

Muffelöfen für Temperaturen von 200 bis 1200 °C mit Schutzgasatmosphäre und Vakuum

Muffle furnaces for temperatures from 200 to 1200 °C with controlled atmospheres and vacuum

Von **Roland Waitz**

Im folgenden Artikel werden Öfen für die Wärmebehandlung unter kontrollierter Atmosphäre und Vakuum bis 1200 °C beschrieben. Beispielhaft werden hier Linn High Therm KS-S Öfen, eine Bauserie von kleinen bis mittleren Kammeröfen mit Volumen von 80 bis 2000 l genannt. Verschiedene Muffelmaterialien, realisierbare Aufheiz- und Abkühlungsraten sowie die Auswirkung von Umluft und Mehrzonenheizung auf die Temperaturverteilung werden erörtert. Eine Gegenüberstellung des Restsauerstoffgehaltes bei Vorvakuum oder Gasspülung und eine kurze Beschreibung für den sicheren Umgang mit explosiven Gasen sind Bestandteil dieses Beitrages.

The "Hot Wall" heating technology for furnace operation under controlled atmosphere and vacuum up to 1200 °C is briefly described on the basis of KS-S, a small to medium sized furnace line with chamber volumes from 80 dm³ to 2 m³. Realizable heating- and cooling rates as well as the influence of forced radiation and multi zone heating on temperature distribution are discussed. A comparison between the residual oxygen content by fore-vacuum or flushing gas method and brief description of safety devices for operation with explosive gases are also part of this paper.

Einleitung

Die Heizer eines KS-S Ofens bestehen aus Kanthal A1 oder APM Drahtspiralen. Diese werden in Nuten der inneren Isolation eingelegt, die normalerweise aus keramischem Leichtstein besteht. Die Hinterisolation besteht aus mikroporösen Kalziumsilikatplatten.

Die Isolation ist durch einen Luftspalt vom Außengehäuse getrennt. Durch diesen Aufbau erzielt man eine zusätzliche Isolationswirkung, so dass die Oberflächentemperatur des Außengehäuses max. 50 °C über Raumtemperatur beträgt.

Standardmäßig wird der Ofen an den drei Seiten und im Boden beheizt. Bei Öfen mit erhöhter Maximaltemperatur

oder großen Chargengewichten werden zusätzlich Heizer auf keramischen Trägerrohren in der Ofendecke eingebaut.

Die Heizleiter (APM®, A1®) sind eine Eisen-Chrom-Aluminium-Legierung mit kleinem Anteil von Seltenen Erden. Chrom dient vor allem als Korrosionsschutz. Bei höheren Temperaturen bildet sich eine dichte Schutzschicht aus Aluminiumoxid, welche den Heizer vor weiterer Oxidation schützt. Die Seltenen Erden mit ihrer extremen Affinität zu Sauerstoff lagern sich bevorzugt an den Korngrenzen ab und stabilisieren diese. Zusätzlich vermitteln Seltenerdoxide eine bessere Haftung der Aluminiumoxidschutzschicht.

Die maximale Heizleitertemperatur liegt für A1 bei 1400 °C bzw. 1425 °C für APM. Die maximale Ofentemperatur von

1200 °C wird also nicht von den verwendeten Heizleitern sondern vom Material der schutzgasdichten Muffel limitiert. APM hat zusätzlich den Vorteil einer besseren mechanischen Festigkeit im Hochtemperaturbereich.

Die Versorgungsspannung der Heizer ist 400 V 3-phasig. Die installierte Leistung liegt zwischen 15 kW bei einem Ofen mit 70 l Nutzraum und 51 kW für 460 l Nutzraum.

Dies entspricht einer Leistungsdichte von 100 bis 200 W/l. Das ist normalerweise ausreichend um den Ofen abhängig von der Beladung in 1 – 1,5 h auf 1000 °C aufzuheizen. Bei Bedarf können aber auch wesentlich höhere Leistungen installiert werden (**Bild 1**).

Schutzgasmuffel

Die Schutzgasmuffel ist eine quader- oder zylinderförmige Schweißkonstruktion mit einem wassergekühlten Rahmen für die Türdichtung. Die Tür hat ebenfalls einen wassergekühlten Rahmen zum Schutz der Silikondichtung, deren zulässige Dauertemperatur 220 °C beträgt. Die Türisolation wird durch eine Kombination von Schirmblechen in der Muffel und keramischer Wolle von außen realisiert. Die Wandstärke der Muffel ist abhängig von Größe und Chargengewicht.

