

Bild 1

Aus der Energiedichte berechnete Temperaturverteilung für eine Gießrollengeschwindigkeit von 0,45 m/s und einem Wärmestrom von 12 MW/m². Deutlich erkennbar: das Stromlinienbild zeigt einen durch die Gießrollen angetriebenen Wirbel

Modellierung von Stoff- und Wärmetransport beim Bandgießen

Um bei der Stahlerzeugung qualitativ hochwertige Produkte herstellen zu können, müssen bestimmte Parameter wie beispielsweise die technische Bereitstellung einzelner Komponenten, die Geschwindigkeit des gesamten Prozesses, Menge und Temperatur der Luftkühlung optimiert werden. Allerdings ist es praktisch unmöglich, direkte Messungen im über 1500 °C heißen flüssigen Stahl mit seiner hohen Fließgeschwindigkeit durchzuführen. Um die Resultate der verschiedenen Parametereinstellungen ‚sehen‘ zu können, wurde im folgenden Aufsatz ein multiphysikalisches Modell erstellt, das sowohl den Massentransport, als auch Energie- und Impulsbilanz berücksichtigt und die innere Temperatur des Stahls als Funktion des Ortes und der Zeit darstellt.

und in Linie in mehrgerüstigen Walzwerken zu Bänder mit einer Dicke von ca. 3 mm ausgewalzt. Die erforderliche Dickenreduktion von 200 mm auf 3 mm erfordert eine größere Zahl von Umformschritten. Beim Bandgießen erfolgt dagegen die Schmelzzufuhr in den Zwischenraum (Gießspalt) zwischen zwei sich gegenläufig drehenden Gießrollen. Das dabei endabmessungsnah erzeugte Band hat eine Dicke von etwa 2 bis 3 mm. Über die Rollenoberfläche werden Wärmeströme in der Größenordnung von 10 MW/m² abgeführt. Gießen, Erstarren und Formgebung erfolgen in einem Prozessschritt. Die Grundidee für dieses Verfahren stammt von Bessemer und ist über 100 Jahre alt. Wegen des komplizierten Wechselspiels von Impuls- und Energietransport im Gießspalt sowie einer anspruchsvollen Prozessregelung ist eine technische Umsetzung des Verfahrens aber erst jetzt möglich geworden.

Autoren

Roland Sellger
Ingenieurbüro Dr. Sellger
Ratiborerstr. 11
40880 Ratingen
E-Mail: Roland.
Sellger@thyssenkrupp.com

Lutz Ernenputsch,
ThyssenKrupp Nirosta GmbH
Krefeld

Kontakt zu COMSOL:
FEMLAB GmbH
Berliner Str. 4
37073 Göttingen
Tel.: 05 51/9 97 21-0
Fax: 05 51/9 97 21-29
E-Mail: info@femlab.de
www.femlab.de
www.comsol.com

Zusammenfassung

Das gekoppelte Problem von Energie- und Impulstransport wird mit COMSOL Multiphysics für das Bandgießen gelöst. In den Gleichungen für den Energietransport ist die bei der Erstarrung freiwerdende Umwandlungswärme zu berücksichtigen. Dies geschieht durch die Einführung eines Parameters f , der den erstarrten festen Anteil beschreibt. Dieser Parameter hängt nur von der Temperatur ab. Im Zweiphasengebiet wächst f monoton von 0 bei der Liquidustemperatur auf 1 bei der Solidustemperatur. In COMSOL-Multiphysik sind die Variablen und Parameter der Wärmeleitungsgleichung entsprechend zu modifizieren. Die Viskosität ist eine schnell zunehmende Funktion von f .

Der Einfluss der Geschwindigkeit der Gießrollen wird diskutiert. Aus dem Strömungs- und Temperaturfeld werden Größen abgeleitet, die auf mikroskopischer Ebene das Gefüge des Bandes beschreiben. Mit dem Modell lassen sich Regelstrategien optimieren und das zu erwartende Gefüge beschreiben.

