pulvertemperatur entspricht der Temperatur durch Vorwärmung. Ohne eine installierte Vorwärmung wie im Fall b) bleibt die Pulvertemperatur auf Raumtemperatur und die Schmelze sowie die zuvor lasergesinterten Pulverschichten kühlen ebenfalls auf Umgebungstemperatur ab. Die Differenztemperatur zwischen Sinterzone und Pulverschicht (ΔT_{SZ}) wird unter Vorwärmung kleiner. Als Folge fällt

die Änderung der Wärme in der Sinterzone (ΔQ_{SZ}) gemäß Gleichung 1.4 geringer aus. Durch die eingekoppelte Laserenergie wird diese kleinere Differenzwärmemenge beigesteuert. Infolgedessen sinkt die Bearbeitungsschwelle und beispielsweise die Sintertemperatur wird schneller erreicht. Demzufolge wirkt bei konstanter Einkoppelzeit eine längere Sinterdauer.



a) mit Vorwärmung	b) ohne Vorwärmung	zu a,b) unverändert
$\left. \begin{matrix} T_{ES} \\ T_{uS} \\ T_{Pulver} \end{matrix} \right] = T_{Vorwärmung}$	$\left. \begin{matrix} T_{ES} \\ T_{uS} \\ T_{Pulver} \end{matrix} \right] = T_{Raum}$	$\left. \begin{matrix} T_{Raum} \\ T(x, y, z) \\ T_{SZ} \end{matrix} \right]$

Abbildung 3: Temperaturbilanz an der Sinterzonenoberfläche unter Einfluss von Vorwärmung im Lasersinterprozess /24/

Bei den temperaturabhängigen Parametern wie zum Beispiel der spezifischen Wärmekapazität des Pulvermaterials wird von konstanten Werten ausgegangen. Dieses Vereinfachen kann zu Abweichungen in den tatsächlichen Werten wie beispielsweise der Differenzwärmemenge führen. Eine vorhandene Vorwärmung beeinflusst diese Temperaturabhängigkeit je nach Vorwärmtemperatur im entsprechenden Maße. Durch den Einfluss zahlreicher Faktoren insbesondere durch die Temperaturabhängigkeit vieler Parameter ergeben sich oft abweichende Werte in der praktischen Anwendung. Die nachfolgende schematische Abbildung 4 gibt einen Überblick relevanter temperaturabhängiger Parameter und deren Auswirkung auf den Lasersinterprozess mit Vorwärmung.

