

Wärmebehandlung zur Fertigung von Elektro-Rohrheizkörpern

von **Thomas Friedhelm Kohlmeyer, Herbert Tepr**

Rohrheizkörper sind Elektro-Heizelemente bestehend aus einem dünnen Widerstandsdraht in Form einer feinen Wendel, die zentral in einem metallischen Schutzrohr mit einer Isoliermasse eingebettet sind. Das initiale Patent für Rohrheizkörper, gedacht für das Erwärmen von Zimmern und zum Wasserkochen, wurde von George B. Simpson am 20.9.1859 eingereicht. Dieser Grundstein wurde im Laufe der Jahre stetig weiterentwickelt. Aber es dauerte mehr als ein halbes Jahrhundert bis zur ersten kommerziellen Nutzung. Im folgenden Beitrag wird die Wärmebehandlung von Rohrheizkörpern ausführlich beschrieben und die Auslegung von Anlagen zur Wärmebehandlung vorgestellt.

Heat treatment for the production of electrical tubular heating elements

Tubular heating elements are electrical heating elements which consist of a thin resistance wire built as a fine spiral, which is placed central in a protection tube made of metal. The tube is filled with a insulating compound. This basic principal configuration was already patented in USA in 1859. More than half a century passed until this idea could be used commercially. The following explains the manufacturing of tubular heating elements. Furthermore, the report is comparing annealing systems with innovative heat treatment systems which are used to produce the tubular heating elements.

Im Jahre 1918 wurde an die Firma General Electric USA ein Patent vergeben. Gegenstand war ein metallbeschichtetes rundes Element, welches mit Isolierpulver gefüllt war und in dem in der Mitte ein Widerstandsdraht durchgezogen wurde. Dieses Element wurde durch Pressen und Rollen positioniert. Danach konnte das Element in jede beliebige Form gebracht werden, ohne dass die elektrischen und thermischen Eigenschaften verändert worden wären. Nachdem der Widerstandsdraht positioniert war, gab es kein Kurzschlussrisiko zwischen innerem Draht und äußerer Hülle mehr und die Möglichkeit gleichmäßige Temperaturen am ganzen Rohr zu bekommen war deutlich verbessert worden.

Der Norweger Christian Backer hat 1921 ein Patent für die Umwandlung von reinem metallischem Magnesium zu Magnesiumhydroxid durch Zusatz von Wasserdampf unter hohem Druck und weiterer Umwandlung zu Magnesiumoxid mittels Wärmebehandlung erhalten. Aus dem elektrisch leitenden Magnesiummetall wurde damit eine hervorragende Isoliermasse. Das nachfolgende Patent in 1926 von Christian Backer betraf die Herstellung von Elektro-Rohrheizkörpern

als Alternative zu Herdplatten mit Brennstoffbeheizung. Christian Backer wanderte nach Kanada aus und entwickelte in Ottawa eine komplette Produktionsanlage für Rohrheizkörper. Nach dem zweiten Weltkrieg kehrte Christian Backer nach Skandinavien zurück und gründete 1949 in Sösdala, Schweden, die Firma Backer Elektro-Värme AB. Der Elektro-Rohrheizkörper wurde als sogenanntes Backerelement international bekannt.

In Illinois, USA, entwickelte in der Zeit von 1945 bis 1955 Mr. Sterling A. Oakley u. a. Maschinen zur Wicklung der Heizleiterdrähte, Herstellung der Anschlussbolzen, Füllung der Mantelrohre mit Magnesiumoxidpulver bei gleichzeitiger Platzierung des Heizleiters und Walzwerk zur Reduzierung der gefüllten Rohre. Durch die Komprimierung wird die Heizspirale zentrisch mit hochverdichtetem MgO-Pulver eingebettet. Hieraus resultieren eine ideale Wärmeleitung zum Rohrmantel sowie beste elektrische Isolierwerte.

Die Firma Kanthal AB in Hallstahammar, Schweden, hat 1955 von der Oakley Company die Lizenz für die Nutzung der Patente für die gesamten Maschinen zur Fertigung von

Rohrheizkörpern erhalten. Die Vereinbarung galt weltweit außer USA und Kanada mit Patentschutz bis 1980.

In **Bild 1** sind die wesentlichen Bestandteile von Rohrheizkörpern dargestellt. Rohrheizkörper werden als Elektro-Heizelemente je nach Anwendung in vielen unterschiedlichen Ausführungen hinsichtlich Größe, Formgebung, elektrische Leistung, Werkstoffe etc. hergestellt. Der äußere Durchmesser des Rohrmantels liegt üblich im Bereich von 3,0 bis 16,0 mm und die Rohrlänge beträgt von 200 bis 8.000 mm.

Die Werkstoffe für den Rohrmantel sind:

- Aluminium
- Kupfer
- Kohlenstoffstahl
- Austenitischer Cr-Ni-Stahl
- Ferritischer Cr-Ni-Stahl
- Hochhitzebeständiger Stahl
- Nickelbasis-Legierungen
- Titan
- und Sonderwerkstoffe.

