

Rollenherdöfen zur Wärmebehandlung – bereit für eine grüne Zukunft

Erik Koenig, Mike Allen

Wie in allen Bereichen des Lebens wird auch der industrielle Sektor in der heutigen Zeit sehr stark durch das Thema des Umweltschutzes geprägt. In Verbindung mit dem UN-Klimaschutzabkommen von 2015, dem sogenannten Pariser Abkommen, in dem die Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C begrenzt wurde, fällt weltweit auch das Schlagwort der „Dekarbonisierung“ immer häufiger. Deshalb ist für die Stahlindustrie und dadurch auch für die Wärmebehandlung von Rohren und Stäben die Nutzung von erneuerbaren Energien nicht nur ein Teil der neuesten Technik, sondern auch ein entscheidender Faktor für die erfolgreiche Dekarbonisierung.

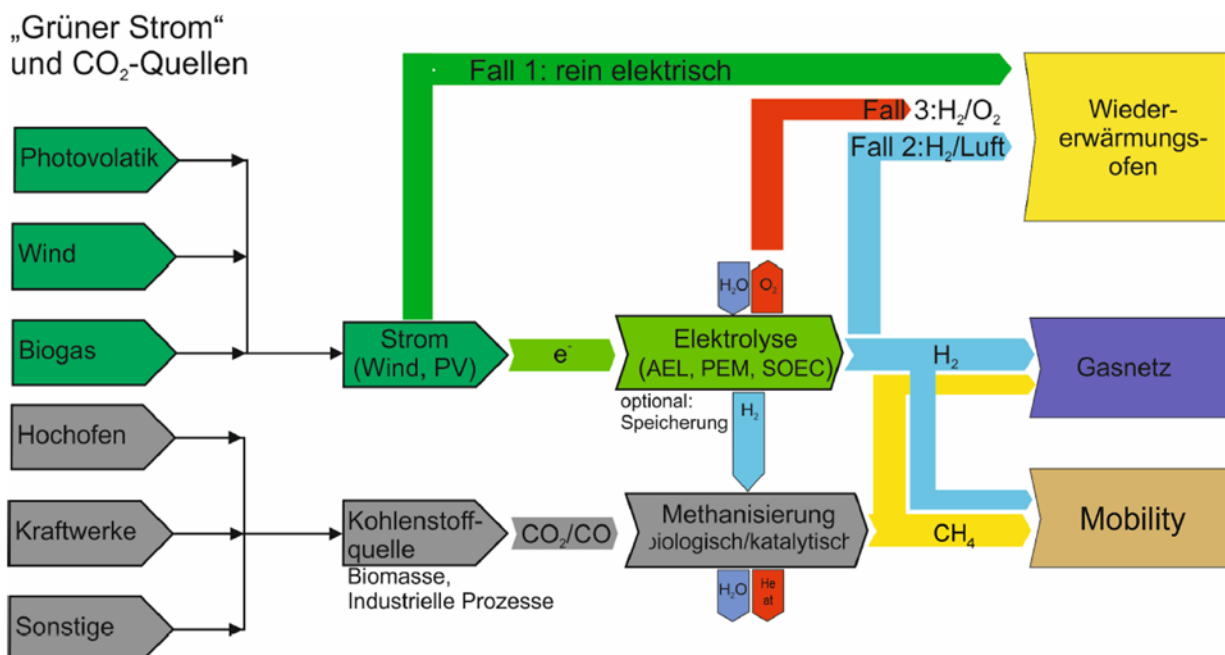
Die indirekte oder direkte elektrische Beheizung von Rollenherdofenanlagen gehört bereits seit Jahrzehnten zum Standard. Allerdings rücken jetzt auch weitere Quellen aus erneuerbaren Energien, wie z. B. Wasserstoff, oder synthetisch und CO₂-frei hergestellte Kohlenwasserstoffe, wie Synthese- oder Biogase, immer weiter in den Fokus. Dabei ist es sinnvoll und für eine ehrliche Verringerung des Kohlenstoff-Fußabdrucks für alle oben genannten Energiequellen unerlässlich, dass die direkt oder indirekt im Wärmebehandlungsprozess verwendete Energie aus erneuerbaren Quellen stammt.

