Mehr Informationen:
www.elektrowaerme-online.de

# Aspekte zur Konvektionserwärmung und Temperaturgleichmäßigkeit bei Vakuum- und Schutzgasöfen

von **Olaf Irretier**

Die Erwärmung beim Glühen und Härten von metallischen Bauteilen in Vakuum- und Schutzgasglühöfen findet über Wärmeleitung, Konvektion oder Wärmestrahlung statt. Die in einem Industrieofen unter Vakuum stattfindenden thermischen Prozesse können demnach nur die Wärmestrahlung zur Übertragung der Wärmeenergie nutzen. Dieses kann mit einer Reihe von Nachteilen verbunden sein; so verzögert sich in der Regel bei Temperaturen bis etwa 700 °C die Erwärmungsdauer im Vakuum gegenüber erzwungener, konvektiver Erwärmung, die durch Anwesenheit eines Schutzgases erreicht wird. Außerdem kann durch Konvektion während der Aufheizdauer eine verbesserte Temperaturgleichmäßigkeit in der Charge und im Bauteil erreicht werden, welches in deutlich optimierte Bauteileigenschaften beim Glühen und Härten resultiert. Der vorliegende Beitrag behandelt das Thema der konvektiven Erwärmung bei Vakuum- und Schutzgasglühöfen und stellt die wesentlichen Aspekte in Zusammenhang mit der Ofenausführung dar.

## Vacuum and protective gas furnaces – Aspects of convective heating and temperature homogenity

Heating up of annealing and hardening processes of metal components in vacuum and protective gas furnaces takes place by conduction, convection or radiation. In industrial furnaces under vacuum conditions heat transfer to metal parts surfaces for heating up is therefore only be possible by heat radiation. This can lead to some general disadvantages; f.e. delayed heating up time to 700 °C in comparison to convective heating under protective gas. Furthermore a better temperature homogenity for better metal parts properties is also be possible by convective heating up. This report shows the general issues for convective heating in vacuum and protective gas furnaces.

Die Vakuum- und Schutzgaswärmebehandlung findet heute in vielen Bereichen der Herstellung und Verarbeitung von metallischen Bauteilen weite Verbreitung. So wird beispielsweise beim Härten, Glühen, Anlassen, Sintern Löten, Lösungsglühen von rostfreien Stählen, Aushärten, Entgasen von Sonderlegierungen etc. auf die Möglichkeiten der Vakuumofentechnik zurückgegriffen.

Zum Einsatz kommen eine Vielzahl von Ein- und Mehrkammervakuum- und Schutzgasöfen – bis hin zu modular und vollautomatisch betriebenen Anlagen in horizontaler und vertikaler Bauart (**Bild 1**). Vakuum- und Schutzgasöfen sind generell flexibel im Design ausgeführt, als energieeffizient zu bewerten und in vielen Bereichen dezentral, aber auch aufgrund der „sauberen" Betriebsweise im Bereich der „lean"-Produktion im Einsatz. Die wesentlichen Anwendungen der Vakuumwärmebehandlung liegen im Bereich Werkzeug- und Formenbau, Luft- und Raumfahrtindustrie, Automobilindustrie, Lohnhärterei, Medizinindustrie und

Mehr Informationen:
www.elektrowaerme-online.de

**Bild 1**: Modulare Vakuumofenanlage Typ ICBP (ECM)

**Bild 2**: Einkammer-Vakuumofen Typ VH 669 mit Heliumabschreckung (Rübig)

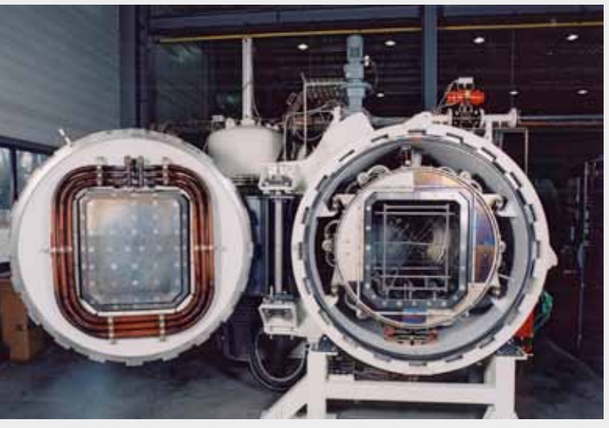

**Bild 3**: Vakuumofen mit Ganzmetallheizkammer-Molybdän (ECM)

chirurgische Geräte, Lebensmittelindustrie, Solartechnik, Turbinenbau, Wärmetauscher und Schneidwerkzeuge.