Die Auswahl erfolgt entsprechend der Beanspruchung bezüglich Beständigkeit gegen Temperatur, Korrosion, Verzunderung sowie Festigkeit.

Der mit Abstand größte Anwendungsbereich für Rohrheizkörper sind Haushaltsgeräte. Hierfür werden täglich weltweit mehrere Millionen Stück mit Rohrdurchmesser 6,5 bzw. 8,5 mm x 1.000 bis 2.000 mm Länge und Rohrmantel aus

rost- und säurebeständigen Edelstählen produziert. Während früher die Abmessungen mit einem Durchmesser von 8,5 mm dominierte, überwiegt seit einigen Jahren der Durchmesser 6,5 mm. Der dünnere Rohrheizkörper ist leichter, statt 0,24 sind es nur noch 0,15 kg/m und die Herstellung ist dementsprechend viel kostengünstiger.

Extrem vielfältig sind die Anwendungsbereiche von Rohrheizkörpern zum direkten Beheizen von Flüssigkeiten und Gasen sowie Kontakterwärmung, wobei die Rohrheizkörper in Metallen eingegossen sind. Die beheizten Flüssigkeiten sind vorwiegend ruhendes oder strömendes Wasser aber auch Öl, Chemikalien, Teer, Salzbäder oder Bleibäder. Zur Erwärmung von Gasen zählt insbesondere ruhende oder strömende Luft sowie Strahlungsheizung mittels Reflektoren. Wichtige Bereiche sind die Erwärmung von Wasser in Haushaltsgeräten, Koch- und Grillapplikationen, Raumbeheizung, Saunaöfen, Dampferzeuger, Bahnwagenheizungen, Enteisung von Weichen etc.

Wärmebehandlung

Die verschiedenen Fertigungsschritte zur Herstellung von Rohrheizkörpern umfassen auch eine Wärmebehandlung. Erforderlich wird der Glühprozess, weil durch die Kaltumformung mit dem Walzen der Rohrheizkörper eine erhebliche Kaltverfestigung einhergeht. Diese Verfestigung ist unerwünscht, weil die Rohrheizkörper für den Verwendungszweck üblicherweise gut biegefähig sein müssen (**Bild 2**) und auch bei extremer Formgebung (**Bild 3**) dürfen am Rohrmantel keine Risse entstehen.

Je nach Durchmesser der Rohre werden bei CrNi-Werkstoffen minimale Biegeradien gemäß **Tabelle 1** erzielt.

Beim Walzen der Rohrheizkörper wird der Durchmesser des Rohrmantels um 10 bis 20 % reduziert, wodurch eine Verlängerung des Rohres um 8 bis 33 % resultiert. Durch die Kompression des Walzvorganges wird das MgO-Pulver über 3,10 g/cm³ verdichtet. Nach dem Einfüllen des MgO-Pulvers mittels Vibrationsmaschinen beträgt die ursprüngliche Dichte etwa 2,40 g/cm³. Damit wird die Wärmeleitfähigkeit zur Übertragung der Heizenergie von dem Heizwendel zum Rohrmantel von 3,4 auf 7,5 Wm⁻¹ K⁻¹ verbessert. Gleichzeitig erfolgt durch die Kompression eine stabile Zentrierung des eingebetteten Heizwendels.

Die Wärmebehandlung ist ein Rekristallisationsglühen, wobei das durch den Walzvorgang verschobene Materialgefüge in den ursprünglichen Zustand zurückversetzt und damit die Verfestigung rückgängig gemacht wird. Die Glühtemperaturen variieren entsprechend dem Werkstoff des Rohrmantels. Für Aluminium ist bereits eine Erwärmung auf 480 °C ausreichend, während für Kupfer etwa

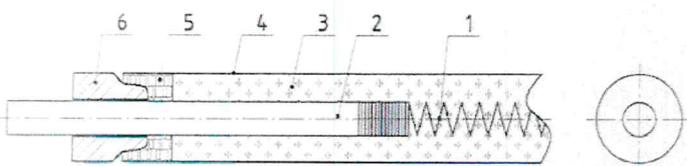


Bild 1: Aufbau eines Rohrheizkörpers: 1. Heizleiter; 2. Anschlussbolzen; 3. Isoliermasse; 4. Rohrmantel; 5. Dichtmasse; 6. Endtülle

