Entwicklung eines Werkzeuges zur automatischen Berechnung optimaler Prozessparameter auf der Grundlage metallurgischer Anforderungen

Künne, S.; Valder, G. (1)

Bei der Wärmebehandlung von Kupferbändern kommt dem Temperatur-Zeit-Verlauf des Materials im Hinblick auf die Einstellung gewünschter Materialeigenschaften große Bedeutung zu. In diesem Beitrag wird ein Werkzeug vorgestellt, mit dessen Hilfe die Sollwerte für eine Produktionsanlage so berechnet werden können, dass im Material ein vorgegebenes Temperaturprofil eingestellt wird. Der Prozess lässt sich nun anhand metallurgischer Anforderungen, wie Aufheizrampen, Haltezeiten und Haltetemperaturen beschreiben. Der Umweg über Ofentemperaturen, Ventilatordrehzahlen und andere Prozessgrößen ist nicht mehr nötig.

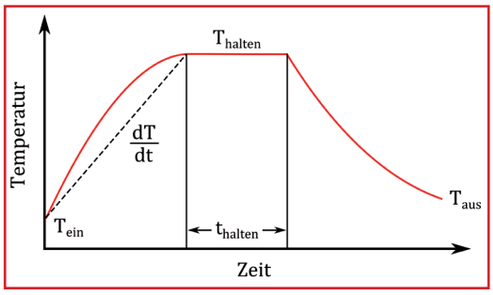

Bild 1: Temperaturprofil des Bandes in der Anlage mit einigen Größen, die zur Beschreibung der Wärmebehandlung dienen.

Walzprodukte aus Kupferlegierungen bilden das Ausgangsmaterial für eine breite Palette von Anwendungen. Je nach Einsatzgebiet sind daher unterschiedliche Materialeigenschaften von Bedeutung. Diese Eigenschaften lassen sich einerseits durch die chemische Zusammensetzung der Legierung und andererseits durch die Prozessführung während der Herstellung beeinflussen. Um für den jeweiligen Zweck den optimalen Kompromiss aus Härte, Umformbarkeit, Korrosionsbeständigkeit, Leitfähigkeit und Relaxationsverhalten einstellen zu können, müssen Zusammensetzung und Prozess aufeinander abgestimmt sein. Um die gewünschten Eigenschaften eines Produktes einzustellen, wird es abwechselnd kaltgewalzt und wärmebehandelt. Die Materialeigenschaften werden durch die thermisch aktivierte Entwicklung des Gefüges bestimmt. Daher kommt dem Temperaturprofil des Materials während der Wärmebehandlung eine entscheidende Bedeutung zu. Bild 1 zeigt an einem einfachen Beispiel, wie sich das Profil beschreiben lässt. Ausgehend von der Eingangstemperatur des Materials soll mit einer definierten mittleren Aufheizrate eine Temperatur für eine gewisse Zeit gehalten werden. Das Band darf nach der letzten Kühlzone die Austrittstemperatur nicht überschreiten.

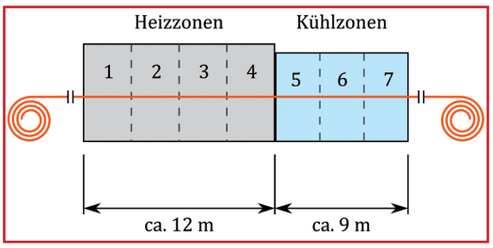

Bild 2: Schematische Darstellung des Ofens mit vier Heizzonen und angeschlossener Kühlstrecke mit drei Zonen.

Im Zuge der Werkstoffentwicklung wird in Laborversuchen ermittelt, welches Temperaturprofil für ein bestimmtes Produkt erforderlich ist, um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen. Die Schwierigkeit besteht nun darin, die Ergebnisse aus dem Labor auf die Produktionsanlage zu übertragen und dort das ermittelte Profil zu reproduzieren. Dies geschieht in der Praxis meist durch systematisches Ausprobieren. Eine Anlageneinstellung, die der Erfahrung nach sinnvoll scheint, wird gewählt und die erreichten Materialeigenschaften untersucht. Anschließend werden die Einstellungen leicht angepasst, bis die erwünschten Ergebnisse erreicht werden. Das so gewonnene produktspezifische Rezept wird in einer Datenbank hinterlegt und muss beispielsweise für ein und dieselbe Legierung in Abhängigkeit der Produktgeometrie mehrfach ermittelt werden.

