

Drehrohröfen

Autor: Roland Waitz

Abstrakt:

Der Drehrohröfen vereint, in vielen Fällen, die in der heutigen Zeit geforderten Anforderungen einer modernen kontinuierlichen Wärmebehandlungsanlage - hoher Durchsatz, leichte Automatisierbarkeit und gute Reproduzierbarkeit. Durch den Einsatz von modernen Hochleistungswerkstoffen sind heute eine Vielzahl von Anwendungen realisierbar. Die vielseitigen Einsatzmöglichkeiten von Drehrohröfen werden an praktischen Beispielen in diesem Beitrag dargestellt.

Abstract:

The rotary tube furnace combines, in most cases, the expectations of today of a modern continuous heat treatment furnace - high charge, easy automation and a enormous reproducibility.

Today several applications can be realized with the use of high performance materials.

The various operational possibilities of rotary tube furnaces are shown

(via practical examples) in this subscription.

Die steigenden Anforderungen an Rohstoffe zur Herstellung von Gläsern, Quarz und Keramiken für den Einsatz im elektronischen oder medizinischen Bereich stellen immer höhere Ansprüche an die Reinheit, Homogenität und Oberflächenbeschaffenheit der Ausgangspulver.

Durch immer strengere Umweltauflagen bzw. Entsorgungskosten wird es immer interessanter Abfallstoffe z. B. aus der Metallverhüttung innerbetrieblich zu recyceln wobei häufig eine zwischengeschaltete Aufbereitung nötig ist. Durch thermische Behandlung lassen sich störende Verunreinigungen organischer Art z. B. Schmier- oder Konservierungsöle zersetzen oder direkt verdampfen. Dies gilt auch für einige Metalle wie Zink nach Überführung in das leichter flüchtige Oxid. Für beide Anwendungen gilt: optimale homogene Eigenschaften werden nur erreicht, wenn jedes Teilchen des Pulvers oder Granulats die gleiche Behandlung erfährt. Das betrifft sowohl die Temperatur-Zeit-Kurve, als auch die Umgebungsatmosphäre z. B. den Sauerstoffgehalt beim Calzinieren.

Die einfachste Methode ist es, die Ausgangspulver in keramische oder metallische Kästen, bzw. Tiegel zu füllen und im Batch-Ofen zu behandeln. Dieses Verfahren hat jedoch schwerwiegende Nachteile: Das Gewicht bzw. die thermische Masse der Container übersteigt die des Produkts meist um ein vielfaches. Dadurch ist ein hoher Energieverbrauch und lange Zykluszeiten durch das Aufheizen und Abkühlen vorprogrammiert.

Da bei Schüttgütern, manchmal noch durch auftretende Sinterkrusten verstärkt, die Diffusion des Reaktionsgases stark behindert wird, ist die Schütthöhe auf wenige Zentimeter beschränkt und die Haltezeit sehr lang. Durch den zusätzlichen Aufwand beim Be- und Entladen wird die Produktivität stark vermindert. Trotzdem kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Pulvereigenschaften von der Oberfläche bis zum Boden der Schüttung variieren. Theoretisch ließen sich diese Probleme durch zyklisches Vakuumpumpen vermindern. Jedoch wird der Aufwand und damit der Preis der Ofenanlage sehr in die Höhe getrieben. Bei empfindlichen Substanzen besteht außerdem die Gefahr, daß Abdampfen oder gar Zersetzung eintritt.

Da trotz der oben genannten Schwierigkeiten ein Großteil des Pulvers zur gleichen Zeit reagiert, müssen nachgeschaltete Entsorgungseinrichtungen, wie Wäscher oder Nachverbrennung für sehr große Durchflüsse dimensioniert werden.

Die Lösung all dieser Probleme ist ein Ofen mit kontinuierlichem, behälterlosem Transport, bei dem die Teilchen gleichzeitig durchmischt werden, so dass die Exposition gegenüber der Temperatur und Atmosphäre im Mittel homogen bleibt: Der Drehrohröfen.