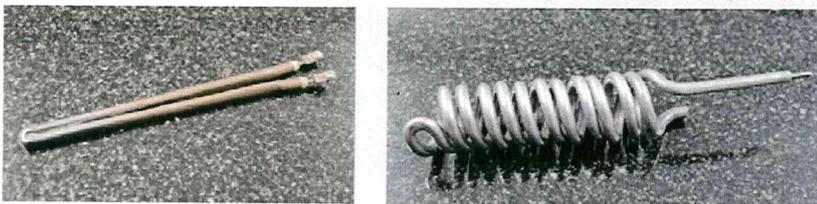


Bild 2: Biegefähigkeit von geglühten Rohrheizkörpern

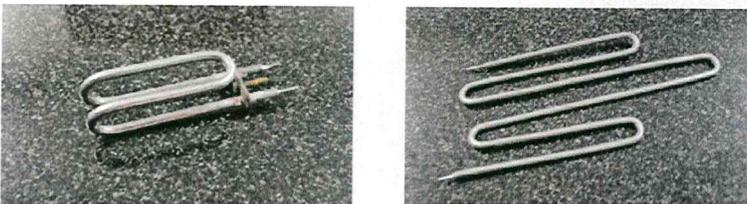


Bild 3: Typische Formgebung

Tabelle 1: Minimale Biegeradien

Ø Rohrmantel (in mm)	Min. Biegeradius (in mm)
3,0	4
6,5	10
8,5	12
11,5	20
16,0	25

650 °C erforderlich ist. Rohrheizkörper aus Kohlenstoffstählen werden im Bereich 800 bis 900 °C wärmebehandelt und hochlegierte Rohrmäntel benötigen 1.000 bis 1.100 °C Glüh-temperatur.

Für ein zufriedenstellendes Ergebnis der Wärmebehandlung muss der Rohrmantel vollständig bei der vorgegebenen Glüh-temperatur durchwärmt sein. Die Zeit für den Tempera-turausgleich in der Rohrwandung beträgt lediglich eine Minute, da die Wanddicken sehr gering sind. Längere Haltezeiten bewirken keine besseren Eigenschaften für das Glühresultat.

Die Wärmebehandlung wird immer unter Schutzgasatmo-sphäre durchgeführt. Andererseits würden die Rohrheizkörper durch den Sauerstoff der Luft unzulässig oxidieren.

Neue Durchlauf-Glühanlage

Für die Wärmebehandlung von Rohrheizkörpern wurde von der FK Industrieofen + Schutzgastechnik GmbH eine für den Verwendungszweck spezifische neue Ofenanlage entwickelt. Das FK-Verfahren bietet zahlreiche Vorteile gegenüber her-kömmlichen Glühanlagen, bei denen die Rohrheizkörper auf Bänder, Drahtgliedergurte, Ketten oder Schlitten durch den Ofen transportiert werden. Wegen der technischen Vorzüge und ganz besonders der Wirtschaftlichkeit wurden nach dem neuen Prinzip über 50 Glühanlagen weltweit installiert. Im Vergleich zu den herkömmlichen Glühverfahren werden die Gesamtkosten für die Wärmebehandlung von Rohrheizkör-pern mehr als halbiert.

Bei dem FK-Verfahren werden die Rohrheizkörper mittels einer Antriebsstation, die sich vor dem Ofen befindet, durch den Glühofen geschoben. Dabei drückt jeder Rohrheizkörper den vorher aufgegebenen Rohrheizkörper vor sich her. Der Glüh- und Kühlkanal der Ofenanlage besteht aus einer Vielzahl von Rohren, deren Anzahl nach der geforderten Durchsatzleistung bestimmt wird. Der Innendurchmesser der Glüh- und Kühlrohre ist so bemessen, dass nur jeweils ein Rohrheizkörper durchgeschoben werden kann. Standardöfen werden mit zwei bis 30 parallelen Kanälen ausgeführt. Hieraus resultieren Glühkapazitäten von 5 bis 300 kg/h netto oder entsprechend 20 bis 1.250 m/h Edelstahl-Rohrheizkörper mit 8,5 mm Durchmesser.

Bild 4 zeigt die Gesamtansicht einer Durchlaufglühanlage mit Schutzgasausrüstung für die Wärmebehandlung von Rohrheizkörpern mit einer Durchsatzkapazität von 200 kg/h netto, nach dem FK-Verfahren.

Da für die Förderung der Rohrheizkörper durch die Ofen-anlage die herkömmlichen Transportvorrichtungen entfallen, erfolgt der Glühprozess ohne die sonst üblichen Totlasten. Dadurch alleine vermindert sich der Energiebedarf bereits um etwa 50 % bei gleicher Netto-Durchsatzkapazität. Dement-sprechend verringert sich auch die erforderliche Kühlleistung für die Abkühlung der Rohrheizkörper auf ca. 50 °C. Im Übr-igen wird eine indirekte Wasserkühlung der Kühlkanäle nur ab einer Durchsatzleistung von über 150 kg/h empfohlen. Durch die Vielzahl der Kühlrohre ergibt sich nämlich eine große Wärmeableitfläche, sodass die Umgebungsluft zur Kühlung ausreichend ist.