Die größte Herausforderung ist es, die Muffel so auszulegen, dass thermisch induzierte Spannungen vermieden werden. Diese können vor allem bei schnellem Aufheizen und Abkühlen zu Rissen führen. Abgerundete Ecken reduzieren

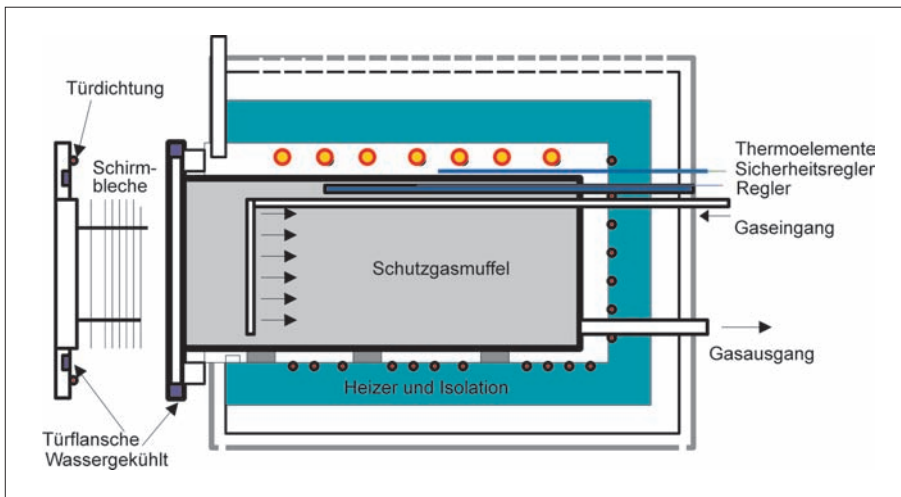


Bild 1: Schema eines KS-S Ofens
Fig. 1: Scheme of a KS-S Furnace

diese Spannungen. Zusätzlich wird der Gradient zwischen heißem Innenraum und wassergekühlten Türrahmen durch die Schirmblechisolation der Tür auf eine längere Strecke verteilt. Die auftretenden Spannungen werden so vermindert.

Durch den wassergekühlten Türrahmen entsteht in der Muffel eine Wärmesenke. Dies kann beim Arbeiten mit befeuchteten Gasen oder während des Entbinderns von pulvermetallurgischen Teilen bzw. Keramik zu Kondensationsproblemen im Türbereich führen. In solchen Fällen kann die Kühlung auch mit temperierten Wärmeträgeröl mit bis zu 140 °C erfolgen, so dass Wasser nicht und Binder nur sehr vermindert auskondensieren kann.

Die Materialien für die Muffel müssen sorgfältig je nach Anwendung und Temperatur ausgewählt werden. Als Standardmaterial wird der Werkstoff 1.4841 (X15CrNiSi25-20) bis 1050 °C verwendet. Bei Dauerbetrieb im Bereich zwischen 600 °C und 900 °C neigt dieser jedoch zur Versprödung, so dass man auf andere Stähle z. B. 1.4828 ausweicht. 1.4828 hat sehr gute Korrosionsbeständigkeit. Er wird vor allem in Nitrieröfen eingesetzt, 1.4876H in Öfen zum Aufkohlen. Für höhere Temperaturen bis 1150 °C setzt man die Nickellegierungen 2.4851 (Inconel 601) oder bis 1200 °C 2.4633 (Inconel 602 CA) ein.

Steuer und Regelung

Die Auslegung der Steuerungs- und Regelanlage, speziell die Platzierung der Thermolemente verlangt einige Vorü-

berlegung betreffend des Zeit/Temperatur-Verhaltens des Ofens während des Prozesses.

Eine praktikable Lösung ist es, das Thermolement der Steuerung von außen in ein Rohr zu stecken, welches in die Muffel eingeschweißt ist. So kann es leicht gewechselt werden und hat keinen Kontakt zur Atmosphäre im Ofen. Das ist wichtig wenn PtRh-Thermolemente (Typ S) verwendet werden, deren Einsatz sich bei Temperaturen über 1000 °C empfiehlt, da sich in wasserstoffhaltigen Atmosphären die Thermospannung verändern kann. Dasselbe kann durch mechanisches Verbiegen passieren.

Ein zusätzlicher Sicherheitsregler überwacht die Temperatur zwischen Heizer und Schutzgasmuffel. Falls durch zu schnelles Aufheizen oder einem Defekt im Regelkreis die Temperatur einen eingestellten Wert, normalerweise 30 °C über der Maximaltemperatur des Ofens, überschreitet, wird der Ofen reversibel ausgeschaltet bis die Temperatur wieder gefallen ist. Ein Überhitzen der Muffel wird dadurch ausgeschlossen.

In vielen Fällen ist es sinnvoll, ein oder mehrere zusätzliche flexible Thermolemente, die in und an der Ofencharge platziert sind, mit Anzeige und Temperaturschreiber zu verwenden. Vor allem bei Zulieferern für Luft- und Raumfahrt und in der Automobilindustrie ist dies zur Qualitätskontrolle Vorschrift.