Bei gasbeheizten Drehrohröfen wird das Rohr im Gegensatz zu elektrisch beheizten von innen heraus erwärmt. Dadurch ist es möglich, das Rohr selbst als Wärmeisolation zu verwenden, so dass es außen relativ kühl bleibt und überall frei zugänglich ist. Die Materialauswahl und die Möglichkeiten zu mechanischer Lagerung, Antrieb, etc. sind kaum beschränkt. So werden extrem große Bauformen z. B. für die Zementindustrie möglich. Gasbeheizte Öfen benötigen jedoch hohen Infrastrukturaufwand und sind, was Reinheit der Atmosphäre und Gasstrom anbelangt, nicht gut steuerbar. Dies ist vor allem bei der Herstellung von hochwertigen reinen Produkten nicht tragbar. Ihre Hauptanwendung liegt deshalb im Recycling.

Für Versuchs-, Technikums- und kleinere Produktionsöfen - der Durchsatz wird durch die Haltezeit und den gutspezifischen Füllgrad des Rohres bestimmt (ca. 1 - 300 dm³/h), sind elektrisch beheizte Drehrohröfen die geeignetere Wahl. Die Grenzen bei keramischen, plasmagespritzten Rohren liegen etwa bei $D_{\max} = 600$ mm und $L_{\text{beheizt}} = 5$ m. Bei metallischen Rohren können die maximalen Größen bei Temperaturen < 600 °C auch höher liegen.



Drehrohröfen mit Vibrationsförderer und Nachverbrennung, bis 1500 °C

Gutbewegung im Drehrohrföfen bei Gütern mit Wasser ähnhlichem Verhalten

Form	Gleiten		Kaskaden			Katarakt	
Unterart	1	2	3	4	5	6	7
Ablauf							
Prozess	Gleiten		Mischen			Zerkleinern	Zentri- fugieren
Anwendung	keine		Drehrohrföfen und -reaktoren, Trocken- und Kühltrommeln, Kugelmöhlen			Trommel- mischer	keine

- Reines Gleiten:** Hierbei ist die Reibung zwischen Rohrwand und Schüttgut so gering, dass das Gut mit zeitlich konstantem Winkel ohne Bewegung und Durchmischung im Ofenrohr steht.
- Pendeln:** Durch die etwas höhere Drehzahl besteht ein fortlaufender Wechsel zwischen Haft- und Gleitreibung an der Rohrwand. Eine Durchmischung findet ebenfalls nicht statt. Aus diesem Grund haben diese ersten beiden Zustände wenig praktische Bedeutung.
- Periodisches Stürzen:** Beim Übergang von Phase 2 zu 3 ist an der Ober- und Randfläche des Schüttgutes eine Durchmischung zu beobachten. Die Oberfläche des Gutes ist gekennzeichnet durch zwei mit stumpfen Winkel aufeinander stehenden Ebenen.
- Abrollen:** Dieser Winkel vergrößert sich mit zunehmender Drehzahl, sodass sich letztendlich eine einzige Ebene bildet, an deren Oberfläche eine Materialtransport stattfindet, der auch hier an der Unterseite fortgesetzt wird.
- Überböschern:** Die Oberkante des Schüttgutes steigt mit der Drehzahl weiter an und rundet sich durch das Hinabgleiten kontinuierlich ab. Die Durchmischung wird intensiver.
- Wellenüberschlag:** Es findet über die gesamte Querschnittsfläche hinweg ein großer Überschlag statt, der im Stande ist, das Schüttgut zu zerkleinern. Diese Transportart tritt häufig auf wenn mit Einbauten im Rohr gearbeitet wird
- Zentrifugieren:** Nur bei hinreichend hoher Haftreibung zwischen Ofenwand und Schüttgut ist der typische Zentrifugenprozess zu beobachten, bei dem das gesamte Gut an der Außenseite haftet. Dies ist ein unerwünschter Zustand lässt sich aber häufig durch einen zusätzlich installierten Abstreifer wieder in Zustand 6 überführen. Der Abstreifer (Keramik o. Metallrohr) kann dann gleichzeitig als Schutzrohr für Thermolemente dienen.