Ein besonderes Merkmal ist die Abdichtung an den Aus-trittsöffnungen der Kühlrohre mittels elastischer Ringe zu den Rohrheizkörpern. Kühl- und Glührohre sind gasdicht miteinander verbunden und werden ständig unter Schutz-gas gehalten. Herkömmliche Ofenanlagen mit Glühmuffeln und Kühlkanälen benötigen große Querschnitte an Ein- und Auslaufseite, weil die Förderbänder oder sonstigen Transport-vorrichtungen durchgeführt werden müssen. Ein gasdichter Abschluss an der Austrittsseite ist daher nicht möglich. Der Verbrauch an Schutzgas ist bei diesen Glühöfen bis zu 50-mal höher als bei dem FK-Verfahren. Der Bedarf an Schutzgas ist auch ein erheblicher Kostenfaktor. Hinzu kommt noch, dass die Durchschubrohre an den neuen Glühanlagen an den Ein- und Austrittsseiten einfach mit Kappen gasdicht verschlossen werden können (**Bild 5**).

**Bild 4:** Glühofen nach FK-Verfahren**Bild 5:** Gasdicht verschlossene Durchschubrohre

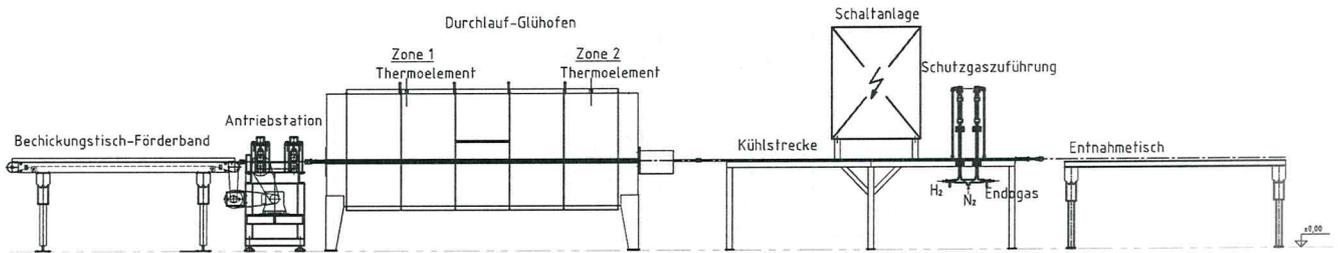


Bild 6: Längsansicht der Durchlauf-Glühanlage

So ist selbst bei Schichtbetrieb eine Wärmebehandlung mit einwandfreien Oberflächen garantiert, d. h. auch Blankglühen von Edelstahl-Rohrheizkörpern mit Wasserstoffatmosphäre. Förderband-Glühöfen dagegen erfordern für das Blankglühen von hochlegierten Mantelrohren einen Dreischichtbetrieb. Bei jedem Abstellen dieser Öfen ist ein aufwendiges Spülen mit Schutzgas notwendig. Außerdem sind diese Glühöfen gegen Zugluft in der Fertigungshalle sehr empfindlich und bei Einsatz von Wasserstoff als Ofenatmosphäre verursacht das relativ große Volumen in Glühmuffel und Kühlkanal ein entsprechendes Sicherheitsrisiko. Es ist auch zu beachten, dass im Ofen das zugeführte Schutzgas auf Glüh-temperatur erwärmt werden muss und hierfür Heizenergie erforderlich ist.

Für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung haben natürlich auch die Kosten für Verschleißteile und Wartung eine große Bedeutung. Extremen Beanspruchungen sind Transportvorrichtungen, z. B. Förderbänder, ausgesetzt, weil diese Bauteile beim Durchlaufen der Glühzonen auf über 1.000 °C erhitzt

und in der anschließenden Kühlzone wieder auf Raumtemperatur abgekühlt werden. Diese Stressbelastung wiederholt sich ständig auf den langen Förderbändern, sodass hochhitzebeständige Werkstoffe einem schnellen natürlichen Verschleiß unterliegen. Auch die hochwertigen Glühmuffeln werden stark belastet und müssen wegen Verformung ersetzt oder repariert werden. Der Austausch der Verschleißteile ist zeitaufwendig und kostenintensiv. Nicht zuletzt sind die Investitionskosten für die Anschaffung einer herkömmlichen Glühanlage etwa doppelt so hoch wie die der innovativen Wärmebehandlungsöfen bei gleicher Durchsatzkapazität.

Der gesamte Aufbau einer Durchlauf-Glühanlage in mittlerer Baugröße mit 10 Glühkanälen ist in **Bild 6** in Längsansicht und in **Bild 7** im Querschnitt zur Veranschaulichung zeichnerisch dargestellt. Die detaillierte Beschreibung der einzelnen Baugruppen in Durchlaufrichtung beginnt mit dem Beschickungstisch. Der Beschickungstisch dient zur Speicherung der Rohrheizkörper, die zur Glühbehandlung aufgegeben werden, und fördert die Rohrheizkörper automatisch in die Antriebsstation. Hierzu ist der Beschickungstisch als Transportband mit einem Endlosgurt aus glattem Kunststoffgewebe und Seitenführungsleisten ausgeführt. Die Länge des Beschickungstisches wird in Abstimmung mit den maximalen Längen der Rohrheizkörper gewählt. Ein eigener Antrieb ist für das Transportband nicht erforderlich. Von der nachgeschalteten Antriebsstation wird mittels einer Kettenverbindung die Fördergeschwindigkeit auf das Transportband des Beschickungstisches übertragen. Dabei ist der Kettentrieb so ausgelegt, dass die Geschwindigkeit auf dem Beschickungstisch stets 10 % schneller ist als die variabel vorprogrammierte Durchlaufgeschwindigkeit des Ofens. Durch diese Maßnahme werden die Rohrheizkörper sicher in die Treibrollen der Antriebsstation eingeführt. Wesentlicher Bestandteil der Antriebsstation sind zwei hintereinander angeordnete Treibrollensätze. Ein Treibrollensatz besteht aus gummierten Walzen mit Spurrillen zur geraden Führung der Rohrheizkörper (**Bild 8**).