Einleitung

Die Erzeugung von Warmband in der Stahlindustrie erfolgt aus quaderförmigen Brammen, die in Stranggießanlagen vergossen werden. Die Dicke der Brammen liegt bei etwa 200 mm. Nach dem Transport von der Stranggießanlage zur Warmbandstrasse werden diese im Ofen auf eine Temperatur auf ca. 1200°C wiedererwärmt und dann reversierend in Vorwalzgerüsten

Prozessgeometrie

Bei der ThyssenKrupp Nirosta GmbH in Krefeld wird eine Bandgießanlage betrieben. Der Gießrollendurchmesser beträgt 1,5 m. Für Untersuchungszwecke steht am Institut für Bildsame Formgebung (IBF) der Rheinisch-Westfälischen Hochschule (RWTH) Aachen eine kleinere Laboranlage zur Verfügung. Der Prozess wird hier für

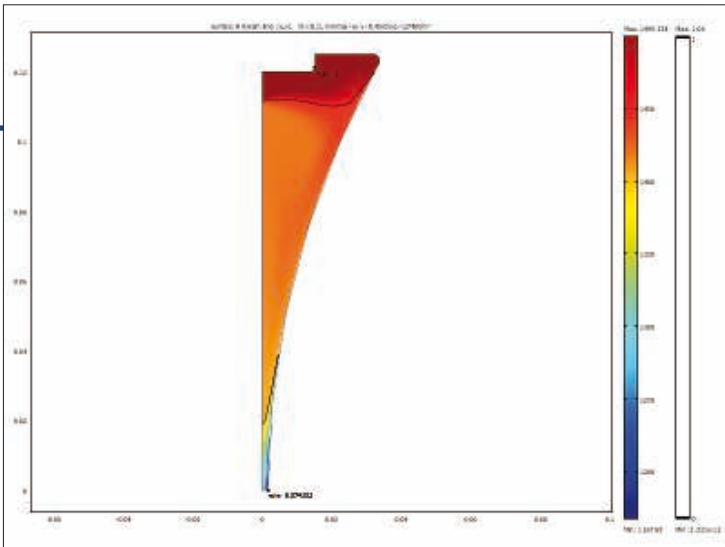


Bild 2

Stromlinienbild: Isolinie für $f = 0$ und $f = 1$ als schwarze Linie

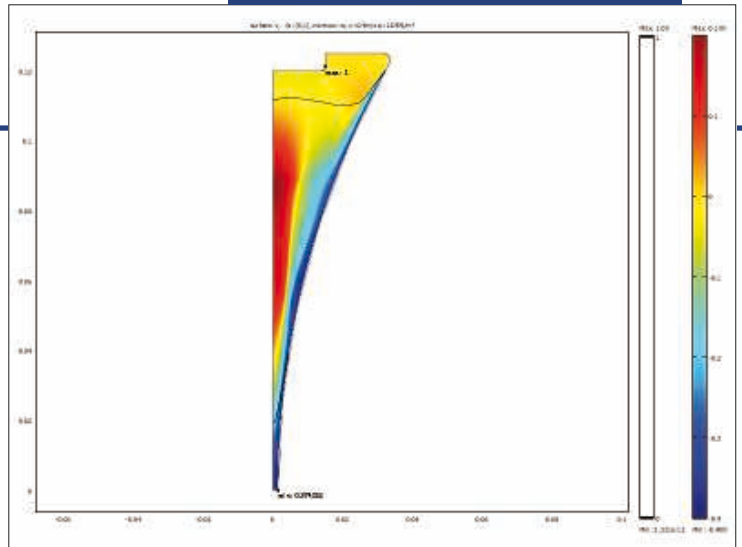


Bild 3

Darstellung der y-Komponente der Geschwindigkeit und die Isolinie bei 0.4 m/s und 12 MW/m²

