

Reduktion des spezifischen Energiebedarfs bei der Wärmebehandlung in einem Haubenglühofen durch modellgestützte Prozessführung

Dr.-Ing. Simon Künne
Prosik GmbH

Bei der Wärmebehandlung in Haubenglühöfen werden noch häufig feste Rezepte eingesetzt und unabhängig von der tatsächlichen Beladung des Ofens abgearbeitet. Daher wird hier in der Regel der Sollwert für die Temperatur der Schutzgasatmosphäre auf den Sollwert der Materialtemperatur gesetzt, um ein Überhitzen des Material auf jeden Fall ausschließen zu können. Dadurch geht die Temperaturdifferenz zwischen Atmosphäre und Material am Ende des Prozesses gegen Null, was zu unnötig langen Aufheizzeiten führt.

Durch eine Erhöhung der Atmosphärentemperatur über den Sollwert der Materialtemperatur hinaus kann der Prozess am Ende stark beschleunigt werden. Durch die eingesparte Zeit ergeben sich Einsparungen im Gasverbrauch, da der Ofen nicht so lange auf Temperatur gehalten werden muss und die Oberflächenverluste entsprechend geringer ausfallen. Mit Hilfe eines in die Steuerung der Anlage integrierten Prozessmodells wird der Prozess sicher geführt und ein Überhitzen des Materials kann ausgeschlossen werden. Für den gezeigten Beispielprozess sind Gaseinsparungen in der Größenordnung von 4,8 % und eine Reduzierung der Durchlaufzeit von etwa 2 h möglich.

Keywords: Energieeffizienz, Prozessmodell, Haubenglühofen

1. Beschreibung der Ausgangssituation

Der Aufbau eines Haubenglühofens ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Ofen verfügt über einen festen Sockel, in dem ein Umwälzventilator integriert ist. Der Ventilator sorgt für eine gleichmäßige Temperaturverteilung innerhalb der Ofenatmosphäre. Auf dem Sockel werden die zu Coils aufgewickelten Kupferbänder mit Hilfe von Abstandhaltern übereinander gestapelt. Die anschließend aufgesetzte

Schutzhaube schließt dicht ab, sodass die Coils unter Schutzgasatmosphäre wärmebehandelt werden können. Über die Schutzhaube wird die sogenannte Heizhaube gestülpt. Die Brenner feuern in den Spalt zwischen Schutz- und Heizhaube.

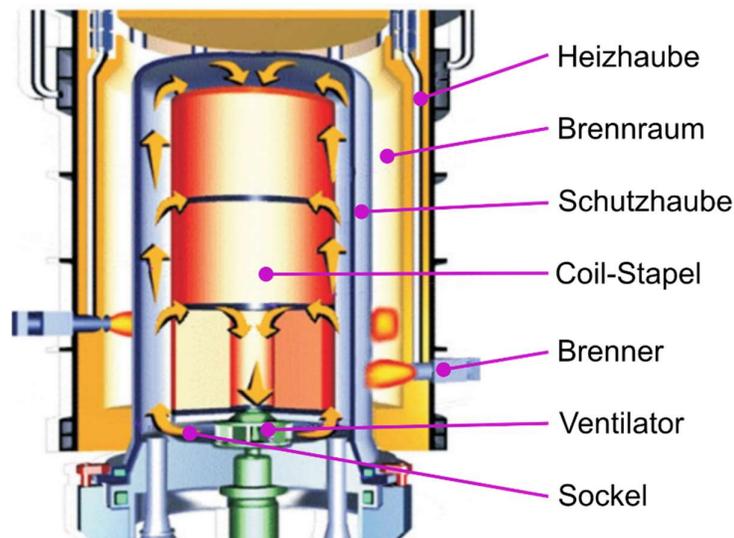


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Haubenglühofens nach [1]

Nach dem Beladen und dem Aufsetzen der Heizhaube beginnt das Aufheizen des Ofens. Das Material soll auf 540 °C aufgeheizt und anschließend für eine Stunde bei dieser Temperatur gehalten werden. Die Verläufe der wichtigsten Temperaturen dieses Prozesses sind in Abbildung 2 dargestellt. Zunächst steigt die Temperatur der Schutzhaube stark an. Dadurch steigt ebenfalls der Wärmestrom in Richtung Schutzgas, sodass sich ein Gleichgewicht einstellt und beide Temperaturen gleichmäßig ansteigen. Die Schutzgastemperatur ist im Gegensatz zur Temperaturverteilung im Material direkt messbar und wird daher als Regelgröße für den Prozess verwendet.

