

Energieeffiziente Gestaltung von Industrieöfen

von **Felix Artur Nolzen, Benjamin Dickel**

Wärmebehandlungs- und Härteverfahren kommen heute in vielen Bereichen der Herstellung und Verarbeitung von metallischen Bauteilen in unterschiedlichsten Industrieöfen zur Anwendung. Der Industrieofen hat dabei die Funktion, den Wärme- und Stoffübergang auf das Bauteil möglichst gleichmäßig zu gewährleisten, weil nur dadurch eine optimale Bauteilqualität erzeugt werden kann. Der schnelle und gleichmäßige Wärme- und Stofftransport, d.h. der Antransport von Energie als auch von Schutz- oder Reaktionsgasen, wird demgegenüber durch die Umwälzung und Strömung in der Ofenanlage gewährleistet.

Energy-efficient design of industrial furnaces

Heat treatment process and hardening process used today in many areas of production and processing of metal components in a variety of industrial furnaces for use. The industrial furnace has the function to ensure the transfer of heat and mass transfer to the component as uniformly as possible, because only by an optimal part quality can be produced. The rapid and uniform heat transfer and mass transfer, that is, the transfer of energy as well as the transportation of inert gas or reaction gases, in contrast, ensured by the circulation and flow in the furnace.

Ein wichtiges Entscheidungskriterium bei der Auswahl einer Industrieofenanlage ist die Energieeffizienz. Das allgemeine Streben der Ressourcenschonung und des Umweltschutzes und das mit steigendem Energiepreis verbundene Ziel der Kostenreduzierung sind hier die treibenden Kräfte und lösen derzeit eine Reihe an Maßnahmen im Ofendesign aus. Die Aufgabe des Ofenbauers besteht hinsichtlich einer für den Prozess geeigneten und unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz optimierten Ofenanlage darin, die prozessübergreifenden Stoff- und Energieflüsse zu erfassen, zu bilanzieren und die technischen und wirtschaftlichen Fakten hinsichtlich einer möglichen Energieeinsparung durch z. B. Verkürzung von Prozesszeiten, Reduzierung von Wärmeverlusten, Verbesserung von Wirkungsgraden, Reduzierung von Energieverbräuchen, Energiespeicherung, Abwärmennutzung oder Energierückgewinnung zu nutzen. Die Bewertung einer optimalen Energieausnutzung in der Wärmebehandlung ist auch mit der Frage verbunden, wie die vorhandene Wärme, d.h. der Energieinhalt eines Bauteils, einer Atmosphäre oder eines Stoffes durch ein Temperaturgefälle an ein anderes Medium oder die Umgebung übertragen werden kann.

ENERGIEEFFIZIENZSTEIGERUNG DURCH OPTIMIERTE ISOLIERUNG

Bei Wärmebehandlungs-, Glüh- und Härteprozessen, die durchaus Temperaturen bis zu 1.300 °C aufweisen können, kommt der Ofenisolierung eine ganz besondere Rolle zu, der durch den optimierten Einsatz von Isoliermaterialien (Faser, Wolle, Steine) in den letzten Jahrzehnten mit Reduzierung der Energieverbräuche von bis zu 30 % entsprochen wurde. Es gilt: Leichte Isolierstoffe weisen eine geringe mechanische Festigkeit auf, zeichnen sich hingegen durch ein hohes Isoliervermögen und eine geringe Wärmespeicherkapazität aus.

Durch eine optimale Kombination verschiedener Isolierstoffe (Ausnutzung des Isoliervermögens, der Speicherkapazität, der mechanischen Festigkeit und der max. Anwendungstemperatur) kann man somit den Ofen seinem jeweiligen Einsatz anpassen und hinsichtlich der Energieeffizienz optimal gestalten. So können beispielsweise durch Einsatz mikroporöser Wärmedämmplatten (0,025 W/mK bei ca. 400 °C) als Hinterisolierung die Ofenwandverluste um etwa 20 % reduziert werden, womit in der Regel eine Herabsetzung der äußeren Ofenwandtemperatur von