Durch die Platzierung des Steuerthermolements in einem in die Muffel eingeschweißten Rohr kann es bei schnellen Aufheizraten zu Beginn des Heiz-

vorgangs zu einem Überschwingen der Temperatur kommen, da das Regelsystem eine relativ große Trägheit besitzt. Dies tritt bei Temperaturen < 500 °C auf und kann bei Wärmebehandlungen wie z. B. Entbindung von Keramiken zu Problemen führen.

Am einfachsten lässt sich das Problem durch niedrigere Heizraten in Verbindung mit geeigneten PID Parametern des Reglers lösen. Lineares Aufheizen lässt sich am einfachsten durch ein weiteres Reglelement außerhalb der Schutzgasmuffel erzielen. Dieses arbeitet bis zu einer eingestellten Temperatur als Regelthermolement, danach wird auf das Standard-Reglelement umgeschaltet. Man muss dabei allerdings einen gewissen „Nachhinken“ der Muffelinnentemperatur in Kauf nehmen.

Die komfortabelste Lösung ist es, mit den beiden Thermolementen und einem modernen Differenzregler zu arbeiten. Man kann dann mit einem voreingestellten Offset zwischen Innen- und Außentemperatur arbeiten.

Temperaturverteilung

Die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Temperaturverteilung in einem Ofen sind die Geometrie, die Isolation und die Platzierung und Auslegung der Heizer bzw. Heizzonen. Für einen Heißwandofen ist eine tiefe Bauform vorteilhaft. Sehr wirksam ist eine 5-seitige Beheizung. Für viele Anwendungsfälle ist aber eine 4-seitige Beheizung ausreichend wenn Temperaturunterschiede von ±15 °C tolerierbar sind. Den Löwenanteil für die Wärmeübertragung liefern Strahlung und Konvektion.

Die Wärmeübertragung durch Strahlung lässt sich nach dem Stefan-Boltzmann Gesetz berechnen:

$$5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \epsilon_{\text{eff}} \cdot \{(T_{1[\text{K}]})^4 - (T_{2[\text{K}]})^4\} \text{ W/m}^2$$

Der effektive Emissionsfaktor liegt in Öfen mit Stahlmuffel bei:

- ca. 0,3 (polierte Metalloberfläche des Brennguts)
- ca. 0,6 (Metalloberfläche z. B. Stahl)
- ca. 0,8 – 0,9 (Keramikoberfläche)

Durch Ableitung dieser Formel lässt sich für kleine Temperaturdifferenzen der Wärmeübergangskoeffizient (WÜK) bestimmen.

Die Ableitung lautet:

$$5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \epsilon_{\text{eff}} \cdot 4 \cdot (T1_{[\text{k}]})^3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

eine wenn auch stark vereinfachte Formel für den WÜK bei natürlicher Konvektion lautet:

$$2,2 \cdot (T1 - T2)^{1/4} \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

für erzwungene Konvektion an metallischen Flächen:

$$5,8 + 4 \cdot v \text{ W/m}^2 \text{ K} \quad \text{für } v < 5 \text{ m/s}$$

$$7,14 \cdot v^{0,78} \text{ W/m}^2 \text{ K} \quad \text{für } v > 5 \text{ m/s}$$

v = Gasgeschwindigkeit in m/s

für raue Oberflächen sind die Werte etwas höher:

$$6,2 + 4,2 \cdot v \quad \text{bzw.} \quad 7,52 \cdot v^{0,78}$$

Die Wirksamkeit der Übertragung wird in **Bild 2** wiedergegeben.

Aus Bild 2 lässt sich der dominierende Einfluss der Strahlung auf den Ausgleich von Temperaturunterschieden in der Ofenkammer ableiten. Erzwungene Konvektion kann aber speziell bei Brenngut mit polierter Oberfläche noch bis 900 °C sehr wirksam sein.

Zu Beachten ist auch, dass bei der üblichen Zustellung von Öfen mit dicht gepacktem Brenngut oder auch Schüttgut die meisten Teile gegenüber der Strahlung der Muffelwand abgeschattet sind, in solchen Fällen lassen sich durch Zwangskonvektion deutlich kürzere Durchwärmzeiten bei besserer Temperaturgleichmäßigkeit erzielen.

Es werden daher von Linn High Therm zwei verschiedene Optionen zur Verbesserung der Temperaturgleichmäßigkeit angeboten.

3-zonige Heizung

Die Heizer werden längs der Ofenkammer in drei Zonen aufgeteilt. Jede Zone hat ein Thermoelement und einen separaten Regelkreis. Damit lassen sich örtliche Wärmesenken, wie sie vor allem im Türbereich auftreten, ausgleichen.