Gestell und mechanischer Aufbau

Beschickung:

Die Dosierung und Beschickung erfolgt über Vibrationsrinnen, Förderschnecke oder Band. Rüttler erfordern neben einer Frequenzsteuerung meist zusätzliche flexible mechanische Einbauten um Fördermengen exakt einzustellen. Bei Dosierschnecken kann der erhöhte Abrieb zu Problemen führen. Bei Schutzgasbetrieb werden zur kontinuierlichen Befüllung Doppelschleusen eingesetzt.

Transport und Antrieb:

Der Drehrohrantrieb erfolgt über einen frequenzgesteuerten Drehstrommotor. Die Durchlaufzeit lässt sich stufenlos über Drehzahl und Anstellwinkel variieren. Die Drehzahl für das Rohr liegt meist im Bereich von $1-10 \text{ min}^{-1}$.

Der Ofen selbst wird auf einen Kipprahmen aufgebaut. Der Kippwinkel lässt sich bei kleineren Öfen manuell über Drehkurbel zwischen $0-10^\circ$ Steigung einstellen, bei großen Drehrohrföfen über Hydraulik



Gas-/ Vakuumdichter Mikrowellen-Drehrohröfen, für CVD Beschichtungen

Rohr:

Je nach Temperatur und Brenngut können verschiedene Rohrtypen zum Einsatz kommen. Möglicher Abrieb und Verunreinigung des Brenngutes und Reaktionen (chemisch oder nur „Anbacken“ des Brenngutes am Rohr) sind zu berücksichtigen. Dieses Problem tritt verstärkt bei feinen Pulvern auf, so dass bei kritischen Substanzen eine Vorgranulation nötig werden kann. Bei Pulvern, welche zum Kleben neigen, kann es sinnvoll sein ein Abstreiferrohr oder Kette zu montieren .

Metallische Rohre:

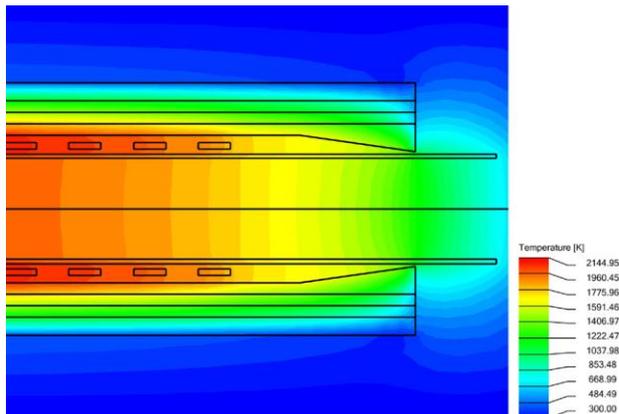
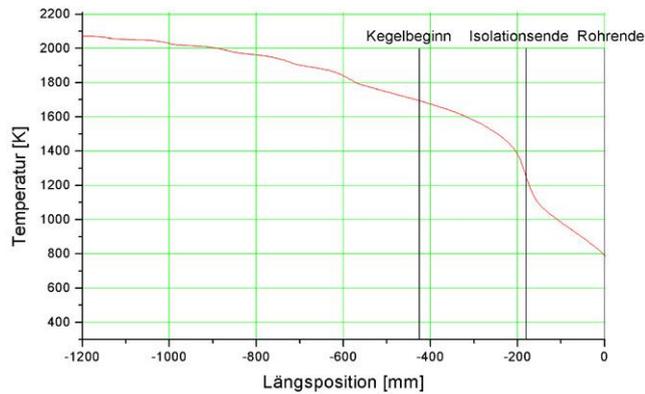
Gängige Materialien sind je nach Anwendung und chemischer Belastung 1.4841 bis 1050 °C, 1.4828 bis 950 °C, Inconel bis 1150 °C und neuerdings APM[®] (FeCrAl) bis 1300 °C. Metallrohre sind mechanisch robust, erlauben hohe Aufheiz- und Abkühlraten, die Einbauten z. B. Schnecken und Abstreifer sind relativ einfach realisierbar. Die geringe Härte kann aber durch Abrieb zur Verunreinigung des Brenngutes führen, da metallische Hochtemperaturwerkstoffe relativ viele und z. T. auch kritische Legierungsbestandteile, z. B. Ni, Cr enthalten.