Das folgende **Schema 1** fasst die Nutzung erneuerbarer Energiequellen und sogenannter nicht vermeidbarer Kohlenstoffquellen im Hinblick auf eine CO₂-freie Versorgung von Wärmebehandlungsanlagen zusammen.

Eine Vision für die Zukunft ist dabei die Nutzung dieser Energieformen in einer Anlage je nach Verfügbarkeit auf dem Markt und den jeweiligen Kosten, ohne Nachteile in der Wärmebehandlung zu kreieren.

Die Nutzung von Strom als Energiequelle für die Beheizung eines Rollenherdofens kann nach heutigem Stand als energieeffizienteste Methode angenommen werden, die nur geringe Umwandlungsverluste zu kompensieren hat. Der Nachteil der direkten Nutzung von Strom liegt in der begrenzten Speicherkapazität und der notwendigen Sektorkopplung der Stromlieferanten mit den Anlagenbetreibern.

Eine große Bedeutung bei der Verwendung von erneuerbarer Energie wird deshalb die Entwicklung von Speicherkapazitäten sein, da die erneuerbaren Energien von sehr volatilen



Schema 1: Nutzung von Ökostrom und Kohlenstoffquellen in Thermoprozessen, Energieversorgung und Verkehr [1].

Faktoren, wie etwa der Tageszeit oder dem Windaufkommen, unumstößlich auch in Zukunft abhängen werden. Zurückkommend auf die Zukunftsversion einer Anlage, die für die Wärmebehandlung auf alle erneuerbaren Energien zurückgreifen könnte, gibt es hierfür schon die ersten Ansätze, die sogenannten Hybrid-Anlagen. In diesen Anlagen wird aktuell entweder Erdgas oder Strom in den einzelnen Zonen zur Beheizung in Abhängigkeit der Verfügbarkeit verwendet. Oder es werden beide Energien gleichzeitig genutzt.

Im Falle einer gleichzeitigen Nutzung der Energiequellen wird meistens die Aufheizphase über das gasbeheizte System abgedeckt, während die Halte- und ggf. kombinierten Kühl-/Heizzonen elektrisch beheizt werden. Dieser Ansatz ermöglicht es, den Bedarf der elektrischen Energie zu reduzieren, jedoch trotzdem den Karbon-Footprint zu verringern. Zusätzlich kann dem Erdgas auch ein Teil Wasserstoff zugeführt werden oder der Wasserstoff kann als Brenngas zur weiteren Reduzierung genutzt werden.

Fallbetrachtung verschiedener Beheizungssysteme

Im Folgenden nun eine Fallbetrachtung der verschiedenen Beheizungssysteme für einen Rollenherdofen zur Wärmebehandlung von Kohlenstoffstahlrohren. Als Beispiel wird eine Rollenherdofenanlage zum Normalisieren von Kohlenstoffstahlrohren bei einer Temperatur von 920° C mit einer Kapazität von 4 t/h unter Reaktionsgasatmosphäre angeführt. Die jeweiligen Aussagen lassen sich jederzeit auf Rollenherdanlagen mit anderen Kapazitäten und/oder Atmosphären übertragen. Ziel dieses Abschnitts ist es, einen einfachen und grundlegenden Überblick zu skizzieren. Die vorgestellten Szenarien müssten natürlich für kundenspezifische Anwendungen technisch und wirtschaftlich weiter ausgearbeitet werden. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass Mischformen der genannten Szenarien in der Regel jederzeit realisierbar sind. Grundlage ist dabei immer das Szenario der vollständigen Gasbeheizung mit fossilem Erdgas (Szenario 1). Im zweiten Szenario wird das Potenzial einer rein elektrischen Beheizung für die entsprechende Anlage diskutiert. Das dritte Szenario beschreibt Möglichkeiten der Hybridbeheizung und das vierte Szenario die Beheizung mit regenerativ erzeugten Brenngasen.

