

Kurzzeitwärmebehandlung von Kupfer- und Kupferlegierungen im Werkstofflabor unter Glühbedingungen wie in Banddurchlaufanlagen

Berrenberg, T. (1)

Die Halbzeugeigenschaften von Bändern aus Kupfer- und Kupferlegierungen werden neben der Legierungszusammensetzung maßgeblich durch die letzten Produktionsschritte, einem abwechselnden Kaltwalzen und Wärmebehandeln, bestimmt. Bei größeren Materialstärken werden die Bänder nach dem Walzen meist in Hauben- oder Kammeröfen bei moderaten Temperaturen über viele Stunden einer „Langzeitwärmebehandlung“ unterzogen. Die Gefügeumwandlung, insbesondere die Rekristallisation, läuft dabei sehr langsam ab. Bei kleinen Materialdicken, ca. 50 μm bis 4 mm, werden die Bänder in Durchlaufanlagen einer „Kurzzeitwärmebehandlung“ unterzogen. Die Glühtemperaturen sind deutlich höher und die Glühdauer liegt dabei im Minutenbereich und bei sehr dünnen Bändern auch darunter. Mit den Prozessparametern der letzten Kurzzeitwärmebehandlung werden die endgültigen mechanischen Eigenschaften der Bänder eingestellt. In manchen Fällen werden diese noch durch einen abschließenden Walzstich mit geringem Umformgrad geringfügig modifiziert. Die metallphysikalischen Vorgänge bei der Kurzzeitwärmebehandlung sind dabei im Gegensatz zu der „Langzeitwärmebehandlung“ hochdynamisch und erfordern die genaue Einstellung und Einhaltung der Wärmebehandlungsparameter, um eine hohe und gleichbleibende Produktqualität zu erzielen. Dies wird beispielhaft im folgenden Beitrag dargestellt.

Ein Dilemma bei der Entwicklung neuer Werkstoffe oder bei der Prozessoptimierung besteht darin, dass sich ein Temperatur-/Zeitverlauf, wie er unter Produktionsbedingungen in Banddurchlaufanlagen erreicht wird, mit den üblichen Laboröfen, wie z.B. dem Kammerofen, dem Salzbadofen oder dem Sandbadofen, nicht nachbilden lässt. Aussagekräftig sind letztendlich nur Probeglühungen in Produktionsanlagen. In der Regel sind aber auch diese Versuche hinsichtlich der Glühparameter eingeschränkt, da Probebänder im Anschluss an Produktionsbändern mit deren Glühparametern geglüht werden. Um Probebänder bei von diesen „Standardrezepten“ abweichenden Glühparametern zu glühen, ist sehr viel mehr Zeit und Versuchsmaterial erforderlich, bis sich in der Bandglühanlage stationäre Zustände eingestellt

haben. Unter Umständen lassen sich die gewünschten Glühparameter in einer Produktionsanlage gar nicht einstellen, da Produktionsanlagen aus nachvollziehbaren wirtschaftlichen Gründen hinsichtlich der maximalen Glühtemperaturen und der erzielbaren Aufheiz- und Abkühlraten auf das Produktspektrum abgestimmt werden. Das Probeglühen in Produktionsanlagen ist darüber hinaus auch oft mit längeren Wartezeiten verbunden, da eine Probeglühung erst durchgeführt werden kann, wenn ein „passender“ Produktionsglühauftrag ansteht. Die Kosten für eine solche Probeglühung sind entsprechend hoch. Abhilfe schafft hier die WSP/ITP Hochkonvektions-Labor-Wärmebehandlungsanlage, die zur Zeit im Rahmen eines ZIM-Einzelprojekts (Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand) von der WSP gebaut wird. Mit dieser Anlage lassen sich

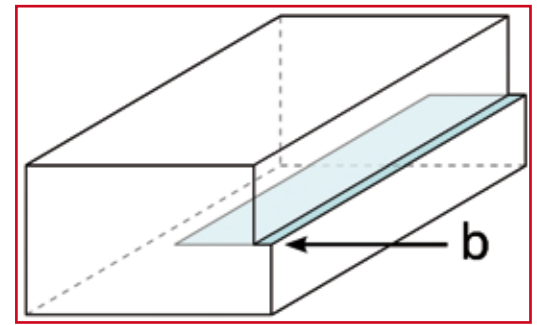


Bild 1: Schematische Darstellung und transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme von Versetzungen in einem kristallinen Gitter (Quelle: Wikipedia, oben: A.N. Cutler, unten: Wikityke)

Temperatur-/Zeitverläufe, wie sie unter Produktionsbedingungen in Banddurchlauföfen erreichen werden, einstellen. Die Anlage ist so konzipiert, dass in kurzer Zeit viele Glühversuche mit variierenden Glühparametern zu günstigen Kosten durchgeführt werden können. Außerdem ist das Prozessfenster hinsichtlich maximaler Glühtemperaturen und der erzielbaren Aufheiz- und Abkühlraten deutlich größer als in Standardproduktionsanlagen. Damit bietet die Anlage für die Werkstoffentwicklung und die Prozessoptimierung reizvolle Möglichkeiten.

