



Doctoral Thesis

Magnetohydrodynamischer (MHD) Druckkopf für die additive Fertigung von Metallbauteilen

Author(s):

Suter, Martin

Publication Date:

2012

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007612673> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH Nr. 20509

MAGNETOHYDRODYNAMISCHER (MHD) DRUCKKOPF FÜR DIE ADDITIVE FERTIGUNG VON METALLBAUTEILEN

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN

der

ETH ZÜRICH

vorgelegt von

MARTIN SUTER

Dipl. Ing. ETH

geboren am 7.04.1977

von Aarau und Seon

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. Konrad Wegener

Prof. Dr. Pavel Hora

2012

Kurzfassung

In der additiven Fertigung von Metallbauteilen sind heutzutage hauptsächlich metallpulver-basierte Fertigungsprozesse mit einem Laser als Werkzeug anzutreffen. Diese Prozesse haben durch den Laser-Einsatz den grundlegenden Nachteil, dass damit hohe Kosten verbunden sind, und eine Produktivitätssteigerung automatisch eine Kostensteigerung mit sich zieht. Eine Erhöhung der Produktivität wird aber vom Markt gefordert, damit eine grössere Verbreitung der additiven Verfahren erreicht werden kann.

Bei den additiven Verfahren in der Kunststoffbranche hat sich das Drucken von Bauteilen mittels vieler kleiner Tropfen (3D Printing) mittlerweile zu einem führenden Prozess entwickelt. Daher wird davon ausgegangen, dass ein Druckverfahren auch bei Metallbauteilen einen Entwicklungssprung ermöglichen könnte, da dabei die benötigte Schmelzenergie auf viel kostengünstigerem Weg bereitgestellt werden kann, als wenn ein Laser oder eine Elektronenstrahl dafür verwendet werden. Deshalb wird ein Tropfenerzeuger benötigt, der den hohen Temperaturen, die zur Metallverarbeitung benötigt werden, standhält. Aus dem Stand der Technik sind einige Tropfenerzeuger für Metalle bekannt, die aber verschiedene Nachteile aufweisen. Bei einigen ist die Temperaturbeständigkeit für Schmelzpunkte über 500°C nicht gegeben. Bei anderen ist die Tropfenerzeugung kontinuierlich und damit für einen Fertigungsprozess nur schwer nutzbar und bei einer dritten Gruppe ist für die Tropfenerzeugung ein erheblicher mechanischer Aufwand erforderlich. Kann dieser mechanische Aufwand und der damit verbundene Bauraumbedarf vermieden werden, so besteht die Möglichkeit, durch die Verwendung mehrerer paralleler Druckköpfe die Produktivität zu steigern. Dies ist ein Aspekt, dem in dieser Arbeit ebenfalls grosse Beachtung geschenkt wurde.

Ein Vorschlag für einen neuartigen Tropfenerzeuger konnte in einer Patentschrift niedergelegt werden. Dieser neuartige Druckkopf funktioniert mittels Magnetohydrodynamik als Aktuationsprinzip. Dabei wird mittels einer Spule ein Magnetfeld im Druckkopf erzeugt und gleichzeitig ein Stromimpuls durch die Schmelze geleitet. Nach dem Prinzip der Lorenzkraft wird dabei eine Volumenkraft in der Schmelze erzeugt, welche für den Tropfenausstoss verantwortlich ist. Der vorgeschlagene Druckkopf kann in hohem Masse parallelisiert werden, kann im

Drop-on-Demand Modus arbeiten, hat keine bewegten Teile und kann aus Materialien gefertigt werden, welche höchsten Temperaturen standhalten.

Von diesem konzeptuellen Entwurf wurde in dieser Arbeit eine Vorstufe, nämlich ein MHD-Druckkopf mit einer einzelnen Düse, untersucht und als Funktionsprototyp aufgebaut.

Die Untersuchungen umfassten dabei die eindimensionale statische und dynamische Modellierung des Tropfenerzeugungsvorgangs, sowie der dafür benötigten Aktuierungskräfte. Dafür wurde mit vereinfachenden Annahmen die Impulsgleichung für die Metallschmelze aufgestellt und durch numerische Integration gelöst. Die Resultate daraus dienen dem Verständnis des Prozesses und konnten benutzt werden, um Auslegungsgrößen für den Versuchsstand herzuleiten.