Szenario 1 (Basisszenario, Gasheizung mit fossilem Erdgas):

Für die Produktionskapazität von 4 t/h und einer Zieltemperatur des Glühgutes von 920° C muss eine Gasheizleistung von rund 1,8 MW mit einem durchschnittlichen Feuerungswirkungsgrad von $\eta_f = 65\%$ installiert werden. In der Theorie sind höhere Wirkungsgrade technisch möglich, aber die eher konservativ angenommenen 65 % entsprechen dem Stand der Technik in der Praxis. An dieser Stelle sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die Beheizung aufgrund der Schutzgasatmosphäre indirekt über Strahlungsheizrohre erfolgt. Rein gasbeheizte Anlagen sind weltweit weit verbreitet und gehören zum Stand der Technik.

Szenario 2 (elektrische Heizung):

In diesem Szenario wird die Annahme getroffen, dass die in Szenario 1 eingesetzten Brenner gegen elektrische Heizelemente getauscht werden. Dabei spielt es keine wesentliche



Bild 1: Rollenherdofen für das Normalisieren von Kohlenstoffstahlrohren

Rolle, ob die Heizelemente wieder über Strahlheizrohre von der Ofenraumatmosfera getrennt oder diese direkt über Heizwendeln oder Meanderheizdrähte in der Ofenraumatmosfera sind.

Für die Produktionskapazität von 4 t/h und eine Zieltemperatur des Glühgutes von 920 °C müssen rund 1,25 MW, unter der Annahme eines elektrischen Wirkungsgrades von $\eta_{el} = 68\%$, bereitgestellt werden. Der Rollenherdofen für Rohre und Stäbe kann somit voll elektrisch beheizt realisiert werden.

Szenario 3 (Hybridbeheizung):

Hybride Beheizungsformen sind bei Rollenherdöfen für Rohre und Stäbe, aufgrund der meistens relativ kurzen Ofenkammer, die Ausnahme.

Zusätzlich und insbesondere auch die Anforderungen an die Beheizungsarten sind bisher von den infrastrukturellen Randbedingungen der Kunden, wie der Verfügbarkeit und den Preisen der Medien, stark abhängig.

Technisch-logisch sind die Hybridsysteme gut realisierbar. Ein Ansatz wäre, die Aufheizzonen im vorderen Teil der Ofenkammer typischerweise gasbeheizt und die Haltezeiten im hinteren Teil elektrisch beheizt auszuführen.

Ein flexibles Hybridsystem mit einem 100 % gasbeheizten Ofen und in Abhängigkeit vom Strompreis zuschaltbarer elektrischer Heizung, stellt eine weitere Lösung dar. In dem angeführten Fallbeispiel müsste dementsprechend bei gleichen Rahmenbedingungen eine Gasheizleistung von rund 1,8 MW mit einem durchschnittlichen Feuerungswirkungsgrad von $\eta_f = 65\%$ installiert werden. Zusätzlich könnte dann noch eine elektrische Leistung von ca. 525 kW mit einem elektrischen Wirkungsgrad von $\eta_{el} = 68\%$ über Boden- und Deckenheizung realisiert werden.

Der Einsatz von hybriden Heizsystemen bietet das Potenzial, CO₂-Emissionen zu reduzieren oder als „flexibler Energiespeicher“ genutzt zu werden. Die notwendigen Systeme sind Stand der Technik und müssen individuell an die technologischen Anforderungen des Wärmebehandlungsprozesses und die Infrastruktur der Anlagenbetreiber angepasst werden.

Die Nachteile eines höheren Investments und der mehr benötigte Platz für diese Ausführung liegen dabei auf der Hand.

Szenario 4 (Gasheizung mit erneuerbaren Brenngasen):

Für dieses Fallbeispiel gelten die gleichen Randbedingungen wie für Fallbeispiel 1. Der Einsatz von grünem Erdgas (Power2Gas oder Biogas) ist sowohl vom Umwandlungsaufwand als auch von der Prozesssicherheit her unproblematisch. Der Einsatz von Wasserstoff ist technologisch anspruchsvoller.

