

# WÄRMEBEHANDLUNG VON BAUTEILEN AUS PULVERSPRITZGUSS & ADDITIVER FERTIGUNG

CARBOLITE GERO bietet passende Öfen für die verschiedenen Prozessschritte im Pulverspritzgussverfahren (PIM) und in der Additiven Fertigung (AM) von Metall- oder Keramikteilen an. Dazu zählen z. B. das thermische oder katalytische Entbindern, das Trocknen von Teilen, z. B. nach der Lösemittelentbinderung, das Spannungsarmglühen sowie das Sintern unter Schutzgas, Wasserstoff oder Vakuum.

Die Additive Fertigung von Metallteilen lässt sich in einen direkten und einen indirekten Prozess unterteilen. CARBOLITE GERO hat sein Produktprogramm mit dem GPCMA für direkte und dem HTK für indirekte AM und PIM Prozesse nach den höchsten Anforderungen entwickelt. Dies sind nur zwei Öfen aus dem umfangreichen Programm für die Additive Fertigung.

## Spannungsarmglühen im direkten AM Prozess

Im direkten Prozess wird das Ausgangspulver selektiv geschmolzen und Schicht für Schicht verfestigt bis ein komplexes dreidimensionales Teil entstanden ist.

Wenn Metallpulver durch einen Laserstrahl geschmolzen wird (Selective Laser Melting SLM – Standardbezeichnung: Laser Powder Bed Fusion L-PBF), ist eine nachfolgende Wärmebehandlung der gefertigten Teile erforderlich.

Der SLM Prozess wird digital direkt von den 3D CAD Daten gesteuert. Für jede Bauteilschicht wird eine dünne Schicht feines, gesiebtes Metallpulver (Titanlegierung Ti6Al4V, Kobaltchrom, rostfreier Stahl, Nickellegierungen Inconel 625 und Inconel 718 und Aluminiumlegierung AlSi10Mg) auf einer Bauplattform aufgebracht, bevor die selektierten Bereiche des Pulvers präzise durch den Laser geschmolzen werden. Dieser Prozess wird so lange wiederholt bis das Produkt Schicht für Schicht fertiggestellt ist.

SLM eignet sich für die Herstellung sehr kleiner Teile und Komponenten. Es lassen sich Geometrien reproduzieren, die auf anderem Wege nicht machbar wären, wie zum Beispiel eingeschlossene Räume. Die einzelnen Schichten können bis zu 20 µm dünn sein, die Toleranzen liegen bei ±50 µm.

Momentan sind die Aufbauraten für Teile die mittels SLM gefertigt werden eher niedrig. Die Kosten sind hoch, da das Ausgangsmetallpulver mit Hilfe von Kugelmøhlen produziert wird und anschließend gesiebt und geprüft werden muss, bevor es verwendet werden kann. Die aktuellen SLM Maschinen erfordern eine beträchtliche Investition.

Wenn das zu fertigende Teil Abmessungen bis 250 mm x 250 mm x 350 mm aufweist, könnte der Fertigungsprozess ideal sein für Unternehmen, die Rapid Prototyping oder geringe Mengen komplexer oder „unmöglicher“ Teile benötigen, welche anschließend maschinell gebohrt, gefräst, aufgerieben, pulverbeschichtet, lackiert, poliert oder eloxiert werden.



Abb. 1: GPCMA Großraum-Kammerofen für Schutzgasatmosphäre mit Temperaturen bis zu 1200°C und einem möglichen Sauerstoffgehalt von <30 ppm. Er wird für das Spannungsarmglühen von Teilen eingesetzt, die mittels SLM gefertigt wurden.



Teile, die mittels der direkten additiven Fertigungsmethode SLM hergestellt werden, weisen hohe Eigenspannungen auf, ausgelöst durch den lokal konzentrierten hohen Energieeintrag und die Bildung eines hohen Temperaturgradienten unter dem Schmelzbad.

Die Reduktion der Eigenspannungen erfordert eine nachfolgende Wärmebehandlung mit präziser Temperaturhomogenität. Zu diesem Zweck wird die Komponente für einen definierten Zeitraum bei einer bestimmten Temperatur gehalten. Der Wärmebehandlungsschritt muss präzise überwacht werden, um die mechanischen Eigenschaften der verwendeten Metalllegierung gezielt einzustellen, indem die Eigenspannungen effektiv verringert werden.

Zudem wird die Wärmebehandlung unter Schutzgasatmosphäre durchgeführt, um sicherzustellen, dass das gesinterte Teil nicht mit Sauerstoffmolekülen kontaminiert wird, welche die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Endproduktes verändern könnten.