Da ohne Prozessmodell keine Informationen über die Materialtemperaturen vorliegen und ein Überhitzen des Materials vermieden werden soll, wird die Solltemperatur für das Schutzgas ebenfalls auf 540 °C gesetzt. Dieser Wert wird mit einer Rampe von 65 K/h angefahren. Nach kurzer Zeit stellt sich ein Gleichgewicht ein und auch die Materialtemperatur folgt dieser Rampe. Sobald das Schutzgas, hier nach circa 6,5 Stunden, den Sollwert erreicht, flacht die Temperaturkurve innerhalb des Materials aufgrund der immer geringer werdenden

Temperaturdifferenz ab. Das Heizen von 20 °C auf etwa 400 °C an der kältesten Stelle dauert 6 Stunden. Nach weiteren 6 Stunden ist die Temperaturerhöhung von 400 °C auf 535 °C abgeschlossen.

In diesem Fall dauert es circa 12,5 Stunden bis die kälteste Stelle des Materials bis auf 5 K an den Sollwert herangekommen ist. Ab diesem Zeitpunkt beginnt per Definition die Haltezeit. Der gesamte Prozess dauert demnach 13,5 Stunden. Anschließend folgt noch ein Kühschritt, der in dieser Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet wird.

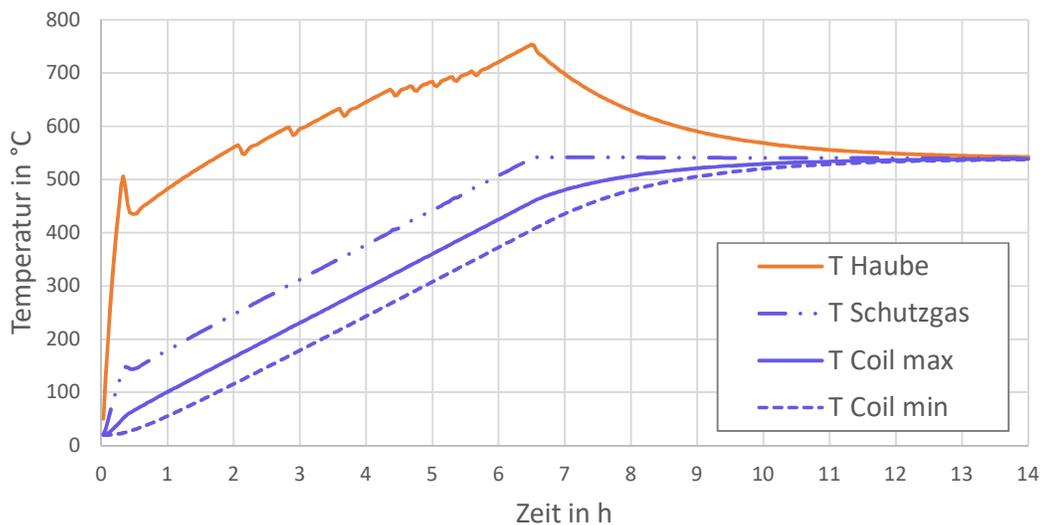


Abbildung 2: Verläufe der wichtigsten Temperaturen für den Referenzzustand, Erreichen der Haltephase nach ca. 12,5 Stunden

2. Modellierung der Anlage und des Prozesses

Mit Hilfe eines Prozessmodells ist es möglich die Temperaturverteilung innerhalb des Materials im Laufe des Prozesses zu berechnen. Mit dieser Information ist eine Erhöhung der Schutzgastemperatur gegenüber der Solltemperatur prozesssicher möglich. Die sogenannte Überziehtemperatur $T_{\dot{U}T}$ ist definiert als:

$$T_{\dot{U}T} = T_{Soll,Gas} - T_{Soll,Material}$$

Je höher $T_{\dot{U}T}$ gewählt wird, desto höher ist gegen Ende des Prozesses die Temperaturdifferenz zwischen Schutzgas und Material, sodass die Erwärmung des Materials schneller stattfindet. Mit Hilfe des im Folgenden vorgestellten

Prozessmodells wird untersucht, welches die optimale Überziehtemperatur für diesen Prozess ist.

