

Effizienzsteigerung durch Hochkonvektion in Ofenbau und Wärmebehandlung

von **Olaf Irretier**

Die Erwärmung beim Glühen und Härten von metallischen Bauteilen findet über Wärmeleitung, Konvektion oder Wärmestrahlung statt. Der vorliegende Beitrag behandelt das Thema der konvektiven Erwärmung und insbesondere der Erwärmung unter Hochkonvektion zur Steigerung der Aufheizgeschwindigkeit und der Temperaturgleichmäßigkeit und stellt die wesentlichen Aspekte in Zusammenhang mit der Ofenausführung dar.

High convective heating in furnace construction and heat treatment

The heating of metal components during annealing and hardening in vacuum and protective gas furnaces takes place by conduction, convection or radiation. This report shows the general issues of convective heating and high convective heating for higher heating rates and better temperature homogeneity and shows general furnace design aspects.

Wärmebehandlungs- und Härteverfahren in Industrieöfen kommen heute in vielen Bereichen der Herstellung und Verarbeitung von metallischen Bauteilen zur Anwendung. Zum Einsatz kommt dabei eine Vielzahl unterschiedlicher Ausführungen an Ein- und Mehrkammer- als auch Durchlauföfenanlagen. Dabei werden Bauteile zunächst auf hohe Temperaturen erwärmt, um nach einer entsprechenden Haltedauer wieder abgekühlt zu werden. Der Wärmeübergang auf das Bauteil geschieht 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 durchgesetzt, weil durch diese Technologie vor allem kontinuierliche Durchlauföfen durch den gesteigerten Wärmeübergang in kompakter Bauweise und mit hoher Temperaturgleichmäßigkeit möglich sind.

HOCHKONVEKTIONSERWÄRMUNG – STAND DER TECHNIK

In den vergangenen Jahren wurde im Bereich der Erwärmung von Stahl- und Aluminiumbauteilen eine Vielzahl neuer Ofenkonzepte entwickelt, die auch den Betrieb unter Hochkonvektion berücksichtigen. In Patent DE 102010019215 A1 wird ein Industrieofen zum Erwärmen von Stahlblechen auf Presshärte temperatur von 950 °C mit Strahlung und Hochkonvektion beschrieben, bei dem der Transport durch eine Kette in Kombination mit Hubbalken erfolgt. Der Vorteil dieses Systems gegenüber herkömmlichen Ausführungen liegt in einer Nutzlängenverkürzung auf 25-50 %, reduzierten Investitionskosten um etwa 1/3 und verminderten jährlichen Energiekosten um etwa 50 %. Zudem wird berichtet, dass die jährlichen Kosten für Ersatz- und Verschleißteile sowie für Service und Reparaturen sich auf etwa 60 % reduzieren [5].

Beim diesem Ofenprinzip des Hubschrittkettenförderers (**Bild 1**) sollte außerdem eine höhere Betriebssicherheit und damit Verfügbarkeit zu erwarten sein, da beispielsweise der Transport von schweren Warenträgern auf bruchempfind-



Bild 1: Hubschrittfördertechnik im Ofenbau [15]

lichen keramischen Rollen entfällt. Diese Ofenanlage ist flexibel über die Belegungsdichte des Kettentransportes für Bauteile einzustellen. Große Nutzbreiten können ohne Kostennachteile und Reduzierung der Behandlungsqualität realisiert werden. Zudem erhöht die mögliche mehrspurige Fahrweise die maximal mögliche Durchsatzleistung, welche sehr kurze Taktzeiten nach sich zieht.

Um den Durchsatz eines Durchlaufofens zu erhöhen, wird angestrebt, dass mehrere Werkstücke nebeneinander die Transporteinrichtung des Ofens durchlaufen. Werkstücke und Bauteile können dann bei entsprechender ausgeformter Umform- und Presswerkzeugen nach der Erwärmung gleichzeitig in die Presse überführt werden, d. h., dass sie gleichzeitig von einem Roboter oder Manipulator aufgenommen werden. Hierzu ist es erforderlich, dass sich die Werkstücke an der Übergabeposition stets an einer vorgegebenen Stelle befinden, damit der Roboter sie bei jedem Umsetzvorgang sicher aufnehmen kann. Üblicherweise kann dies jedoch ohne Hilfsmittel nicht gewährleistet werden. Selbst wenn Werkstücke in der richtigen Ausrichtung zueinander auf der Transporteinrichtung des Durchlaufofens abgelegt werden, erreichen sie die Ausgangsöffnung des Ofens oftmals nicht in der gleichen Lage, sondern gewöhnlich werden einzelne Werkstücke schneller oder langsamer durch den Ofen transportiert. Insbesondere bei Rollenförderern erfolgt bei laufendem Betrieb eine Verformung der einzelnen Rollen. Sie nehmen hierbei eine von oben gesehen konkave Form an. Einzelne Rollen biegen sich somit nach unten durch, was absolut zu einem größeren Außendurchmesser führt, wodurch sich gegenüber nicht oder nicht so stark durchgebogenen Rollen die Umfangsgeschwindigkeit und damit die Geschwindigkeit des auf der jeweiligen Rolle transportierten Werkstücks erhöht. Ferner kann es auf den Rollen

des Rollenförderers zu Ablagerungen aus dem Material der Werkstücke kommen, was ebenfalls zu einem größeren Durchmesser der Rolle und somit zu einer erhöhten Umfangsgeschwindigkeit führt [5].