Mit dem **Großraum-Kammerofen für Schutzgasatmosphäre (GPCMA)** bietet CARBOLITE GERO ein Produkt für das Spannungsarmglühen von additiv gefertigten Bauteilen an, welches die täglichen Betriebskosten reduziert, unerwünschte Oxidation verhindert und hervorragende Temperaturhomogenität garantiert.



Abb. 2: Blick in eine Metallretorte des GPCMA/174 mit additiv gefertigter Probe zum Spannungsarmglühen.

Der Ofen ist in verschiedenen Größen erhältlich (**GPCMA/37, GPCMA/56, GPCMA/117, GPCMA/174, GPCMA/208 & GPCMA/245**) mit Kapazitäten für 1 bis 4 Bauplattformen zur vollen Ausnutzung des Kammervolumens auch bei kleinen Probengrößen. Eine Anpassung an die Anforderungen der AMS2750E Nadcap Klasse 1 für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt ist durch den Einsatz einer Inconel oder Haynes 230 Retorte möglich.

Die Wärmebehandlung erfolgt unter Schutzgasatmosphäre (üblicherweise Stickstoff und Argon [für Titan]). Der Sauerstoffgehalt lässt sich je nach Anwendung bis auf 30 ppm reduzieren.

Die GPCMA Öfen verfügen über eine Unterbodenheizung in Verbindung mit einer Beheizung von oben und von den Seiten zur Verbesserung der Temperaturhomogenität in der Retorte, wo sich die Thermoelemente befinden. Die Platzierung der Kaskadensteuerung in der Retorte ermöglicht schnellere Aufheizraten, wodurch die Zyklen in der Kundenanwendung deutlich reduziert werden können, wenn die optionale forcierte Kühlung zum Einsatz kommt.

Um die Durchlaufzeiten noch weiter zu verringern, verfügt der GPCMA/174 über eine temperaturverriegelte leichtgängige Drehtür, welche das Be- und Entladen des Ofens erleichtert. Die Tür verfügt über eine wassergekühlte Silikongummidichtung, so dass eine Schutzgasatmosphäre in der Kammer über den gesamten Wärmebehandlungsprozess aufrechterhalten werden kann.



Abb. 3: Vakuumofen HTK mit metallischer Kammer für das Entbindern und Sintern von spritzgegossenen und additiv gefertigten Bauteilen bei bis zu 1450 °C.

## Restentbindern und Sintern in PIM und indirekten AM Prozessen

Im indirekten additiven Fertigungsprozess sowie beim Pulverspritzgießen, welches sowohl für Metalle als auch für Keramiken genutzt wird, wird das Ausgangspulver mit einem Bindemittel vermischt. Dieses ist nach dem Formen des Grünlings noch vorhanden und wird in einem nachfolgenden Schritt thermisch, katalytisch oder mithilfe von Lösemitteln entfernt, was zur Schrumpfung des Bauteils führt. Das erhaltene Brauteil wird anschließend gesintert, um dem Fertigteil seine finalen Eigenschaften und die endgültige Form zu verleihen.

Zunächst wird das Hauptbindemittel entfernt, z. B. auf thermischem Weg. Nach diesem Prozessschritt wird das Pulver nur noch durch einen Restbinder zusammengehalten, was das Bauteil sehr empfindlich macht. In einem weiteren Schritt wird der Restbinder thermisch entfernt und das Teil direkt in demselben Ofen gesintert. Die Entbinderungs Schritte im Ofen machen die Entfernung der gasförmigen Abfallprodukte sowie eine präzise Temperaturverteilung erforderlich, um die Materialeigenschaften des gesinterten Teils gezielt anzupassen. Entbindern kann unter Vakuum, Luft oder Schutzgas stattfinden. Letztere werden häufig als Trägergas genutzt, um den Gasfluss

zu verbessern, die gasförmigen Abgangsprodukte „wegzufegen“ und die Entbinderungszeit zu verkürzen. Der Entbinderungsprozess erfordert Öfen mit spezifischen Atmosphären wie CARBOLITE GERO sie anbietet. Um das Oxidieren der meisten Metalle und Nichtoxidkeramiken zu verhindern, wird das Sintern unter Schutzgas (Ar oder N<sub>2</sub>) oder Reduktionsgas (H<sub>2</sub> für Edelstahl) durchgeführt. Für hochreine Anwendungen, wie z. B. das Sintern von Titan, ist sogar ein Hochvakuum erforderlich. Oxid- oder nitridbasierte Keramiken wie Aluminiumoxid, Zirkonoxid und Aluminiumnitrid können an Luft gesintert werden.