a) Temperatur

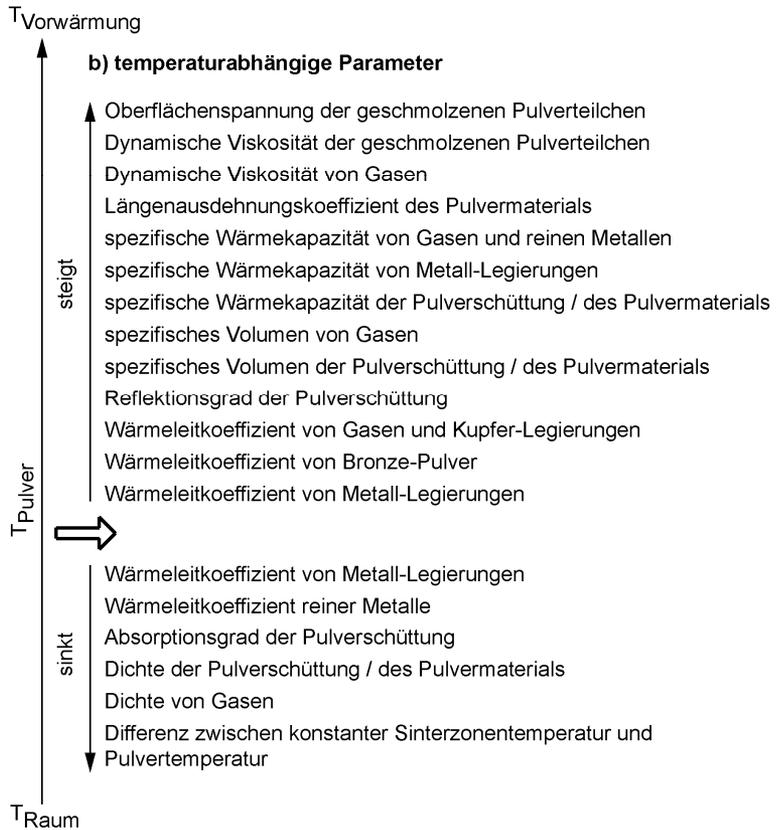


Abbildung 4: Relevante temperaturabhängige Parameter im Lasersinterprozess mit Vorwärmung /14,22,24 bis 40/

Nach dieser Darstellung beispielsweise steigt mit zunehmender Temperatur der Wärmeleitkoeffizient von Bronze-Pulver, Kupfer-Legierungen und Gasen an. Dagegen kann der Koeffizient bei Metall-Legierungen in Allgemeinen mit ansteigender Temperatur abfallen oder ansteigen. Folglich können durch eine Vorwärmung die Pulvertemperatur und der Wärmeleitkoeffizient einer Pulverschüttung ansteigen. Infolgedessen kann unter bestimmten Randbedingungen vergleichsweise mehr Wärme aus der Sinterzone abgeführt werden und der Wärmestau wird vermindert. Dieser Zusammenhang kann negative Auswirkungen auf den Lasersinterprozess haben und gegebenenfalls nicht zufriedenstellende Sinterergebnisse bewirken. Das

betrifft zum Beispiel die Maß- und Formabweichungen, die relative Sinterdichte oder die Porosität.

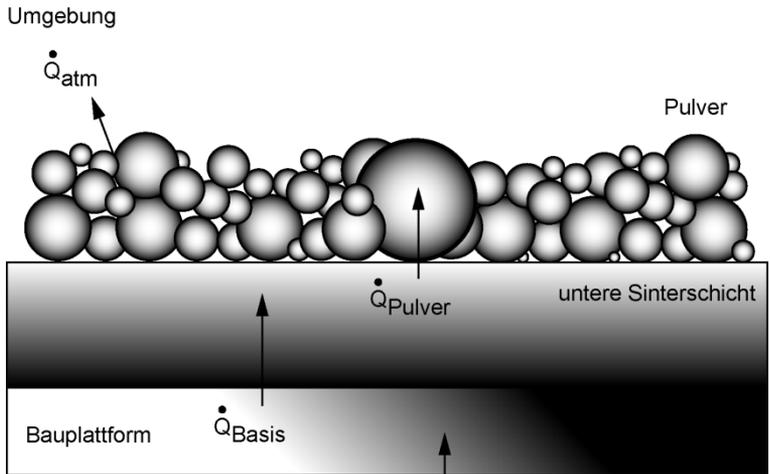
3 Vorwärmungsverfahren

Um hohe Leistungsdichten (Intensitäten), hohe thermische Wirkungsgrade und hohe Erwärmungsgeschwindigkeiten zu erzielen, werden ausschließlich direkte Erwärmungsarten betrachtet. Nachfolgend werden die drei elektrothermischen Verfahren konduktives Erwärmen beziehungsweise direkte Widerstandserwärmung, induktives Erwärmen und dielektrisches Erwärmen (Mikrowellen) hinsichtlich der Vorwärmung und des Lasersinterprozesses erläutert.