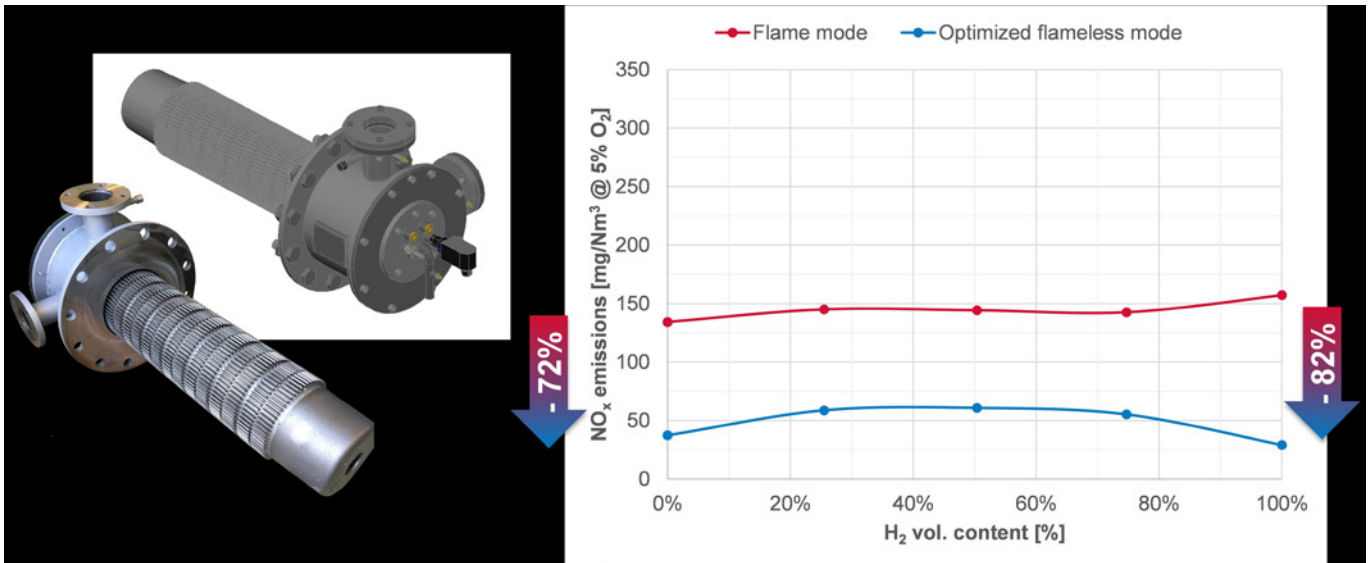


Bild 2: Links: Tenova TRKS-Brenner; Rechts: NO_x-Emissionen des TRKS-Brenners mit verschiedenen Erdgas/H₂-Gemischen.

Geeignete Brenner wurden bereits im Versuchsmaßstab mit 100 % H₂ und Gemischen aus H₂ und Erdgas erfolgreich getestet. Im flammenlosen Betrieb wurden NO_x-Emissionen unter 70 mg/Nm³ (Referenz: 5 % O₂) erreicht, siehe Abbildung 2. Diese Technologie wird bereits in bestehenden Anlagen getestet und für den großtechnischen Einsatz vorbereitet. Sobald die Feldversuche erfolgreich durchgeführt sind, wird es möglich sein, die Anlage komplett mit H₂ zu beheizen.

Diese kurzen, grundlegenden Betrachtungen zeigen, dass ein Rollenherdofen sowohl als Neuanlage, sowie auch durch einen Umbau/eine Modernisierung ein entsprechendes Potenzial zur Reduzierung von CO₂ besitzt. Im Gegensatz zu Maßnahmen im Neuanlagenbau, bei dem die notwendigen Investitionen sehr hoch ist, sind Modernisierungen recht effizient, um den CO₂-Fußabdruck kurzfristig zu reduzieren. Geeignete technisch und wirtschaftlich optimierte Lösungen können nur nach einer vorherigen Analyse der Prozesse und der Infrastruktur gefunden werden. Die folgende Tabelle gibt einen vereinfachten Überblick über die beschriebenen Szenarien und deren Bewertung hinsichtlich der technischen Machbarkeit.