An diesem Punkt bietet das bei der Otto Junker GmbH entwickelte Werkzeug eine Hilfestellung. Durch Anwendung eines physikalisch motivierten Prozessmodells kann das Temperaturprofil des Materials für jeden Betriebspunkt der Anlage berechnet werden. Der auf diesem Modell basierende Rezeptgenerator löst das inverse Problem: Zu einem vorgegebenen Temperaturprofil werden die entsprechenden Sollwerte für die Anlage ermittelt. Der Betreiber kann so in seinem Prozess die metallurgisch begründeten Anforderungen, wie Aufheizraten, Haltezeiten und Haltetemperaturen direkt in der Anlagensteuerung vorgeben.

Prozessmodellierung

In Bild 2 ist der Geltungsbereich des Prozessmodells schematisch dargestellt. Dabei handelt es sich um einen typischen Bandschwebeofen mit angeschlossener Kühlstrecke zur Wärmebehandlung von Kupferlegierungen. In den Heizzonen wird das Band durch das Düsensystem auf einem Druckpolster berührungslos schwebend geführt und gleichzeitig hoch konvektiv beheizt. Die folgende Kühlstrecke arbeitet nach dem gleichen Prinzip. Das Temperaturprofil des Bandes im Ofen wird mit Hilfe der Finite Volumen Methode (FVM) berechnet. Weiterführende Informationen zu dieser Methode sind beispielsweise in [Sch06] oder [DR08] zu finden. Dazu wird das betrachtete System aus Band und Ofen in ortsfeste Kontrollvolumen eingeteilt, an deren Grenzflächen Energie- und Massenströme definiert werden. Zusätzlich können Quellen und Senken in den Elementen vorhanden sein.

Bild 3 zeigt dies für einen Ausschnitt einer Zone. Die Kontrollvolumen, die das bewegte Band repräsentieren, sind untereinander durch zwei Energieströme verknüpft. Die durch Wärmeleitung entstehenden Wärmeströme sind mit dem Index λ gekennzeichnet, der Enthalpiestrom des bewegten Bandes mit dem Index $\dot{m}$. Die Atmosphäre gibt sowohl Energie an das Band als auch an das Ofengehäuse ab. Diese konvektiven Wärmeströme sind mit dem Index α markiert. Zwischen Gehäuse und Band findet ein Energietransport durch Strahlung statt, was durch den Index ε angedeutet ist. In der Atmosphäre gibt es zwei Wärmequellen. Den größten Anteil liefern die Brenner des Ofens aber auch der Wärmeeintrag durch die Ventilatoren wird berücksichtigt. Die Wärmeverluste im Gehäuse werden hier als einfache Wärmesenke modelliert.

Mit den vorgestellten Energieströmen, Quellen und Senken lässt sich für jedes Kontrollvolumen eine Energiebilanz aufstellen. Informationen hierzu und zur mathematischen Beschreibung der einzelnen Ströme sind in zahlreichen Publikationen wie zum Beispiel [BS13] und [Pfe07] zu finden. Für die zeitliche Änderung der Temperatur eines infinitesimal kleinen Kontrollvolumens gilt demnach folgender Zusammenhang:

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}\rho c_p V = \int_A \dot{q}_A \mathrm{d}A + \int_V \dot{q}_V \,\mathrm{d}V$$

Die Energieströme durch die Flächen $\dot{q}_A$ werden über die gesamte Oberfläche A des Volumens V integriert. Die volumenbezogenen Quellterme $\dot{q}_V$ werden dagegen über V integriert. Zusammen mit der Dichte und der spezifischen Wärmekapazität ergibt sich so die zeitliche Änderung der Temperatur. Der Energiestrom zwischen zwei Volumen ist für beide betragsmäßig gleich, jedoch mit unterschiedlichen Vorzeichen behaftet. Dadurch ist die Einhaltung des Energieerhaltungssatzes stets gegeben. Bis zu diesem Punkt ist die FVM noch immer exakt, es wurde keine Vereinfachung vorgenommen.