Nur die unteren Rollen werden über Ketten angetrieben und sind in der Höhe nicht verstellbar. Die oberen Treibrollen werden mit Pneumatik-Zylindern angedrückt (**Bild 9**). Der Anpressdruck kann durch Einstellung des Luftdruckes

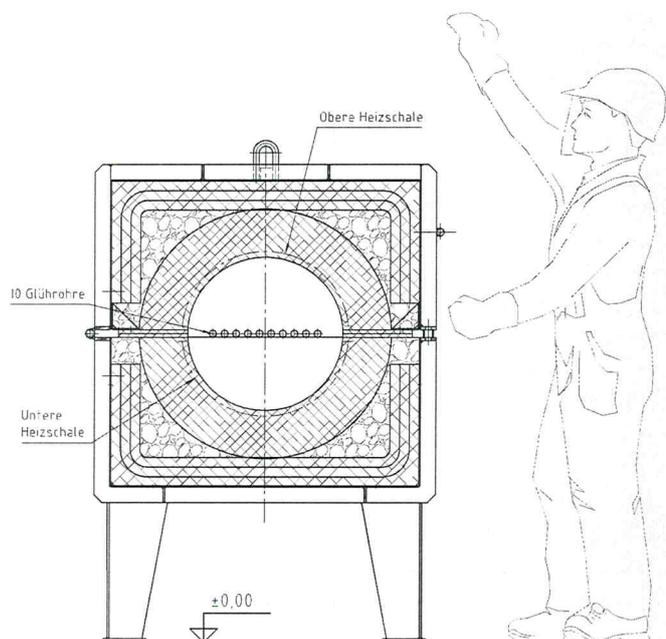


Bild 7: Querschnitt der Durchlauf-Glühanlage

dem Bedarf angepasst werden. Zur Einstellung der Fördergeschwindigkeit wird der Getriebemotor über einen Frequenzumformer angesteuert. Damit kann die Drehzahl im Bereich von 1:10 elektronisch stufenlos von der Schaltanlage vorgegeben werden.

In der Wärmebehandlungsanlage hat der eigentliche Glühofen einen Heizraum mit zwei Regelzonen á 750 mm Nutzlänge. Bestückt ist der Ofen mit 10 Glühkanälen aus nahtlosen Rohren in hochwertiger Nickelbasislegierung mit einer Oxidationsbeständigkeit bis 1.150 °C. Dieser hochhitzebeständige Werkstoff unterliegt nicht der Sigma-Phasenversprödung. Im Heizraum werden die Glührohre im Abstand von etwa 250 mm durch hochkant eingebaute Schamotteplatten unterstützt. Weiterhin werden die Glührohre mittels einer Federspannvorrichtung am Ofenauslauf so gezogen, dass die Glührohre exakt gerade bleiben. Damit wird auch gleichzeitig der durch thermische Ausdehnung bedingte Längenzuwachs der Glührohre von ca. 40 mm entlastet. Eine Besonderheit stellt das elektrische Heizsystem des Ofens dar. Über und unter den Glührohren sind die speziellen Heizelemente freistrahlernd angeordnet. Die Heizwendeln aus Widerstandsdraht sind an der Oberfläche in vakuumgeformten Modulen aus keramischem Material integriert.

Durch die allseitige Beheizung der Glührohre mit sinnvoller Anordnung der kreisrunden, strahlenden Heizflächen werden gleichmäßige Temperaturfelder im Ofenraum erzielt. Als Temperaturfühler werden Thermoelemente vom Typ PtRh-Pt eingesetzt, damit die erforderliche Genauigkeit und Sicherheit bei Ofenraumtemperaturen von 1.100 °C gewährleistet sind. Für die präzise Steuerung der Ofentemperatur sind Software PiD-Regler mit stetigem Ausgang vorgesehen. Die Heizelemente erhalten in Verbindung mit einem Thyristor-Leistungssteller eine stufenlose Energiezuführung. Mit dieser Konzeption wird eine Regelgenauigkeit von +/- 1 K erreicht.