Metallphysikalische Grundlagen

Das Kaltwalzen stellt einen Umformprozess dar, bei dem die Materialdicke oft bis zum Erreichen des zulässigen Umformgrades, bei dem noch keine Schädigungen durch Risse auftreten, vermindert wird. Die kristalline Mikrostruktur des Metalls wird dabei durch Deformation und „Quasi“ Zerstörung der ursprünglichen Kornstruktur sehr stark verändert, was sich makroskopisch in einer Verfestigung und Zunahme der Materialhärte und mikroskopisch in einer enormen Zunahme der Versetzungsdichte (auf das Volumen bezogene Gesamtlänge der eindimensionalen Gitterfehler, die Versetzungen

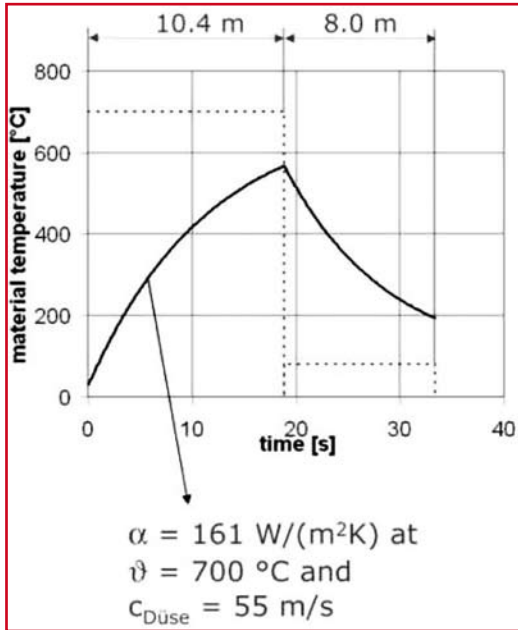


Bild 2: Exemplarischer Zeit-/Temperatur-Verlauf in einem WSP-Bandschwebeofen zur Wärmebehandlung von Bändern aus Cu und Cu-Legierungen

genannt werden, siehe Bild 1) widerspiegelt. Die Enthalpie oder Gesamtenergie des Systems nimmt dabei durch die in den Versetzungen gespeicherte Energie zu. Bei der auf den Umformvorgang folgenden Wärmebehandlung laufen grundsätzlich drei verschiedene Vorgänge ab, die Erholung, die Rekristallisation und das Kornwachstum, die die Gefügestruktur unter Abnahme der Enthalpie verändern. Bei der Erholung werden Versetzungen umgeordnet und ausgelöscht. Bei der Rekristallisation vollzieht sich eine vollständige Neubildung der Kornstruktur unter starker Abnahme der Versetzungsdichte. Wird die Wärmebehandlung fortgesetzt, findet ein Kornwachstum statt. Dabei wachsen größere Körner auf Kosten kleiner und die

in den Korngrenzen gespeicherte Energie wird minimiert. Das aus der Wärmebehandlung resultierende Gefüge bestimmt in hohem Maße die Materialeigenschaften. Die Wärmebehandlung muss aber im Zusammenhang mit der vorausgegangenen Kaltumformung gesehen werden, da z.B. ein sehr feinkörnigeres Gefüge nur durch einen hohen Umformgrad mit einer daraus resultierenden hohen Versetzungsdichte hergestellt werden kann. Neben der Rekristallisation wird bei manchen Legierungstypen mittels der Kurzzeitwärmebehandlung auch eine Ausscheidungshärtung durchgeführt. Dazu werden die Legierungselemente, die die festigkeitssteigernden, fein verteilten Ausscheidungen in Form z.B. intermetallischer

Phasen bilden, zunächst bei höheren Temperaturen im Gefüge aufgelöst. Nach dieser Homogenisierung wird das Material sehr schnell abgekühlt. Durch anschließendes Anlassen bei niedriger Temperatur werden die Ausscheidungen fein verteilt im Gefüge hergestellt. Bei genauer Prozessführung können die Ausscheidungen auch bereits beim Abkühlen erzeugt werden. Die Metallphysik bildet die Grundlage der Werkstoffforschung der Metalle. Der kurze und sicher unvollständige Einblick kann durch das Studium der einschlägigen Fachliteratur, z.B. [1] und [2] vertieft werden.