Um das bei der Berechnung der Energiebilanzen entstehende System gekoppelter Differentialgleichungen lösen zu können, müssen allerdings gewisse Vereinfachungen in Kauf genommen werden. Die Anzahl und somit die Größe der betrachteten Kontrollvolumen ist durch die verfügbare Rechenleistung beschränkt. Daher kann die Temperatur nur an diskreten Stellen in Ort und Zeit aufgelöst werden, wodurch Ungenauigkeiten entstehen. Auch bei der Modellierung der Wärmeströme müssen Vereinfachungen vorgenommen werden. Der konvektive Wärmeübergang zwischen Atmosphäre und Band wird durch das sehr komplexe Zusammenwirken von Temperatur- und Strömungsfeld im Ofen bestimmt. In der Regel wird hier durch die Verwendung des Wärmeübergangskoeffizienten α vereinfacht. Die Genauigkeit des Modells hängt demnach auch entscheidend davon ab, wie gut die Einflüsse der unterschiedlichen Prozessparameter verstanden und mathematisch abgebildet sind. So gibt es beispielsweise umfangreiche Untersuchungen zur Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten von der Temperatur und der Düsenaustrittsgeschwindigkeit für verschiedene Arten von Düsenfeldern [VDI06]. Dies wird im Modell berücksichtigt.

Rezeptgenerator

Basierend auf dem beschriebenen FVM-Modell löst der Rezeptgenerator das inverse Problem. Anstatt zu einem Betriebspunkt der Anlage das entsprechende Temperaturprofil im Band zu berechnen, wird zu einem gegebenen Profil der passende Betriebspunkt der Anlage ermittelt. Dabei müssen unterschiedliche Randbedingungen eingehalten werden. Zunächst müssen technische Einschränkungen bedacht werden. Beispielsweise beeinflusst die Ventilatordrehzahl nicht nur den Wärmeübergang, sondern auch das Schwebeverhalten des Bandes. Weiterhin dürfen aufgrund der entstehenden Thermospannungen zwischen zwei Ofenzonen keine beliebig hohen Temperaturgradienten auftreten. Die verfügbare Brennerleistung muss bei der Wahl des Betriebspunktes ebenfalls berücksichtigt werden. Des Weiteren muss das durch Aufheizrampen, Haltezeiten und Haltetemperaturen definierte Temperaturprofil eingehalten werden. Dabei kann der Anwender noch weitere Bedingungen festlegen, um aktuellen Umständen Rechnung tragen zu können, wie beispielsweise eine feste Bandgeschwindigkeit.

Das Generieren eines Rezeptes ist ein iterativer Prozess, wie es in Abbildung 4 schematisch dargestellt ist. Ausgangspunkt ist ein angenommener Betriebspunkt für die Anlage. Durch Anwendung des FVM-Modells wird das Temperaturprofil des Bandes ermittelt. Dadurch sind unter anderem auch die benötigten Brennerleistungen und die auftretenden Temperaturgradienten im Ofengehäuse bekannt. Nun wird die Qualität der Lösung geprüft. Sind alle Randbedingungen erfüllt, ist die endgültige Lösung gefunden. Ist das nicht der Fall, wird die Lösung mit dem Ziel angepasst, die bestehenden Vorgaben besser zu erfüllen. Nun wird das FVM-Modell erneut angewandt und das Ergebnis bewertet. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis ein gültiges Ergebnis gefunden wurde. Der Rezeptgenerator kann sowohl in die Anlagensteuerung integriert, als auch auf einem PC verwendet werden. Durch gezielte Variation ausgesuchter Prozessgrößen kann untersucht werden, wie groß deren Einfluss auf das Endergebnis der Wärmebehandlung ist. Dies hilft bei der Entscheidung, mit wie viel Aufwand bestimmte Größen im Prozess geführt werden müssen.

