

# Experimentelle Untersuchung der Temperaturverteilung an einem elektrisch beheizten schutzgasdichten Industrieofen mit Gasumwälzung

## Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es zu untersuchen, inwieweit mit Hilfe von Parameterkombinationen und der Zwangsumwälzung der Gase eine Homogenisierung der Temperatur an einem 1-zonigen Kammerofen Typ KS 80 S erreicht werden kann. In der Muffel mit rechteckigem Querschnitt erfolgten die Messungen des Temperaturprofils in fünf Messebenen stromabwärts. Zudem wurde eine Geschwindigkeitsmessung unter Raumtemperatur an der Ebene 1 aufgenommen, um anschließend eine quantitative Deutung der Strömungsverteilung wiederzugeben. Zu Beginn wurden Messungen bezüglich der Aufheizkurven unter verschiedenen Gasatmosphären aufgenommen. Damit konnte man Rückschlüsse auf die Temperaturverteilung bezüglich der Gase ziehen. Durch Variation der Drehzahl konnten unterschiedliche Volumenstromverhältnisse eingestellt werden. Bei der Analyse der Mischung sollten sich die heißen Gase mit den kälteren vermengen, um so auch die Enthalpie der wärmeren Heizgase im Ofen herunterzusetzen. Zur Gasverteilung im Ofen wurden unterschiedliche Einspeisungskonfigurationen durchgeführt.

In Vorversuchen wurde zunächst ermittelt, wie sich die Temperaturvergleichmäßigkeit in Abhängigkeit der Ansaugblechquerschnitte der Messblechreihe 1 mit Veränderung der Drehzahl an Luft ändert. Mit Hilfe von drei Ansaugblechen konnte man den Einfluss auf die Gasverteilung bzw. eine Temperaturvergleichmäßigkeit in der Kammer recht gut wiedergeben.

Während der Versuche wurden zusätzliche Messungen, wie Kühlwasserverbrauch und Verlustleistung an der Tür aufgenommen. Mit Hilfe der Messdaten konnte man rechnerisch die Werte bestimmen, die der Beurteilung des Ofens dienen. Der Wasserverbrauch bei vollem Betriebsdruck von 4 bar lag bei 500l/h und die Verlustleistung je nach Temperaturbereich lag an der Tür zwischen 620 W und 940 W. Auch wurde der Temperaturgradient der Türschirmbleche ermittelt.

Abschließend wurde eine numerische Methode für die Temperaturverteilung im Ofen angewandt. Die Ergebnisse wurden dann zur Optimierung der Gasumwälzung bei der untersuchten Ofenanlage verwendet und versucht diese dann auch auf eine ganze Baureihe Schutzgas muffelöfen bis 500 l Nutzvolumen zu übertragen.

## Einleitung

In vielen Bereichen der Technik spielen Stoff- und Wärmeaustauschvorgänge eine bedeutende Rolle. Zur Erzielung homogener Temperaturverteilung in Kammeröfen ist sowohl die theoretische als auch die experimentelle Erfassung von Vermischungsvorgängen von großem Interesse. In der metallverarbeitenden Industrie ist der Kammerofen zur Wärmebehandlung von z.B. aufgewickelten Metallbändern, -drähten, Kleinteilen, Lötens usw. eine wichtige wärmetechnische Anlage. Bei dem Kammerofen KS/S handelt es sich um einen Einsatzofen. Dieser bedingt einen periodischen Betrieb: Beschicken, Aufheizen, Halten und Abkühlen.

Steigende Anforderungen an die Kammeröfen hinsichtlich der Produktqualität und der Zwang zur Minimierung des spezifischen Energieverbrauches sowie der Zykluszeiten führen beim Erwärmen und der Wärmebehandlung von Bundens bzw. Kupferlegierungen zur der Notwendigkeit, die Erwärmung des Einsatzgutes über der gesamten Querschnittsfläche und der Tiefe des Besatzes weitgehend zu homogenisieren. Ein wichtiges Einsatzgebiet ist z.B. das Rekristallisationsglühen kaltgewalzter Bänder. Dabei werden die beim Walzen entstandenen gerichteten Texturen und Verfestigungen durch Kornwachstum beim Glühen beseitigt. Die Wärmebehandlung muss somit immer oberhalb der für das Material maßgebenden Rekristallisationstemperatur stattfinden.

Die Wärmebehandlung von Aluminium- und Kupferlegierungen geschieht in einer Schutzgasatmosphäre, um eine weitgehend blanke Oberfläche zu erhalten.

Einen hohen konvektiven Wärmeübergang erreicht man durch große Strömungsgeschwindigkeiten an der Oberfläche. Diese hohen Strömungsgeschwindigkeiten können mit Hilfe von Strömungsmaschinen, die das Gas im Behandlungsraum zwangsweise umwälzen, erreicht werden. Dazu wird beispielsweise ein Pseudo-Radialventilator verwendet. Kompakte Bauweisen begrenzen den Raum, der für den vollständigen Mischvorgang der Gase erforderlich ist, so dass die Forderung nach einer möglichst homogenen und zugleich verlustarmen Durchmischung zunehmend an Bedeutung gewinnt.

Strömungstechnische Ventilatoren im Kammerofenbau, druckverlustreiche Strömungsführungen hinsichtlich der Umlenkung und Verteilung des Umwälzmediums, wirken ebenfalls dem Vermischungsvorgang entgegen.

Die vorgestellten Probleme der Temperaturvergleichmäßigung in Kammeröfen lassen eine eingehende Untersuchung der Vorgänge als sinnvoll erscheinen.

Somit werden Hinweise zur optimalen Temperaturverteilung in indirekt beheizten Kammeröfen / Muffelöfen mit Zwangsumwälzung und Öfen mit ähnlicher Strömungsführung bereitgestellt.