diese Laboranlage modelliert. Der Radius der Gießrollen sei R , die Banddicke sei $2d$. Die Rollen drehen sich mit einer Winkelgeschwindigkeit ω . Der Raum zwischen den Gießrollen bis zur Poolhöhe H ist mit Material gefüllt, das sich entweder im flüssigen, festen oder zweiphasigen Zustand befindet. In der Mitte der Pooloberfläche wird die Schmelze über eine Gießdüse zugeführt. Die Breite der Gießdüse liegt nahe bei der Rollenbreite, so dass angenommen werden kann, dass die betrachteten Felder nicht von der Breitenachse (z) abhängen. Aus Symmetriegründen wird nur ein Halbraum $x > 0$ betrachtet, die Ebene $x = 0$ ist Symmetrieebene. Die betrachtete Geometrie ist aus Bild 1 ersichtlich. Als Gießdüse wird eine poröse Struktur verwendet. Die Versorgung mit Schmelze erfolgt über einen mittigen Zufluss. Die Aufgabe der porösen Struktur ist es, die Schmelze möglichst gleichmäßig über die Oberfläche dem Schmelzenraum zuzuführen. Die Einzelheiten der Strömung in der porösen Gießdüse werden hier nicht betrachtet. Es wird angenommen, dass die Schmelze an den Außenwänden horizontal und vertikal nach unten gleichmäßig austritt. Um Singularitäten zu vermeiden, wurde die untere Außenkante der Gießdüse mit einem Viertelkreis abgerundet und in diesem Bereich keine Ausströmung angenommen.

Der mit Schmelze bzw. dem erstarrten Band gefüllte Raum wird als Pool bezeichnet. Um Singularitäten am Kontaktpunkt von Pooloberfläche mit der Gießrolle zu vermeiden, wurde dieser durch einen

Kreisbogen angenähert.

Der Modellierung des Bandgießens kommt insofern eine besondere Bedeutung zu, da es experimentell nahezu unmöglich ist, in über 1500°C heißen Stahlschmelzen Geschwindigkeiten und Temperaturen ortsaufgelöst zu messen.

Theoretische Grundlagen

Bei der Behandlung des Problems sind der Impuls- und Energietransport zu berechnen. Über die Rollenoberfläche wird ein Wärmestrom abgeführt, der zur Abkühlung und Erstarrung der Schmelze führt. In Legierungen findet die Phasenumwandlung von flüssig nach fest über ein Temperaturintervall zwischen Liquidustemperatur T_l und Solidustemperatur T_s statt. Dabei bleibt die Phasengrenze nicht eben, sondern bildet eine dendritische Geometrie mit Haupt- und Nebenarmen aus. Die Details dieser dendritischen Form hängen von der Lösung der gekoppelten Gleichung von Impuls-, Energie- und Stofftransport (Diffusion) ab. Da der Diffusionskoeffizient um Größenordnungen kleiner als die Temperaturleitfähigkeit ist, ist die Dicke der sich ausbildenden Diffusionsgrenzschicht klein gegenüber der Ausdehnung der Temperaturgrenzschicht. Man kann daher von der konkreten Ausbildung der Dendritengeometrie absehen und mit einem mittleren Volumenanteil f an fester Phase rechnen. Bei $T > T_l$ ist $f = 0$, bei $T < T_s$ ist $f = 1$ und im Intervall zwischen T_l und T_s wächst f stetig von 0 auf 1 und es gilt

$f = f(T)$. Mit der Phasenumwandlung ist die Freisetzung einer beträchtlichen Umwandlungswärme L verbunden.

Ausgangspunkt ist die allgemeine Gleichung für den Entropietransport [1]:

$$\rho T \left(\frac{\partial s}{\partial t} + v \nabla s \right) - \sigma'_{ik} \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \nabla \circ (-k \nabla T) = 0 \quad (1)$$

$$\sigma'_{ik} = -p \delta_{ik} + \sigma'_{ik} = -p \delta_{ik}$$

Die Nichtdiagonalkomponenten des Spannungstensors σ_{ik} beschreiben die Wärmeerzeugung durch viskose Reibung. Dieser Anteil liegt um Größenordnungen unter dem Wärmehalt der Schmelze und wird daher vernachlässigt. Aus der Thermodynamik folgt eine Beziehung zwischen Entropiedichte s und der (Wärme)-Energiedichte w

$$T ds = dw = d(c_p T + L(1 - f(T))) \Rightarrow w = c_p T + L(1 - f(T)) \quad (2)$$