Vakuumwärmebehandlungen finden in der Regel im Druckbereich von 10-3 bis 10-6 mbar statt. Die erforderliche „Dichtheit" einer Ofenanlagen oder auch Leckrate genannt liegt bei 10-3 mbar l/s. Restgasatmosphären bestehen aus geringen Mengen an oxidierenden oder aufstickenden Gasen wie z.B. $H_2O$ (ca. 80 %), $N_2$ (ca.15 %), $O_2$ und CO (ca. 5 %). Der Temperaturbereich für Vakuumwärmebehandlungen liegt in der Regel bei 150 bis 1.300 °C (bis max. 3.000 °C). Standard-Vakuumöfen sind mit Grafitauskleidung/-beheizung und integriertem Abschrecksystem ausgestattet (**Bild 2**).

Bei jeder Erwärmung reagiert grundsätzlich der in einer Ofenanlage vorhandene Luftsauerstoff mit der Oberfläche des Werkstückes (Oxidation). Diese Reaktion fällt umso heftiger aus, je höher die Temperatur und je größer die Menge an Sauerstoff ist. Bei entsprechend langer Verweilzeit der Bauteile auf hohen Temperaturen kommt es dann auf der Bauteiloberfläche zu einer Verzunderung (ab ca. 600 °C) und zur Ent- bzw. Abkohlung der Oberfläche (ab ca. 780 °C), die sich bei einem Härteprozess als ungewollte „Weichhaut" darstellt. Aus diesem Grund ist bei jeder Erwärmung ab ca. 300 °C eine Schutzgasatmosphäre erforderlich. Bei höheren Temperaturen bietet schließlich das Vakuum Schutz vor Oxidation und Entkohlung. Selbst bei Härtetemperaturen von 1.300 °C sind die Werkstücke nach dem Härten absolut blank.

## KONVEKTIVE ERWÄRMUNG

Bei Nachfrage nach den Vorteilen der Vakuumwärmebehandlung gegenüber „klassischen" atmosphärischen Wärmebehandlungsverfahren werden blanke Oberflächen, oxidations- und entkohlungsfreie Randzonen und Verzugsarmut, auch bei Werkstücken mit komplexen Geometrien, genannt. Diese genannten Qualitätskriterien lassen sich im Wesentlichen auf die Verwendung des für den Kühl- und Abschreckprozesses verwendeten Kühlgases, anstelle sonst auch üblicher Abschreckmedien wie Öl und Polymer, zurückführen. Vakuumöfen mit Stickstoffgasabschreckung bieten anlagenbedingt grundsätzlich die Möglichkeit, die positive Eigenschaft des Gases auch für den Erwärmungsprozess zu verwenden (**Bild 3**).

Die Bauteilerwärmung in einem Industrieofen findet unabhängig der Bauform und der Verwendung durch Wärmeleitung, Konvektion oder Wärmestrahlung statt. In einem Vakuumofen bei entsprechendem Vakuumbetrieb, d.h. in Abwesenheit der für die Wärmeübertragung mittels Konvektion nötigen Gasmoleküle, findet die Erwärmung eines Bauteils lediglich über Wärmestrahlung statt. Wärmestrahlung benötigt kein Trägermedium wie Gas und erfolgt daher auch im Vakuum durch den Ofenraum hindurch. Die Energieübertragung erfolgt dabei durch sich ausbreitende elektromagnetische Wellen, d.h. abgeschattete Bereiche eines Ofenraumes oder einer Charge können dabei einer mehr oder weniger ungleichmäßigen Strahlung ausgesetzt sein. Das grundlegend zu berücksichtigende Kriterium der Bauteilerwärmung mittels Strahlung liegt in der Tatsache, dass Strahlung erst bei Temperaturen von 600 bis 700 °C merklich an Effektivität zunimmt.