Gasumwälzung

Außen an der Tür wird ein Motor montiert. Die Motorwelle wird über eine gas-/vakuumdichte Drehdurchführung in die

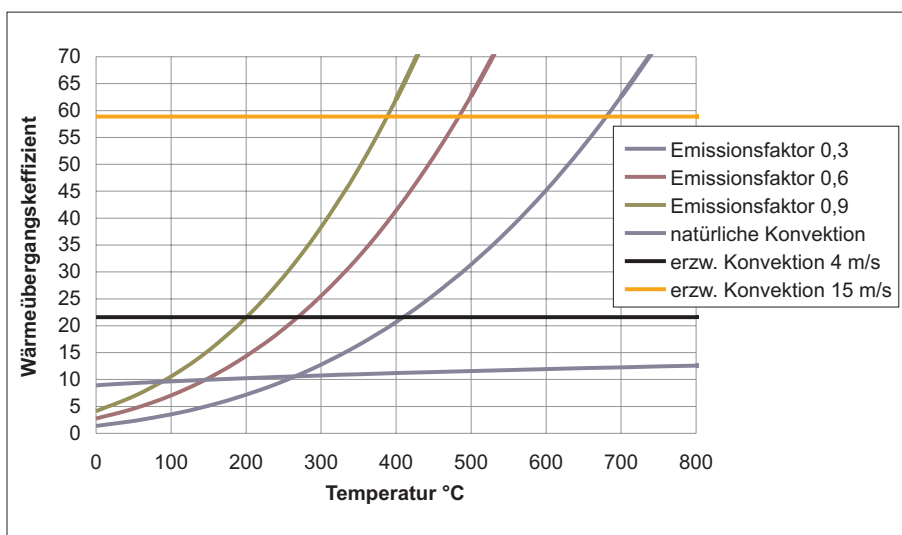


Bild 2: Wärmeübergangskoeffizient für kleine Temperaturunterschiede
Fig. 2: Heat transfer coefficient for small differences in temperature

Muffel geführt und treibt dort ein Gebläse an, welches das Gas axial ansaugt und radial ausbläst. Durch zusätzliche Leitbleche in der Muffel wird so eine Zwangskonvektion erzeugt. Durch die begrenzte mechanische Festigkeit der Lüftermaterialien bei hohen Temperaturen lässt sich die Gasumwälzung so nur bis etwa 850 °C einsetzen. Wird mit höheren Temperaturen gearbeitet muss die Motordrehzahl über einen Frequenzumrichter vermindert werden. Ein Abschalten ist nicht möglich, da sich sonst die Welle verzieht. Neben der besseren Wärmeübertragung bewirkt die Zwangskonvektion auch eine bessere Verteilung der Gase im Ofen.

Während des Freispülens des Ofens mit Stickstoff ist die Gasumwälzung nützlich, da vorhandene Luftnester, wie sie vor allem in Schüttgütern auftreten, schneller beseitigt werden.

Beim Entbindern von Keramik- oder PM-Teilen werden durch die Zwangskonvektion die entstehenden Gase schneller von der Oberfläche abgeführt (**Bild 3**).

Vereinfacht lässt sich zusammenfassen, dass bei Temperaturen bis 400 °C die Gasumwälzung und über 750 °C die Strahlung den dominierenden Einfluss auf die Wärmeübertragung und die Temperaturgleichmäßigkeit ausübt. Von 400 °C bis

Bild 3: a) Simulation der Gasverteilung und Geschwindigkeit in einem KS 80 S Ofen mit Zwangsumwälzung, b) Berechnung der Temperaturverteilung über den Querschnitt der Einsatzmuffel

Fig. 3: a) Path lines and gas velocity inside KS80 S furnace with forced convection, b) Calculation of middle cross section of KS 80 S

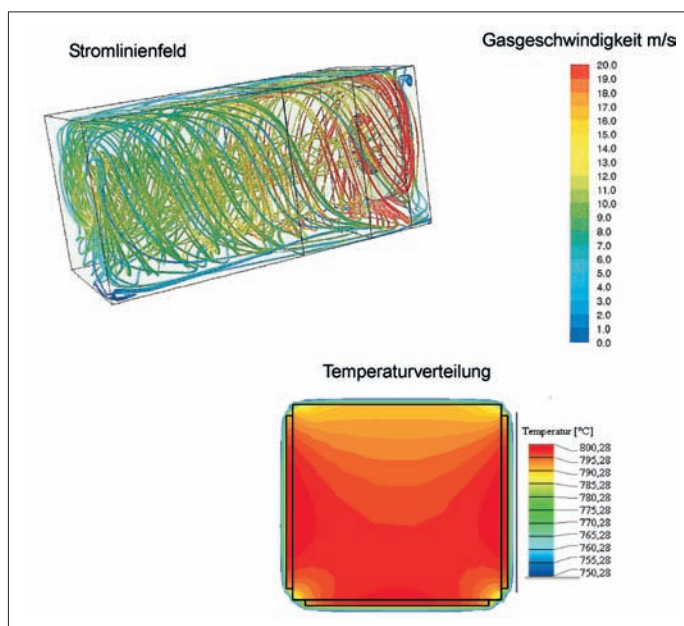


Tabelle 1: Evakuierungszeit für einen 240 l Behälter mit einer Drehschieberpumpe (Saugvermögen 16 m³/h)