Bei der Erwärmung von beschichteten Stahlblechen auf Presshärtemperatur von 950 °C weist dieses Ofenkonzept einen besonderen Vorteil beispielsweise gegenüber Rollenherdöfen auf. Das zu transportierende Bauteil wird in diesem Fall sowohl direkt auf den Rollen als auch indirekt über Warenträger durch den Ofen transportiert. Nachteilig bei dem direkten Transportkonzept ist, dass die Beschichtung, welche während des Aufheizprozesses schmilzt, teilweise in die Oberfläche der Transportrollen eindringt und die Rollen beschädigt. Bei dem Transport mit Warenträgern entsteht ein erheblicher Energieverlust, da die periodisch abgekühlten Warenträger zusammen mit dem Bauteil erhitzt werden müssen. Die Warenträger sind ebenfalls ein Verschleißteil mit einer begrenzten Standzeit. Der alternative Einsatz einer umlaufenden Edelstahlkette hat sich bei diesen Temperaturen ebenso als problematisch erwiesen. Mit dem Prinzip der Hubkettenförderung kann grundsätzlich auf Warenträger verzichtet werden.

Das Transportsystem basiert darauf, dass anstelle der bekannten Rollen- oder Hubbalkenantriebe eine Kombination von reversierbarem Kettentransport und Hubbalken zum Einsatz kommt. Die Transportkette im temperaturbelasteten Bereich besteht aus einem hitzebeständigen Edelstahl und wird horizontal über keramische Gleitelemente gezogen. An den Enden der Transportkette vor und hinter der Ofenanlage ist eine Rollenkette befestigt, welche mittels Getriebemotoren horizontal reversiert. Die Kette wird auf Zug belastet, d. h. die Antriebe werden über schaltbare Kupplungen im Wechsel freigeschaltet. Wesentlich ist, dass die temperaturbelastete Edelstahlkette keine verschleißintensive Umlenkung erfährt. Die Kettenspannung erfolgt durch Spannrollen der beiden Antriebe. Im Ofen sind zwischen den Transportketten pneumatisch betätigte Hubbalken angeordnet. Die Aufteilung der Hubbalken entspricht der Schrittlänge des durch den Ofen zu taktenden Wärmegutes. Die Hubbalken sind sowohl einzeln als auch gemeinsam ansteuerbar. Die Erwärmung der Bauteile bei diesem Ofenkonzept erfolgt zudem aus einer Kombination von Strahlungs- und Hochkonvektionserwärmung, sodass bisher erreichte Aufheizzeiten mittels Strahlung nahezu halbiert werden können. Notwendig ist hierbei der Einsatz von hochhitzebeständigen Ventilatoren, abriebfester Ofenisolierung, dichten Hubbalkensystemen und dem hitzebeständigen Düsensystem zur Verteilung und Übertragung der Wärmeenergie auf die Bauteile [15].

Um Presswerkzeuge kontinuierlich mit erwärmten Stahlplatten zu chargieren, werden Durchlauföfen zur Erwärmung eingesetzt. Eine in den Durchlauföfen eingelegte Stahlplatte durchläuft diesen mittels Transporteinheit und

wird in der Ofenatmosphäre erwärmt und auf Temperatur gehalten. Bereits vor der Entnahme am Durchlaufausgang hat das Bauteil seine Solltemperatur zur Austenitisierung erreicht. In einem weiteren Patent (DE 102009051157 A1) wird eine Ofenanlage mit getaktetem oder kontinuierlichem Transportprozess für die Wärmebehandlung und das Presshärten beschrieben, bei der eine kontinuierliche Luft-/Gaszirkulation die Bauteile überströmt und erwärmt bzw. kühlt. Die Neuerung liegt darin, dass die lange Erwärmungszeit im Ofen verringert und die Stellfläche der Ofenanlage erheblich reduziert werden kann [6, 7].

Zum Anwärmen von langen Aluminiumsträngen wird in Patent EP 1736556 A2 eine Ofenanlage vorgestellt, welche eine hohe Flexibilität in der Herstellung von Aluminium-Pressbolzen bei gleichzeitig effizienter Energieausnutzung aufweist. Dieses Ofenprinzip erreicht eine homogene Erwärmung der Aluminiumstränge durch hohe Temperaturgenauigkeit und hohen Wirkungsgrad, d. h. optimale Ausnutzung der Wärme des Ofens bei Erwärmung der Aluminiumstränge. Dies wird vor allem auch durch den Hochkonvektionsbetrieb erreicht, bei dem das Vorwärmen und das eigentliche Beheizen der Aluminiumstränge in einem Ofen realisiert wird [8].

Bei der Wärmebehandlung metallischer Bauteile erfolgt die Erwärmung bekanntlich durch Wärmestrahlung und überwiegend durch erzwungene Konvektion. Die Kühlung erfolgt in der Regel immer durch erzwungene Konvektion mit einer Atmosphäre, welche umgewälzt und der durch Kühleinrichtungen, z. B. von Kühlwasser durchströmte Gaskühler, die vom Gut abgeführte Wärme wieder entzogen wird. Der konvektive Wärmeübergang in solchen Anlagen entspricht meist einem Wärmeübergangskoeffizienten von mehr als $80 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Ein Verfahren zur Energieeinsparung bei Wärmebehandlungsanlagen mit durch Heiz- und Kühlteil bewegtem Gut (Patent DE 102008005259 B4) nutzt den Wärmestrom aus der Wärmegutabkühlung zur Gutvorwärmung mittels hoher erzwungener Konvektion bei Abkühlung und Vorwärmung [9].