Die vakuumgeformten Heizmodule dienen auch als effektive Wärmeisolierung, weil das keramische Material mit

einer Dichte von 0,2 kg/dm³ sehr leicht ist. Optimale Wärmedämmung wird durch Einsatz von modernsten mikroporösen Dämmstoffen als Hinterisolierung erzielt. Der Stahlmantel des Ofengehäuses hat daher nur eine Temperatur von ca. 20 °C über Umgebungsluft bei Arbeitstemperaturen bis 1.100 °C im Nutzraum des Glühofens. Durch die Leichtbauweise der Innenauskleidung kann die Ofenanlage in weniger als einer Stunde von 20 °C auf Betriebstemperatur gebracht werden.

Das Ofengehäuse ist zweiteilig und horizontal im Niveau der Glührohre getrennt. Über ein Scharnier an der Längsseite kann die obere Hälfte des Ofengehäuses samt der kompletten Auskleidung mit Heizsystem einfach aufgeklappt werden. Somit wird ein praktischer Zugang für Inspektionen des Ofeninnenraumes mit Heizung und Glührohren realisiert (**Bild 10**).

Hinter dem beheizten Ofenteil befindet sich die Kühlstrecke bestehend aus 10 Kühlrohren, dem Untergestell, der Ausrüstung zur Zuführung von Schutzgas und des Schaltschranks. Für die Kühlrohre sind nahtlose Rohre aus rostfreiem Edelstahl ausreichend. Die gasdichte Verbindung zu den hochwertigen Glührohren wird durch eine Muffe und Hartlot hergestellt (**Bild 11**).

Als Richtwert ist die Kühlstrecke doppelt so lang wie der beheizte Ofenraum. Falls der Aufstellungsplatz begrenzt ist, können die Kühlrohre in ein Wasserbad verlegt werden. Dadurch wird die Kühlstrecke erheblich kürzer, d. h. die Länge halbiert sich.

Schutzgasversorgung

Die dargestellte Wärmebehandlungsanlage wurde zum Blankglühen von Rohrheizkörpern aus CrNi-Stahl konzipiert. Zur Vermeidung von unerwünschter Oxidation und Erzielung von metallisch blanken Oberflächen der Rohrheizkörper werden hohe Anforderungen bezüglich der Reinheit der Schutzgasatmosphäre gestellt. Eine Oxidation ab 250 Ångström Schichtdicke wird bereits durch mattes oder verfärbtes Aussehen des Rohrmantels sichtbar. Als Schutzgas kommt Wasserstoff mit



Bild 8: Treibrollen zur geraden Führung der Rohrheizkörper

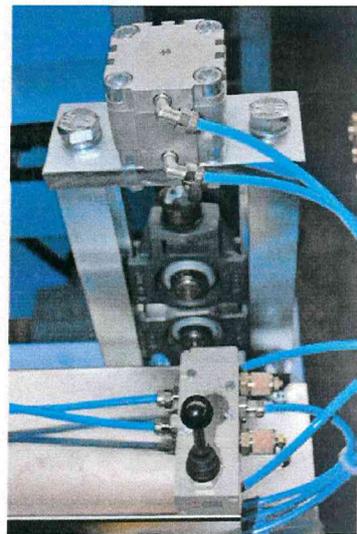


Bild 9: Pneumatische Anpressung der Treibrollen



Bild 10: Zweiteiliges Ofengehäuse



Bild 11: Verbindung Glüh-/Kühlrohre

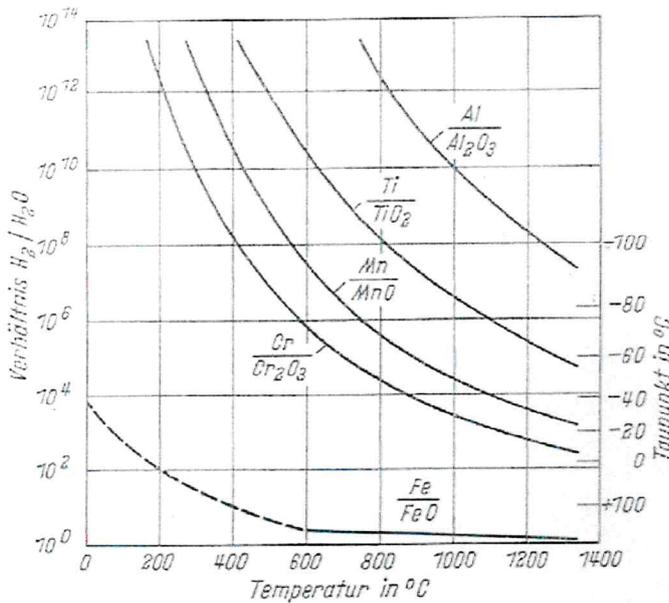


Bild 12: Temperatur/Taupunkt-Funktion verschiedener Metall-/Metalloxid-Gleichgewichte



Bild 13: Schaltanlage mit Prozessvisualisierung

geringer Feuchtigkeit und Restsauerstoffgehalt zum Einsatz. Der zulässige Gehalt an Wasserdampf im Schutzgas wird durch die Gleichgewichtsbeziehung zwischen den Verhältnissen von H_2/H_2O und Metall/Metalloxid bestimmt. Der Taupunkt muss niedriger sein als das aktivste Legierungselement des Rohrmantels (**Bild 12**). Ausschlaggebend für das Erzielen einer möglichst blanken Oberfläche beim Glühen von Rohrheizkörpern aus CrNi-Stahl ist der Taupunkt des Schutzgases. Der zugeführte Wasserstoff sollte deshalb mindestens einen Taupunkt von -60 °C entsprechend einem Feuchtegehalt von maximal $10\text{ vpm } H_2O$ ($0,001\text{ Vol.-%}$) aufweisen.