Abbildung 3 zeigt schematisch den Aufbau des für diese Arbeit verwendeten FVM-Modells. Die Coils werden rotationssymmetrisch abgebildet. In der Mitte der übereinander gestapelten Coils befindet sich ein Luftkanal, in den der Umwälzventilator ausbläst. Die äußeren Elemente des Kanals sind mit einem weiteren Luftkanal verbunden, der den Spalt zwischen Coils und Schutzhaube darstellt. Auf diese Weise ist die Zirkulation der Luft im Ofen abgebildet.

Zwischen den Luftkanälen und den Oberflächen der Coils findet konvektive Wärmeübertragung statt. Aufgrund der Wärmeleitung innerhalb der Bandebene gelangt die Wärme ins Innere des Coils. In radialer Richtung wird eine reduzierte Wärmeleitfähigkeit angenommen, die in der Größenordnung von 5 % bis 10 % der Wärmeleitfähigkeit in der Bandebene liegt [2].

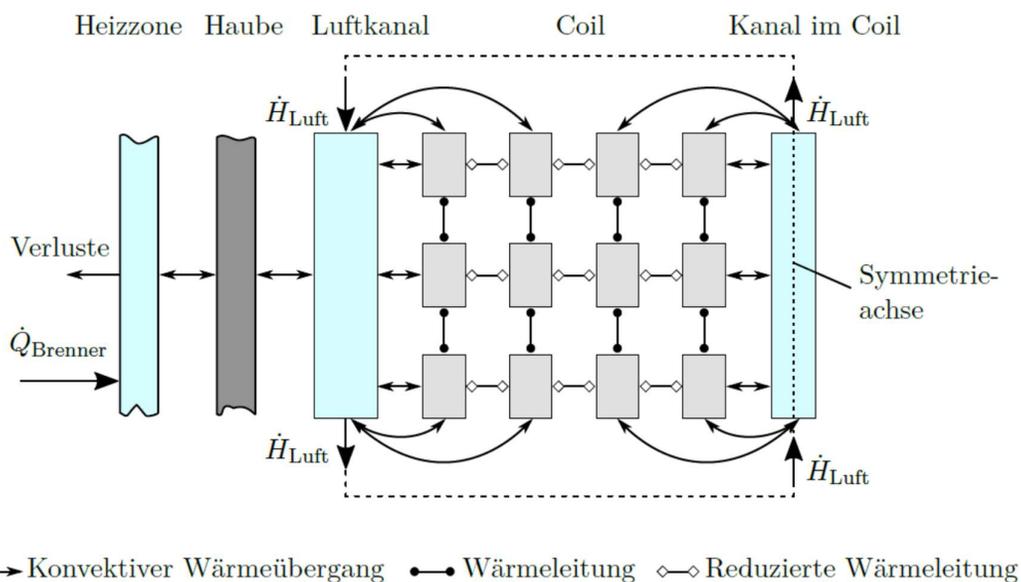


Abbildung 3: Aufbau des FVM-Modells

Konvektive Wärmeübertragung findet ebenfalls zwischen dem äußeren Luftkanal und der Schutzhaube statt, wie auch zwischen Schutzhaube und Heizzone. In der Heizzone werden die Brenner als Wärmequelle berücksichtigt. Die Verluste an die Umgebung werden durch einen konvektiven Wärmestrom abgebildet und sind somit abhängig von der Temperatur innerhalb der Heizzone.