Das Hauptziel ist die Bereitstellung von Wärmebehandlungsanlagen, die in der Lage sind, die vordefinierten Materialeigenschaften mit hoher Reproduzierbarkeit zu erreichen. Chemische Reaktionen zwischen der Ofenatmosphäre und der Werkstoffoberfläche, die sich nachteilig auf die chemische Zusammensetzung der Legierung auswirken können, müssen verhindert werden, insbesondere was den Kohlenstoffgehalt der Oberfläche betrifft.

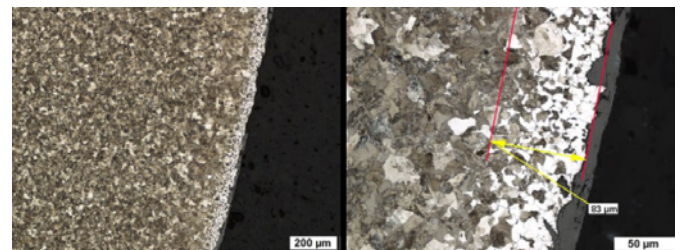


Bild 3: Entkohlung nach dem Glühprozess (Atmosphäre: 100% N₂, keine C-Pegel-Regelung)

Tabelle 1: Zusammenfassung der Eignung der verschiedenen: ++ sehr gut geeignet, + gut geeignet

Beispiel Anlagentyp	Gas (fossil)	Rein elektrisch	Hybrid	Gas (erneuerbar)
Rollenherdofenanlage	Basis	++	+	++

Neben dieser Thematik der Carbonisierung steigern sich aber auch die Qualitätsanforderungen an das Produkt und damit auch an die Anlagentechnologie.

Insbesondere bei den Kohlenstoffstahlrohren geht es hier um die Vermeidung einer Entkohlung in der Oberfläche.

Die Wärmebehandlung von Kohlenstoffstahlprodukten erfordert zunehmend ein ausgeklügeltes System für die Zufuhr des Prozessgases sowie ein robustes mechanisches System und Prozessdesign. Auf diese Weise können die Anforderungen an die Qualität und Flexibilität der Produkte erfüllt werden; außerdem kann der Prozess auf die Anforderungen der einzelnen Kunden zugeschnitten werden.

Mit einer vordefinierten Mischung aus Stickstoff als inertes Gas und Endogas als Reaktionsgas kann das gewünschte Aufkohlungspotential der Atmosphäre eingestellt werden. Das thermodynamische Gleichgewicht zwischen dem Kohlenstoffpotential, dem sogenannten C-Pegel, der Atmosphäre und dem Kohlenstoffgehalt des Materials definiert die Aufkohlungsbedingungen im Ofen, die entkohlend, neutral oder aufkohlend sein können. Der C-Pegel muss in Abhängigkeit von der gewünschten Aufkohlungsumgebung und der Zusammensetzung der behandelten Legierung eingestellt werden. Das Aufkohlungsmittel ist Kohlenmonoxid (CO). Der CO-Gehalt der Atmosphäre kann zwischen 1% und 6% eingestellt werden. Der C-Gehalt wird durch einen geschlossenen Regelkreis auf-

rechterhalten. Zur kontinuierlichen Messung des C-Gehalts können Sauerstoffsonden oder Gasanalytoren eingesetzt werden. Die Abweichung zwischen Soll- und Istwert wird durch Eindüsen von Aufkohlungsmitteln (z. B. Erdgas oder Propan) bei negativer Abweichung bzw. durch Zugabe von Luft bei positiver Abweichung kompensiert.

Mit dem Messsystem und den automatischen Ventilen sowie den PID-Reglern kann der Atmosphärengehalt genau eingestellt werden. So kann der C-Pegel im Hinblick auf die gewünschte Aufkohlungsumgebung für die behandelte Legierung gewählt und gleichzeitig der Gesamtverbrauch an Aufkohlungsmitteln minimiert werden.