## Positionierung und Dimensionierung des Messgitters

Das Hilfsgitter Abb. 1 mit seinen Maßen 300x325x500mm wird in 100x100x125mm Abschnitten unterteilt, d.h. es sind 36 Unterteilungen möglich. Mit diesem Hilfsgitter ist eine räumliche Temperaturerfassung möglich. Die Messstellen sind mit fester Bezifferung versehen, um während bzw. nach den Untersuchungen eine Beurteilung der Temperaturverläufe an jeder Messstelle wiedergeben zu können. Um eine genauere Aussage über die Temperaturverteilung machen zu können, wurde das Hilfsgitter symmetrisch in der Kammer positioniert. Die Blickrichtung der Ebenen geht von der Tür aus Abb. 2.

Die Anordnung der Thermoelemente im Messgitter (siehe Abb. 1)

- Die Diagonale A-F (grüne Markierung) mit 6 Messpunkten von vorne links unten nach hinten rechts oben.
- Eine Diagonale G-H (türkise Markierung) mit 2 Messpunkten von vorne rechts oben nach hinten links unten.
- Alle 6 übrigen Ecken 1-6 (rote Markierung) die nicht von den Diagonalen erfasst sind.
- Mittig Längsachse a-c (schwarze Markierung), d.h. im mittleren Quadrat von der Frontsicht her vorne, Mitte, hinten,
- Seitenfläche 1'-8' (blaue Markierung) oben, unten, links und rechts, mittig jeweils 2 Quadrate mit 2

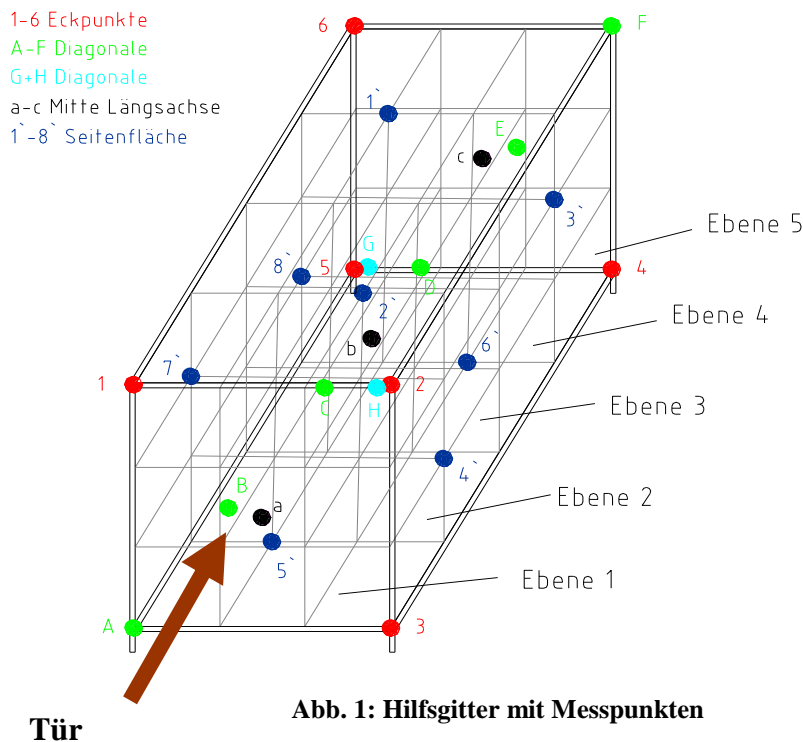


Abb. 1: Hilfsgitter mit Messpunkten

Tür



**Abb. 2: Symmetrische Anbringung des Hilfsgitters in die Kammer**

### **Aufbau und Wirkungsweise des Umwälzventilators**

Im Industrieofenbau wird der Umwälzventilator oft angewandt. Das Umwälzrad ist mit dem Strömungsantrieb, der an der Tür angebracht ist, direkt gekoppelt, damit eine schnelle Austauschbarkeit sicher gestellt wird. Von ihrem Einbau in den Strömungskreislauf, d.h. von den Zu- und Abströmbedingungen hängt der strömungs- und wärmetechnischer Wirkungsgrad des Ofens ab. Der Pseudo-Radialventilator bietet hier gegenüber dem Axialventilator Vorteile. Die Umformung vom Abströmquerschnitt der Strömungsantriebes auf den Rechteckquerschnitt der Strömungsführung lässt sich beim Radialventilator einfacher gestalten als bei einem Axialventilator. Zusätzlich erlaubt die im Radialventilator stattfindende  $90^\circ$  - Umlenkung der Strömung einen günstigeren Einbau im Ofen. Die Funktionsweise des Umwälzventilator lässt sich anhand der Abb. 3 beschreiben, an der Saugseite wird das Medium axial angesaugt und anschließend radial mit hoher Umfangsgeschwindigkeit ausgeströmt. Dieses Prinzip beruht dem Radialventilator. Das radial ausgeströmte Medium erfährt an der Ofenwandung eine  $90^\circ$ -Umlenkung in Längsrichtung des Ofens, dabei entstehen Verluste im Sinne von Druckverlusten. Zudem erkennt man die Anordnung und die Positionierung der Schirmbleche, diese dienen zur Strahlungsisolierung.

Um Verluste der Gasvolumenströme zu minimieren, wird das Schutzgas unterhalb der ersten drei eng anliegenden Schirmbleche zugeführt, die für die Vorwärmung der Gase dienen, bevor es in die Ofenkammer einströmt. Die eng anliegenden Schirmbleche sind in Abständen von  $x=10\text{mm}$  voneinander entfernt montiert, so dass genügend Strahlungsenergie an die Gase abgegeben werden kann. Um die Energieverluste so gering wie Möglich zu halten.