Dabei ist bezeichnet c_p die spezifische Wärme und T die Temperatur. Durch Umformung erhält man für den hier betrachteten stationären Fall

$$\rho c_p \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + v \nabla \bar{w} \right) + \nabla \circ \left(-\frac{k c_p}{w_0} \nabla T \right) = 0 \quad \bar{w} = w/w_0, \quad (3)$$

wobei noch eine Normierungskonstante w_0 eingeführt wurde. In dieser Gleichung kommen die Energiedichte w und die Temperatur als Va-

riablen T vor. Um w mit T zu verknüpfen ist jetzt eine Annahme über $f(T)$ notwendig. Die einfachste Form ist ein linearer Zusammenhang nach

$$f = \begin{cases} 0 & T > T_l \\ \beta & T_s \leq T \leq T_l \\ 1 & T < T_s \end{cases} \quad \beta = \frac{T_l - T}{T_l - T_s} \quad (4)$$

Prinzipiell sind auch andere Zusammenhänge möglich, wobei dann allerdings zur Berechnung der Temperatur aus w implizite Gleichungen zu lösen sind. Damit lässt sich w durch T oder T durch w ausdrücken. Aus den Beziehungen zwischen w und T

$$w(T) = \begin{cases} c_p T + L & T > T_l \\ c_p T + L(1 - \beta) & T_s < T < T_l \\ c_p T & T < T_s \end{cases} \quad \frac{dw}{dT} = c_p^* = \begin{cases} c_p & T > T_l \vee T < T_s \\ c_p + L/(T_l - T_s) & T_s < T < T_l \end{cases} \quad (5)$$

folgt schließlich

$$\rho c_p v \nabla \bar{w}(T) + \nabla \circ \left(-\frac{k c_p}{w_0 c_p^*} \nabla \bar{w} \right) = \rho c_p v \nabla \bar{w}(T) + \nabla \circ \left(-\frac{k c_p}{w_0 c_p^*} \nabla \bar{w} \right) = 0 \quad (6)$$

Durch die Transformation

$$T \rightarrow \bar{w}, \quad k \rightarrow k c_p / (w_0 c_p^*) \quad (7)$$

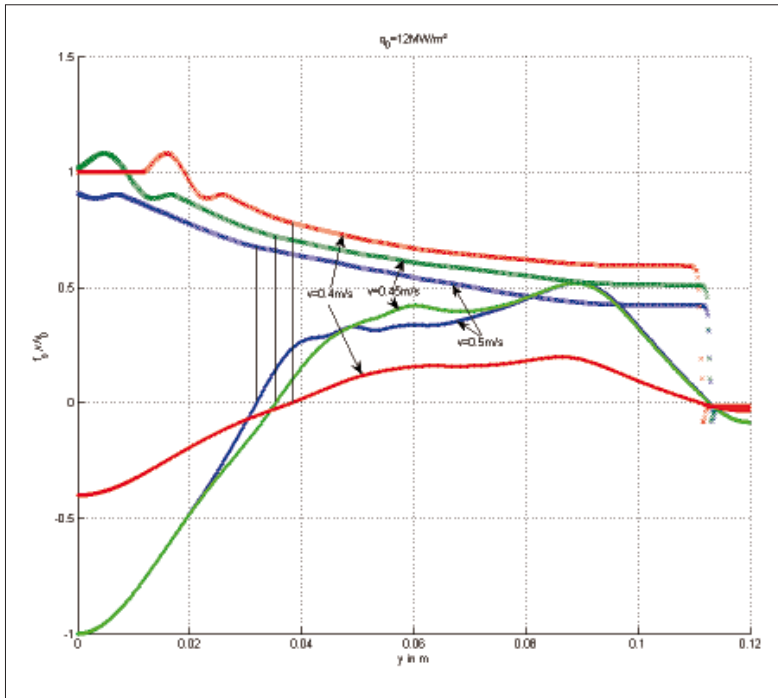


Bild 4
Darstellung der y-Komponente der Geschwindigkeit und der Anteil fester Phase (x) für eine Gießrollengeschwindigkeit von 0.5, 0.45 und 0.4 m/s

höht. Mit der so erhaltenen stabilen Lösung lassen sich dann Parametervariationen durchführen.