3.1 Direkte Widerstandserwärmung

Mit diesem Erwärmungsverfahren wird die Bauplattform durch ein Heizelement vorgewärmt. Das konduktive Erwärmen kann durchgehend (kontinuierliche Vorwärmung) während des gesamten Lasersinterprozesses erfolgen. Um den Einfluss der Vorwärmung zu beschreiben, illustriert die Abbildung 5 den Wärmestrom unter konduktiver Erwärmung. Die Abbildung a) zeigt schematisch den Wärmestrom unter konduktiver Erwärmung von der Bauplattform in die Pulverschüttung. Aufgrund der Wärmequelle in der Bauplattform, die sich folglich unterhalb der Pulverschicht befindet, ist dieses Vorwärmungsverfahren unabhängig von der lasergesinterten Bauteilhöhe. Allerdings nimmt mit ansteigender Bauteilhöhe der Wärmestrom der Vorwärmung durch Verluste und zunehmendes Volumen der Pulverschüttung ab. Dieser Sachverhalt gilt insbesondere für das Restpulver auf der Bauplattform. Durch das kontinuierliche Erwärmen des Pulvers auf Vorwärmtemperatur wird im Lasersinterprozess nur die Differenzwärmemenge zugeführt. Zusätzlich erfolgt die Selbstabschreckung der erstarrten Schmelze auf Vorwärmtemperatur. Die Abbildung 5 b) illustriert die Temperatureinwirkung durch Konduktion. Die Pulverteilchen werden von außen nach innen erwärmt. Eine konduktive Vorwärmungseinheit besteht aus mindestens einem Heizelement mit jeweils einem Thermoelement sowie einer Temperaturregelung. Widerstandsheizelemente wie zum Beispiel Heizpatrone und Flächenheizkörper werden unter anderem in der Beheizung von Werkzeugen (Kunststoffspritzguss) eingesetzt.

a) Wärmestrom unter konduktiver Vorwärmung



b) Erwärmung über Konduktion

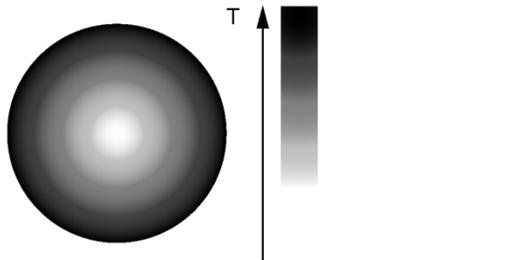


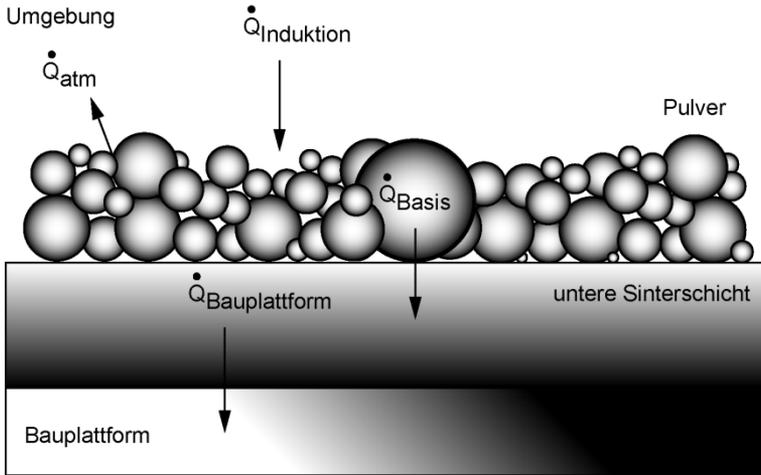
Abbildung 5: Wärmestrom unter konduktiver Vorwärmung /24/

3.2 Induktives Erwärmen

Um den Einfluss der Vorwärmung zu beschreiben, ist in der folgenden Abbildung der Wärmestrom unter induktiver Erwärmung dargestellt. Die Abbildung 6 a) zeigt schematisch den Wärmestrom unter induktiver Erwärmung von der Pulverschüttung in die Bauplatteform. Aufgrund der Wärmequelle (Induktionsspule) oberhalb der Bauplatteform ist dieses Vorwärmungsverfahren abhängig von der lasergesinterten Bauteilhöhe. Mit ansteigender Bauteilhöhe nimmt der Wärmestrom der Vorwärmung in die Bauplatteform durch Verluste und zunehmendes Volumen der Pulverschüttung ab. Der Wärmestrom in

die aktuellen Pulverschichten bleibt dagegen konstant. Nach Abschalten des Induktors versiegt die Wärmequelle schlagartig. Durch das diskontinuierliche Erwärmen des Pulvers auf Vorwärmtemperatur wird im Lasersinterprozess nur die gegenwärtige Differenzwärmenge zugeführt. Zusätzlich erfolgt die Selbstabschreckung der erstarrten Schmelze auf Raumtemperatur beziehungsweise aktuelle Temperatur der unteren Sinterschicht.