Der HTK Ofen eignet sich hervorragend für das Restentbindern und Sintern von additiv gefertigten oder pulverspritzgegossenen Bauteilen. Die hohe Temperaturhomogenität ermöglicht ein präzises Entbindern und Sintern über das gesamte Kammervolumen. Die Möglichkeit, unter Schutz- oder Reaktivgas, Hochvakuum oder sogar Ultrahochvakuum zu arbeiten macht auch das Sintern von sehr empfindlichen Teilen möglich.

Das rechteckige Design mit Fronttür erlaubt einfaches Be- und Entladen der fragilen Bauteile, die nur durch den Restbinder zusammengehalten werden. Die HTK Serie ist in vier Größen erhältlich: 8 Liter, 25 Liter, 80 Liter und 200 Liter.

Die Modelle mit metallischen Kammern aus Wolfram (HTK W) oder Molybdän (HTK MO) ermöglichen eine Schutzgasatmosphäre von höchstmöglicher Reinheit und ein Endvakuumniveau im Hochvakuumbereich ( $5 \times 10^{-6}$  mbar). Es kann sogar ein Ultrahochvakuum konfiguriert werden. Typische Gase sind z. B. Stickstoff, Argon (Titan), Wasserstoff (Edelstahl) oder Mischungen.

Die Heizelemente bestehen aus dem gleichen Metall wie die Isolierung. Diese besteht aus mehreren Hitzeschilden aus Wolfram oder Molybdän, je nach ausgewähltem Ofentyp. Mit einer Retorte lässt sich der Gasfluss leiten und die Temperaturhomogenität verbessern. Die Maximaltemperatur des HTK W liegt bei 2200 °C, die des HTK MO Modells bei 1600 °C.

Die gasförmigen Abfallprodukte, die beim Entbindern entstehen, werden durch einen beheizten Gasauslass geleitet und im Nachbrenner verbrannt. Ein umschaltbarer Gasfluss ermöglicht das kontaminationsfreie Sintern von hochempfindlichen Materialien (siehe Abb. 4).

Während des Entbinderns fließt das Gas von oben durch den rechten Einlass hinter die Retorte. Da diese nicht vollständig

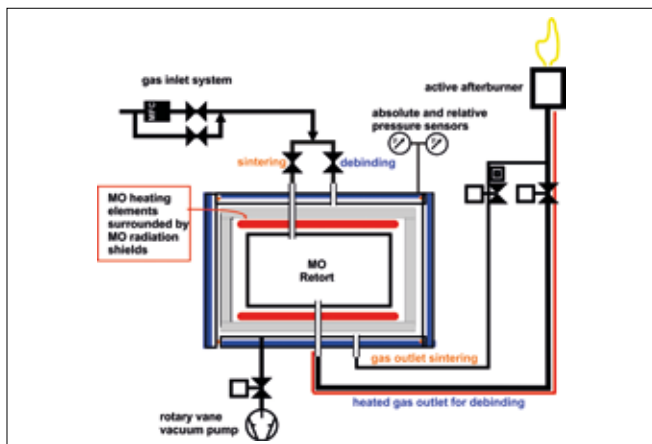


Abb. 4: Gasführung durch die Retorte während des Entbinderns oder Sinterns.

abgedichtet ist und der Druck außerhalb der Retorte etwas höher ist als innerhalb, fließt das Gas in die Retorte hinein. Dabei nimmt das Trägergas den gasförmigen Binder mit in den Gasauslass am Fuß der Retorte. Die Gase werden dann durch den beheizten Auslass zum Nachbrenner geleitet.

Nach dem Entbinderungsschritt lässt sich der Gasfluss ändern, um eine hochreine Atmosphäre in der Retorte zu schaffen. Das Gas fließt jetzt durch den oberen linken Einlass direkt in die Retorte und wieder hinaus, wo es den unteren rechten Gasauslass passiert und in den Nachbrenner gelangt. Da kein gasförmiger Binder mehr enthalten ist, muss der Auslass auch nicht beheizt werden. Dieser veränderte Gasfluss verhindert, dass Rückstände des Binders außerhalb der Retorte während des Sinterns wieder in die Proben gelangen, so dass man am Ende saubere Proben erhält.

In der Kammer befinden sich die Heizelemente am Boden, an der Decke und an der linken und rechten Seite, wodurch eine sehr gute Temperaturhomogenität erzielt wird. Um diese auch bei großen Kammeröfen zu erreichen, sind zusätzlich die Rückwand und die Tür mit Heizelementen ausgestattet. Die HTK Öfen werden von einem doppelwandigen Kessel umschlossen, durch den Kühlwasser fließt. Man spricht daher auch von Kaltwandöfen.