Bei der schwebenden Führung von bahnenförmigem Material, insbesondere von Metallbändern (Patent EP 2104745 B1), erfolgt die Erwärmung unter Konvektion/Hochkonvektion im Fluidstrom im Düsenfeld mit wenigstens einem Radialventilator und mit wenigstens einem zugeordneten Strömungskanalssystem in einen Bandschwebeofen. Bei einem Bandschwebeofen wird in einem Ofengehäuse mittels eines oder mehrerer Radialventilatoren ein Gasstrom erzeugt, welcher über ein Strömungskanalssystem in der Regel beidseitig auf das durch das Ofengehäuse laufende Band geleitet wird und dieses dabei schwebend führt und ggf. erwärmt bzw. auf einer bestimmten Temperatur hält. Hierzu sind im Strömungskanalssystem oder in dem das Strömungskanalssystem umgebenden Raum Heizelemente angeordnet, welche durch Konvektion den Gasstrom auf

die gewünschte Prozesstemperatur erhitzen. Bei sehr hoher Temperatur (z. B. 870 °C) erfolgt die Wärmeübertragung auf den Gasstrom vorrangig durch Strahlung [10].

Ergänzend wird in der EP 0864 519 A1 eine gattungsgemäße Vorrichtung zur schwebenden Führung von bahnförmigem Material, vorzugsweise Metallbändern, beschrieben, bei der die zu behandelnde Materialbahn horizontal durch die Vorrichtung geführt und beidseitig, d. h. von oben und von unten, beblasen wird. Hierzu ist auf jeder Seite der Materialbahn jeweils ein Radialventilator vorgesehen, welcher einen Fluidstrom erzeugt, der über ein zugeordnetes Strömungskanalssystem zur Oberfläche der Materialbahn transportiert wird [11].

In der Regel sollte die Ofenraumtemperatur nur wenige $^{\circ}\text{C}$ über der Temperatur der Werkstücke liegen, um Wärmespannung zu vermeiden. Das Aufheizen von Werkstücken kann daher relativ zeitaufwendig werden. So dauert die Erwärmung von Aluminiumbauteilen auf Temperaturen zwischen 530 und 580 °C nicht selten, je nach Form und Gestalt des Werkstückes, insbesondere in Abhängigkeit von der Wandstärke, bis zu einer Stunde. Das Aufheizen von massiven Bolzenabschnitten erfordert maximale Aufheizzeiten. Unterschiede in den Aufheizzeiten werden auch bedingt durch die Art der Packung der Werkstücke in Körben. Folglich kommt es zu unterschiedlichen Qualitätsergebnissen, die nicht reproduzierbar sind.

In Patent EP 0716152 A1 wird ein Verfahren vorgestellt, welches dadurch gekennzeichnet ist, dass die Werkstücke einzeln oder nebeneinander in Reihen durch den Industrieofen transportiert werden und in der Aufheizzone direkt von mindestens einer Strahlungsquelle durch Wärmestrahlung und durch mindestens einen Konvektionsgasstrom, der die Strahlungsquelle umgibt, auf die Wärmebehandlungstemperatur erwärmt werden. Bei der Strahlungsquelle handelt es sich um einen Brenner oder ein elektrisch beheiztes Strahlungselement. Da die Leistung der Strahlungsquelle und des Konvektionsgasstromes getrennt gesteuert werden können, ist es möglich, den Energieeintrag in jedes Werkstück genau zu optimieren. Eine Weiterentwicklung besteht darin, dass der Konvektionsgasstrom ringförmig um die Strahlungsquelle geführt wird. Der Konvektionsgasstrom kann aus rezirkuliertem Abgas und/oder vorzugsweise vorgewärmter Luft entstehen.

Das Verhältnis von Wärmestrahlung und Konvektionsgasstrom ist in Abhängigkeit der Differenz zwischen der Isttemperatur des Werkstückes und der Soll-Wärmebehandlungstemperatur eingestellt. Hierbei ist der Konvektionsgasstrom umso größer, je kleiner die Differenz zwischen Ist- und Solltemperatur des Werkstückes ist. Am Anfang der Aufheizzone ist daher der Aufheizgradient groß. Je geringer der Abstand der Isttemperatur des Werkstückes von der Solltemperatur wird, desto größer wird der Anteil des Konvektionsgasstromes. Vorzugsweise wird die Tem-

peratur des Werkstückes gemessen und in Abhängigkeit vom Messwert die Leistung der Brennerflamme und/oder die Größe des Volumens des Konvektionsgasstromes geregelt [12]. Ein Verfahren zum partiellen Erwärmen eines Formbauteils über Düsenfelder mit einem Heißgas für ein abschließendes Presshärten ist in Patent WO 2013000001 A1 beschrieben [13].

Das Patent EP 2090667 A1 betrifft u. a. eine Ofenanlage, in der mehrere Brennerdüsen zum Einsatz kommen. Gegenüber klassischen Erwärmungsöfen, in denen für die Erwärmung der Werkstücke hauptsächlich infrarote Strahlung oder Konvektion verwendet wird, kommt in diesem Fall die Pralldüsen erwärmung zum Einsatz. Infrarotwärme ist bei überwiegend blanken Bauteilen aufgrund der Reflexion nur sehr langsam zu übertragen, was lange Öfen mit entsprechendem Platzbedarf erfordert. Wird dagegen Konvektionswärme verwendet, indem beispielsweise heiße und durch Ventilatoren beschleunigte Luft in einen Ofen geleitet wird, lässt sich die Konvektionswärme nur bis etwa 750 °C wirtschaftlich übertragen. Die Baugrößen dieser Öfen und damit auch die Kosten sind relativ hoch. Hochkonvektionserwärmung mit Luft-Gas-Gemischen, die über ein Düsenfeld Fluid-Prallstrahlen auf Bauteiloberflächen richten, sind eine geeignete und effiziente Alternative [14].