Um dieser negativen Einschränkung bei der Erwärmung in Vakuumöfen bis zu den Temperaturen entgegenzuwirken, bei denen die Wärmestrahlung die prozessbestimmende Größe der Wärmeübertragung wird, wird mittels Schutzgas die Bauteilerwärmung auf konvektivem Wege durchgeführt. In der Regel wird nach einem ersten Evakuieren des Ofenraumes ein inertes Gas als Wärmeträger in den Ofen eingelassen. Bei Normal- oder leichtem Überdruck wird das Schutzgas über die in der Ofenkammer befindlichen Heizelemente (Graphit, Siliziumcarbid oder Metall) erwärmt und so in die Lage versetzt, die aufgenommene Wärme an das Bauteil abzugeben. Um die sogenannte durch Dichteunterschiede bedingte „freie Konvektion" und somit die Wärmeübertragung weiter zu steigern, werden in entsprechenden Vakuumöfen Umwälzer eingesetzt, die zu einer sogenannten „erzwungenen Konvektion" durch erhöhte Strömungsgeschwindigkeit beitragen. Ergänzend dazu wird auch die Temperaturgleichmäßigkeit in der Heizkammer verbessert (**Bild 4**).

Bei Temperaturen von etwa 700 °C wird das für die konvektive Erwärmung genutzte Gas wieder abgepumpt und der Wärmebehandlungsprozess im Vakuum fortgesetzt. In Abhängigkeit des verwendeten Gases und der durch die Umwälzung gesteigerten Wärmeübertragung können Aufheizzeiten um bis zu 30 bis 40 % verkürzt werden (**Bild 5**).

Die konvektive Erwärmung wird in der Regel mit Stickstoff oder Helium unterhalb 1.100 mbar mit einem Volumenstrom in Abhängigkeit der Ofenkammergröße von 2 bis 3 $m^3$ und einem durch den Umwälzer verursachten Energieverbrauch von 5 bis 10 kWh pro Zyklus durchgeführt (**Bild 6**).

## DÜSENFELDERWÄRMUNG - PRALLSTRÖMUNG

Bei der Wärmebehandlung im Vakuumofen oder auch generell im Atmosphärenofen bei Normaldruck werden Bauteile zunächst auf hohe Temperaturen erwärmt, um nach einer entsprechenden Haltedauer wieder abgekühlt zu werden. Der Wärmeübergang auf das Bauteil geschieht, wie bereits geschildert, bei Temperaturen bis 700 °C fast ausschließlich durch „erzwungene" Konvektion. Es ist daher nachvollziehbar, dass insbesondere in diesem Temperaturbereich einer forcierten Umwälzung ein hohes Maß an Interesse zukommt. Neben der „konventionellen" Umwälzung durch Heißgasventilatoren hat sich in den letzten Jahren vor allem auch die Erwärmung über ein Düsenfeld durch „Prallströmung" (**Bild 7**) durchgesetzt, weil durch diese Technologie vor allem kontinuierliche Durchlauföfen durch den gesteigerten Wärmeübergang in kompakter Bauweise

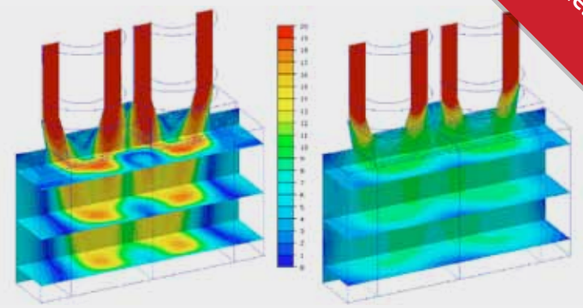

**Bild 4**: Temperaturgleichmäßigkeit bei Konvektiver Erwärmung im Vakuumofen mit (rechts) und ohne (links) Gleichrichtergitter (ECM)

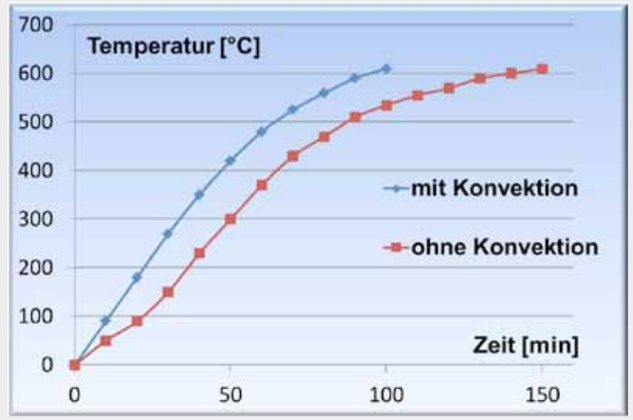


**Bild 5**: Vergleich Erwärmung mit und ohne Konvektion

**Bild 6**: Vakuumheizkammer für konvektive Erwärmung mit Umwälzer in der Wartungstür der Ofenrückseite (ECM)

Mehr Informationen:
www.elektrowaerme-online.de

und mit hoher Temperaturgleichmäßigkeit möglich sind.