3. Einfluss der Überziehtemperatur auf den Energiebedarf

Mit Hilfe des beschriebenen Prozessmodells werden unterschiedliche Überziehtemperaturen untersucht. Abbildung 4 zeigt vergleichbar zu Abbildung 2 die Verläufe der wichtigsten Prozesstemperaturen für $T_{\text{ÜT}} = 15 \text{ K}$. Die Verläufe zeigen eine ähnliche Charakteristik, allerdings dauert es in diesem Fall nur 10,2 Stunden bis die kälteste Stelle des Materials bis auf 5 K an den Sollwert herangekommen ist. Durch die minimale Erhöhung der Schutzgastemperatur lässt sich demnach eine Zeitersparnis von über 2 Stunden erzielen.

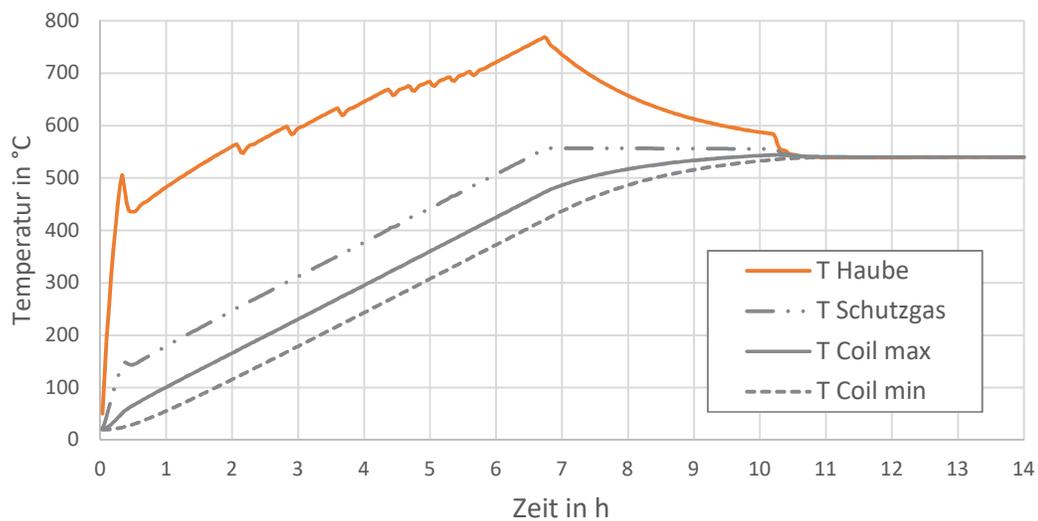


Abbildung 4: Verläufe der wichtigsten Temperaturen für eine Überziehtemperatur von 15 K, Erreichen der Haltephase nach ca. 10,2 Stunden

Abbildung 5 zeigt den Vergleich der Ausgangssituation mit einem Prozess bei einer Überziehtemperatur von 15 K für den relevanten Bereich. Anfangs verlaufen die Temperaturen gleich, da in beiden Fällen zunächst mit voller Leistung geheizt wird. Ab $t = 6,5 \text{ h}$ nehmen die Temperaturkurven unterschiedliche Verläufe.

Durch die höhere Schutzgastemperatur steigen die maximale und die minimale Materialtemperatur deutlich schneller an. Die Überziehtemperatur führt ebenfalls zu einer kurzzeitigen Überschreitung des Sollwerts an der heißesten Stelle im Material. Die Überschreitung beträgt 4,3 K und liegt noch innerhalb der für diesen Prozess geltenden Toleranz von $\pm 5 \text{ K}$. Die maximale Temperatur im Material in

Abhängigkeit der Überziehtemperatur ist in Abbildung 6 dargestellt. Für Überziehtemperaturen über 15 K wird die Abweichung so groß, dass sie außerhalb der genannten Toleranz liegt. Daher wurde diese Temperatur hier als Beispiel gewählt.