a) Wärmestrom unter induktiver Vorwärmung



b) Erwärmung über Induktion

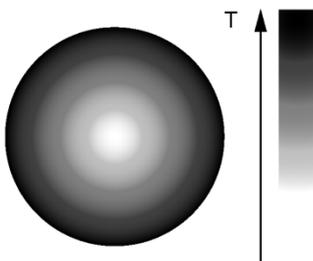


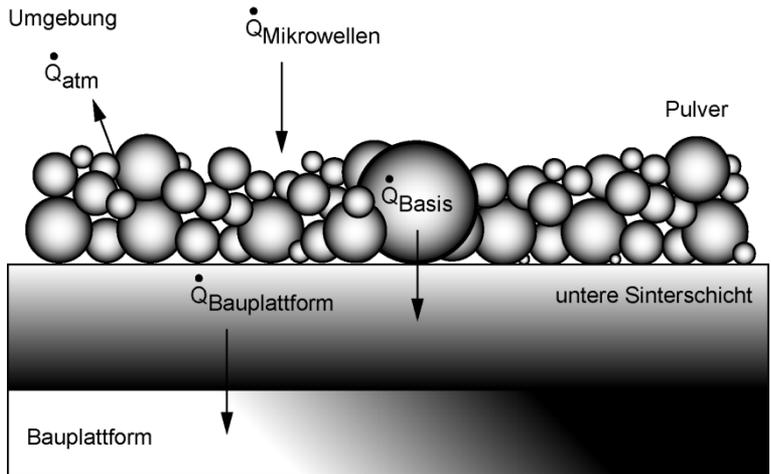
Abbildung 6: Wärmestrom unter induktiver Vorwärmung /24/

Die Abbildung 6 b) illustriert die Temperatureinwirkung durch Induktion. Die Pulverteilchen sowie die Bauplattform werden von außen nach innen erwärmt. Eine induktive Vorwärmungseinheit besteht aus einem Frequenzgenerator, einer Erwärmungsstation mit Induktor und Kühlsystem sowie gegebenenfalls einer Temperaturregelung.

3.3 Dielektrisches Erwärmen

Um den Einfluss der Vorwärmung zu beschreiben, ist in der folgenden Abbildung der Wärmestrom unter dielektrischer Erwärmung dargestellt.

a) Wärmestrom unter Vorwärmung mit Mikrowellen



b) Erwärmung über Mikrowellen

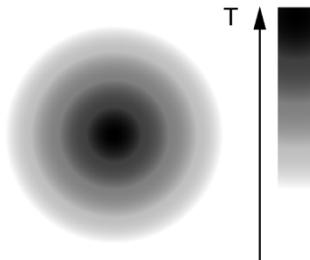


Abbildung 7: Wärmestrom unter Vorwärmung mit Mikrowellen
/24/

Um austretende Mikrowellen (Leckstrahlung) zu vermeiden, ist eine abgeschlossene Mikrowellenkammer erforderlich. Die Prozesskammer einer Lasersinteranlage ist mikrowellentechnisch als undicht zu charakterisieren. Deshalb ist eine zusätzliche abgedichtete Kammer für die Mikrowellenstrahlung notwendig. Damit die Mikrowellenkammer