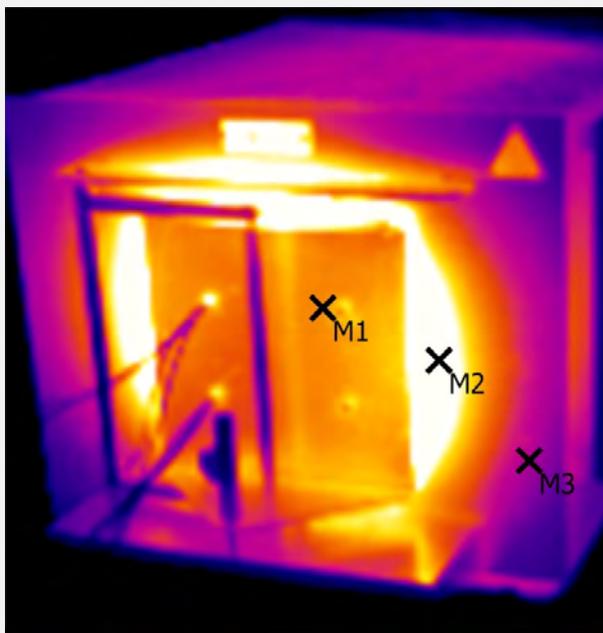


Bild 1: Aufnahmen mit der Wärmebildkamera

etwa 10 °C verbunden ist. Die Amortisationszeiten liegen je nach Betrachtungsfall bei drei bis fünf Jahren.

Zum energieeffizienten Wandaufbau eines Industrieofens gilt es Folgendes zu beachten:

- Bei stationär betriebenen Öfen sind die Wärmeverluste an der Ofenaußenwand und nicht die Speicherwärme Hauptauswahlkriterium.
- Bei instationär betriebenen Öfen (häufiges Aufwärmen und Abkühlen) ist die Speicherwärmekapazität der Ofenwand so gering wie möglich zu halten.
- Bei Öfen mit reaktiver Ofenatmosphäre ist Hauptauswahlkriterium das Verhindern chemischer Reaktionen zwischen innerer Ofenwandschicht auf die Ofenatmosphäre (dies gilt auch für Flüssigphasen im Ofeninnenraum, z. B. bei Schmelzöfen).
- Beim Aufbau einer mehrschichtigen Wand verschiebt sich der Taupunkt in die Ofenwand und damit kann Wasser in der Ofenwand kondensieren. In diesen Fällen sind entsprechende Vorkehrungen zu treffen (z.B. Taupunktsperren).
- Das Ofengerüst muss so konstruiert sein, dass es das Gewicht der Ofenzustellung trägt. Wird die Ofenzustellung modifiziert (z. B. Änderung der Ofensteine durch HTW (Module, Matten, Variation der Dicke der verschiedenen Wandschichten), kann eine Änderung des Ofengerüsts notwendig sein. Bei Neukonstruktion eines Ofens kann der Aufwand fürs Fundament reduziert werden.

- Bei nachträglicher Außendämmung ist eine Überhitzung innenliegender Schichten oder des Stahlbaus unter allen Umständen zu vermeiden.
- HTW-Module müssen mit geeigneten Mitteln (z.B. Kleber, metallischer Anker) an der Ofenkonstruktion befestigt sein.
- Halteanker, die in den Ofenraum ragen, können auch mit der Ofenatmosphäre reagieren (Aufkohlen, Oxidieren).
- Die maximal zulässige Oberflächentemperatur an der Außenwand des Ofens ist aus Arbeitsschutzgesichtspunkten in der ISO 13732-1 vorgegeben. Wird diese überschritten, so ist durch geeignete Maßnahmen zu verhindern, dass diese Fläche durch Menschen berührt werden kann (z.B. Schutzgitter, Absperrung).
- Die Wärmespeicherkapazität ist für die instationäre Betriebsweise wichtig. Die Wärmekapazität eines Feuerfestprodukts ist proportional zur Rohdichte.

Eine Aussage zum Isolieraufbau und der Dichtheit von Ofenanlagen kann mithilfe thermografischer Aufnahmen über eine Wärmebildkamera erreicht werden, die hinsichtlich der Wärmedämmung und der Ofendichtheit Aufschluss gibt (**Bild 1**). Die Messungen der Temperatur mit der Wärmebildkamera und PT werden in der Regel an signifikanten Positionen ermittelt, um entsprechende Aussagen über die Wärmedämmung durchzuführen.

Die Überprüfung kann je nach Umfang auch während des laufenden Betriebes durchgeführt werden. Zudem kann ein Werksprüfzeugnis nach EN 10204 „2.3“ CEN ausgestellt werden.