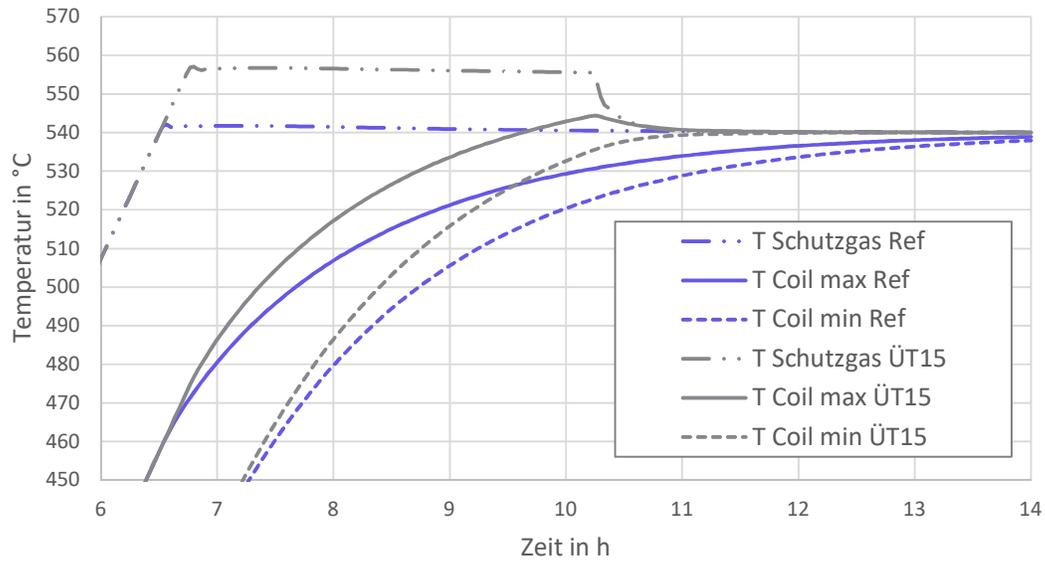


Abbildung 5: Referenzprozess im Vergleich zu einem Prozess mit 15 K Überziehtemperatur