das Lasersintern nicht stört, muss diese vor dem Auftreffen der Laserstrahlung in einen gesicherten Bereich verfahren werden. In diesem Fall liegt eine diskontinuierliche Vorwärmung vor. Die Abbildung a) zeigt schematisch den Wärmestrom unter dielektrischer Erwärmung von der Pulverschüttung in die Bauplattform. Aufgrund der Wärmequelle (Magnetron) oberhalb der Bauplattform ist dieses Vorwärmungsverfahren abhängig von der lasergesinterten Bauteilhöhe. Mit ansteigender Bauteilhöhe nimmt der Wärmestrom der Vorwärmung in die Bauplattform durch Verluste und zunehmendes Volumen der Pulverschüttung ab. Der Wärmestrom in die aktuellen Pulverschichten bleibt dagegen konstant. Nach Abschalten der Mikrowellenstrahlung versiegt die Wärmequelle augenblicklich. Durch das diskontinuierliche Erwärmen des Pulvers auf Vorwärmtemperatur wird im Lasersinterprozess nur die gegenwärtige Differenzwärmemenge zugeführt. Zusätzlich erfolgt die Selbstabschreckung der erstarrten Schmelze auf Raumtemperatur beziehungsweise aktuelle Temperatur der unteren Sinterschicht. Die Abbildung b) illustriert die Temperatureinwirkung durch Mikrowellen. Die Pulverteilchen werden von innen nach außen erwärmt. Dieses Erwärmungsverhalten ist ein markanter Unterschied zu konduktiven und induktiven Erwärmungsverfahren. Eine dielektrische Vorwärmungseinheit besteht im Wesentlichen aus mindestens einem Magnetron, einem Wellenrührer sowie einer Mikrowellenkammer. Zusätzlich sind elektronische Komponenten und Bauteile erforderlich.

4 Experimentelle Untersuchungen

Die installierte konduktive Vorwärmungseinheit erreicht eine Vorwärmtemperatur von 180°C. Ein Vorversuch zeigt bei ausgeschalteter Vorwärmung und lasergesinterten Proben aus Bronze-Nickel Pulver (Direct Metal 20) keine Auffälligkeiten. Dagegen treten bei identischen Vorversuchsbedingungen und eingeschalteter Vorwärmung starke rotbraune Verfärbungen auf. Das Pulver besitzt keine bronzetypische Farbe mehr sondern eine rotbraune teilweise regenbogenartige Schattierung. Hauptbestandteil des verwendeten Pulvers ist Kupfer, welches eine hohe Sauerstoffaffinität besitzt. Außerdem verfügt Kupfer beziehungsweise Kupferoxid über eine vergleichsweise niedrige Reduktionstemperatur. Das Ansteigen der Pulvertemperatur auf mindestens Vorwärmtemperatur führt zu einem Reduktionsprozess. Dieser Vorgang wird durch die Energieeinkopplung der Laserstrahlung sowie durch die Wärmeleitung innerhalb der Pulverschüttung und den folglich resultierenden Temperaturanstieg begünstigt. Die Reduktion von Kupferoxid setzt Sauerstoff frei, der mit der Umgebung reagieren kann. Die Schutzgasatmosphäre aus Stickstoff bindet den freien Sauerstoff und bildet Stickstoffdioxid (NO₂). Das Kupferoxid

wird durch den Entzug von Sauerstoff auf das Grundelement (Kupfer) zurückgeführt. Stickstoffdioxid ist ein rotbraunes, eigenartig riechendes und sehr giftiges Gas. Bei einer Temperatur von 21,2°C kondensiert es zu einer rotbraunen Flüssigkeit und erstarrt bei minus 10,2°C zu farblosen Kristallen. Die Temperatur innerhalb der Prozesskammer liegt wie die Kondensationstemperatur von Stickstoffdioxid nahezu bei Raumtemperatur. In den Schliffbildern ist keine rotbraune Verfärbung festzustellen. Die Porosität wird auf 9,1% bestimmt und entspricht dem vom Hersteller angegebenen Bereich von größer 8% für dieses Pulver.