Der Versuchsprototyp wurde in einem eigens dafür ausgerüsteten Versuchsumfeld in Betrieb genommen. Mittels High-Speed Aufnahmen des Druckkopfs und weiteren Sensordaten konnte die Tropfenerzeugung untersucht werden. Als wichtigstes Ergebnis konnte nachgewiesen werden, dass die Tropfenerzeugung mit einem MHD Druckkopf möglich ist. Mit Zinn als Arbeitsmedium wurden Tropfen mit 0.8 mm bis 1.6 mm Durchmesser im Drop-On-Demand Modus erzeugt. Die dabei mögliche Tropfenfrequenz (bei entsprechend vorhandener Leistungselektronik) kann mit ca. 50 Hz angegeben werden. Damit ist ein Volumenauftrag möglich, der die bestehenden Prozesse um Faktoren übersteigt. Die Standardabweichungen des Tropfendurchmessers und der Geschwindigkeit betragen bei den ausgewerteten Versuchen 7.4% bzw. 3.2% und sind damit zufriedenstellen gering. Die Abweichungen der Flugbahn besitzen eine Standardabweichung von 0.27° , wodurch ein Arbeitsabstand des Druckkopfs vom Bauteil von bis zu 8 mm möglich wird.

Mit dem verwendeten Versuchsaufbau konnten zwei Punkte jedoch nicht genügend gelöst werden. Erstens stellte sich der Schutz der Schmelze vor Oxidation als ungenügend heraus, so dass sich eine Oxidhaut auf der Schmelze bildet. Diese haftet an den Wänden des Druckkopfs an, und führt zu einer mangelnden Wiederholbarkeit von einzelnen Tropfenerzeugungsvorgängen.

Zweitens sind vereinzelt bei der Tropfenerzeugung elektrische Funken zwischen einer Elektrode und der Schmelze entstanden. Diese Funken führen zu einem unkontrollierten Schmelzeausstoss, und sie verändern die Charakteristik

des Druckkopfs dauerhaft, d.h. so, dass neue Impulsparametern gefunden werden müssen um wieder eine gleiche Tropfenerzeugung zu erhalten.

Um die Funkenentstehung phänomenologisch zu untersuchen, wurde eine Strömungsanalyse mit einem CFD-Tool durchgeführt. Damit konnte gezeigt werden, dass der Funkenbildung eine Entnetzung einer Elektrode vorangeht. Diese Entnetzung wird dadurch ausgelöst, dass die MHD-Volumenkraft am Berührungspunkt des oberen Schmelzemeniskus mit der Elektrode eine Kraftkomponente besitzt, welche von der Elektrode weg zeigt. Beginnt die Entnetzung, so verstärkt sich diese instabil, so lange der Stromimpuls andauert. Ist die ganze Elektrode entnetzt, so findet über den entstandene Luftspalt der Funkenüberschlag statt. Ein Vorschlag, wie mit einem konstruktiven Eingriff in den Aufbau des Druckkopfs die Funkenbildung verhindert werden könnte, zeigt die Richtung an, in welche sich eine Optimierung des Druckkopfs bewegen sollte.

Die CFD-Analyse kann, nachdem ein Abgleich mit Versuchsergebnissen und eine Verifizierung stattgefunden hat, als neues Simulations- und Optimierungswerkzeug für die Weiterentwicklung des Druckkopfs dienen. Dies ist ein weiteres wichtiges Ergebnis dieser Arbeit.

In dieser Arbeit konnte somit die grundsätzliche Machbarkeit eines MHD Druckkopfs bestätigt werden und eine Versuchs- und Simulationsumgebung geschaffen werden, welche für weitere Arbeiten zur Verfügung steht. Können die Probleme mit der Funkenbildung wie vorgeschlagen behoben werden und wird der Schutz der Schmelze genügend verbessert, dann sind wiederholbare und modellierbare Versuchsergebnisse zu erwarten.