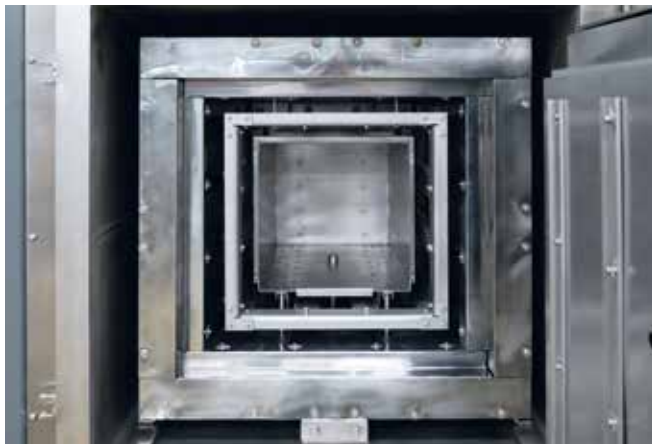


Abb. 5: Molybdän-Retorte des HTK für hochreine Atmosphäre und Vakuum.

## CARBOLITE GERO – WÄRMEBEHANDLUNG

CARBOLITE GERO ist ein führender Hersteller von Hochtemperaturöfen von 30 °C bis 3000 °C mit einem besonderen Schwerpunkt im Bereich Vakuum, Schutzgas und reaktiver Atmosphäre. Unsere Geräte, die wir auf Basis jahrzehntelanger Erfahrung in der Hochtemperaturtechnologie entwickeln, werden weltweit erfolgreich in Forschung, Technikum und Fertigung eingesetzt.

- Wärmeschränke
- Kammeröfen
- Rohröfen
- Vakuumöfen
- Anwendungsspezifische Öfen
- Sonderanfertigungen

Mehr Informationen auf [www.carbolite-gero.de](http://www.carbolite-gero.de)

## Fazit

Mit dem GPCMA bietet CARBOLITE GERO einen Ofen für das Spannungsarmglühen additiv gefertigter Produkte an, der die täglichen Betriebskosten minimiert, unerwünschte Oxidation verhindert und hervorragende Temperaturhomogenität gewährleistet. Vor allem lassen sich die Durchlaufzeiten dank der Rundum-Beheizung, der optionalen forcierten Kühlung und einfachen Be- und Entladung durch die wassergekühlte, mit Silikon abgedichtete Drehtür reduzieren.

Der HTK Ofen eignet sich hervorragend für das Restentbindern und Sintern von pulverspritzgegossenen oder additiv gefertigten Komponenten. Die hohe Temperaturhomogenität erlaubt das präzise Entbindern und Sintern im gesamten Kammervolumen. Die größtmögliche Reinheit der Schutzgasatmosphäre und das Endvakuum im Hochvakuumbereich bis hin zum Ultrahochvakuum erlauben das Sintern hochempfindlicher Materialien wie Titan.

CARBOLITE GERO bietet Kunden auf Anfrage die Möglichkeit, additiv gefertigte Proben testweise wärmebehandeln, um die bestmögliche Lösung für individuelle Anforderungen zu finden.

Modell	Innenabmessungen Retorte: H x B x T [mm]
<b>GPCMA/37</b>	205 x 337 x 538
<b>GPCMA/56</b>	229 x 400x 610
<b>GPCMA/117</b>	279 x 500 x 840
<b>GPCMA/174</b>	428 x 500 x 815
<b>GPCMA/208</b>	428 x 500 x 970
<b>GPCMA/245</b>	650 x 700 x 1050
<b>HTK 8</b>	190 x 170 x 200
<b>HTK 25</b>	250 x 250 x 400
<b>HTK 80</b>	400 x 400 x 500



## CARBOLITE GERO LÖSUNGEN FÜR DIE ADDITIVE FERTIGUNG & PULVERSPRITZGUSS



### GPCMA Großraum-Kammeröfen für Schutzgasatmosphäre für die Additive Fertigung

- Spannungsarmglühen unter  $N_2$ , Ar
- $O_2$  Gehalt unter 30 ppm möglich
- Präzise Temperaturhomogenität



### HTK Vakuumofen mit metallischer Kammer für PIM und Additive Fertigung

- Entbindern und Sintern unter  $H_2$ , Ar,  $N_2$
- Umschaltbarer Gasfluss zur Behandlung empfindlicher Materialien
- Vollautomatische Steuerung

[www.carbolite-gero.de](http://www.carbolite-gero.de)