In den Versuchen wird eine Pulvermischung aus keramischen und metallischen Bestandteilen verwendet. Eine Mischung besteht aus Kupfer-Nickel-Zirkoniumdiborid im Verhältnis (Cu90-Ni10)70-(ZrB2)30 in Gewichtsprozenten. Die zweite Pulvermischung ist analog der ersten aber mit Titandiborid (Cu90-Ni10)70-(TiB2)30. Wie im Vorversuch treten auch in diesem Prozess rotbraune Farbveränderungen auf. Allerdings ist die Farbintensität deutlich schwächer ausgeprägt. Aufgrund der keramischen Pulverteilchen und des im Vergleich zum Bronze-Nickel Pulver geringeren Kupferanteils reduziert sich die Wärmeleitfähigkeit der Pulverschüttung. Infolgedessen kann die zugeführte Wärme der Vorwärmungseinheit sich nicht in dem Maße Ausbreiten wie im Vorversuch. Die Schliffbilder der lasergesinterten Proben zeigen keine rotbraune Färbung. Die gemessene Dichte der Proben aus Zirkoniumdiborid ist vergleichbar mit den Werten vorhandener Proben die ohne Einwirkung der Vorwärmung lasergesintert wurden. Die ermittelte Porosität konnte dagegen um 8,8% reduziert werden. Die gemessene Dichte von Proben aus Titandiborid ist ebenfalls vergleichbar mit den Werten vorhandener Proben die ohne Einwirkung der Vorwärmung lasergesintert wurden. Die ermittelte Porosität stieg allerdings um 5,2% an.

5 Zusammenfassung

Das Anwenden einer konduktiven Vorwärmungseinheit im Lasersinterprozess (DMLS) hat Auswirkungen auf das Lasersinterergebnis. Die Anbindung der lasergesinterten Bauteile an die Bauplattform kann sich verbessern. Innere Spannungen im Bauteil lassen sich durch eine Vorwärmung verringern. Je nach Pulvermaterial kann die Bauteilporosität sinken oder ansteigen. Bei Kupferpulvern wird durch Erreichen der Reduktionstemperatur die Oxidation des Pulvers reduziert.

6 Literatur

- /1/ Li, Ruidi; et al. (2010): Selective laser melting W-10 wt.% Cu composite powders. In Int. J. of Adv. Manufacturing Tech.
- /2/ N.N. (2007): Laserbearbeitung. Festkörperlaser. Technische Dokumentation. Ditzingen: TRUMPF Werkzeugmaschinen
- /3/ Meiners, W. (1999): Direktes Selektives Lasersintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe. RWTH Aachen
- /4/ Weber, Roman; et al. (2008): Vorlesungen zur Wärmeübertragung. Teil I: Grundlagen. Clausthal-Zellerfeld
- /5/ Beyer, Eckard; et al. (1998): Oberflächenbehandlung mit Laserstrahlung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag
- /6/ Klocke, Fritz; König, Wilfried (2007): Fertigungsverfahren 3. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag
- /7/ Gieck, K.; Gieck R. (1995): Technische Formelsammlung. Germering: Gieck Verlag
- /8/ N.N. (2007): Laserbearbeitung. CO₂-Laser. Technische Dokumentation. Ditzingen: TRUMPF Werkzeugmaschinen
- /9/ Beaman, J.J.; et al. (1997): Solid Freeform Fabrication. A New Direction in Manufacturing. Kluwer Academic Publishers
- /10/ Clare, Adam T.; et al. (2007): SLM of high aspect ratio 3D nickel-titanium structures two way trained for MEMS applications. In Inter. J. of Mech. and Mater. Design. Berlin: Springer-Verlag
- /11/ Lu, L.; Fuh, J.; Wong, Y.S. (2001): Laser-Induced Materials and processes for Rapid Prototyping. Kluwer Academic Publishers
- /12/ Clare, Adam T.; et al. (2006): SLM of high aspect ratio 3D nickel-titanium structures for MEMS applications. In Mater. Research Soc. Symp. Cambridge: University Press
- /13/ Gu, Dongdong; et al. (2006): Processing and microstructure of submicron WC-Co particulate reinforced Cu matrix composites prepared by direct laser sintering. In Mater. Science and Eng.
- /14/ Hügel, Helmut; Graf, Thomas (2009): Laser in der Fertigung. Wiesbaden: Vieweg und Taubner
- /15/ Hügel, Helmut (1992): Strahlwerkzeug Laser. Eine Einführung. Stuttgart: B.G. Teubner Verlag
- /16/ Poprawe, Reinhart (2005): Lasertechnik für die Fertigung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag
- /17/ Kruth, J.P.; et al. (2004): Binding Mechanisms in SLS and SLM. Proc. of the 15th Annual Inter. Solid Freeform Fabr. Symp.
- /18/ Gebhardt, Andreas (2007): Generative Fertigungsverfahren. München: Carl Hanser Verlag
- /19/ Ellingham, Harold (1944): In J. Soc. of Chem. Industry. London
- /20/ Weber, G.; Gebhardt, A. (1995): Lösungen für die Praxis. Tagungsband. Aachen: Aachener Rapid Prototyping Tage