Abstract

In additive manufacturing of metal parts mainly powder based processes can be found. The tool of these processes is the laser beam. The disadvantage of the use of laser beams lies in the high costs of laser sources. Therefore, an increase in productivity, which means an increase in laser power or in numbers of laser sources, automatically triggers an increase in costs. But for a larger market share of additive manufacturing, a better cost-effectiveness is needed.

When looking at additive manufacturing processes for plastic parts, one can find, that in the last ten years 3D-Printing (three dimensional printing) has become one of the leading process technologies. This success is based on the use of many nozzles, each acting as a tool, and all working in parallel. As a conclusion, 3D-Printing for metal parts could be the cost-effective way in additive metal parts manufacturing.

For this new process, a droplet generator is needed, which can withstand the high temperatures needed for melting metals. In the state of the art a number of droplet generators can be found, but all of them have disadvantages. Some of them are not resistant to temperatures above 500°C. Others produce a constant stream of droplets and are therefore difficult to utilize in a manufacturing process. And in a third group, a substantial mechanical apparatus is needed for each nozzle and parallelization of nozzles seems not practical.

But parallelization is an important aspect and is specially addressed in this work. A proposal for a novel metal print head has been registered for patent. This novel print head utilizes magnetohydrodynamic (MHD) actuation as main working principle. For MHD actuation a magnetic field is generated by a coil, while at the same time a pulse of electric current is sent through the molten metal. This produces a Lorenz volume force in the melt, which results in the ejection of a droplet. A Drop-on-Demand mode can be employed, with one current pulse per droplet and no moving parts and therefore great mechanical simplicity. This simplicity is also favoring the parallelization of nozzles and it can be expected, that a high packing density of nozzles can be reached with this concept. The simple mechanical design allows the use of ceramics and refractory metals and therefore very high operating temperatures are possible.

A first step towards the realization of this print head concept is conducted in this work. This first step consists of a MHD print head with a single nozzle, which has been realized in a functional prototype.

For the theoretical analysis one-dimensional models of the printing process have been developed, both static and dynamic. In the models, assumptions are used to set up the equation of momentum and then a numerical solution is computed. The most important result of this work is the prove of concept for a MHD printhead. Tin droplet with diameters between 0.8 mm and 1.6 mm were created in a Drop-On-Demand operation mode. With sufficiently strong electronic circuits the maximum frequency for droplet generation can be given as approximately 50 Hz. With this frequency the volume output of the process is by numbers larger compared with existing additive processes.

The standard deviation of the droplet diameter and velocity were 7.4% and 3.2% in the investigated experiments. This is satisfyingly small and well suited for manufacturing. The angular deviation of the flight path has a standard deviation of 0.27°. This allows for a working distance between workpiece and printhead of up to 8 mm.

With the experimental setup at hand, two issues remain unsolved. One is the insufficient protection of the melt against pollution with oxides. This leads to the formation of a oxide skin on the melt, which sticks to the print head walls and changes the wetting behavior of the melt. The result from this is a poor repeatability of the droplet generation, which makes modeling it impossible.

The second issue is the occurrence of sparks between the electrodes and the melt. These sparks lead to a uncontrolled melt ejection and they alter the characteristics of a print head permanently. After a spark has occurred, new actuation parameters have to be found for a good droplet generation.

To investigate the appearance of sparks, a CFD analysis of the droplet ejection has been conducted. It showed, that spark ignition is preceded by the complete dewetting of one of the electrodes. This dewetting is initiated by the MHD volume force. On the contact point between the upper melt meniskus and the electrode, this volume force has a force component pointing away from the electrode. Thus the melt starts dewetting the electrode, which is an instable process as long as the volume force is acting. Once the complete electrode is dewetted, a spark ignites. One way to overcome the sparks, would be a design

change in the upper printing channel. A proposal for a baffle, changing the flow of electricity at the upper contact point, shows the route for further investigations.

In extension to the conducted investigations, the CFD model could also be used for studies including the droplet formation stage. A prerequisite for this would be the comparison of the model with experimental data.

As a conclusion, it can be stated, that the prove of concept for a MHD print head has been provided. Further, an experimental setup and a simulation environment enabling further studies are available. If the protection of the melt can be improved and the sparks can be avoided as proposed, then repeatable experimental results seem possible.