Patent EP 2090667 A1 beschreibt eine Erwärmungsvorrichtung über mehrere Brennerdüsen, mit dem beliebig geformte Bauteile gleichmäßig erwärmt werden können. Die Brennerdüsen werden dabei durch eine Steuereinheit

getrennt voneinander zu- und abgeschaltet. Die Ofenanlage weist mehrere Lichtschranken, induktive Sensoren und/oder eine Bilderkennungseinrichtung zur Bestimmung der ungefähren Umrisse und/oder der Position der Werkstücke in der Ofenanlage auf [14].

HOCHKONVEKTION – THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Bei Behandlungstemperaturen von etwa 600 bis 700 °C, bei denen die Wärmestrahlung mit $\epsilon = 0,4$ noch verhältnismäßig gering ist, bietet die Erwärmung mit Hochkonvektion (Jet-Heating) einen optimalen Wärmetransfer und eine daraus resultierende minimierte beheizte Ofenlänge. Der Wärmetransfer liegt in diesem Temperaturbereich bei etwa 140 bis 150 W/m²K zuzüglich eines Strahlungsanteils im Ofeninnenraum von etwa 50 W/m²K. Demgegenüber stehen Wärmeübertragungswerte klassischer Umluftöfen mit Heißgasventilator von 40 bis 50 W/m²K zuzüglich des Strahlungsanteils von 50 W/m²K. Kalkulatorisch kann in diesem Fall die Baulänge eines Ofens mit Hochkonvektion (bei angenommenen Temperaturhaltezeiten von 5 Minuten im Ofen) für dickwandige Bauteile und Tafeln um ca. 50 % gegenüber einem klassischen Konvektionsofen reduziert werden (**Bild 2**).

Durch eine im Düsenfeld erzeugte Prallströmung kann im Mittel ein bis zu 4-facher Wärmeübergang erreicht werden, was in eine entsprechend verkürzte Erwärmungs- und Durchwärmdauer mündet (**Bild 3**). Vor allem bei großen

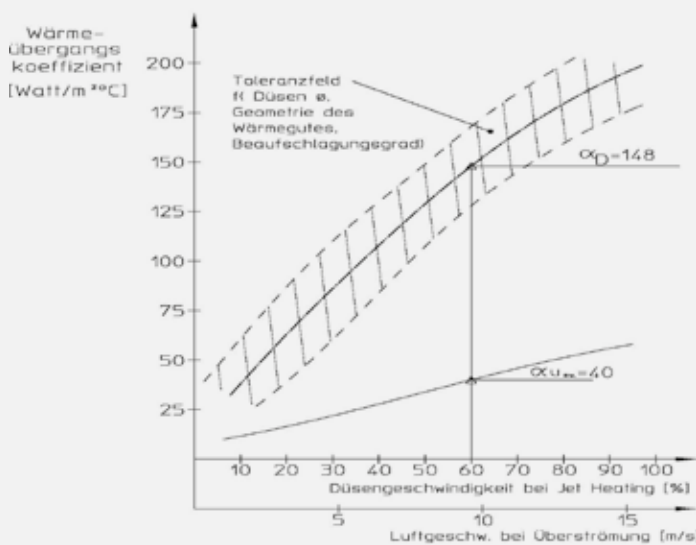


Bild 2: Wärmeübergangskoeffizient α in Abhängigkeit von Düsen geschwindigkeit und Überströmgeschwindigkeit [2]

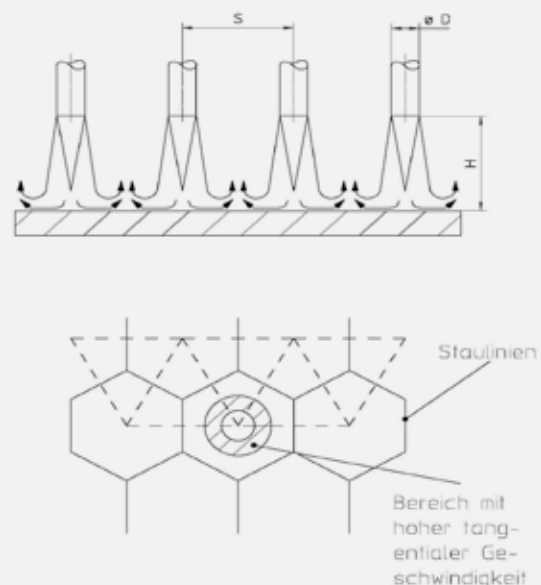


Bild 3: Prinzip Düsenfelderwärmung – Prallströmung [2]

Vakuum- bzw. Anlassöfen mit und ohne Schutzgas nimmt die Temperatur des umströmenden Gases 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 4 und 5** sind die Düsenfelder zweier Ofenanlagen 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/m²K zuzüglich des Strahlungsanteils des Ofeninnenraumes von ca. 50 W/m²K. Die Wärmeübertragungswerte der reinen Strahlungserwärmung von 50 W/m²K und der Konvektion von 40 W/m²K sind somit etwa um die Hälfte geringer.

HOCHKONVEKTION – ASPEKTE IN OFENBAU UND WÄRMEBEHANDLUNG

Luftumwälzöfen mit Ventilation für eine konventionelle Umströmung der zu erwärmenden Bauteile eignen sich für große Durchsatzleistungen nur bedingt und weisen hinsichtlich Temperaturgenauigkeit, Reproduzierbarkeit des Temperaturprofils, der vergleichsweise geringen Leistungsdichte und der daraus resultierenden großen Ofenabmessungen entsprechende Nachteile auf. Industrieöfen für Hochkonvektionsbetrieb (Jet-Heating) vereinen die Vorteile der hohen Leistungsdichte, wie sie beispielsweise bei der induktiven Erwärmung vorliegen, und der gleichmäßigen, reproduzierbaren und kostengünstigen Erwärmung. Darüber hinaus bieten sie die Möglichkeit, Bauteile mit unterschiedlichen Geometrien im gleichen Ofen zu erwärmen, ohne entsprechende Zusatzeinrichtungen für Werkzeuge, die bei der induktiven Erwärmung zu verwenden sind, beistellen zu müssen. Für diesen Anwendungsfall werden Düsenysteme angepasst, mit denen eine gleichmäßige Erwärmung verschiedenster Teilegeometrien erreicht wird. Für den richtigen Abstand der Düsen zur Bauteiloberfläche werden heb- und senkbare Düsenysteme eingesetzt.