Durch eine im Düsenfeld erzeugte Prallströmung kann im Mittel ein um bis zu 4-facher Wärmeübergang erreicht werden, was in eine entsprechend verkürzte Erwärmungs- und Durchwärmdauer mündet. Bei vor allem großen Vakuum- bzw. Anlassöfen mit und ohne Schutzgas nimmt die Temperatur des umströmenden Gas während des Überströmens auf dem Bauteil oder der Charge kontinuierlich ab. Beim Erwärmen mittels Prallströmung können alle Teile einer Charge mit gleicher Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit beaufschlagt werden.

Die Geometrie und Anordnung der Düsenfelder wird durch Form und Größe des Bauteils bzw. der Charge bestimmt - auch beidseitig der Transportebene können Düsenfelder entsprechend angeordnet werden, um allseitig und damit effektiver mit Heißgas zu beaufschlagen. Neben der hohen Erwärmungseffizienz zeichnet sich das Erwärmungsprinzip durch Prallströmung durch eine äußerst hohe Temperaturgleichmäßigkeit am Bauteil von bis ± 1 K aus. Diese Genauigkeit erreichen „klassische" Umwälzöfen in der Regel nicht. In **Bild 8** ist das Düsenfeld einer Ofenanlage dargestellt.

Der „Nutzen" der Prallströmung ist dann besonders hoch, wenn das Aufnahmevermögen des Bauteils an Wärmestrahlung (ε etwa 0,4 bis 0,5 bei z.B. 600 °C) gering ist. Mit Prallströmung ergibt sich in diesem Fall ein Wärmetransfer von ca. 140 W/m² und K sowie zuzüglich der Strahlungsanteil des Ofeninnenraumes von ca. 50 W/m² K. Die Wärmeübertragungswerte der reinen Strahlungserwärmung von 50 W/m² K und der von Konvektion von 40 W/m² K ist somit etwa um die Hälfte geringer (**Bild 9**).

## BEHEIZUNG UND ISOLIERUNG

Neben dem maximalen Wärmetransport während der Erwärmung muss vor allem auch der optimalen Erzeugung der auf das Bauteil zu übertragenen Wärme große Beachtung geschenkt werden. Elektrische Widerstandsheizelemente von Vakuum- und Schutzgasöfen werden je nach Anwendungsfall und -temperatur in einer Vielzahl unterschiedlicher Materialien ausgeführt. Bei den Heizelementen handelt es sich um elektrische Leiter, die so konstruiert sind, dass von ihnen ein hohes Maß an Wärme freigesetzt wird und maximale Oberflächenbelastung möglich ist. Diese wird dann durch Wärmeübertragung dem zu erwärmenden Gut zugeführt. Die Erwärmung erfolgt mittelbar, d.h. die Wärme wird im Ofen erzeugt und durch Konvektion bzw. Strahlung auf Bauteiloberfläche und durch Wärmeleitung in das Werkstückinnere transportiert. Die in Industrieöfen eingesetzten Heizelemente unterscheiden sich vor allem in Form und Material. Letzteres bestimmt die maximale Anwendungsgrenztemperatur. Heizleitermaterialien in Vakuum- und Schutzgasöfen lassen sich in zwei Hauptgruppen einteilen: metallische und keramische.