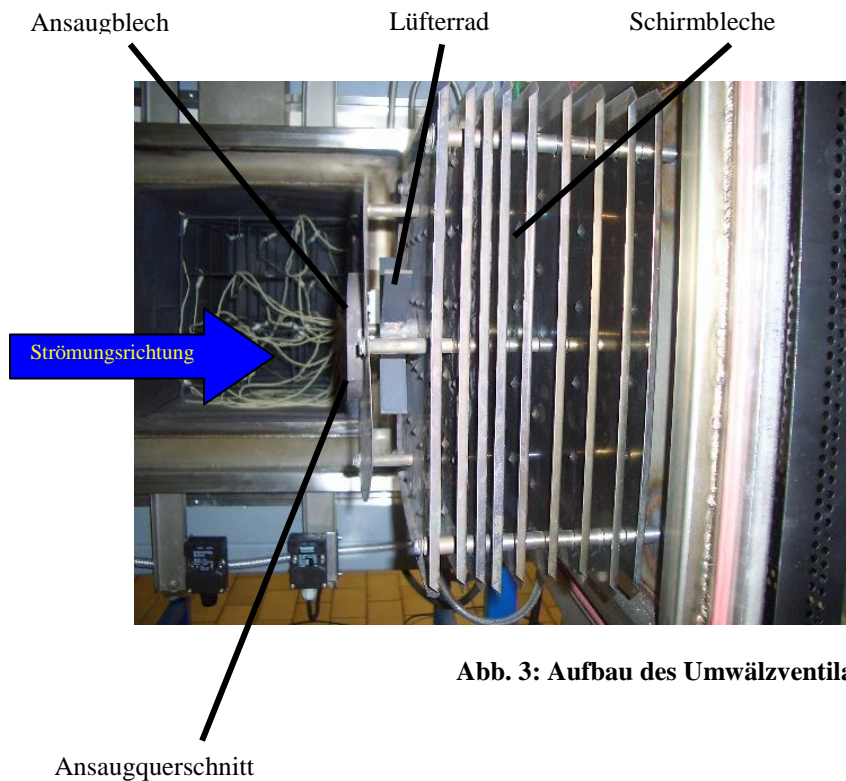


Abb. 3: Aufbau des Umwälzventilators

## Wärmeübertragung

Das Temperaturprofil stellt sich im stationären Zustand aus dem Gleichgewicht zwischen den Quellen und den abgegebenen Wärmeleistungen ein. Die rechnerische Nachbildung des Prozesses ist außerordentlich komplex, da es sich um eine Vielzahl gekoppelter Feldprobleme handelt. Daher besteht die Notwendigkeit zur Beschränkung auf die wesentlichen Mechanismen.

Die Wärmeübertragungsmechanismen sind in Wärmeleitung, Strahlung und Konvektion unterteilbar.

Die Energiebilanzierung für Wärmeübertragungsmechanismen je Volumeneinheit lautet [1]:

$$\underbrace{- \left\{ \frac{\partial \dot{q}_x}{\partial x} + \frac{\partial \dot{q}_y}{\partial y} + \frac{\partial \dot{q}_z}{\partial z} \right\}}_{\text{Wärmeleitung}} = \underbrace{\rho * c_p}_{\text{Wärmespeicherung}} \underbrace{\left\{ \frac{\partial \vartheta}{\partial t} + w_x \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + w_y \frac{\partial \vartheta}{\partial y} + w_z \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right\}}_{\text{durch Strömung transportierte Leistung}} - \underbrace{Str}_{\text{Strahlung}} - \underbrace{\ddot{q}}_{\text{erzeugte Leistung}} \quad (1)$$

## Wärmeleitung

Aus der Gleichung (1) ergibt sich ohne Berücksichtigung der Strömung, unter Vernachlässigung des Strahlungsanteils und unter der Voraussetzung homogener und stationäre Verhältnisse für die Volumenleistungsdichte:

$$\frac{\dot{Q}}{A} \equiv \dot{q} = -\lambda * \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

dreidimensionale in vektorieller Form

$$\vec{\dot{q}} = -\lambda_i * \text{grad}T \quad (3)$$

## Strahlung

Viele Gase emittieren Strahlung in Form elektromagnetischer Wellen. Bei Auftreffen auf einen Körper wird Strahlung teilweise absorbiert oder reflektiert [2].

$$\dot{Q}_i = \varphi_{ij} * \sigma * \varepsilon_i * A_i (T_i^4 - T_j^4) \quad (4)$$

## Konvektion

Die Wärmeübertragung in Gasen durch Leitung und Konvektion sind miteinander verknüpft und werden deshalb gemeinsam beschrieben [2].

Der konvektive Wärmeübergang umfasst den Wärmeaustausch zwischen einem festen Körper und einem Gas. An der Grenzfläche zwischen beiden Stoffen wird die Wärmeleistung durch Leitung übertragen, während innerhalb des Gases der Transport zum überwiegenden Teil durch Bewegung dieses Stoffes erfolgt.

$$q = \alpha_k * A * (T_0 - T_f) \quad (5)$$

Die Strömungsvorgänge können durch Lösung der Gleichungen der

- Massenbilanz
- Energiebilanz, siehe Gleichung ( 1 )
- Impulsbilanz

berechnet werden [3], [4].