Im Rahmen der Optimierungen am Isolieraufbau von Ofenanlagen wurden vor allem Isolierplatten an Wänden, Decke und Boden hinsichtlich thermisch gespeicherter Energie betrachtet und optimiert. Aufgrund der mechanischen Festigkeit wurde im Boden eine hinsichtlich der Isolierwirkung verbesserte Variante an Feuerleichtsteinen verbaut. Bei sogenannten Stopfentüren an Kammeröfen, die bei kleinen Ofenabmessungen in der Regel über eine Parallelhebelkonstruktion mit dem Ofenaußengehäuse verbunden sind, ist die heiße Seite der Stopfentür dem Ofen zugewandt und bei größeren Ofenabmessungen über ein Absorptionsblech strahlungstechnisch isoliert. Dadurch lassen sich bei schnellen Abfolgen beim Öffnen und Schließen der Ofentür signifikante Energieeinsparungen realisieren. Ebenso wurde die Türabdichtung verbessert und die Wärmeleitung im Ofenfrontbereich reduziert.

ENERGIEEFFIZIENZSTEIGERUNG DURCH OPTIMIERTE ELEKTRISCHE BEHEIZUNG

Elektrische Ofenbeheizungen bestehen in der Regel aus gewickelten Heizwendeln, welche an beiden Längsseiten der Luftleitwand auf keramischen Körpern mäander-



Bild 2: Gewickelte Heizwendel auf der Luftleitwand



Bild 3: Elektrisch beheizter Herdwagenofen

förmig angeordnet sind. Hinsichtlich einer optimierten Übertragung der Heizenergie ist darauf zu achten, dass die Wärme frei abstrahlen kann, d. h. dass kein Wärmestau an den Heizelementen vorliegt (**Bild 2**).

Der für den Wärmebehandlungsprozess benötigte Energiebedarf wird mittels elektrischer Heizleiterberechnung durchgeführt. Üblich ist für Industrieöfen die indirekte oder mittelbare Widerstandsbeheizung, bei der die in metallischen oder nichtmetallischen Widerstandskörpern entwickelte Wärme durch Strahlung und meist in geringerem Maße durch Leitung und durch Konvektion auf das Wärmegut übertragen wird. Vielfach werden Heizwiderstände aus metallischem Widerstandsdraht oder -band (meist Heizleiter genannt) für die Beheizung von Industrieöfen verwendet. Um eine genügende Länge unterbringen zu können, wird der Draht zu längeren Spiralen gewickelt und das Band wellenförmig gebogen (**Bild 3**).

Die Lebensdauer des Heizelements hängt von verschiedenen Faktoren ab. So zum Beispiel von der eingesetzten Legierung, der Elementtemperatur, der Elementauslegung, der umgebenden Atmosphäre, dem Heizzyklus, der Art des Elementträgers usw. Heizleiterlegierungen bilden bei entsprechender Betriebstemperatur an ihrer Oberfläche eine Oxidschicht, die eine weitere Oxidation des Materials verhindert. Um ihre Funktion erfüllen zu können, muss die Oxidschicht dicht und widerstandsfähig gegen die Diffusion von Gasen und Metall-Ionen sein. Sie muss möglichst dünn sein und auch bei Tem-

peraturschwankungen fest am Metall haften. Durch sorgfältige Wahl der Legierungsbestandteile erhält man Legierungen, die sich durch längere Lebensdauer, höhere zulässige Betriebstemperatur und verbesserte Warmfestigkeit auszeichnen. Bei Runddrähten ist das Verhältnis von Heizleitervolumen zu Heizleiteroberfläche proportional zu dem Durchmesser. Praktisch bedeutet das, dass mit steigendem Durchmesser für die Neubildung von Oxid mehr Legierungsbestandteile pro Oberflächeneinheit zur Verfügung stehen. Das ist auch der Grund dafür, dass unter sonst gleichen Bedingungen dickere Drähte eine längere Lebensdauer besitzen als dünnere. Das gleiche gilt für Bandlelemente, d. h., mit zunehmender Dicke verlängert sich deren Lebensdauer.

ENERGIEEFFIZIENZSTEIGERUNG DURCH OPTIMIERTE UMWÄLZUNG

Der Wärmeübergang auf das Bauteil und somit die Erwärmungsgeschwindigkeit und auch die Temperaturgleichmäßigkeit hängt ganz wesentlich von der Qualität der Umwälzung eines Industrieofens ab, d. h. ein hoher Volumenstrom bzw. eine hohe Luft- oder Gasgeschwindigkeit im Umwälzofen ist grundsätzlich anzustreben. Der nahezu proportionale Zusammenhang aus Luftgeschwindigkeit und Wärmeübergang ist in **Bild 4** dargestellt.