Table 1: Evacuation time for 240 l volume 16 m³/h rotary vane pump

Druck [mbar]	10	1	10 ⁻¹
Zeit zum Evakuieren Std	0,0690	0,1036	0,1381
Zeit zum Evakuieren min/s	4 min 9 sec	6 min 13 sec	8 min 7 sec

750 °C sollten beide Optionen verwendet werden.

Durch diese Einrichtungen verbessert sich die Temperaturgleichmäßigkeit im Ofen je nach Typ und Beladung auf ±3 °C bis ±7 °C.

Bei noch höheren Anforderungen kann man gute Ergebnisse durch 6-seitige Beheizung und Multizonenregelung erreichen. In den meisten Fällen ist es aber günstiger, eine größere Ofenkammer zu verwenden und den darin genutzten Raum zu verkleinern.

Schnellkühlung

Die Zykluszeiten eines Ofens werden im Wesentlichen durch die Abkühlzeit bestimmt. Die natürliche Abkühlrate eines Ofens lässt sich grob durch die Funktion $T = T_0 \cdot e^{-kt}$ beschreiben. Für KS-S-Öfen liegt sie bei ca. 8 K/min bei 1000 °C, 6 K/min bei 800 °C, 3 K/min bei 600 °C und sinkt bei 250 °C auf 1 K/min.

Die maximal mögliche Entnahmetemperatur kann bei sauerstoffempfindlichen Gütern bei < 100 °C liegen. Dazu sind extrem lange Abkühlzeiten nötig.

Eine Schnellkühlung kann die Abkühlzeit deutlich verringern. Durch Ventilatoren wird über einen Verteiler Raumluft in den Spalt zwischen Heizer und Schutzgasmuffel geblasen. Die aufgewärmte Kühlluft wird über einen Abluftkamin abgeführt.

Um die Schutzgasmuffel vor zu großen Spannungen zu schützen, wird die Schnellkühlung erst eingeschaltet, wenn die Ofentemperatur die 500 °C Grenze unterschritten hat. Werden frequenzgezielte Lüfter verwendet, lässt sich die Schnellkühlung mit verringerter Leistung schon bei 900 °C einschalten. Die Lüfterleistung wird dann mit fallender Temperatur stufenweise erhöht und bei 500 °C auf 100 % geschaltet.

Durch diese Einrichtung erhöht sich die Abkühlgeschwindigkeit bei 500 °C auf 10 bis 12 K/min und selbst bei 200 °C beträgt sie noch um 2 K/min.

Noch größere Abkühlgeschwindigkeiten können über eine Gasrückkühlung erzielt werden. Dabei wird heißes Gas aus der Muffel angesaugt und in einem Gas-Wasser Wärmetauscher abgekühlt. Danach wird es über ein Verteilersystem zurück in die Muffel geblasen. Es lassen sich so durchschnittliche Abkühlgeschwindigkeiten von > 20K/min von 500 bis 200 °C erzielen.

Arbeiten im Vakuum

Für Anwendungen unter Vakuum wird die Muffel verstärkt, um den Aussen- druck standzuhalten. Die Auslegung der Verstärkung ist abhängig von der Ofen- gröÙe und der Maximaltemperatur unter der mit Vakuum gearbeitet wird. Die Grenze für rechteckige Vakuummuffeln (Volumen: 60 dm³ – 500 dm³) wird bei 600 – 800 °C erreicht, bei zylindrischen bei ca. 800 – 1000 °C. Diese Werte können abhängig von der Geometrie um ca. ±100 °C abweichen. Die Maximalwerte werden mit den Nickellegierungen (Inconel) erreicht, die eine gegenüber Stahlle- gierungen bessere Hochtemperaturfestig- keit besitzen.

Die wichtigste Anwendung ist das Vore- vakuierten der Kammer und die anschlie- ßende Flutung mit Schutzgas. Dadurch wird auch in Pulverschüttungen oder Drahtspulen die Luft aus kleinsten Zwi- schenräumen entfernt, was durch einfache Spülen so gut wie unmöglich ist. Bei größeren Ofen lassen sich auch große Mengen Spülgas einsparen. Zum Vore- vakuierten reicht normalerweise ein Druck von 1 bis 0,1 mbar der sich selbst mit preisgünstigen, einstufigen Drehschie- berpumpen erreichen lässt (**Tabelle 1**).