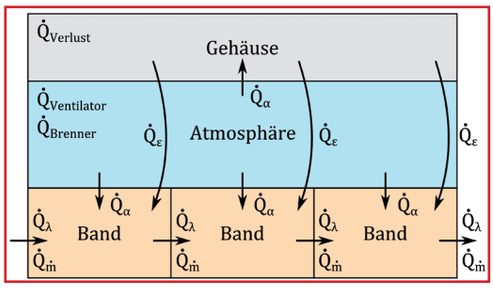

Bild 3: Ausschnitt der Kontrollvolumen zur Beschreibung einer Heiz- bzw. Kühlzone. Die auftretenden Energieströme, sowie die vorhandenen Quellen und Senken sind eingezeichnet.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem vorgestellten Rezeptgenerator werden auf der Grundlage eines FVM-Modells die Prozessparameter einer Produktionsanlage so eingestellt, dass sich im Material ein vorgegebenes Temperaturpro-

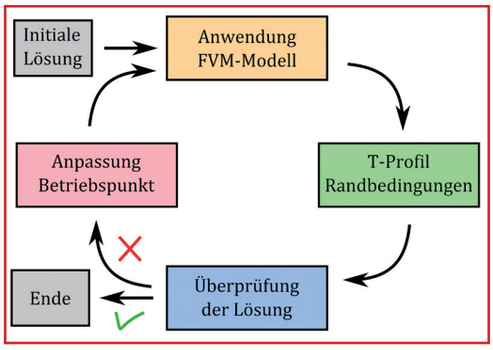

Bild 4: Iteratives Vorgehen des Rezeptgenerators. Die bestehende Lösung wird so lange angepasst, bis alle Randbedingungen erfüllt sind.

fil ausbildet. Das erforderliche Profil wird im Rahmen der Werkstoffentwicklung in Laborversuchen ermittelt.
Der Rezeptgenerator hilft bei der Übertragung der Laborversuche auf die Produktion. Aus Sicht der Qualitätssicherung ergibt sich der Vorteil, dass die Wärmebehandlung nun direkt über den Temperatur-Zeit-Verlauf des Materials beschrieben werden kann und somit unabhängig von der Geometrie des Bandes ist.

Literatur

[BS13] Baehr, H.D. und Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung. Springer Berlin Heidelberg, 2013.

[DR08] Dahmen, W. und Reusken, A.: Numerik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Springer-Lehrbuch. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

[Pfe07] Pfeifer, H.: Taschenbuch industrielle Wärmetechnik: Grundlagen, Berechnungen, Verfahren. Vulkan-Verlag, 2007,

[Sch06] Schäfer, M.: Computational Engineering – Introduction to Numerical Methods. Springer, 2006.

[VDI06] VDI Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen: VDI-Wärmeatlas. Springer, 2006.

(1) Dipl.-Ing. Simon Künne, Dr.-Ing. Günter Valder, Otto Junker GmbH, Simmerath-Lammersdorf

Simulation der Kombination von Kippung und Versetzung auf die Exzentrizität und Eigenspannungen von Rohren beim Gleitziehen

Foadian, F. (1); Carradó, A. (2); Palkowski, H. (1)

Die Reduzierung der Toleranzen und Einstellung spezifischer Größen in Rohren, hier Exzentrizität und Eigenspannungen, führt zu einer verbesserten Materialeffizienz.