Die Einspeisung des Wasserstoffs erfolgt in der Nähe der Auslaufseite der Kühlstrecke. In der Zuführungsleitung ist für jedes Kühlrohr ein Mikrodosierventil installiert, sodass die Gasmengen exakt eingestellt werden können. Weiterhin kann die gesamte Schutzgasmenge an einem Schwebekörper-Durchflussmesser abgelesen werden. Da die Kühlrohre an den Auslaufenden hermetisch abgedichtet sind, strömt der Wasserstoff entgegen der Förderrichtung der Rohrheizkörper durch die ganze Ofenanlage und wird an der Einlaufseite der Glührohre abgefackelt. Während der Wasserstoff in der Halte- und Ausgleichszone die eingestellte Ofenraumtemperatur annimmt und reduzierend auf die CrNi-Rohrheizkörper wirkt, entfernt das Schutzgas in der Aufheizzone des Ofens die durch das Glühgut eingeschleppten Verunreinigungen. Unter Verunreinigungen ist Feuchtigkeit und durch Adhäsion anhaftender Luftsauerstoff zu verstehen. Der Verbrauch an Wasserstoff ist extrem gering und beträgt insgesamt lediglich $0,2\text{ Nm}^3/h$ für die Wärmebehandlungsanlage mit einer Durchsatzkapazität von 60 kg/h netto. Bei Bezug des Wasserstoffes in Druckgasflaschen mit 50 l geometrischem Volumen und Fülldruck von 300 bar ist die Gasfüllmenge etwa 13 Nm^3 . Daraus ergibt sich, dass mit einer einzigen Stahlflasche 65 Produktionsstunden des Glühofens versorgt werden. Der Flaschendruck wird mit einem 2-stufigen Gasdruckminderer auf den Arbeitsdruck von ca. 50 mbar reduziert.

Sicherheitsausrüstung

Bei der Glühbehandlung mit Wasserstoff als Ofenatmosphäre müssen sorgfältige Sicherheitsmaßnahmen getroffen werden. Der Zündbereich von Wasserstoff in Verbindung mit Luft ist mit 4 bis 75 % besonders breit. Hinzu kommt, dass die untere Grenze für die Zündtemperatur mit 510 °C sehr niedrig ist. Vorteilhaft ist dagegen, dass bei dem FK-Verfahren nur ein äußerst geringer Raum mit Wasserstoff gefüllt ist. Das Nutzvolumen in Glüh- und Kühlrohren beträgt bei mittlerer Ofengröße insgesamt nur etwa $0,003\text{ m}^3$. Trotzdem sind einige Verriegelungsvorrichtungen und Sicherheitsschaltungen vorgesehen, die selbst bei Fehlbedienung absolute Risiken ausschließen. Ein Magnetventil in der Zuführungsleitung für Wasserstoff lässt sich erst öffnen, wenn im Ofenraum eine Temperatur von 750 °C erreicht ist. Weiterhin ist an der Ofenanlage eine vollautomatische Stickstoffspülausrüstung installiert. Eine Hochdruckflasche mit Stickstoff ist so angeschlossen, dass bei Störungen oder Unterbrechung der Wasserstoffzufuhr der Spülvorgang der Glüh- und Kühlrohre eingeleitet wird. Das Spülsystem arbeitet auch bei Stromausfall durch ein stromlos öffnendes Magnetventil selbsttätig. Auch bei Inbetriebsetzung sowie Abschaltung des Glühofens wird durch die Spülung mit Stickstoff ein sicherer Schutzgasbetrieb gewährleistet.

Letztes Bauteil der Wärmebehandlungslinie ist der hinter der Kühlstrecke angeschlossene Auslauftisch. Der Auslauftisch besteht aus dem Untergestell mit einer Tischplatte aus

Edelstahlblech mit seitlichen Aufkantungen. Die Länge wird praktisch in der Abmessung des Beschickungstisches ausgeführt. Die durch die Ofenanlage geförderten, fertig geglühten Rohrheizkörper werden auf die glatte Tischplatte geschoben und können von dort zur weiteren Bearbeitung übernommen werden.