Ergebnisse

Bild 1 zeigt die aus der Energiedichte berechnete Temperaturverteilung für eine Gießrollengeschwindigkeit von 0.45 m/s und einem Wärmestrom von 12 MW/m². Die angegebenen Min-Max-Werte stehen für die normierte Energiedichte. Das Stromlinienbild zeigt einen durch die Gießrollen angetriebenen Wirbel. Dieser führt an der Gießrollenoberfläche abgekühlte und relativ kalte Schmelze wieder in Richtung Pooloberfläche. Dadurch entsteht ein ausgedehnter zweiphasiger Bereich. Das wird deutlicher im Bild 2, wo die Isolinie für $f = 0$ und $f = 1$ als schwarze Linie eingezeichnet ist. Bild 3 zeigt für 0.4 m/s und 12 MW/m² die y-Komponente der Geschwindigkeit und die Isolinie für $f = [0 \ 1]$. Entlang der Symmetrieebene $x = 0$ gibt es zwei Stagnationspunkte, einmal im oberen Bereich, wo die aus der Gießdüse austretende Schmelze mit der aufwärts strömenden Schmelze zusammentrifft und im unteren Bereich. Die Lage des unteren Stagnationspunktes hat für das Gefüge eine besondere Bedeutung. Sind die Dendritenspitzen bereits vor dem unteren Stagnationspunkt bis zur Symmetrieebene gewachsen, so werden sie durch die aufwärts steigende Schmelze nach oben gebogen. Erreichen sie erst nach dem Stagnationspunkt die Bandmitte, so werden sie nach unten gebogen. Ein Maß für die Lage der Dendritenspitzen ist der Anteil fester Phase. Die y-Komponente der Geschwindigkeit (\cdot) und der Anteil fester Phase (x) sind für eine Gießrollengeschwindigkeit von 0.5, 0.45 und 0.4 m/s im Bild 4 dargestellt. Die Position des unteren Stagnationspunktes ist durch schwarze senkrechte Linien gekennzeichnet. Aus der Abbildung kann dann der zugehörige Anteil fester Phase ermittelt werden. Diese Beziehung ist in Bild 5 dargestellt. Mit zunehmender Geschwindigkeit nimmt der Anteil fester Phase am Stagnationspunkt ab und damit auch die Tendenz die Dendritenspitzen aufwärts zu biegen. Dies ist auch in

entspricht diese Gleichung formal der in COMSOL-Multiphysics implementierten Wärmeleitungsgleichung. Dabei sind allerdings die Randbedingungen gemäß

$$T = T_0 \rightarrow \bar{w} = 1 \quad q \rightarrow q/T^* \\ T^* = T_0 + (T_l - T_s) \Delta H \quad \Delta H = \frac{L}{c_p(T_l - T_s)} \quad (8)$$

ebenfalls zu transformieren, wobei zur Vereinfachung noch die Größen T^* und ΔH eingeführt wurden. Auch für kompliziertere Randbedingungen, wie eine Wärmeübergangszahl lassen sich leicht Transformationen finden.

Der Energietransport ist über die Strömungsgeschwindigkeit $u = (u, v)$ vom Impulstransport (inkompressible stationäre Navier-Stokes-Gleichung) abhängig. Mit zunehmenden Anteil an fester Phase f nimmt die Viskosität η der Schmelze stark zu. Dies wird durch Gleichung (9) modellhaft beschrieben, wodurch eine Rückkopplung zwischen Impuls- und Energietransport erfolgt.

$$\eta(T) = \eta_0 + \eta_1 \theta(f - f_c) \quad f_c = 0,7 \quad (9)$$

Numerisches Modell und Randbedingungen

Die Umrechnung von Energiedichte w in Temperatur erfolgt durch über den zu lösenden Bereich

definierte Gleichungen entsprechend (5). Dabei gelten unterschiedliche Gleichungen, je nachdem ob sich die der Netzknoten im flüssigen, festen oder zweiphasigen Zustand befindet. Das erfordert besondere Sorgfalt, um eine konvergente Lösung zu erhalten.