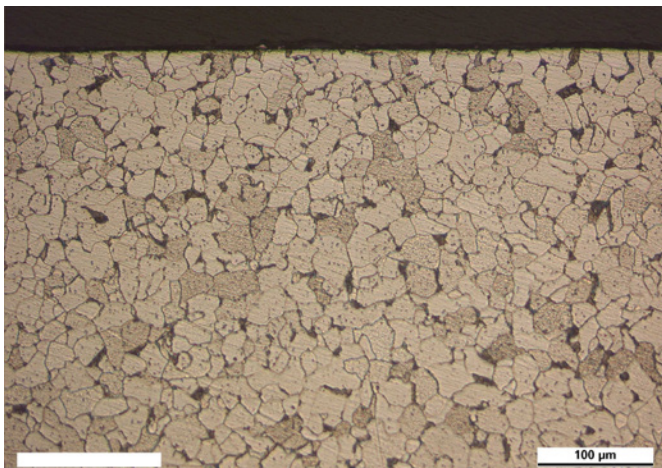


Bild 4: Keine Entkohlung nach dem kohlenstoffneutralen Glühen (Atmosphäre: 6%CO, 12%H₂, Rest N₂, C-Pegel-Reglung)

Der lokale C-Pegel wird indirekt durch O₂-Sonden (ZrO₂, InSitu) gemessen. Zusammen mit einer Temperaturmessung, einer CO-Messung oder einem Festwert kann der C-Pegel nach thermodynamischen Funktionen berechnet werden. Der Vorteil der O₂-Messung ist der robuste Aufbau und die schnelle und genaue Messung mit sehr kurzen Latenz- und Totzeiten, insbesondere im Vergleich zur Taupunktmessung, die sehr empfindlich und vergleichsweise langsam ist.

Die Regelung erfolgt über in die SPS integrierte PID-Regler, die die Öffnungsintervalle der entsprechenden Ventile (Ein-Aus-Regelung) entsprechend der Abweichung zwischen Soll- und Istwert steuern.

Die Genauigkeit beträgt $\pm 0,05$ % Kohlenstoff bei gleichbleibenden Produktionsbedingungen. Die Reaktionszeit liegt im Bereich von Sekunden bis zu einigen Minuten, abhängig von der Störung im Regelsystem.

HTSA CQI-9

Wärmebehandlungsanlagen für Bauteile von Automobilen oder Flugzeugen unterliegen meist einer Auditierung nach entsprechender Normung. Diese Normungen beziehen sich meist auf Anlageninstrumente, die die Systemgenauigkeit und Temperaturgleichmäßigkeit nachweisen. Um die fortlaufende AMS 2750 E/CQI-9 Auditierung ganzheitlich und ohne großen bürokratischen Aufwand zu gewährleisten, sollte eine moderne Wärmebehandlungsanlage schon über eine integrierte All-in-one-Softwarelösung verfügen.

Hiermit lässt sich der Prozessaudit mit Hilfe eines Mobile Panels oder Tablets direkt und papierlos an der Anlage durchführen. Bei einer entsprechenden Ausführung der Instrumentierung kann dies während der Produktion von einem Prozessauditor ohne zusätzliches Personal geplant, durchgeführt und berichtet werden.

Grundsätzlich sollte ein komfortables PC-basiertes Audit-Management und Reporting eine einfache Planung der Prüfverfahren genauso wie das Setzen der anlagenspezifischen Parameter ermöglichen. Insbesondere die für diese Standards sehr zeitaufwändige Verwaltung von Thermoelementdaten, Messgerätdaten, sowie die regelmäßig durchzuführenden Testverfahren, wie der System Accuracy Test (kurz SAT), der Temperature Uniformity Survey (kurz TUS) sollten in dieser Software für den Anlagenbetreiber organisiert und gespeichert werden, so dass beim eigentlichen Audit die Daten für den Auditor kurzfristig verfügbar sind. Diese Organisation verbessert die werkseigene und auch die externe Qualitätskontrolle.

Literatur:

- [1] Pfeifer, H.: Energiewende in der Thermoprocesstechnik, conference contribution, 2nd Aachener Ofenbau- und Thermprocess Kolloquium, Aachen, 10.-11.Oktober 2019.

Autoren:

Erik Koenig, Mike Allen
LOI Thermprocess GmbH