Aufgrund der hohen Temperaturgenauigkeit eignen sich diese Industrieöfen zudem gut für die Wärmebehandlung von Aluminiumbauteilen, wie bspw. Lösungsglühen und Warmauslagern. Für Behandlungstemperaturen zwischen

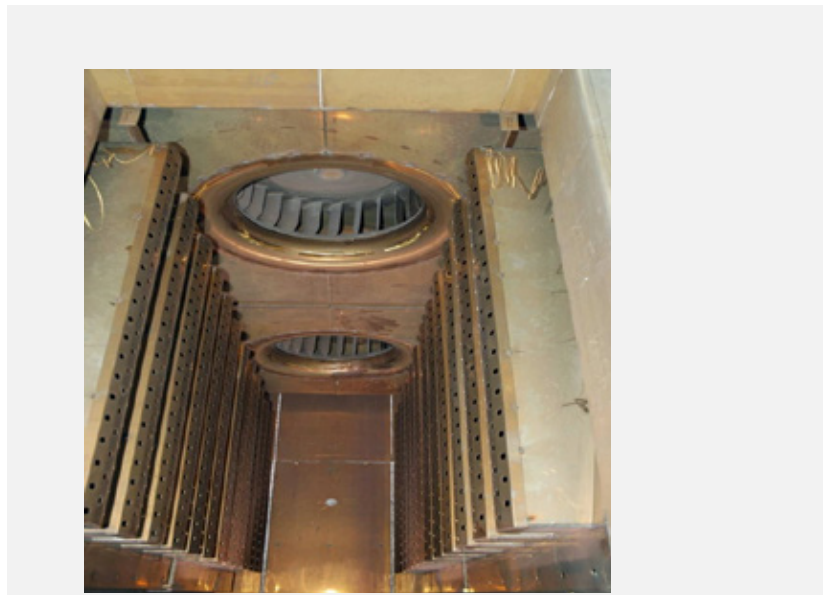


Bild 4: Kammerofenanlage mit Düsenfeld für Prallströmung [15]

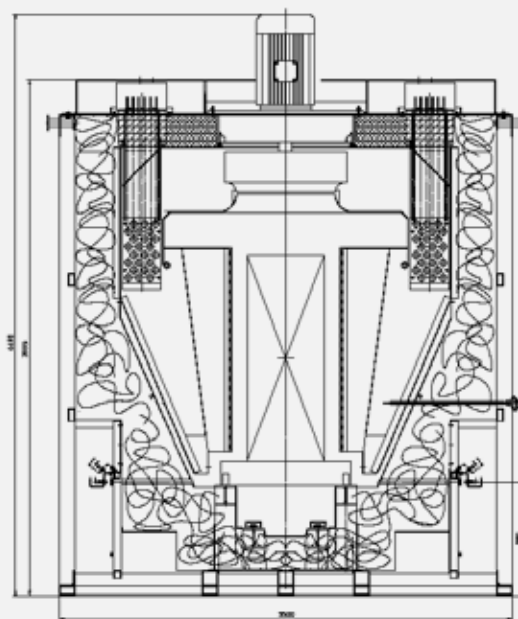


Bild 5: Schnitt Ofenanlage mit Düsenfeld für Prallströmung [15]

200 und 800 °C werden Industrieöfen mit Hochkonvektionsbetrieb für das Anwärmen von Rohlingen und vorge schmiedeten Teilen auf Schmiedetemperatur, das Homogenisieren und Lösungsglühen von Barren, Platinen und Stangen sowie Glühen und Anlassen von Stahlbauteilen eingesetzt.

Eine neuartige und patentierte Transportart bei Durchlauföfen, die sich insbesondere für den Hochkonvektionsbetrieb sehr gut eignet, sind sogenannte Hub-

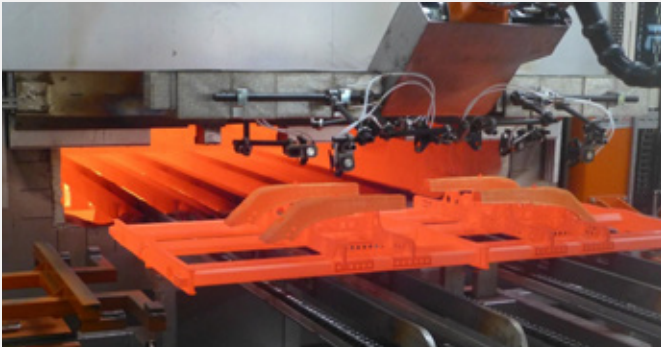


Bild 6: Robotersystem am Durchlaufofen mit Hubschrittförderer-technik [15]