Sofern keine Restfeuchte vorhanden ist, lässt sich die nötige Pumpzeit für diesen Druckbereich einfach nach der Formel:

$$t = V/S \times \ln(1000 \text{ mbar}/p_e) \text{ berechnen.}$$

t = Zeit in h

V = Volumen der Kammer m³

S = Saugvermögen m³/h

p_e = Enddruck mbar

Soll die Wärmebehandlung komplett un- ter Vakuum durchgeführt werden wird meist bei Drücken von 10⁻¹mbar bis 10⁻⁴ (10⁻⁵) mbar gearbeitet. Für geringe Drü- cke > 10⁻² (-3) mbar werden zwei- bis dreistufige Drehschieberpumpen, bei großen Volumen Rootspumpenstände und für besseres Vakuum Turbomoleku- larpumpstände eingesetzt. Bei kleinen Drücken ist auf ausreichend große Quer- schnitte der Vakuumleitungen zu ach- ten, da diese das effektive Saugvermö- gen stark beeinflussen.

Die Pumpzeit wird bei Drücken < 10⁻³ bar vom Ausgasungsverhalten und der Leckrate bestimmt. Bei Temperaturen über 900 °C spielt auch der Dampfdruck der Legierungselemente des Muffelma- terials eine Rolle (**Bild 4**).

Schutzgasatmosphären

Schutzgase können in drei Gruppen auf- geteilt werden (**Tabelle 2**):

- Oxidierend: Luft, Sauerstoff, Wasserdampf, Kohlendioxid
- Neutral: Edelgase (Argon, Helium), Stickstoff (bei niederen Temperaturen)
- Reduzierend: Wasserstoff, Formiergas (Wasserstoff-Neutralgas-Mischun- gen), Methan, Ammoniak

Reduzierende Gase sind brennbar und können mit Luft explosive Mischungen bilden. Ausnahme sind Formiergase mit einem Wasserstoffgehalt < 5 %.

Sollen reduzierende Gase eingesetzt werden muss der Ofen vorher evakuiert oder mit neutralen Gas freigespült wer- den, um den Restsauerstoffgehalt auf Werte unterhalb der Explosionsgrenze zu verringern. Der Restsauerstoffgehalt lässt sich anhand des Spülfaktors S (= Volumen des Spülgas/Kammervolumen) errechnen. Spülfaktor 5 bedeutet, dass durch eine 200 l Kammer 1 m³ Spülgas geflossen ist.

Formel für Restluft Gehalt in %:

$$RL = 100 \% \cdot e^{-S}$$

Die folgende Tabelle vergleicht den Rest- luftgehalt bzw. Restsauerstoffgehalt bei

verschiedenen Spülfaktoren und Vorvakuumdrücken.

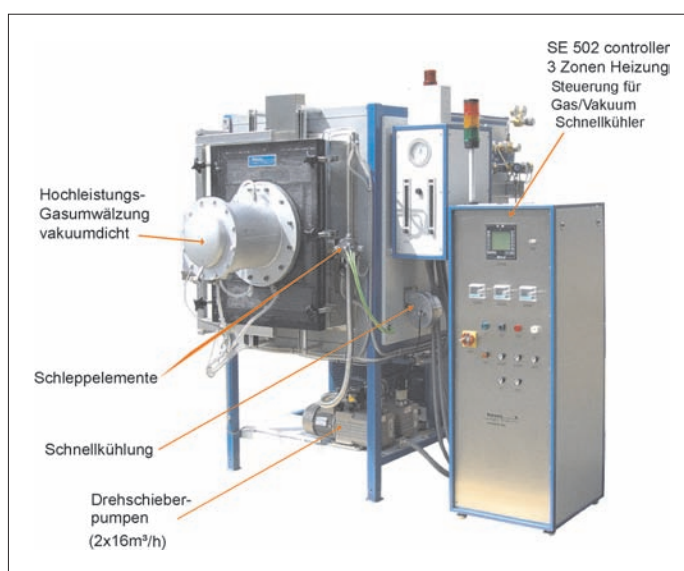
Ein Spülfaktor von 5 ist nach den Vorschriften mindestens einzuhalten. In ungünstigen Fällen z. B. Schüttgut ist es ratsam ihn auf 7 – 9 zu erhöhen. Die gleiche Sicherheit lässt sich durch Vorvakuum schon bei ca. 7 mbar vergleichsweise einfach erreichen. Probleme mit „toten Ecken“ treten dabei nicht auf. Zusätzlich lässt sich der Druckanstieg nach Wegschalten der Pumpe beobachten und daraus die Leckrate berechnen. Wird ein voreingestellter Wert überschritten kann der Regler das Umschalten auf Schutzgas blockieren. Für diese zusätzliche Sicherheitsprüfung sollte aber auf mindestens 10^{-1} mbar vorevakuiert werden.