Bild 5 zeigt einen Umwälzofen mit optimiertem Umwälzsystem für gleichmäßige und schnelle Bauteilerwärmung.

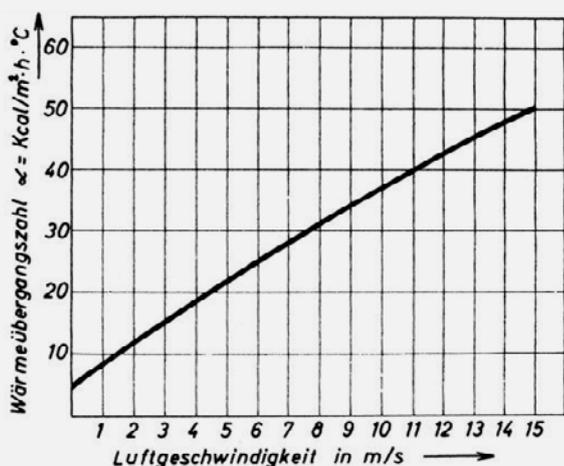


Bild 4: Wärmeübergangskoeffizient und Luftgeschwindigkeit an gewälzten Flächen



Bild 5: Umwälzofen mit optimiertem Umwälzsystem

ENERGIEEFFIZIENZSTEIGERUNG DURCH OPTIMIERTE MOTOREN

In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass bei der Verwendung leistungsstarker Umwälzsysteme eine konsequente Verwendung von Motoren und Frequenzumrichtern höherer Energieeffizienzklasse sinnvoll ist, die in Zusammenhang mit zukünftigen Reparaturen und Wartungen umgesetzt werden können. Die Amortisationszeiten hierfür liegen je nach Anlagenbetrieb und Verwendung bei etwa ein bis drei Jahren. Elektrische Antriebe, Ventilatoren, Pumpen und Kompressoren werden nach bewährten Regelverfahren angesteuert. Bei elektrischen Motoren für Antriebe wird die Motordrehzahl über ein Getriebe reduziert, sodass sich die erforderliche Antriebsdrehzahl ergibt. Ventilatoren, Pumpen und Kompressoren werden für die Nenndrehzahl ausgelegt. Die Anpassung an den tatsächlichen Bedarf erfolgt durch mechanische Drosselventile oder Bypasschaltungen. Sowohl bei der Anpassung der Förderströme durch ein vorgeschaltetes Getriebe, als auch bei der Anpassung durch eine Drosselregelung arbeitet der Elektromotor unter Nenndrehzahl, obwohl nur ein Teil der Leistung benötigt wird. Auf diese Weise wird elektrische Energie verschwendet.

Maßgeblich für die Auswahl von Umwälzventilatoren sind die vom Hersteller zur Verfügung gestellten Katalogdaten, insbesondere die Kennlinien. Die Kennlinien werden auf Normprüfständen gemessen und festgelegt und weichen von den in der Praxis unter Betriebsbedingungen sich einstellenden Einbaukennlinien ab. Diese Abweichungen resultieren z.B. aus Einbaustörungen wie:

- Eintritts- und Austrittsgitter
- Prallplatte am Ventilatoraustritt
- Geringer Wandabstand zum Ventilatoreintritt

- Drallbehaftete Strömung vor dem Ventilatoreintritt
- Krümmer am Ventilatoraustritt

Ventilatoren werden über Riemen, Kupplungen, Getriebe oder direkt angetrieben. Der Direktantrieb ist unter energetischen Aspekten der effizienteste. Bei den Riemenantrieben sind Flachriemen energetisch günstiger als Keilriemen. Wird das Drehmoment auf die Motorwelle durch einen Keilriemen übertragen, so kann durch die Auswahl des richtigen Keilriemens die Gesamtleistung des Ventilatorsystems um bis zu 10 % reduziert werden, abhängig von der Leistung des Gesamtsystems. Bei der Auswahl der Antriebsart sind verschiedene Parameter (z.B. Drehmomente, Temperaturen) zwingend zu betrachten, die die Auswahl einschränken können.

ENERGIEMANAGEMENTSYSTEME UND ABWÄRMENUTZUNG

Die Verbesserung der Energieeffizienz durch Einsatz von Energiemanagementsystemen und Abwärmenutzung ist nur mittelbar im Einflussbereich des Ofenbauers. Hier ist die Zusammenarbeit mit dem Betreiber zur Erarbeitung von auf die betriebliche Situation angepassten Lösungen erforderlich.