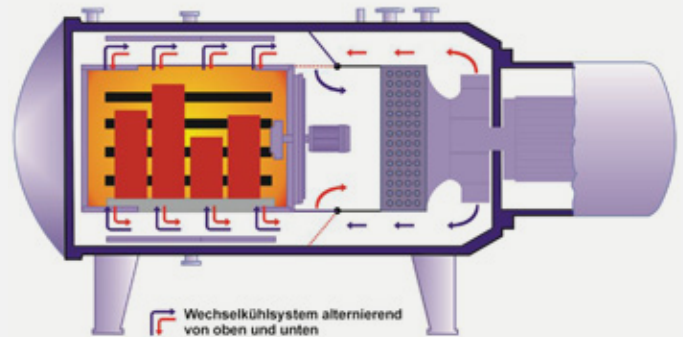


Bild 7: Vakuumofen mit konvektiver Erwärmung [1]

schrittkettenförderer. Bei diesem Ofenkonzept werden mittels Kettentransport durchlaufende Bauteile von oben durch Prallströmung beaufschlagt. Hierfür sind oberhalb der Transportebene und flächendeckend die Düsenfelder angeordnet. Die Unterteilung der Ofennutzlänge in mehrere Düsenfelder bzw. Temperaturregelzonen ermöglicht es, den Anschlusswert und die Strömungsintensität auf den jeweiligen, über die Ofenlänge sehr unterschiedlichen Leistungsbedarf anzupassen. Jeder der hier dargestellten Düsenfelder wird durch jeweils ein Hochleistungs-Umwälzaggregat mit Heißluft versorgt. Bei dieser Luftbeaufschlagung von oben können die Umwälzaggregate platzsparend in der Ofendecke angeordnet werden.

Sehr wesentlich ist die gleichmäßige Verteilung der zugeführten Heißgase im Umwälzstrom. Um eventuell auftretende Heißgasstrahlen im Umwälzstrom mit Sicherheit zu vermeiden, beinhaltet jedes Düsenfeld mit Umwälzaggregat ein eigens hierfür entwickeltes Verteil- und Mischsystem.

Beim Erwärmen in Rollen-, Ketten- oder Banddurchlauföfen von Bolzen, Schmiedeteilen oder Teilen, die einem anschließenden Härtepress- oder Umformvorgang unterzogen werden, ist zudem darauf zu achten, dass die Teile über Roboter oder Manipulatoren positionsgenau aufgegeben werden (**Bild 6**). Während des Transportes durch den Ofen müssen die Bauteile exakt auf diesen Positionen verbleiben, d. h. es darf keine Relativbewegung zwischen Teilen und Transportkette/-band auftreten. Für die Entnahme der Teile aus dem Ofen mittels Roboter oder Handlingsgerät muss das Transportsystem ebenso exakt positioniert werden. Die Entnahmestelle am Ofenende muss bezüglich Temperaturniveau und Temperaturgleichmäßigkeit die gleichen hohen Qualitäten aufweisen wie der Erwärmungsbereich selbst [2].

KONVEKTIVE ERWÄRMUNG IN DER VAKUUMOFENTECHNIK

Die Bauteilerwärmung in einem Industrieofen findet unabhängig von der Bauform und der Verwendung durch Wärmeleitung, Konvektion oder Wärmestrahlung statt. In einem Vakuumofen hingegen, 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 ist die 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, bei denen die Wärmestrahlung die prozessbestimmende Größe der Wärmeübertragung wird, entgegenzuwirken, wird mittels Schutzgas die Bauteilerwärmung auf konvektivem Wege durchgeführt (**Bild 7**). 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 (siehe **Bild 8 und 9**).

KONVEKTION ZUM DURCHWÄRMEN, ABKÜHLEN UND ABSCHRECKEN

Der vorliegende Beitrag beinhaltet das Thema der Konvektion zur effizienteren Erwärmung; 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 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 graphitisierte Heizkammer integrierten Gasleiteinrichtungen müssen dabei zum einen optimale Strömungsverhältnisse sicherstellen, zum anderen aber auch den Erfordernissen bezüglich geringer Eigenmasse 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 $\alpha = f(\text{Gasart, Geschwindigkeit, Druck})$). Durch Verstellen der Luken oder Gasdüsen ist eine Richtungsumkehr oder -steuerung möglich, um die Wirkung der Gasabschreckung zu intensivieren oder um diese den Anforderungen anzupassen. Unterschieden wird im konstruktiven Aufbau die Art und Position des Wärmetauschers, der entweder vor oder nach dem Gasumwälzer platziert wird, um ggf. auch noch die vom Umwälzmotor erzeugte Wärme abführen zu können.

Mithilfe von Simulationstechniken können im Industrieofenbau und in der Wärmebehandlung die Aufheiz- und Kühlvorgänge sehr gut erfasst 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.

Bild 11 zeigt exemplarisch die Durchwärmung eines Würfels, der in der Simulation als entsprechender Probenkörper analog den 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.

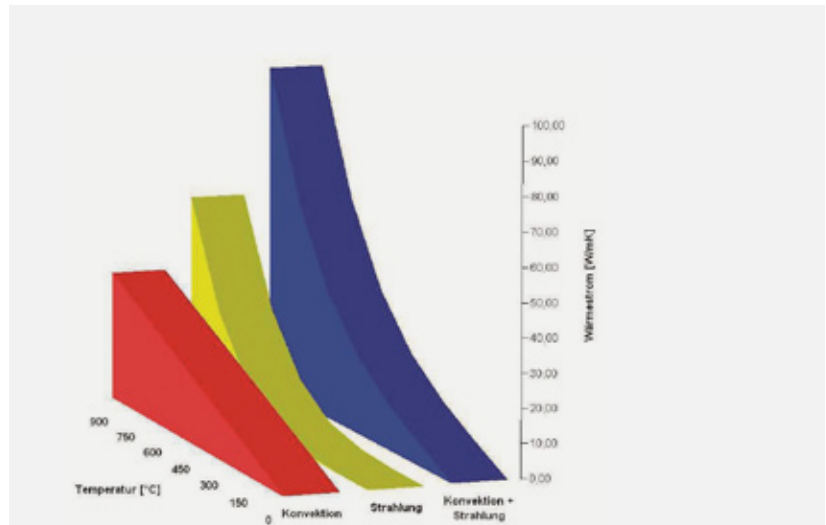


Bild 8: Vergleich Erwärmung mit und ohne Konvektion [1]