## Teilergebnisse

Die Aufheizkurve unter Argonatmosphäre Abb. 4 verdeutlicht den Verlauf der einzelnen Messstellen in der Kammer, wobei sich im Bereich von ca. 10 min ein stationärer Zustand einstellt (Markierung 1). Eine Ursache ist vermutlich, dass in diesem Bereich eine Energiespeicherung des Einsatzes stattfindet. Bei genauer Betrachtung erkennt man einen kleinen oszillierenden Verlauf des Regelthermoelements (Nummerierung x), das dieses grobe Verhalten im Ofen verursacht. Immer an den Wendepunkten des Regelthermoelementverlaufes stellt sich der stationäre Zustand ein. Dieser oszillierende Temperaturverlauf hängt von dem Aufheizalgorithmus ab. Dieser macht sich bis ca. T=300 °C bemerkbar. In dieser stationären Phase erkennt man eine sehr hohe Temperaturdifferenz zwischen der obersten und der untersten Kurve.

Wie erwähnt wird hier als Beispiel die Argonatmosphäre gewählt. An den Markierungen 2 und 3, also Abb. 4, wurde ein Vergleich dargestellt, um den Einfluss des Gases während der Aufheizung und im stationären Zustand die Spannweite der Temperatur sowie etwaige Änderung zu beurteilen. Das Ergebnis von  $\Delta\theta=34\text{K}$  zeigt keinen Unterschied, also ändert sich nichts in beiden Fällen. Mit der Abschätzung der maximalen Messunsicherheit kann man die Größenordnung, die unter ungünstigen Umständen auftreten kann, hier einfließen lassen, diese beträgt  $\pm 3,7 \text{ K}$  bei  $T= 900 \text{ °C}$ , d.h. der ungünstigste Fall würde eine Spannweite von  $\Delta\theta = 34 \text{ K} \pm 3,7 \text{ K}$  betragen. Die Graphen, die außerhalb der Spannweite liegen, wurden bei der Beurteilung nicht berücksichtigt, da diese Messstellen Eckpunkte im Ofen sind, d.h. die Probanden ragen nicht bis zu diesen Messstellen.

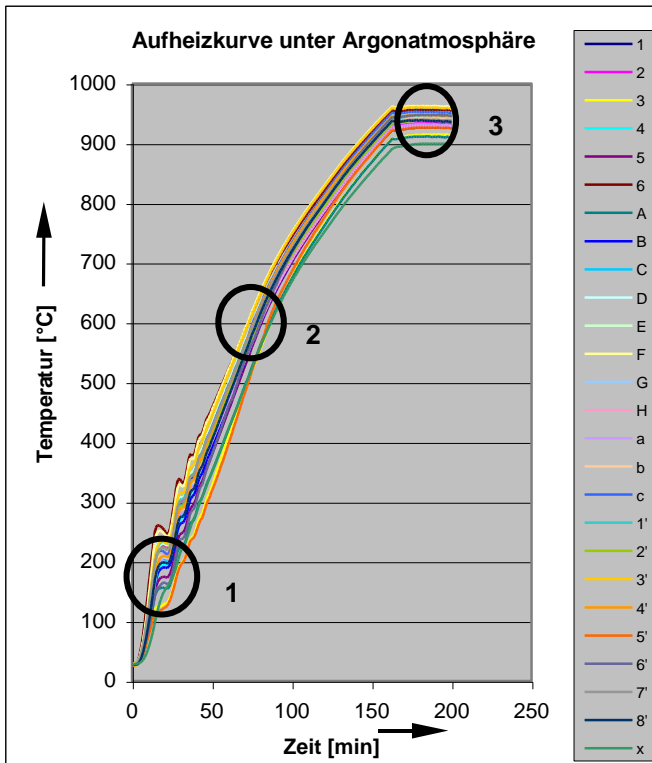
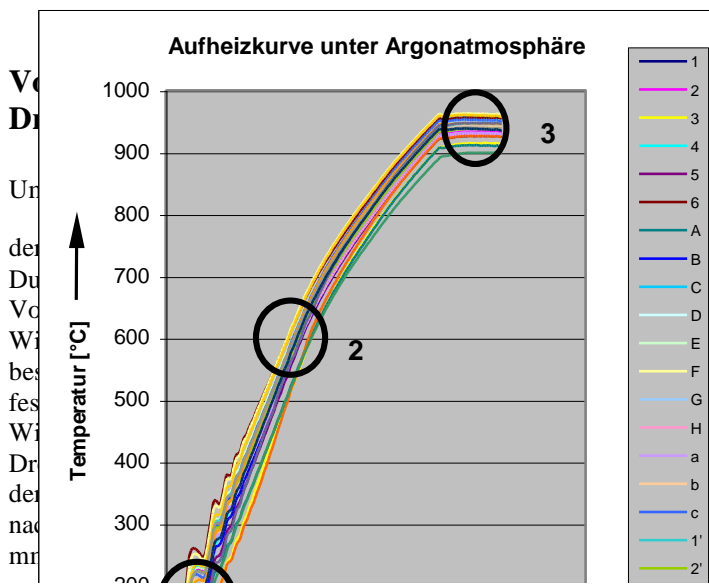


Abb. 4: Aufheizkurve unter Argonatmosphäre



**Lüfterrad 1 bei Veränderung der**

schnitte der Messbleche auf die Vermischung

lumenstrom  $\dot{V}_{Gas}$  in Abhängigkeit vom

l die Kurvenverläufe für drei verschiedene

Querschnitt  $d_2$ . Doch wurde damit kein

eine schlechtere Temperaturverteilung

mutlich bilden sich kleine stark ausgeprägte

ung der Temperatur beitragen. Die

z verkleinert. Gute Homogenisierungseigenschaften

$0 \text{ min}^{-1}$  mit dem Ansaugblech 2. Für die

schnitt  $d_2=100 \text{ mm}$  (Ansaugblech 1  $d_1 = 75$

temperaturverteilungsergebnis erzielte.