Die Energieeinsparmöglichkeiten über Energiemanagementsysteme werden seit vielen Jahren sehr intensiv diskutiert. Bei kurzzeitig ablaufenden thermischen Prozessen einer Serienfertigung mag durchaus ein entsprechendes Last- oder Spitzenstrommanagement energetisch sinnvoll sein – wenn auch mit einem hohen Kosteneffekt verbunden. Langandauernde Aufkohlungsprozesse in Härtereien bieten hier nur eine geringe Möglichkeit der zeitlich flexiblen Gestaltung.

Die im Bereich der Thermoprozesstechnik vorliegenden großen Abwärmemengen gilt es besonders hinsichtlich der Energieeffizienz zu nutzen. Für die Beheizung von Waschmaschinen ist grundsätzlich die Nutzung von Brennerabgasen wie auch die Nutzung des Wärmepotentials von Abschreckbädern möglich, welches in der Regel zwangsgekühlt werden muss. Konzepte zur energetischen Nutzung von Brennerabgasen (Abgastemperatur vor dem Wärmetauscher größer 300 °C / nach dem Wärmetauscher kleiner 150 °C), die über Bypass und Luft-Wasser-Wärmetauscher zur Beheizung der Reinigungsanlagen eingesetzt werden können, amortisieren sich üblicherweise derzeit nach vier bis sechs Jahren. Für das Aufheizen von Waschwasser in Waschmaschinen wird eine Temperaturdifferenz von mindestens 15 K benötigt. Hier ein Beispiel: Ölbadtemperatur 80 °C, d. h. Aufheizen des Wassers auf max. 65 °C möglich. Die Bauteiltrocknung nach der Reinigung kann z. B. durch Abwärmenutzung aus Ölabschreckbädern, den Abwärmeprozessen oder den Brennerabgasen über Wärmetauscher erfolgen. Bei der Abwärmenutzung aus den Ölabschreckbädern sollten Temperaturdifferenzen zwischen dem Öl- und Reinigungsbad von größer 20 K vorliegen. Die Maßnahme hat geschätzte Amortisationszeiten von drei bis fünf Jahren zur Folge. Bei der Abwärmenutzung von Ölbadern zur Trocknung (mit oder ohne Schwadenkondensator) an Reinigungsanlagen ist nach den Erfahrungen für diese Maßnahmen mit Amortisationszeiten von ebenfalls drei bis fünf Jahren zu rechnen.

ZUSAMMENFASSUNG

Industrieöfen finden heutzutage in nahezu allen Bereichen der Wärmebehandlung wie Werkzeug- und Formenbau, Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrtindustrie sowie der Medizintechnik breite Anwendung. In Zukunftsmärkten wie Solartechnik, Windkraft und Brennstoffzelle werden weitere Kapazitäten in Ofentechnik ausgebaut. Kombinierte Wärmebehandlungsverfahren aus Härten 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. 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 Auf-

heizdauer, sondern auch zu gleichmäßigen Gefügeeigenschaften und mehr oder weniger gleichmäßig thermisch induzierter Eigenspannung 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.

Der vorliegende Beitrag zeigt in einer Übersicht diverse Möglichkeiten und Beispiele auf, die Energieeffizienz an und in Industrieöfen zu steigern. Grundlage für diese Betrachtung ist die Analyse des Gesamtprozesses und die sich daraus ergebenden möglichen Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz im Industrieofen und Chancen zur Abwärmenutzung unter Berücksichtigung der betrieblichen Abläufe. Die erzeugte thermische Energie in der Ofenanlage selbst mehrfach zu nutzen, ist eine der effektivsten Möglichkeiten, die Effizienz zu steigern.

Ergänzend und abschließend seien dem Praktiker und Ofenbetreiber an dieser Stelle noch einige Literaturhinweise vermittelt, die sich mit Themen rund um Energieeffizienz von Thermoprozessanlagen beschäftigen.

LITERATUR

- [1] Beneke, Franz; Schalm, Stephan: Energieeffizienz in der industriellen Thermoprozesstechnik; Vulkan-Verlag, Essen 2011

AUTOREN



Felix Artur Nolzen
Artur Nolzen Industrieofenbau
GmbH & Co. KG
Wuppertal-Ronsdorf
Tel: 0202 / 246470
info@nolzen.de



M. Eng. Benjamin Dickel
Artur Nolzen Industrieofenbau
GmbH & Co. KG
Wuppertal-Ronsdorf
Tel: 0202 / 246470
info@nolzen.de

+++ www.prozesswaerme.net +++ www.prozesswaerme.net +++