Als keramische Heizelemente finden vor allem Graphit- und Siliziumcarbid-Materialien Anwendung. Zu den metallischen Heizleiterwerkstoffen gehören Chrom-Nickel-Legierungen (CrNi), die bis etwa 1.200 °C verwendbar sind, ferritische Chrom-Eisen-Aluminium-Legierungen (CrFeAl) für Temperaturen bis 1.400 °C und die reinen Metalle Molybdän (Mo) und Wolfram (Wo), die bis über 1.400 °C unter Schutzgas betrieben werden. Um eine möglichst hohe Energieeffizienz der Beheizung zu erreichen, ohne die Oberflächenbelastung zu überschreiten, muss deren maximal zulässige Elementtemperatur eingehalten werden. Die Elementhersteller geben hierfür einzuhaltende Richtwerte für zwei Kenngrößen, die Elementbelastung und die Wandbelastung, vor. Die Elementbelastung ist die Leistungsdichte auf der Elementoberfläche. Grundsätzlich wächst die maximale Leistungsdichte an der Elementoberfläche nach dem Gesetz von Stefan-Boltzmann mit der vierten Potenz der Temperatur. Praktisch wird sie durch Rückstrahlung von den Ofenwänden und vom Erwärmungsgut stark begrenzt. Die Wandbelastung ist die auf die Wandfläche des Ofens konzentrierte Leistungsdichte. Für eine richtige und gleichmäßige Temperaturverteilung im Ofen müssen ausreichende Wandflächen zur Verfügung stehen. Die zulässigen Werte für die Element- und Wandbelastung sinken mit zunehmender Ofentemperatur. Zudem hängen sie von der Art und Anordnung der Heizelemente ab.

Bei Vakuum-Wärmebehandlungsprozessen wird nicht nur das Wärmebehandlungsgut mit den zugehörigen Chargiermitteln, sondern auch die Heizelemente und die komplette Heizkammer der Ofenatmosphäre ausgesetzt und auf die erforderliche Prozesstemperatur aufgeheizt (Kaltwandöfen). Die Auslegung der Heizkammer hinsichtlich verwendeter Materialien spielt daher unter Berücksichtigung des thermischen Prozesses eine entscheidende Rolle.

Beim konvektiven und darauf folgenden strahlungsbedingten Aufheizprozess in graphitisolierten Vakuum-Härteöfen wird ein beträchtlicher Bestandteil der zugeführten Energie und der Gas-Atmosphäre (bzw. Vakuum) in die nicht von den Bauteilen bzw. der Charge eingenommenen Bereiche der Heiz- bzw. Vakuumkammer geleitet. Das Volumen insbesondere der Vakuumkammer sollte daher minimiert werden, um die Energie- und Abschreckeffizienz zu maximieren. Bei anschließender Abschreckung wird abschließend mit hohem energetischen Aufwand die sowohl in der Charge als auch die in der Heizkammer gespeicherte Wärmeenergie abgeführt, d.h. vernichtet, so dass keine Wärmerückgewinnungsmaßnahmen vorgesehen sind.

Als Isolationswerkstoff der Heizkammer Vakuumöfen wird, abgesehen von Ganzmetallkammern für hochreine Vakuumprozesse, in der Regel Graphitmaterial wegen der hohen Temperaturbeständigkeit und Formstabilität eingesetzt. Ein Isolationsaufbau mit verstärktem Querschnitt der Graphitfilzisolation erzielt eine zusätzliche Leerverlustminimierung während der Temperaturhaltephasen. Der Aufbau von „Ganzmetall-Heizkammern" entspricht im Wesentlichen der von Graphit-Heizkammern, wobei die Isolierung über „Strahlbleche" reflektieren erfolgt und nicht isolierend, wie dies bei Graphitisolierungen der Fall ist.

Der vorliegende Beitrag beinhaltet das Thema der „Konvektion" in Vakuum- und Schutzgasöfen, insofern muss auch – wenngleich kurz – der Abkühlung (bzw. Abschreckung), die ebenso auf dem physikalischen Prinzip der Konvektion beruht und in diesem Fall der Wärmeabfuhr dient, Interesse geschenkt werden (**Bild 10**).

Gasabschreckeinrichtungen in Vakuumhärteöfen haben die Aufgabe, die Bauteile nach der Austenitisierung oder Aufkohlung durchgeführten Gefügeumwandlung schnell abzuschrecken. Um eine möglichst gleichmäßige und verzugsminimierte Abschreckung sicherzustellen, kann der Gasstrom über spezielle Gasleiteinrichtungen über den gesamten, der Charge zur Verfügung stehenden Nutzraum, verteilt werden. Die hierfür in die graphitisolierte Heizkammer integrierten Gasleiteinrichtungen müssen dabei zum einen optimale Strömungsverhältnisse sicherstellen, zum anderen aber auch den Erfordernissen an geringer Eigen-