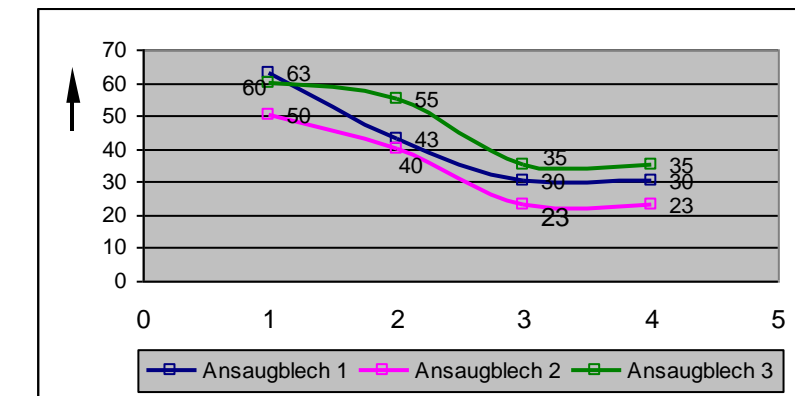
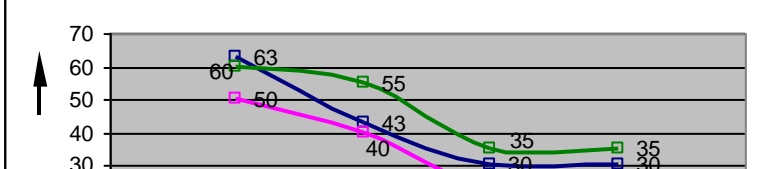


Abb. 5:  $dT/dt$  als Funktion der Ansaugbleche bei verschiedener Drehzahl



## Graphische Temperaturverläufe der Messwerte mit verschiedenen Parametern im Kammerofen KS 80 S

Mit Hilfe der Parameterkombinationen und der Zwangsumwälzung der Gase ist eine Homogenisierung der Temperatur erreicht worden. Im Kanal mit rechteckigem Querschnitt erfolgten die Messungen des Temperaturprofils in fünf Messebenen stromabwärts. Zudem wurde eine Geschwindigkeitsmessung unter Raumtemperatur an der Ebene 1 aufgenommen, um anschließend eine quantitative Deutung der Strömungsverteilung wiederzugeben. Folgende Parameter standen zur Verfügung: Ansaugblechdurchmesser, Drehzahlveränderungen, Lüfterräder, Gase, Gasespeisekonfigurationen. An den Abb. 6 und 7 erkennt man den Temperaturverlauf bei  $T=800\text{ °C}$  in Abhängigkeit der Parameter (die Legende mit der Zahl 81, ist die Zeit von der oberen Abb. 6, ;Momentanaufnahme).

### Temperaturverteilung

Die Temperaturgleichmäßigkeit wird bestimmt von der Geometrie, den Strahlungsverhältnissen, der Konvektion und der Wärmeleitung des Gases. Die Beheizung erfolgt von zwei Seiten, Boden und Rückwand. Bei der unbeheizten Tür tritt dort ein starker Temperaturabfall auf, der um so weiter in das Ofenvolumen hineinreicht je größer die Türfläche ist. Die Wärmeleitung im Gas (bis auf Helium) kann meist vernachlässigt werden. Die Hauptakteure sind Konvektion und Strahlung. Bei natürlicher Konvektion ist diese der bestimmende Faktor bis etwa  $300\text{ °C}$ . Danach überwiegt die Wärmeübertragung durch Strahlung. Wird ein verstärktes Konvektion durch Gasumwälzung erzwungen, bleibt diese bis etwa  $400\text{ °C}$  deutlich wirksam. Darüber wird die Wärmeübertragung und Temperatur von der Strahlung beherrscht. Fazit: ist eine genaue Temperaturverteilung über große Volumen erforderlich, sollte bei Temperaturen bis  $400\text{ °C}$  eine Gasumwälzung verwendet werden. Über  $800\text{ °C}$  ist ein Mehrzonenheizung sinnvoll und notwendig. Zwischen  $400\text{ °C}$  und  $800\text{ °C}$  am besten beides. Gasumwälzung können bis  $950\text{ °C}$  eingesetzt werden. Sollte prozessbedingt ein Einsatz bis max.  $1050\text{ °C}$ , z.B. Entbindern bei  $300\text{ °C}$  und Vorsintern bei  $1100\text{ °C}$  mit guter Temperaturverteilung nötig sein, muss sich der Ventilator mit speziellem Rad auf minimale Drehzahl z.B.  $2/s$  herabregeln lassen, um nicht zerstört zu werden. Ein Drehen ist aber nötig, da sich sonst die Antriebswelle verformt.

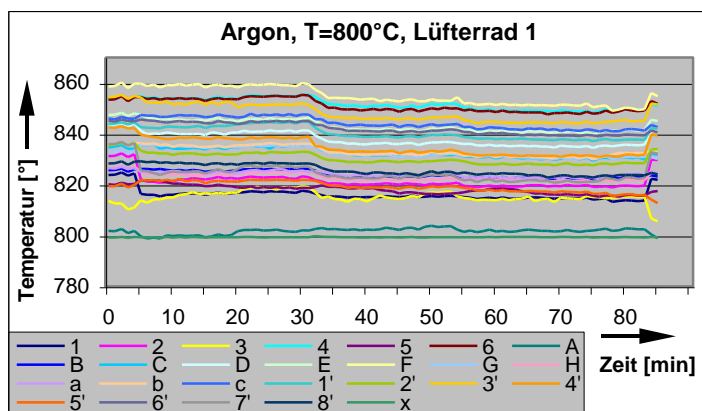


Abb. 6: Argonatmosphäre  $T=800\text{ °C}$  Lüfterrad 1  $\varnothing 140\text{ mm}$