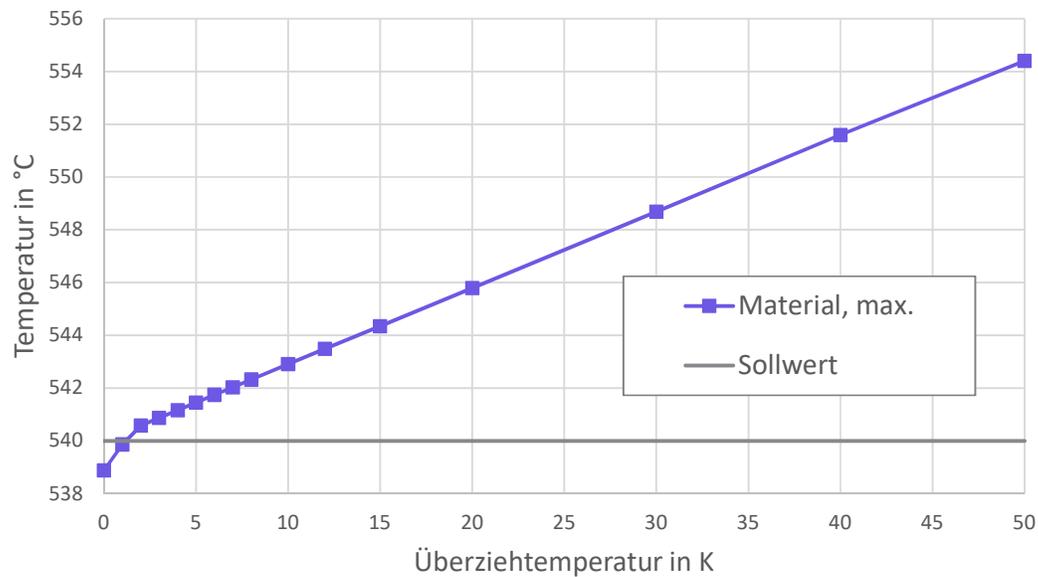


Abbildung 6: Maximale Materialtemperatur in Abhängigkeit der Überziehtemperatur

Es wurde gezeigt, dass die Verwendung einer Überziehtemperatur die Dauer des Aufheizprozesses merklich verkürzt. Während der eingesparten Zeit muss der Ofen nicht auf Temperatur gehalten werden und die Wärmeverluste entfallen. Dem gegenüber stehen höhere Verluste während der Zeit, in der die Überziehtemperatur gehalten werden muss. Unter Berücksichtigung der Oberflächenverluste wurden Simulationen für verschiedene Überziehtemperaturen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 7 dargestellt. Bei den niedrigen Werten für die Überziehtemperatur von $T_{\text{ÜT}} \leq 10 \text{ K}$ steigt die Kurve für die Reduktion des Gasverbrauchs recht steil auf einen Wert von circa 4 % an und flacht dann ab. Die Kurve für die Zeitersparnis in Abhängigkeit der Überziehtemperatur korreliert sehr gut mit der Kurve für die Reduktion des Gasverbrauches und erreicht bei $T_{\text{ÜT}} = 10 \text{ K}$ einen Wert von 1,8 h. Durch die verringerte Prozessdauer entstehen weitere Einspareffekte (Ventilator, Pumpen, Steuerung, etc.), die in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden.

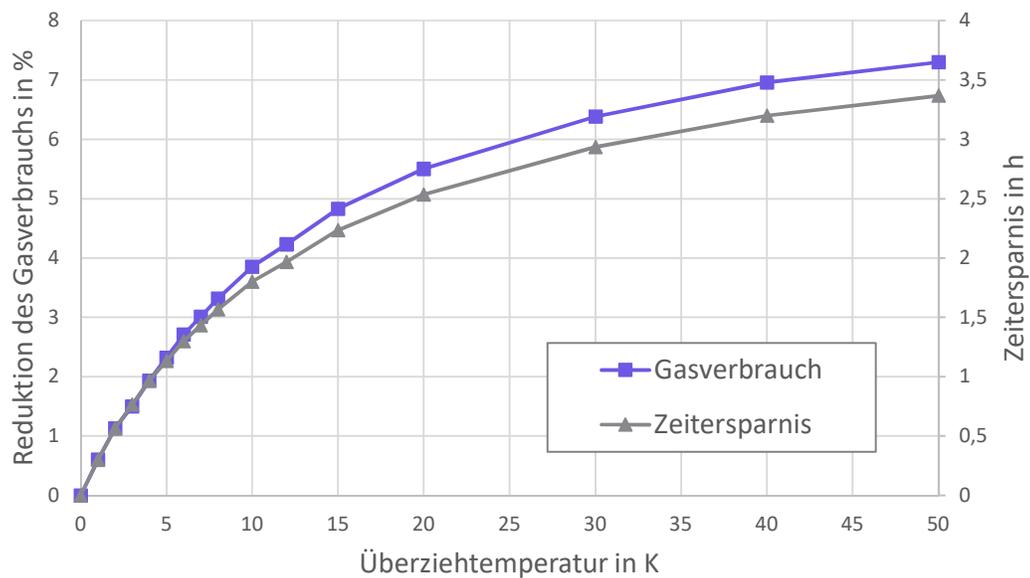


Abbildung 7: Reduktion des Gasverbrauchs in Abhängigkeit der Überziehtemperatur

4. Fazit

Bereits durch den Einsatz minimaler Überziehtemperaturen von weniger als 10 K können Einsparungen beim Gasverbrauch von etwa 4 % und eine Verringerung der Aufheizzeit von 1,8 Stunden erreicht werden. Für eine möglichst präzise Prozessführung, die individuell auf jede Charge abgestimmt ist, bietet sich der Einsatz eines in die Steuerung integrierten Prozessmodells an. Der große Vorteil dieses Ansatzes ist, dass sich ein Modell relativ unkompliziert und kostengünstig an bestehenden Anlagen nachrüsten lässt. Dieses Vorgehen lässt sich auch auf andere Ofentypen wie beispielsweise Stoß- und Kammeröfen anwenden. Bei diesen Ofentypen sind ähnliche Einsparpotenziale zu erwarten.

Literatur

- [1] Fang, Chun-Jen; Wu, Li-Wen: Batch Annealing Model for Cold Rolled Coils and Its Application. *China Steel Technical Report* 28 (2015), S. 13-20
- [2] Park, S.-J., Hong, B.-H., Baik, S.C., Oh, K.H.: Finite Element Analysis of Hot Rolled Coil Cooling. *ISJ International*, 38 (1998), S.1262-1269