Da die Gießrollenoberfläche sich mit der Geschwindigkeit $v_0 = \omega R$ bewegt, ist für die Geschwindigkeit an der Oberfläche die Randbedingung

$$u(R) = -v_0 y/R \cdot \theta(y_c - y) \quad (10) \\ v(R) = -v_0(R + d - x)/R \cdot \theta(y_c - y)$$

zu erfüllen. Die dabei eingeführte (geglättete) θ -Funktion verhindert Unstetigkeiten am oberen Kontaktpunkt von Schmelze und Gießrolle. Obwohl es experimentelle Hinweise auf eine ortsabhängige Wärmestromdichte q_0 gibt, wurde für die hier beschriebenen Ergebnisse diese gleich dem mittleren Wärmestrom gesetzt, der aus dem Experiment bestimmt wurde $q = q_0/T^*$.

Dabei ist die oben genannte Transformation berücksichtigt worden. Über die beiden Seitenflächen der Gießdüse wird die Schmelze mit der Temperatur T_0 und der Geschwindigkeit $|v_1|$ zugeführt, was zu den Randbedingungen $u = v_1, v = 0 \quad u = 0, v = v_1 \quad \bar{w} = 1$ führt. Dabei bestimmt sich v_1 so, dass der in den Pool hineinströmende Volumenstrom gleich dem herausströmenden Volumenstrom

$v_0 d$ ist. Wieder ist die Transformation $T \rightarrow \bar{w}, k \rightarrow kc_p/(w_0 c_p^*)$ dabei zu berücksichtigen. Am unteren engstem Rollenspalt tritt das Band mit der Geschwindigkeit v_0 aus dem Pool. Das führt zu den Randbedingungen $u = 0, v = -v_0 \quad \nabla \bar{w} = 0$. An der Symmetrieebene $x = 0$ sind jeweils symmetrische Randbedingungen zu erfüllen $u = 0 \quad \nabla \bar{w} = 0$ (14). Für die übrigen Gebiete an der Oberfläche wurden Randbedingungen $nu = 0 \quad \nabla \bar{w} = 0$ festgesetzt. Durch die wechselseitige Kopplung ist das Auffinden einer konvergenten Lösung besonders schwierig und es kommt auf eine geeignete Startlösung an. Dazu wurde zunächst die Laplace-Gleichung für das betrachtete Gebiet gelöst. Aus der Lösung φ wurde über $u = \text{grad } \varphi$ eine Anfangslösung für das Geschwindigkeitsfeld u bestimmt. Diese Lösung für das Strömungsfeld wurde zunächst ohne Kopplung mit dem Energietransport mit dem linearen Löser verbessert und dann mit dem nichtlinearen Löser (Isotrope Diffusion in der Standardeinheit) eine stabile Lösung für den Impulstransport gefunden. Danach wurden Impuls- und Energietransport mit der Randbedingung $q = 0$ gekoppelt berechnet. Unter dieser Randbedingung bleibt die Energiedichte zunächst konstant. Im Weiteren wurde q über den parametrisch nichtlinearen Löser schrittweise bis zum Sollwert er-

den Gefügen der Bänder wieder zu finden.

Das Modell gestattet die Berechnung weiterer interessanter Größen, die für das Prozessverständnis von Bedeutung sind. Dazu gehört die Verweildauer t_f der Schmelze im Zweiphasengebiet. Diese Zeitdauer bestimmt entsprechend der Beziehung $\lambda \sim t_f^n$ den Abstand der sekundären Dendriten-arme.