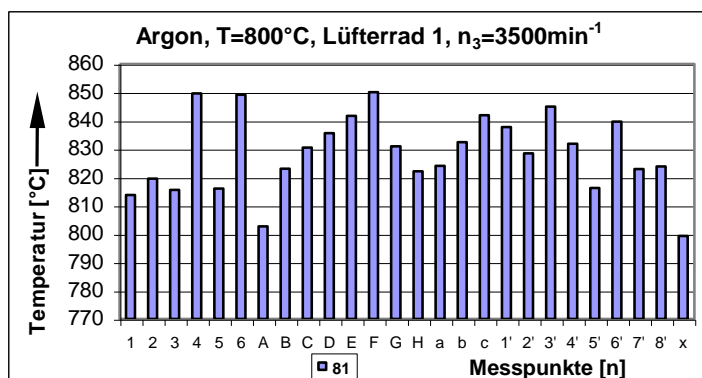
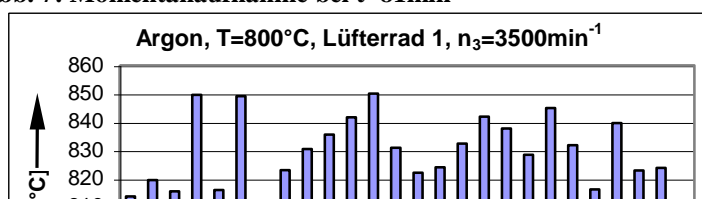


Abb. 7: Momentanaufnahme bei  $t=81\text{ min}$





Untersuchungen an einem Mehrzonenheizung mit drei Regelstrecken, verteilt über die Ofenlänge (Türbereich, Mittelteil, Rückwand), ist an der Universität Erlangen Lehrstuhl für FT Abb. 8 untersucht worden. Mit den Maßnahmen sind Temperaturabweichungen von +/-3 bis +/- 7K über das Ofenvolumen zu erreichen. Mit höherem Aufwand z.B. 6-seitige Beheizung mit Trimmöglichkeit sind für Spezialanwendungen auch höhere Genauigkeiten realisierbar, doch ist es häufig einfacher das nutzbare Ofenvolumen (nächst größere Ofentyp) im Verhältnis zur Muffelabmessung zu beschränken um eine ähnlich gute Temperaturverteilung u.U. kostengünstiger zu erreichen.

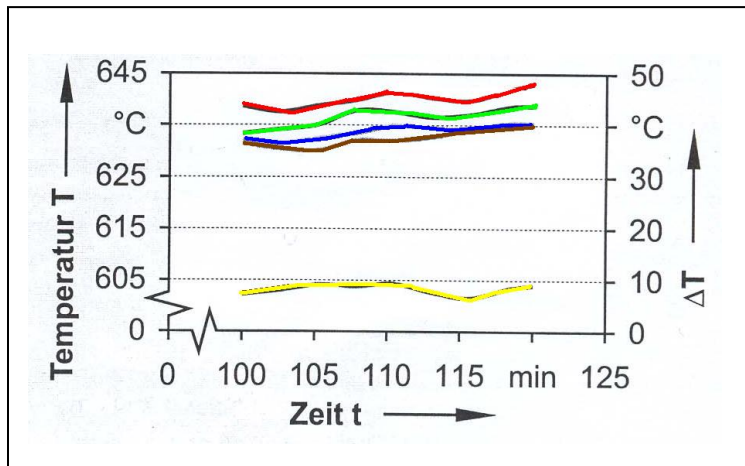
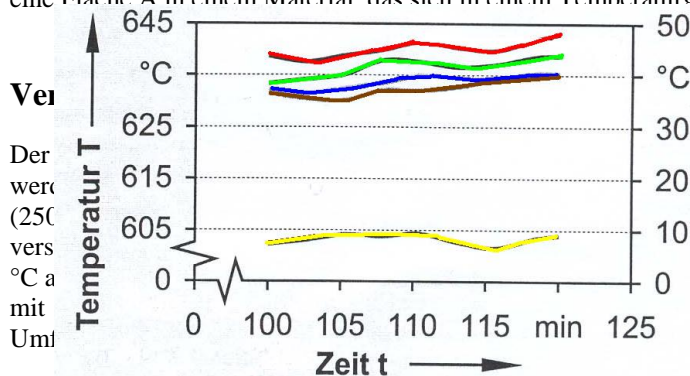


Abb. 8: Temperaturverteilung an einem 3-zonigen Kammerofen

### Temperaturausgleich in Messwürfeln (100x100x100) an einem VMK 250 S Laborofen

Ergänzend wurde die Wärmeübertragung vom Ofenraum auf verschiedener Stoffe deren Durchwärmung untersucht. Die Wärmeübertragung wird durch Konvektion und Strahlung bestimmt. Der maßgebliche Mechanismus im Festkörper selbst ist die Wärmeleitung.

Die Wärmeleitung beschreibt einen Wärmestrom  $dQ/dt$  durch eine Fläche  $A$  in einem Material das sich in einem Temperaturgradienten  $dT/dx$  befindet.



stationären Messmethode bestimmt. Dabei Die Bodenmittig in einem Typ VMK 250 1 wurde mittels Bohrungen (ca.50 mm Tief) 3 mit annähernd konst. Heizrate auf  $T=1000$  abgelesen werden. Somit kann nun der Proben die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  nach

### Messergebnisse

Die Temperaturverläufe Abb. 9 verschiedener Materialien schließen auf die Wärmeleitfähigkeit einzelner Materialien zurück. Graphit erreicht in kürzester Zeit die Sollvorgabe und somit kann man davon ausgehen, dass es sich um einen sehr guten Wärmeleiter handelt. Die Strahlung macht sich bei Graphit ab 500°C bemerkbar, denn der Graph wird steiler, also absorbiert Graphit fast alle Strahlen (ähnlich wie ein schwarzer Körper). Normalerweise hat Kupfer unter den untersuchten Materialien die beste Wärmeleitfähigkeit-Eigenschaften, doch die Wärmeübertragung durch Strahlung ist stark abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit und bei glatten Metallen sehr gering. Im Gegensatz erkennt man, dass die keramischen Materialien wie  $\text{SiC}$  /  $\text{Al}_2\text{O}_3$  eine schlechte Wärmeleitfähigkeit besitzen und somit gute Isolatoren sind.