- /21/ Kruth, J.P.; et al. (2003): New Ferro Powder for SLS of Dense Parts. Annals of the Intern. Academy for Prod. Eng. College
- /22/ Buchbinder, Damien; et al. (2011): Untersuchung zur Reduzierung des Verzugs durch Vorwärmung bei der Herstellung von Aluminiumbauteilen mittels SLM. FH Aachen
- /23/ Buchbinder, D.; et al. (2008): Rapid Manufacturing von Aluminiumbauteilen für die Serienproduktion durch SLM. Euro-uRapid Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag
- /24/ Gasch, M. (2012): Konzept und Realisierung einer zusätzlichen Vorwärmung bei der Herstellung von Elektroden zum funkenerosiven Senken mittels SLS. Diplomarbeit. TU Clausthal
- /25/ Schatt, Werner (1992): Sintervorgänge. Düsseldorf: VDI-Verlag
- /26/ Hornbogen, Erhard (1994): Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen. Berlin: Springer-Verlag
- /27/ Hauffe, K. (1956): Oxidation von Metallen und Metalllegierungen. Berlin: Springer-Verlag
- /28/ Lindner, Helmut; et al. (2001/2003): Physik für Ingenieure. München, Wien: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag
- /29/ E-Eleser, Nuri Saad (1999): Herstellung von Senkerodierelektroden durch SLS. Dissertation. TU Chemnitz
- /30/ Hubert, G. (1999): LOI-Taschenbuch für Thermoprocess-Technik. LOI Thermoprocess GmbH. Essen: Vulkan-Verlag
- /31/ VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (2006): VDI-Wärmeatlas. Berlin: Springer-Verlag
- /32/ Kizaki, K.; et al. (1993): Phenomenological Studies in Laser Cladding Part 1. In Japanese J. of Applied Physics
- /33/ Schatt, Werner; et al. (1986): Sintermechanismen für die Intensivschwindung in einphasigen Systemen. In Metallkunde.
- /34/ Fritz, Alfred Herbert; Schulze, Günter (2010): Fertigungstechnik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag
- /35/ Voelkner, W.; Hardtmann, A. (2003): Fertigungstechnik 1. Erster Teil. Urformtechnik. TU Dresden
- /36/ N.N. (2009): Sintermetalle für Formteile (DIN 30910-4). Studien (BE), Schweiz: Meyer Sintermetall AG
- /37/ N.N. (2002): DirectMetal und DirectSteel Werkstoffe für EOSINT M. Materialdatenblatt. München: EOS GmbH
- /38/ N.N. (2005): CuSn6. Werkstoff-Datenblätter. Düsseldorf: Deutsches Kupferinstitut e.V.
- /39/ Yevko, V.; et al. (1998): Cladding Formation in Laser-Beam Fusion of Metal Powder. Comp. Integr. Manufact. Lab. University of Toronto. Ontario, Canada
- /40/ Song, Yong-Ak (1995): SLS metallischer Prototypen. Dissertation. RWTH Aachen