Schlussfolgerungen

Das gekoppelte Impuls- und Energietransportproblem beim Bandgießen lässt sich durch COMSOL-Multiphysics lösen. Dabei spielt die genaue Berücksichtigung der bei der Erstarrung freiwerdenden Umwandlungswärme eine wesentliche Rolle. Dies erfolgte durch Einführung einer Funktion f , die den Anteil an fester Phase beschreibt und nur von der Temperatur abhängt. Im Zweiphasengebiet wächst der Anteil der festen Phase f monoton von 0 bei der Liquidustemperatur auf 1 bei der Solidustemperatur. Ein einfacher linearer Ansatz für $f(T)$ wurde verwendet. Mit zunehmendem Anteil an fester Phase wächst die Viskosität an.

Dies wurde durch eine geeignete Funktion $\eta(T)$ berücksichtigt.

Das Geschwindigkeitsfeld zeigt einen Wirbel, der durch die sich drehenden Gießrollen erzeugt wird. Dadurch wird relativ kalte Schmelze in Richtung Pooloberfläche transportiert. Dies führt dazu, dass ein großer Volumenanteil des Pools zweiphasig ist. Entlang der Symmetrieebene hat die y-Komponente der Geschwindigkeit zwei Stagnationspunkte. Der obere Stagnationspunkt entsteht durch das Zusammentreffen von aufsteigender Schmelze mit der nach unten gerichteten Strömung aus der Gießdüse. Der untere Stagnationspunkt beeinflusst die Gefügeausbildung. Mit zunehmender Geschwindigkeit nimmt der Anteil fester Phase am Stagnationspunkt ab und damit auch die Tendenz die Dendritenspitzen aufwärts zu biegen. Dies ist auch in den Gefügen der Bänder wieder zu finden.

Aus dem Strömungs- und Temperaturfeld können weitere für die Gefügeausbildung relevante Größen, wie die Verweildauer eines Massepunktes im Zweiphasengebiet berechnet werden und es lässt sich zur Untersuchung einer optimalen Regelstrategie nutzen.

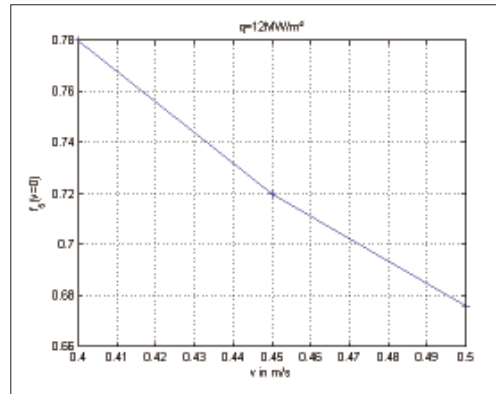


Bild 5

Ermittlung des zugehörigen Anteils der festen Phase

Fazit

Anhand dieses Multiphysik-Modells können wir verstehen, was sich innerhalb des Metalls beim Übergang von der geschmolzenen in die feste Phase abspielt. Mithilfe der Modellierung – auf andere Weise ist ein Einblick in die inneren Prozesse kaum möglich – können wir bestimmen, wo und wie dieser Prozess verändert werden kann, um den Durchsatz zu optimieren und um die Qualität des Endproduktes noch weiter zu verbessern. Das Beispiel lässt das enorme Potenzial der Multiphysik-Simulation für die Produktentwicklung und -optimierung erahnen. Weitere Einsatzmöglichkeiten der Modellierung bieten sich

auch an in Bereichen wie z.B. mechanische Untersuchungen von Schweißvorgängen (z.B. Reibschweißen, Laserschweißen) und den damit zusammenhängenden physikalischen Prozessen.

Literatur

[1] Landau, L.D.; Lifschitz, E.M.: *Lehrbuch der theoretischen Physik*. Berlin: Akademieverlag, Band VI, (1991), S. 243
Der Text dieses Beitrag stammt aus dem Tagungsbandes von der Anwenderkonferenz Multiphysik-Simulation, die am 30. und 31. Oktober 2006 in Frankfurt/Main stattfand. Der Tagungsband kann bei Femlab, Göttingen, angefordert werden.