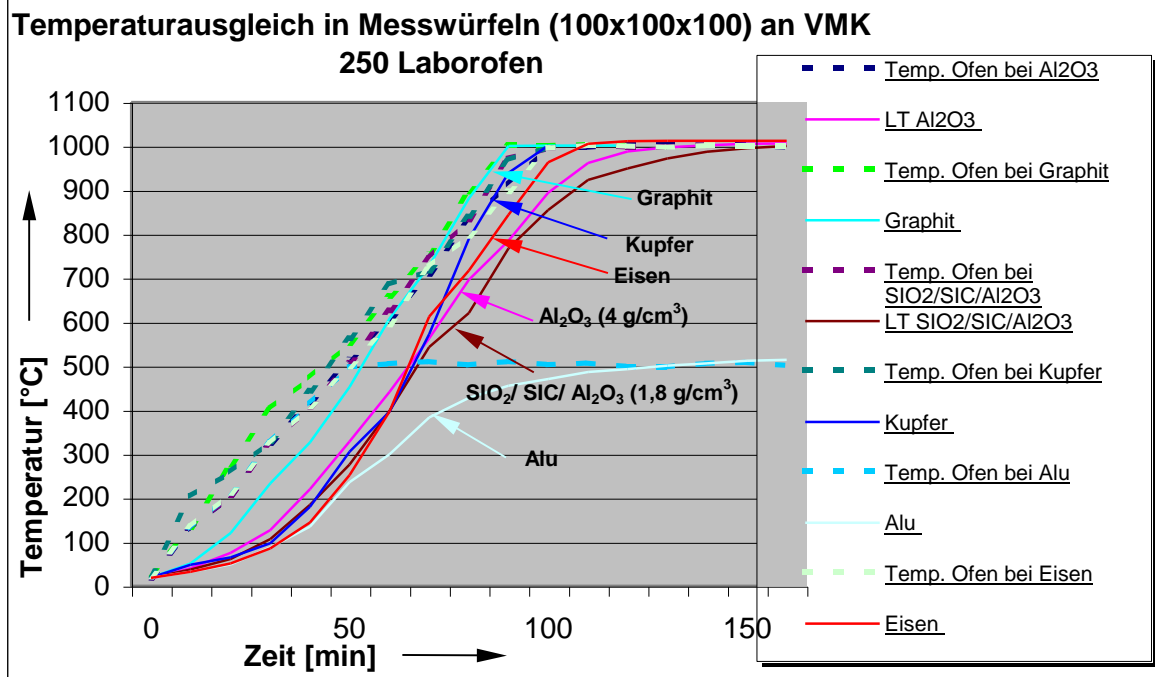
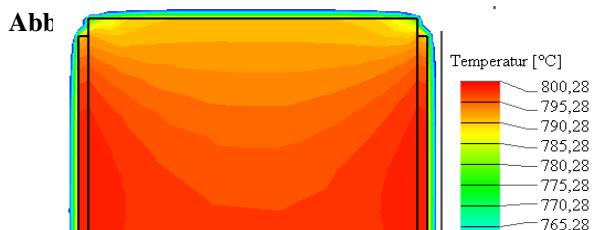
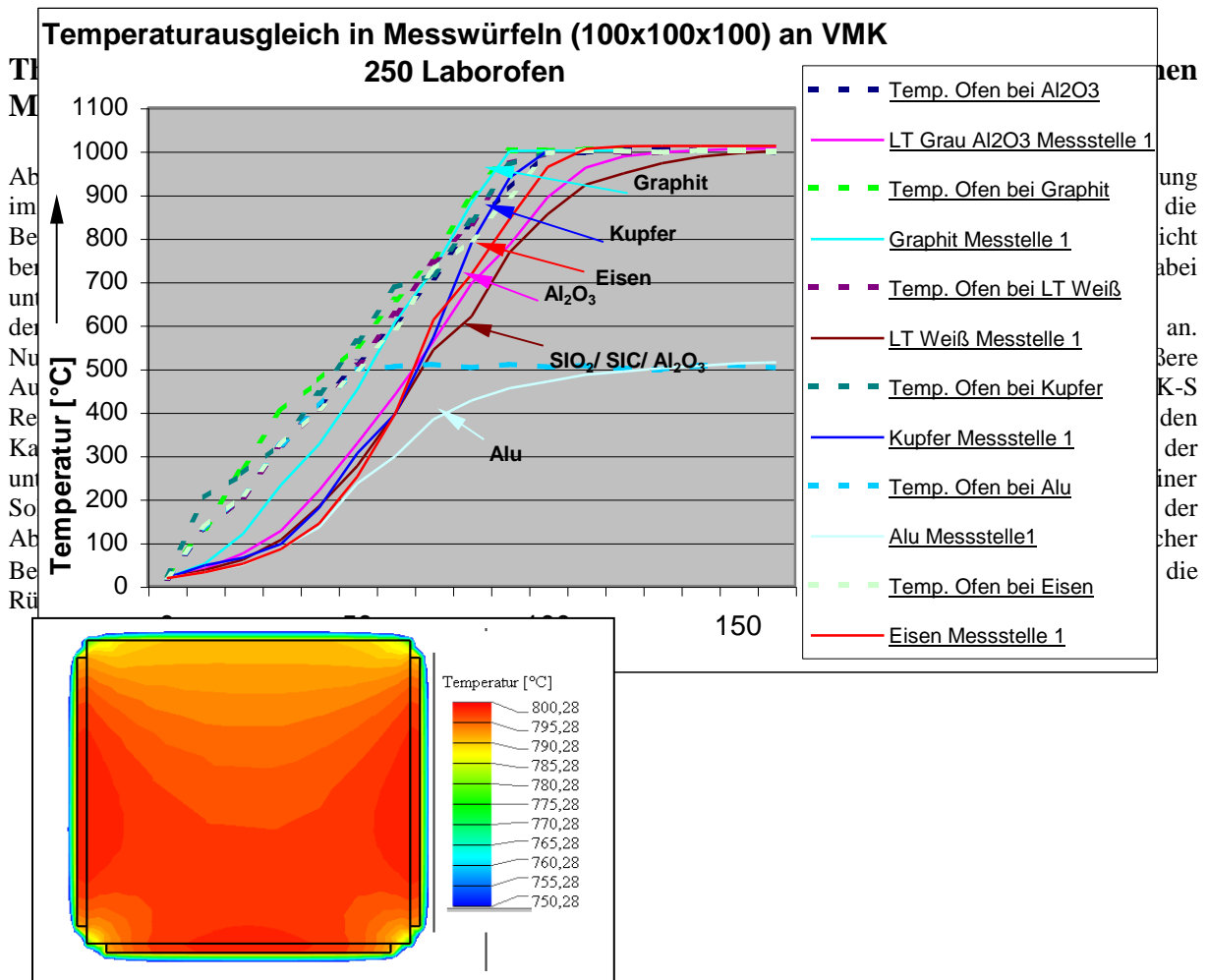
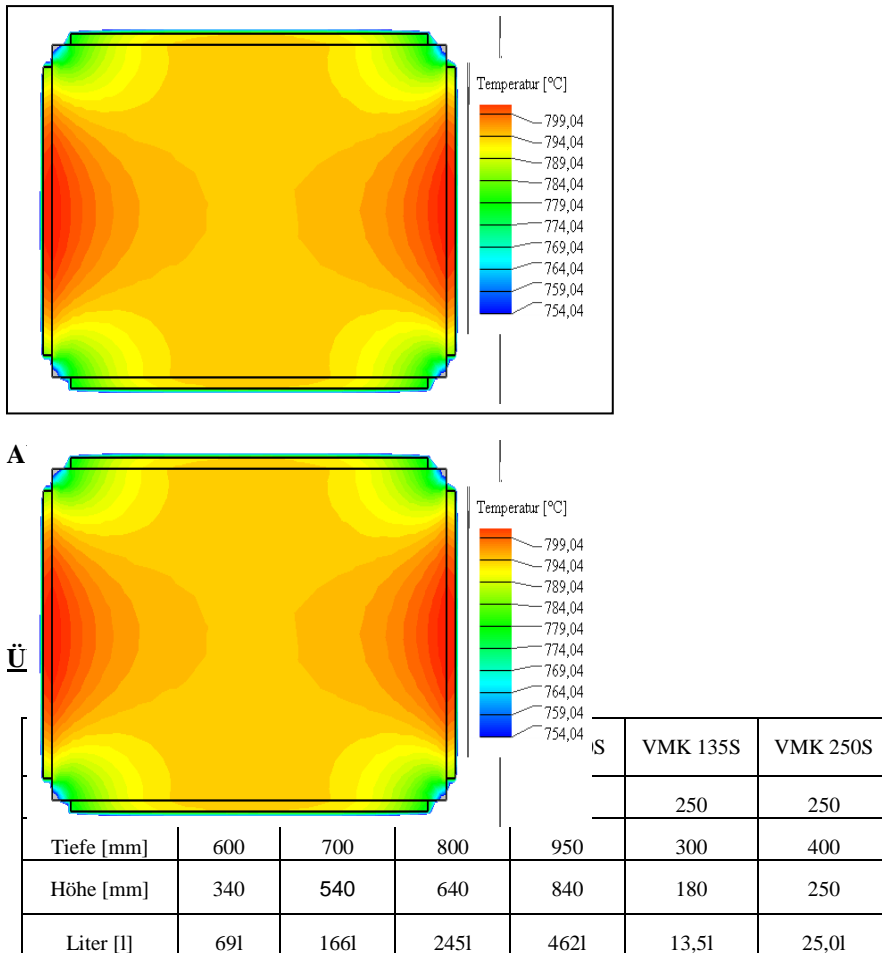


Abb. 9: Temperaturverläufe verschiedener Materialien



Auch dieser Plot, Abb11, bezieht sich auf den mittleren Querschnitt (Ebene 3, Zentrum). Eine Besonderheit ist hier zu berücksichtigen, denn die Wärmezufuhr erfolgt hier von vier Seiten. Man erkennt, dass die Temperatur über den gesamten Querschnitt fast homogen ist. Der Ofentyp VMK 135 S weicht von der Sollwertvorgabe  $T=800\text{ °C}$  im Zentrum nur ca. 2-3 Kelvin ab. Die kleinen Ofenmodelle VMK-S erreichen gegenüber dem KS/S bessere Temperaturhomogenität über den gesamten Querschnitt.



**Tabelle 1:** Geometrische Daten der Öfen

- [1] Dubbel H, Taschenbuch für Maschinenbau, Springer Verlag Berlin 1997
- [2] VDI Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 8.Auflage, Springer Verlag Berlin 1997
- [3] ANSYS 7.1 User Manuel
- [4] Groth, C., Müller, G. FEM für Praktiker- Temperaturfelder, expert Verlag, Renningen- Malsmsheim