Abhängig vom Prozess sollte der Schutzgasfluss pro Stunde während der Wärmebehandlung das 2- bis 10-fache des Ofenvolumens betragen in einigen Fällen zum Beispiel beim Entbindern kann auch deutlich mehr erforderlich sein.

Die Standardbegasungseinrichtung wird direkt am Ofen installiert. Es sind Leitungen für zwei Gase mit manuellen Absperrventilen und elektromagnetischen Ventilen installiert, so dass über den Regler zwischen den einzelnen Gasen umgeschaltet werden kann. Über einen Durchflussmesser mit Nadelventil lässt sich der Gasfluss regeln. Der Gaseingang erfolgt

Bild 4: KS240Vac zum Wärmebehandeln von Federn

Fig. 4: KS240Vac for annealing of springs



durch ein Rohr, das von der Rückseite der Muffeldecke bis in den Türbereich ragt und dort über kleine Bohrungen den Gasstrom verteilt. Durch ein Halteventil im Gasausgang des Ofens wird ein leichter Überdruck von 4 – 7 mbar in der Kammer erzeugt. Es wird dadurch verhindert, dass Luft durch Lecks von Außen eindringen kann.

Diese Standardbegasung kann nach Kundenspezifizierung vielfältig variiert werden.

Möglich sind z. B.

- Anschlüsse für mehrere Gase,
- automatische Gasflussregelung über Massflow Controller.
- für Nitrier- und Aufkohlungsprozesse können zusätzliche Sensoren und eine automatische Regelung der Kennzahlen angeboten werden.

Brennbare Gase müssen in einer Abfackleinrichtung entsorgt werden. Diese besteht aus einem kleinen Gasbrenner

Tabelle 2: Explosionsgrenzen für brennbare Gase

Table 2: Maximum allowable concentration MAC

Gas	Chemische Formel	Spezifisches Gewicht Vergleich zu Luft	Untere Explosionsgrenze (20 °C, 1013 mbar)	Obere Explosionsgrenze (20 °C, 1013 mbar)	Zündtemperatur	Explosiv Giftig Gesundheitsgefährdend
Amoniak	NH ₃	0,72 kg/m ³ (-)	15 %	27 %	690 °C	Ex, Po, Su
Wasserstoff	H ₂	0,084 kg/m ³ (-)	4 %	74 %	570 °C	Ex, Su
Methan	CH ₄	0,671 kg/m ³ (-)	5 %	15 %	580 °C	Ex, Su
Kohlenmonoxid	CO	1,17 kg/m ³ (-)	12,5 %	74 %	630 °C	Ex, Po, Su
Propan	C ₃ H ₈	1,88 kg/m ³ (-)	2,2 %	9,5 %	480 °C	Ex, Su
Endogas aus Propan C ₃ H ₈	31 % H ₂ , 23 % CO 46 % N ₂	0,89 kg/m ³ (-)	7 %	72 %	560 °C	Ex, Po, Su
Endogas aus Propan CH ₄	40 % H ₂ , 23 % CO 37 % N ₂	0,79 kg/m ³ (-)	7 %	72 %	560 °C	Ex, Po, Su
Exogas	14 % H ₂ , 7 % CO 5 % CO ₂	1,12 kg/m ³ (-)	17 %	72 %	560 °C	Ex, Po, Su
Spaltgas	25 % N ₂ , 75 % H ₂	0,38 kg/m ³ (-)	3 %	72 %	560 °C	Ex, Su