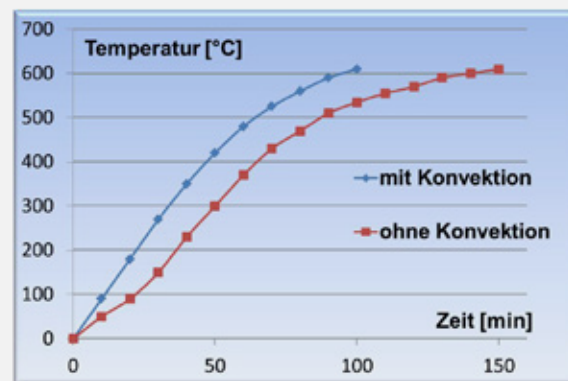


Bild 9: Temperaturgleichmäßigkeit bei Konvektiver Erwärmung im Vakuumofen [1]

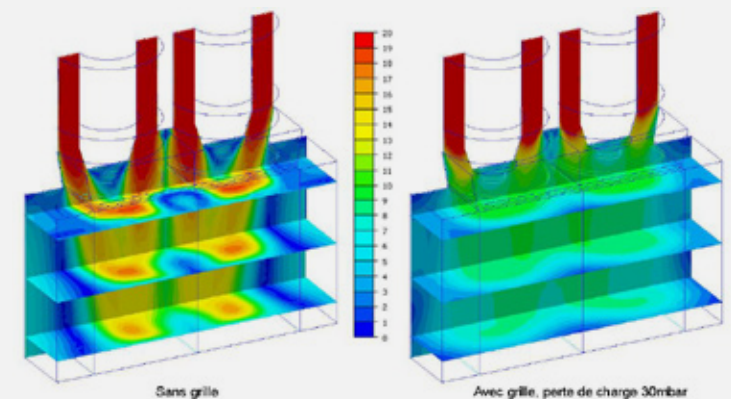


Bild 10: Vergleich Konvektion und Strahlung [1]

Durch die Unterstützung von CFD werden Sonderlösungen konzipiert, die 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 AMS2750D stellt hohe Anforderungen an Industrieofenanlagen und insbesondere Vakuumöfen, die in der Wärmebehandlung zur Anwendung kommen. Dies sind insbesondere Thermo-elemente, 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 AMS2750 in einer normierten Form erfasst werden. Die Genauigkeitstoleranz der Messsysteme spielt bei der AMS2750D eine entscheidende Rolle. Die Kalibrierengenauigkeit der Geräte darf dabei $\pm 1,0 \text{ }^\circ\text{F}$ ($\pm 0,6 \text{ }^\circ\text{C}$) oder $\pm 0,1 \%$ des Messwerts in $^\circ\text{F}$ nicht überschreiten. Die Datenaufzeichnung muss mit einer Kalibrierengenauigkeit von $\pm 2 \text{ }^\circ\text{F}$ ($\pm 1,1 \text{ }^\circ\text{C}$) erfolgen. Die maximal zulässige SAT-Gesamtdifferenz des Ofens ist nach sechs Ofenklassen eingeteilt. Gemäß AMS2750D wird entsprechend auch die erreichte Temperaturgleichmäßigkeit der Öfen in entsprechende sechs Klassen eingeteilt, beginnend mit $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ (Ofenklasse 1) bis $\pm 28 \text{ }^\circ\text{C}$ (Ofenklasse 6), (Messung gem. DIN ISO 17052-2).

WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNGEN

Technisch bedingt lassen sich Industrieöfen mit Hochkonvektionseinrichtung aufgrund des verhältnismäßig hohen Wärmetransfers und der dadurch bedingten reduzierten Aufheizzeiten (siehe **Bild 12**) auf die Bauteile deutlich kompakter und platzsparender ausführen. Dieses positive Merkmal korreliert in der Regel auch mit vergleichsweise geringeren Investitionskosten für eine entsprechende Ofenanlage.

Ein weiterer wirtschaftlicher Vorteil des Jet-Heating sind die niedrigeren Energiekosten. Während beispielsweise induktive Erwärmungsanlagen mit kostenintensivem Strom und vergleichsweise kleinem Wirkungsgrad arbeiten, können Jet-Heating-Ofenanlagen zudem mit Erdgas betrieben werden. Die jährliche Energiekosteneinsparung beim Betrieb von Jet-Heating-Öfen – im Vergleich zu induktiver Erwärmung ist in **Bild 15** dargestellt.

Beispiel:

- Betriebszeit von 6.000 Stunden
- Gastarif: € 0,025 pro kWh
- Stromtarif: € 0,08 pro kWh
- Jährliche Energiekosten einer induktiven Erwärmungsanlage: ca. € 250.000 bei einem mittleren Durchsatz von 1.500 kg/h
- Jährliche Energiekosten Durchlaufofenanlage mit Jet-Heating: ca. € 50.000-70.000

Bei einem Kaufpreis der Ofenanlage von € 200.000-300.000 amortisiert sich die Investition in etwa 1-2 Jahren.