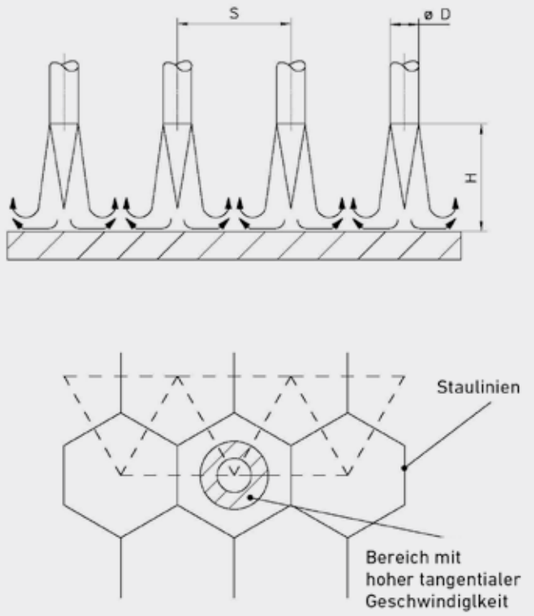


**Bild 7**: Prinzip Düsenfelderwärmung – Prallströmung (BSN)

**Bild 8**: Düsenfeld für Prallströmung (BSN)

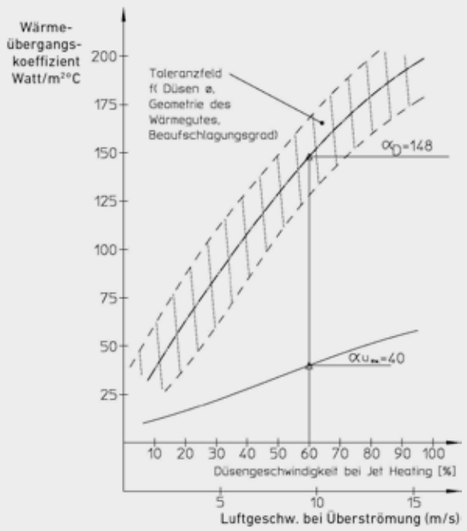


**Bild 9**: Wärmeübergangskoeffizient α in Abhängigkeit von Düsengeschwindigkeit und Überströmgeschwindigkeit (BSN)

masse bei gleichzeitig hohen Standzeiten gerecht werden. Ein weiterer, wesentlicher Vorteil der Gasabschreckung ist seine Regelbarkeit, d.h. in Abhängigkeit der Anforderungen des Bauteils kann die Abschreckgeschwindigkeit über Wahl der Gasart, des Gasdrucks und der Gasrichtung und auch der Gasgeschwindigkeit eingestellt werden (Wärmeübergang a = f (Gasart, Geschwindigkeit, Druck). Durch Verstellen der Luken oder Gasdüsen ist eine Richtungsumkehr oder -steuerung möglich, um die Wirkung der Gasabschreckung zu intensivieren oder auch den Anforderungen anzupassen. Unterschieden wird im konstruktiven Aufbau die Art und Position des Wärmetauschers, der entweder vor oder nach dem Gasumwälzer platziert wird, um gegebenenfalls auch noch die vom Umwälzmotor erzeugte Wärme abführen zu können (**Bild 11**).

Mit Hilfe von Simulationstechniken können im Industrieofenbau und in der Wärmebehandlung die Aufheiz- und Kühlvorhange sehr gut erfasst werden und so auch die ablaufenden Prozesse und Phänomene verstanden werden. So kann aus den Erkenntnissen die genaue Auslegung und Anordnung von Strahlungsheizung und Abschirmungen sowie der Strömungsverteilung während Aufheiz- und Abkühlzyklen für eine optimierte Temperaturgleichmäßigkeit in der Haltephase, stattfinden.

Das **Bild 12** zeigt exemplarisch die Durchwärmung eines Würfels, der in der Simulation als entsprechender Probenkörper analog der NADCAP-Vorgaben dienen kann. Aus weiteren Untersuchungsergebnissen konnte die konvektive Strömungsführung und anschließende Strahlung derart optimiert werden, dass abhängig von der Geometrie eine gleichmäßige Durchwärmung der Bauteile bzw. der Charge erreicht wird.