Die Mess- und Regelanlage des Durchlaufofens ist in einem Schaltschrank installiert, der platzsparend auf dem Untergestell der Kühlstrecke angeordnet ist. Mit dem TFT-Wide Screen Farbdisplay wird die gesamte Wärmebehandlungsanlage mit dem Verfahrensablauf visualisiert (**Bild 13**). Alle Prozessdaten wie Temperaturen, Durchlaufgeschwindigkeit etc. werden angezeigt und kontinuierlich registriert. Damit werden das Qualitätsmanagement und die Produkthaftung gewährleistet. Störmeldungen und Fehler werden automatisch in der Datenspeicherung festgehalten. Optional kann ein Remote-System zur Ferndiagnose der Wärmebehandlungsanlage eingerichtet werden.

Flexibilität

Das FK-Verfahren eignet sich nicht nur speziell für das Blankglühen von Rohrheizkörpern, sondern kann auch effektiv zum Dunkelglühen eingesetzt werden. Wenn Rohrheizkörper als Heizstrahler eingesetzt werden, verbessert die dunkle Oberfläche die Abstrahlung und in Saunaöfen dient die Verfärbung als Schutzschicht. Beim Dunkelglühen muss eine gleichmäßige Oxidschicht erzeugt werden. Rohrmäntel aus CrNi-Stahl bilden unter bestimmten Schutzgasatmosphären beim Glühen eine dunkelgrüne Chromoxidschicht. Das erforderliche Schutzgas kann im Bereich der Ofenanlage durch katalytische Teilverbrennung aus Erdgas oder Propan kostengünstig hergestellt werden. Es besteht sogar die Möglichkeit in einer Ofenanlage gleichzeitig in einigen Glühkanälen blanke Rohrheizkörper und parallel dunkle Oberflächen zu produzieren. Hierfür erhält jeder Glühkanal mehrere Zuführungen für verschiedene Schutzgase.

Die Glüh- und Kühlrohre sind auch für Rohrheizkörper mit unterschiedlichem Durchmesser geeignet. So können z. B. zur gleichen Zeit Rohrheizkörper mit 6,5, 8,5 und 11,5 mm Durchmesser durch den Ofen gefördert werden. Allerdings bestimmen die Rohrheizkörper mit dem größten Durchmesser die Transportgeschwindigkeit und damit die Glühzeit. Die einzelnen Glühkanäle lassen sich also für verschiedene Aufgaben beliebig zuordnen und es können auch einzelne Kanäle je nach Bedarf ganz abgestellt werden. In Verbindung mit der kurzen Zeit zur Einstellung der gewünschten Arbeitstemperatur erhält man eine äußerst flexible und universelle Wärmebehandlungsanlage für Rohrheizkörper.

In **Tabelle 2** ist zum Abschluss der Betrachtung eine Gegenüberstellung des FK-Verfahrens zum konventionellen Förderband-Durchlaufofen für das Blankglühen von CrNi-Rohrheizkörpern aufgeführt. Der Vergleich der Ver-

Tabelle 2: Gegenüberstellung des FK-Verfahrens zum Förderband-Durchlaufofen für Blankglühen mit einer Kapazität von 100 kg/h netto CrNi-Rohrheizkörper

	FK-System	Förderband-Durchlaufofen
Glühkanäle	10 Glüh- und Kühlrohre	1 Muffel 300 mm Nutzbreite
Schichtbetrieb	ja	nicht möglich
Aufheizzeit des kalten Ofens auf Betriebstemperatur	1h	10h
Blanke Oberfläche nach Start des Schutzgasbetriebs	< 1h	> 24h
Elektro-Energiebedarf	30 kW	63 kW
Schutzgasverbrauch	0,2 Nm ³ /h	10 Nm ³ /h
Kühlwasserverbrauch	0	3 Nm ³ /h
Investitionskosten Richtwert für Anschaffung (2017)	€ 120.000,-	€ 300.000,- einschl. Schutzgaserzeuger
I+R-Aufwand Richtwerte	€ 3.000,- /a	€ 15.000,- /a

brauchsdaten für diese Öfen zeigt, welche Kosteneinsparungen sich bei der Glühbehandlung einstellen. Auch der Kapitalaufwand ist günstig, sodass sich kurze Amortisationszeiten ergeben.

Fazit

Eine Wärmebehandlungsanlage für Elektro-Rohrheizkörper wird detailliert vorgestellt und sämtliche Konstruktionseinzelheiten ausführlich dargelegt. Ganz besondere Merkmale sind die hohe Energieeffizienz sowie der minimale Schutzgasbedarf. Hinzu kommt noch die Flexibilität der Anlage mit Erzielung optimaler Glühergebnisse.

AUTOREN



Thomas Friedhelm Kohlmeyer
FK Industrieofenbau + Schutzgastechnik
GmbH
Hagen
Tel.: 02331 / 5709-3
kohlmeyer@industrieofen-schutzgas.de



Herbert Tepr
FK Industrieofenbau + Schutzgastechnik
GmbH
Hagen
Tel.: 02331 / 5709-4
h.tepr@industrieofen-schutzgas.de