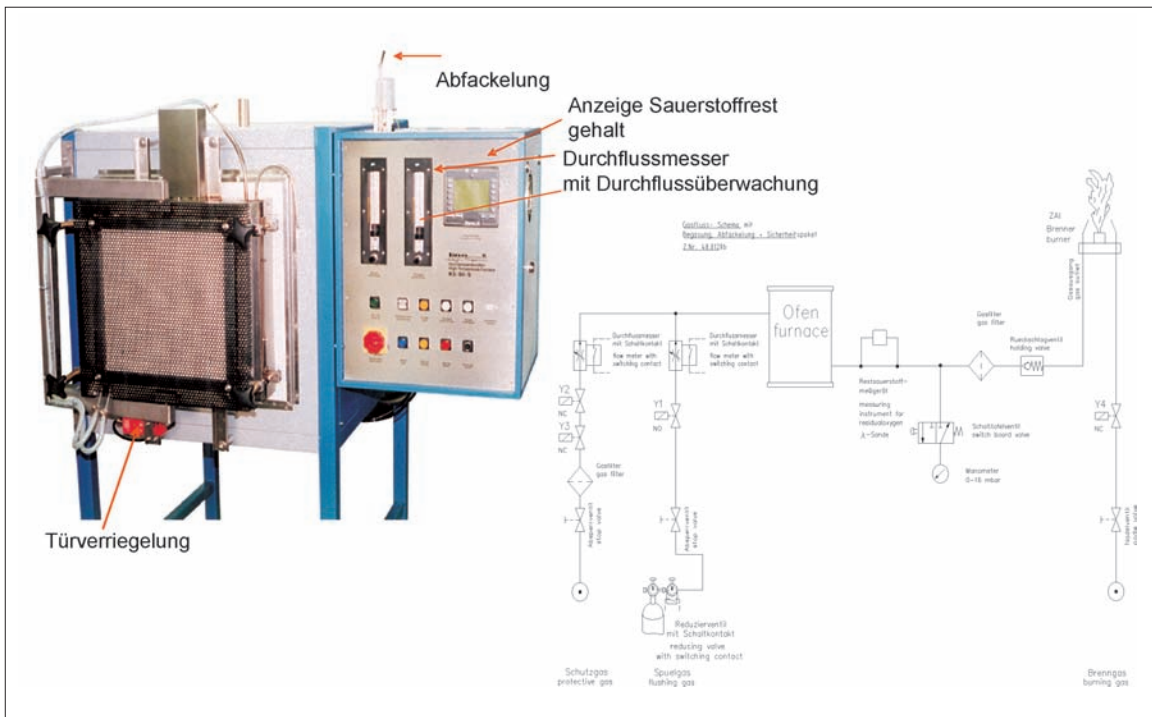


Bild 5: KS 80 S mit Sicherheitspaket
Fig. 5: KS 80 S with safety package

mit automatischer Zündung und einem Flammwächter. Zusätzlich wird die notwendige Spülzeit überwacht. Bei Störungen wird automatisch auf neutrales Spülgas umgeschaltet und akustischer Alarm gegeben (**Bild 5**).

Zusätzliche kann ein Sicherheitspaket angeboten werden, das Fehlbedienung weitgehend verhindert:

- Der Spülgasfluss und der Schutzgasfluss werden überwacht. Somit wird z. B. das Anschließen leerer Flaschen erkannt. Beim Abkühlen des Ofens kann es bei zu geringem Gasfluss zu Unterdruck in der Kammer kommen. Es wird dann Luft durch eventuell vorhandene Lecks angesaugt so dass ein explosives Gemisch in der Kammer entstehen kann. Bei zu großem Unterdruck können einfache Schutzgaskammern auch implodieren.
- Wenn Flaschen zur Gasversorgung verwendet werden wird der Gasvorrat überwacht. Er muss bei Prozessbeginn mindestens das 10-fache des Ofenvolumens betragen. Ein Freispülen des Ofens mit Spülfaktor 5 ist somit am Beginn und am Prozessende möglich.
- Der Restsauerstoffgehalt im Gasausgang wird durch eine Lambda Sonde überwacht der Betrieb mit brennbarem Gas ist nur möglich, wenn der Sauerstoffgehalt < 1 % ist.

Erkennen von Lecks und von ungenügender Spülung.

- Die Tür wird bei Schutzgasbetrieb blockiert. Versehentliches oder Öffnen ist ausgeschlossen.

Als weitere Optionen können Kondensatfallen, verschiedene katalytische Nachverbrennungen, Schaugläser, Messdurchführungen, Chargiergestelle und Bubbler zum Befeuchten der Gase angeboten werden.

Die Öfen der KS-S Baureihe werden in vielen Industriezweigen und in der Forschung eingesetzt:

- Metallindustrie: Nitrieren und Karbonitrieren, Löten, Entbindern von MIM Teilen, Sintern von Buntmetallen.
- Draht und Federindustrie: Wärmebehandlung von Drähten und Federn.
- Edelmetalle: Herstellung und Recycling von Edelmetallen. Herstellen von Katalysatormaterial und Testen von Katalysatoren.
- Diamant und Hartmetallwerkzeuge: Löten und Vorsintern von Hartmetall und Diamantwerkzeugen.
- Graphit: Pyrolyse zur Herstellung von Kohlenstoff und Graphit.

- Leuchtstoffe + Medizin + Optik: Herstellung von Fluoreszenzfarbstoffen. Herstellung hochreinen Eisenoxids. Löten von Linsen und Photomultipliern.
- Forschung + Entwicklung: Testen von Sensoren. Testen von Brennstoffzellen. Entwicklung neuer Bindersysteme u.v.m.

Literatur:

- [1] Bürgel, Ralf: Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik, Vohweg Verlag, 2001
- [2] Beguin, Claude: Einführung in die Technik der Schutz- und Reaktionsgase, Schweizer Verband für die Wärmebehandlung der Werkstoffe
- [3] Kanthal Handbuch, Heizleiterlegierungen und Systeme für Industrieöfen, 2001

Dipl.-Ing. Roland Waitz
 Linn High Therm GmbH, Eschenfelden



Tel.: 09665 / 914-0
 E-Mail: waitz@linn.de