Quarz/Quarzgut:

T_{max} für Quarz ist 1050 °C. Die Rohre können auch noch bei höheren Temperaturen eingesetzt werden. Beim Abkühlen unter 600 °C tritt jedoch eine Rekristallisation ein, die bis zur Zerstörung des Einsatzrohres führen kann. Die Zyklenzahl und Lebensdauer lässt sich nur schwer vorhersagen, da sie stark von externen Parametern wie z. B. der Luftfeuchtigkeit abhängt. Quarzglas als bevorzugtes Material der Halbleiterindustrie ist in hochreiner Form lieferbar. Eine Kontamination des Brenngutes ist, wenn nicht der Quarz selbst angegriffen wird, ausgeschlossen. Weiterhin hat Quarz ein extrem gutes Thermoschockverhalten.

Keramik

Keramische Rohre haben hohe Abriebsbeständigkeit, die enthaltenen Stoffe sind eher unkritisch und es können hohe Einsatztemperaturen bis 1700 °C gefahren werden. Bei Schlicker-gegossenen Keramikrohren sind die max. Abmessungen aber sehr eingeschränkt. Mit den teureren Plasma-gespritzten Rohren lassen sich auch große Dimensionen realisieren. Eingesetzt werden meist Al₂O₃-Werkstoffe je nach Temperatur mit steigenden Al₂O₃-Gehalten zwischen 60-99.7%. In speziellen Fällen macht auch der Einsatz von SiC-Rohren Sinn. Die hohe thermische Leitfähigkeit bewirkt eine gute Wärmeübertragung bei hohen Durchsätzen und lässt höhere Aufheizraten zu. Für Aluminiumoxidrohre liegen die max. Aufheizraten bei dicht gesinterten Qualitäten bei 120-360 K/h bis 1200 °C, darüber bei 180-360 K/h. Poröse Qualitäten lassen bis zu 400 K/h zu. Die ebenfalls hohe Empfindlichkeit gegenüber räumlichen Temperaturgradienten muss bei der Konstruktion des Ofens und beim Eintrag großer Mengen kalten Brenngutes berücksichtigt werden. Bei größeren Keramikrohren empfiehlt es sich Maßnahmen zur Verminderung des Temperaturverteilung am Rohrende vorab durch eine Modellrechnung abzusichern:



Modelrechnung

Beheizung:

Da bei den gängigen Bauformen die Heizelemente meist der Umgebungsluft exponiert sind, werden die aus dem normalen Ofenbau bekannten Materialien eingesetzt. FeCrAl (APM[®]) bis 1400 °C, MoSi₂ bis 1850 °C Heizleitertemperatur. Die max. Temperatur im Rohr ist ca. 50 - 100 °C niedriger anzusetzen.

Die Heizung ist meist mehrzonig, da im Drehrohr verschiedene Reaktionen ablaufen: Die Aufheizphase mit Trocknung des Pulvers mit relativ hohem Energiebedarf, einer Zone, in der exotherme oder endotherme Reaktionen ablaufen können und einer Halte- oder Abkühlphase, bei der nur Wärmeverluste ausgeglichen werden oder sogar gekühlt werden muss. 3-Zonen sind bei kleineren Aggregaten meist ausreichend. Es kann so eine hohe Temperaturgleichmäßigkeit erreicht werden. Bei größeren Öfen oder wenn genaue Temperaturprofile durchfahren werden sollen, muss die Heizzonenzahl entsprechend erhöht werden. Aus wirtschaftlichen (Preis) und technischen Gründen können auch verschiedene Heizelementtypen in den einzelnen Zonen eingesetzt werden, da Hochtemperaturheizelemente aus MoSi₂ im Temperaturbereich zwischen 600 - 900 °C sehr ungünstige Betriebsbedingungen haben. Bei MoSi₂ muss der spätere Kippwinkel des Ofens berücksichtigt werden, da sie über 1300 °C nur senkrecht + / - 7° betrieben werden können.