Durch die Unterstützung von CFD werden Sonderlösungen konzipiert, die einerseits mechanische Anpassungen zur Strömungsoptimierung bis hin zur Auslegung und Anpassung der Wärmetauscher und der Hochleistungsturbinen zur Geschwindigkeitsoptimierung bei der Stickstoffhochdruckabschreckung bzw. bei Verwendung alternativer Medien wie Helium als Abschreckmedium beinhalten.

Die Aerospace Material Specification AMS 2750 D stellt hohe Anforderungen an Industrieofenanlagen und insbesondere Vakuumöfen, die in der Wärmebehandlung zur Anwendung kommen. Dieses sind insbesondere Thermoelemente, allgemeine Messinstrumente, Systemgenauigkeitsprüfungen (System Accuracy Test - SAT) für Thermoprozessgeräte und die Prüfung der Temperaturgleichmäßigkeit (Temperature Uniformity Surveys – TUS).

Mithilfe der (SAT) zertifizierten Instrumente soll sichergestellt werden, dass ein authentifizierter Nachweis der Instrumentengenauigkeit innerhalb eines definierten Toleranzrahmens vorliegt. Die Prüfungsergebnisse müssen gemäß AMS 2750 in einer normierten Form erfasst werden. Die Genauigkeitstoleranz der Messsysteme spielt bei der AMS 2750D eine entscheidende Rolle. Die Kalibriergenauigkeit der Geräte darf dabei +/- 1,0 Grad F (+/- 0,6 °C) oder +/- 0,1 % des Messwerts in Grad F nicht überschreiten. Die Datenaufzeichnung muss mit einer Kalibriergenauigkeit von +/- 2 Grad F (+/- 1,1 °C) erfolgen. Die maximal zulässige SAT-Gesamtdifferenz des Ofens ist nach sechs Ofenklassen eingeteilt. Gemäß AMS 2750D wird entsprechend auch die erreichte Temperaturgleichmäßigkeit der Öfen in entsprechende sechs Klassen eingeteilt. Beginnend mit +/- 3 °C (Ofenklasse 1) bis +/- 28 °C (Ofenklasse 6), (Messung gem. DIN ISO 17052-2).