Die wirtschaftliche Bedeutung liegt hier in der Reduzierung der Masse bei gleicher Belastbarkeit, interessant für Werkstoffe mit einem hohen Materialkostenanteil. Zudem bietet eine lokale, gesteuerte Exzentrizitätserhöhung die Möglichkeit, die Massenverteilung in einem Rohr (lokal über Umfang und Länge) so zu gestalten, dass für nachfolgende Umformprozesse an geeigneter Stelle mehr Material zur Verfügung steht und damit z.B. Versagen durch Ausdünnung und nachfolgender Rissbildung reduziert wird. Im einem Projekt im Institut für Metallurgie wurde an nahtlos gezogenen Kupferrohren der Einfluss der Matrizenkippung und –verschiebung bei Einsatz einer Führungsmatrize im Einlauf auf die Exzentrizitätsbeeinflussung und Eigenspannungsausbildung untersucht. Bei Kippung der Ziehmatrize ließ sich die Exzentrizität je nach Kippswinkel und in Abhängigkeit von der Lage des Wanddickenmaximums/ -minimums gegenüber dem ungekippten Normalzug (Winkel 0°) deutlich erhöhen/reduzieren. Ein Verschieben in Richtung des Maximums führte mit zunehmendem Versatz zu einer Verschlechterung der Exzentrizitätswerte, eine Verbesserung wurde reproduzierbar bei umgekehrter Verfahrensweise erzielt. Im diesen Projekt werde die Auswirkung der Kombination von Kippung und Versetzung auf die Exzentrizität und Eigenspannungen mittels Finite-Element-Methode untersucht. Für die Simulation wurde die FE-Software ABAQUS/Explicit in der Version 6.14 verwendet.

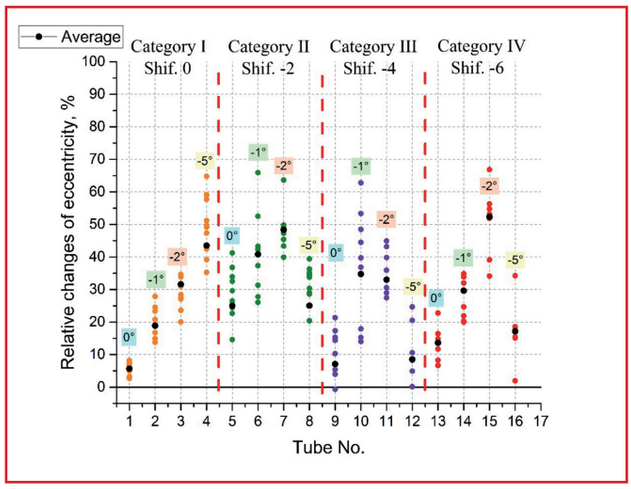

Bild 1: Einfluss der negativen Verschiebung auf der Exzentrizität in Rohrziehen mit verschiedenen Kippwinkeln (Kupferrohren mit 65 x 5,5 mm - Außendurchmesser x Wandstärke - sind an 55 x 4,5 mm gezogen)

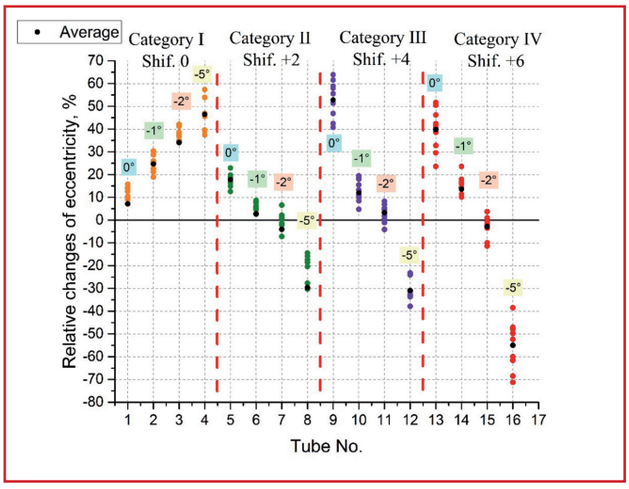

Bild 2: Einfluss der positiven Verschiebung auf der Exzentrizität in Rohrziehen mit verschiedenen Kippwinkeln (Kupferrohren mit 65 x 5,5 mm - Außendurchmesser x Wandstärke - sind an 55 x 4,5 mm gezogen)