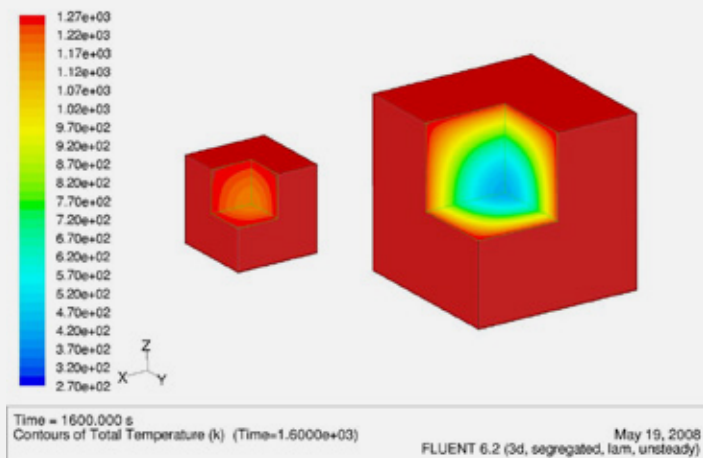


Bild 11: Simulation einer Durchwärmung nach 1.600 s von zwei Würfeln (Chargenkörpern) mit Kantenlänge 250 mm und 500 mm [1]

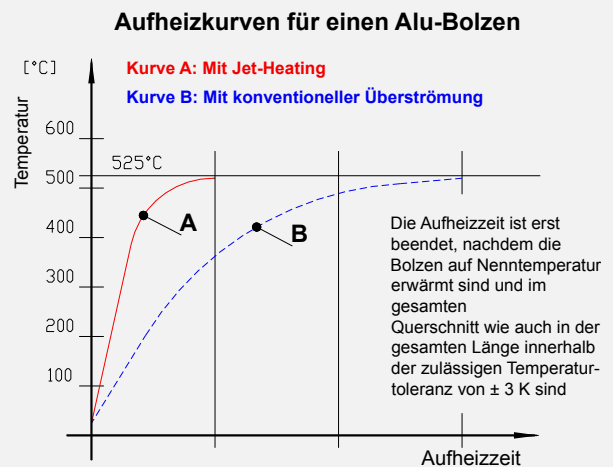


Bild 12: Vergleich Erwärmung mit und ohne Konvektion

FAZIT

Industrieöfen 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 Brennstoffzellen besitzt oder 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 Potenzial bieten, gerade auch, wenn es um den Gedanken der sauberen und umweltfreundlichen Betriebsweise im Bereich der lean-Produktion geht.

Bereits während des Aufheizvorgangs in Industrieöfen finden Prozesse statt, die ganz wesentlich die späteren Bauteileigenschaften beeinflussen. So führt ein schnelles Aufheizen und eine optimale Temperaturgleichmäßigkeit in der Charge nicht nur zu einer verkürzten Aufheizdauer, sondern auch zu gleichmäßigen Gefügeeigenschaften und mehr oder weniger gleichmäßig thermisch induzierten Eigenspannungen im Bauteil. 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 30-40 % verkürzt werden. Auch kann durch eine im Düsenfeld erzeugte Hochkonvektion bzw. Prallströmung im Mittel ein um bis zu 4-facher Wärmeübergang erreicht werden, was in eine entsprechend verkürzte Erwärmungs- und Durchwärmdauer mündet.

LITERATUR

- [1] Irretier, O.: Aspekte zur Konvektionserwärmung und Temperaturgleichmäßigkeit bei Vakuum- und Schutzgasöfen. *elektrowärme international* 1-2011, S. 33-39
- [2] Irretier, O.; Schütt, W.: Aspekte zur Konvektionserwärmung und Temperaturgleichmäßigkeit bei Vakuum- und Schutzgasöfen. *elektrowärme international* 2-2012, S. 53-59
- [3] Irretier, O.: Energieeffizienz in Industrieofenbau und Wärmebehandlung – Maßnahmen und Potentiale. *elektrowärme international* 1-2010, S. 37-44
- [4] Irretier, O.: Resource savings and energy efficiency in heat treatment shops. *heat processing* 1-2014, S. 47-52
- [5] Patent DE 102010019215 A1, Vorrichtung zum Erwärmen von Stahlblechen auf Presshärtemperatur 950 °C
- [6] Patent DE 102009051157 A1, Verfahren zum Betreiben einer Ofenanlage mit einem getakteten oder kontinuierlichen Transportprozess
- [7] Patent DE 102009004967 B4, Verfahren und Vorrichtung zur Ausrichtung von erwärmten Werkstücken
- [8] Patent EP 1736556 A2, Ofenanlage zum Anwärmen von langen Aluminiumsträngen
- [9] Patent DE 102008005259 B4, Verfahren zur Energieeinsparung bei Wärmebehandlungsanlagen mit durch Heizteil und Kühlteil bewegtem Gut
- [10] Patent EP 2104745 B1, Vorrichtung zur schwebenden Führung von bahnförmigem Material
- [11] Patent EP 0864 519 A1, Verfahren zur Wärmebehandlung von Werkstücken
- [12] Patent EP 0716152 A1, Verfahren zur Wärmebehandlung von Werkstücken
- [13] Patent WO 2013000001 A1, Ein Verfahren zum partiellen Erwärmen eines Formbauteils
- [14] Patent EP 2090667 A1, Vorrichtung und Verfahren zur Erwärmung von Werkstücken
- [15] Irretier, O.: Überblick und aktuelle Entwicklungen der Industrieofentechnik für die Wärmebehandlung von metallischen Bauteilen. Vortrag 69. Härtereikongress 2013 Wiesbaden

AUTOR



Dr.-Ing. **Olaf Irretier**
 IBW Dr. Irretier GmbH
 Kleve
 Tel.: 02821 / 7153948
 olaf.irretier@ibw-irretier.de