Auslegung: Der übliche Füllgrad für Drehrohröfen liegt bei ca. 10 % des Drehrohrvolumens. Je nach Art und Form des Brenngutes (Pulver, Granulat, Blättchen) kann der Füllgrad aber auch stark davon abweichen. z.B. lässt sich der Füllgrad durch eingebaute Schikanen verbessern. Ausschlaggebend für die benötigte Ofengröße ist die notwendige Haltezeit bei der Arbeitstemperatur. Um diese zu ermitteln sind meist Vorversuche notwendig, da die Reaktionszeiten meist erheblich unter denen beim Batch-Betrieb liegen. Grund dafür ist die bessere Exposition des Schüttgutes zur Ofenatmosphäre und die durch den guten Wärmeübergang verkürzten Aufheizzeiten im Drehrohr.

Auslegungsbeispiel für einen Drehrohrföfen:

Verweilzeit und Durchsatz lassen sich nach folgenden Formeln berechnen:

<p>Verweilzeit:</p> $t_o = \frac{L}{n * \pi * D * \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}}$	<p>Durchsatz:</p> $m(t) = \frac{\pi * D^2 * \varphi * L * SD}{4 * t_o}$
---	--

<p>Rohrdurchmesser : D = 0,3 m Rohrlänge : L = 2,4 m Volumenfüllgrad : \rho = 10 % Schüttdichte : SD = 500 kg/m³ Schüttwinkel : \beta = 43° Ofenneigung : \alpha = 0,5° Drehzahl : n = 2¹/min \pi : 3,14...</p>	<p>Beispiel: Verweilzeit:</p> $t_o = \frac{2,4 \text{ m}}{2 \text{ 1/min} * \pi * 0,3 \text{ m} * \frac{\sin 0,5}{\sin 43}} = 99,5 \text{ min}$ <p>Durchsatz:</p> $m(t) = \frac{\pi * 0,3 \text{ m}^2 * 0,1 * 2,4 \text{ m} * 500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{4 * 99,5 \text{ min}} = 0,085 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$ <p>= 5,1 kg/std</p>
--	---

Aus einfachen geometrischen Überlegungen lässt sich ableiten dass bei vorgegebener Haltezeit, der Durchsatz proportional zum Quadrat des Durchmessers und linear zur Rohrlänge ansteigt. Die Rohroberfläche durch welche die nötige Energie eingebracht wird steigt aber in beiden Fällen nur linear an. Aus diesen Gründen werden bei Drehrohrföfen häufig Rohre mit einem Verhältnis D/L zwischen 1/8 – 1/12 verwendet.

Wenn Schüttdichte, gewünschter Durchsatz und die notwendige Haltezeit bekannt sind lässt sich leicht die Geometrie des Rohres in der Haltezone errechnen:

$$V_{\text{rohr}} = \frac{\text{Durchsatz} * \text{Haltezeit} * 100}{\text{Schüttdichte} * \text{Füllgrad} [\%]}$$

mit D/L = q

$$V_{\text{rohr}} = L * \left(\frac{D}{2}\right)^2 * \pi = L * L^2 * \frac{q^2}{4} * \pi = L^3 * \frac{q^2}{4} * \pi$$

$$L_{\text{rohr}} = \frac{1}{q} * \sqrt[3]{\frac{V}{\pi}} \qquad D_{\text{rohr}} = \sqrt[3]{\frac{V}{\pi}}$$