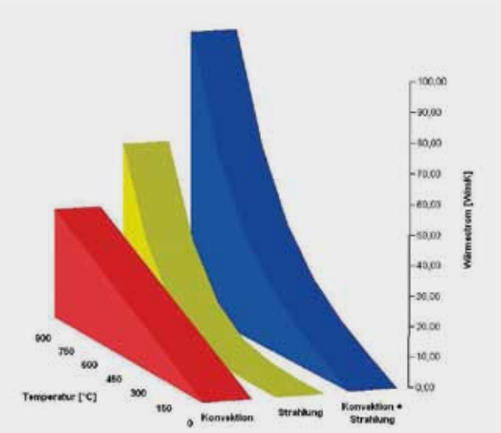


**Bild 10**: Vergleich Konvektion und Strahlung (Rübig)

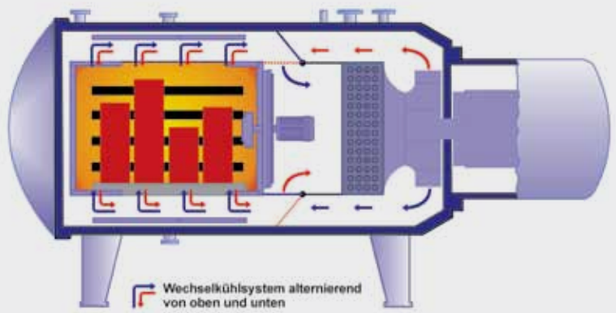


**Bild 11**: Schematische Darstellung Vakuumofen mit Wechselkühlung (Rübig)

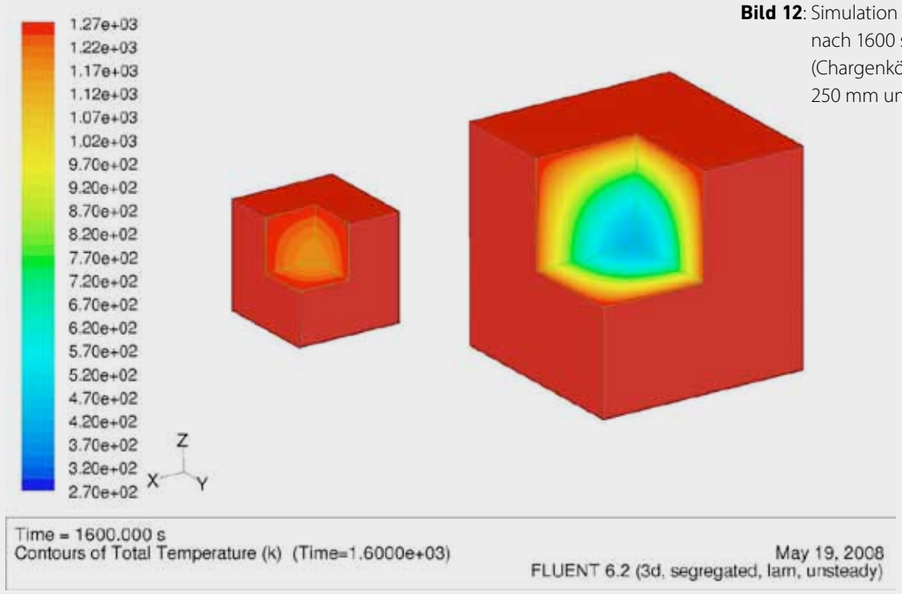


**Bild 12**: Simulation einer Durchwärmung nach 1600 s von 2 Würfeln (Chargenkörpern) mit Kantenlänge 250 mm und 500 mm (Rübig)

Mehr Informationen:
www.elektrowaerme-online.de

## FAZIT

Vakuum- und Schutzgasöfen finden heutzutage in nahezu allen Bereichen der Wärmebehandlung wie Werkzeug- und Formenbau, Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrtindustrie sowie Medizintechnik breite Anwendung. In „Zukunftsmärkten“ wie Solartechnik, Windkraft und Brennstoffzelle wird die Vakuumtechnik gute Marktchancen besitzen. Kombinierte Verfahren aus z.B. Plasmanitrieren mit anschließender Beschichtungstechnik werden darüber hinaus neue Anwendungsbereiche und verbesserte Bauteileigenschaften ermöglichen.

Verzugsarmut, auch bei Werkstücken mit komplexer Geometrie, wird in der Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen. Die Vakuumwärmebehandlung ermöglicht optimale Festigkeitseigenschaften, bei gleichzeitig oxidations- und entkohlungsfreien Randzonen. Die Vakuumhärtetechnik z.B. unter Helium in Einkammervakuumöfen oder die modulare Vakuumofentechnik werden dabei zukünftig ein weiteres Potential bieten, gerade auch, wenn es um den Gedanken der „sauberen und umweltfreundlichen“ Betriebsweise im Bereich der „lean“-Produktion geht.

Bereits während des Aufheizvorgangs in Vakuum- und Schutzgasöfen finden Prozesse statt, die ganz wesentlich die späteren Bauteileigenschaften beeinflussen. So führt eine optimale Temperaturgleichmäßigkeit in der Charge während der Aufheizphase nicht nur zu einer verkürzten Aufheizdauer, sondern auch zu gleichmäßigen Gefügeeigenschaften und mehr oder weniger gleichmäßig thermisch induzierten Eigenspannung im Bauteil.

Die im Vakuum stattfindenden thermischen Prozesse können nur die Wärmestrahlung zur Übertragung der Wärmeenergie und zum Aufheizen nutzen. Bei Temperaturen unterhalb von etwa 700 °C findet jedoch nahezu kaum Energietransport mittels Wärmestrahlung statt. Insofern wird in diesem Temperaturbereich durch umwälzendes Gas erzwungene Konvektion zum gleichmäßigen und vor allem auch schnelleren Aufheizen bis etwa 700 °C genutzt. In Abhängigkeit des verwendeten Gases und der durch die Umwälzung gesteigerten Wärmeübertragung können Aufheizzeiten um bis zu 30 bis 40 % verkürzt werden. Auch kann durch eine im Düsenfeld erzeugte Prallströmung im Mittel ein um bis zu 4-facher Wärmeübergang erreicht werden, was in eine entsprechend verkürzte Erwärmungs- und Durchwärmdauer mündet.

AUTOR
Dr. **Olaf Irretier**
**Industrieberatung für Wärmebehandlungstechnik**
**IBW Dr. Irretier, Kleve**
**Tel.: 02821/715-3948**
**olaf.irretier@ibw-irretier.de**