Ein Beispiel für die Dynamik der Kurzzeitwärmebehandlung

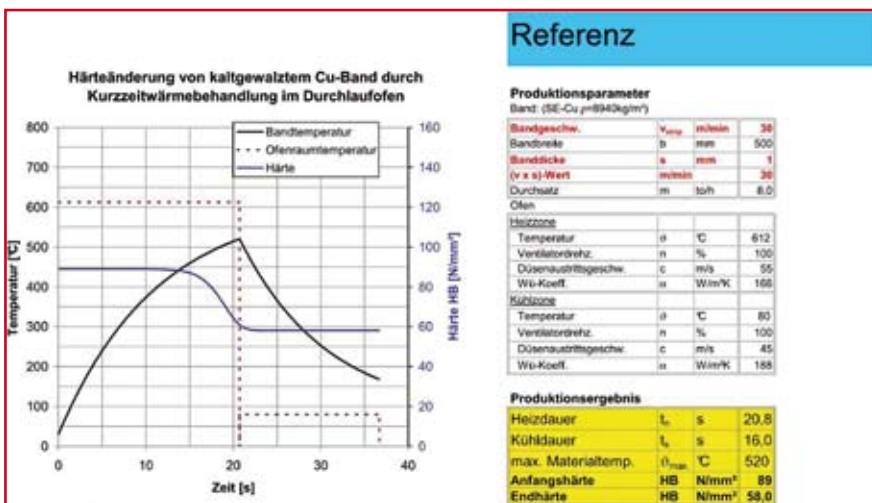


Bild 3: Ausgangssituation (Referenz) für das Rekristallisationsglühen von 1 mm Cu-Band bei einem Durchsatz von 8 t/h (entsprechend einer Durchsatzkennzahl v x s von 30 mm m/min) und einer Aufheizdauer von ca. 21 s.

Mit Hilfe von Simulationsrechnungen von Rekristallisationsglühungen von Cu-Bändern in einem Banddurchlaufofen wird gezeigt, wie stark das Wärmebehandlungsergebnis bei geringfügiger Änderung der Prozessparameter variieren kann. Die den Berechnungen zugrunde gelegte Wärmebehandlungsanlage entspricht in ihrer Funktion einem WSP-Bandschwebeofen, Bild 2. Bei diesem Ofentyp wird die Aufheiz- und die Abkühlkurve von der aus der Bandgeschwindigkeit resultierenden Glühdauer und der jeweiligen Zonentemperatur und dem Wärmeübergangskoeffizienten am Band bestimmt. Der Wärmeübergangskoeffizient kann in einem weiten Bereich über die Ventilator Drehzahl und dem davon abhängigen umgewälzten Gasvolumenstrom variiert werden. Die

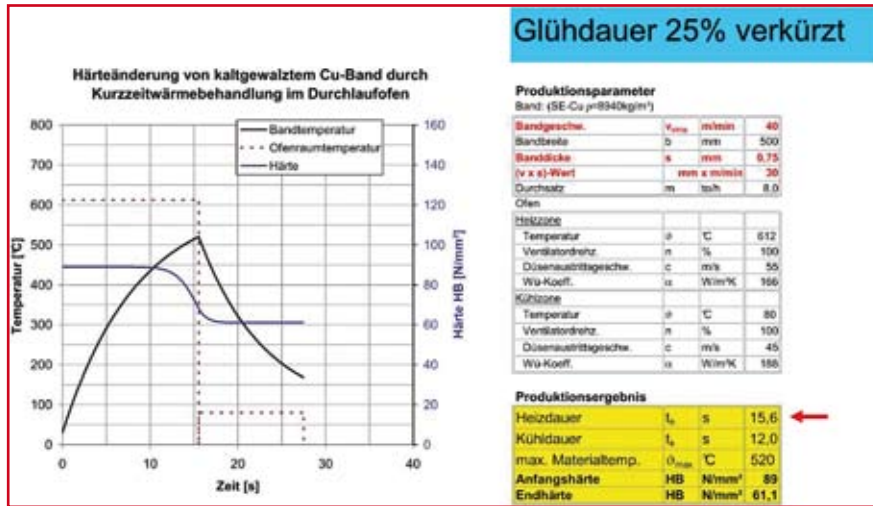


Bild 4: Bei einer gegenüber Referenz (Bild 3) um 25% verkürzten Glühdauer nimmt die Endhärte um drei Punkte zu.

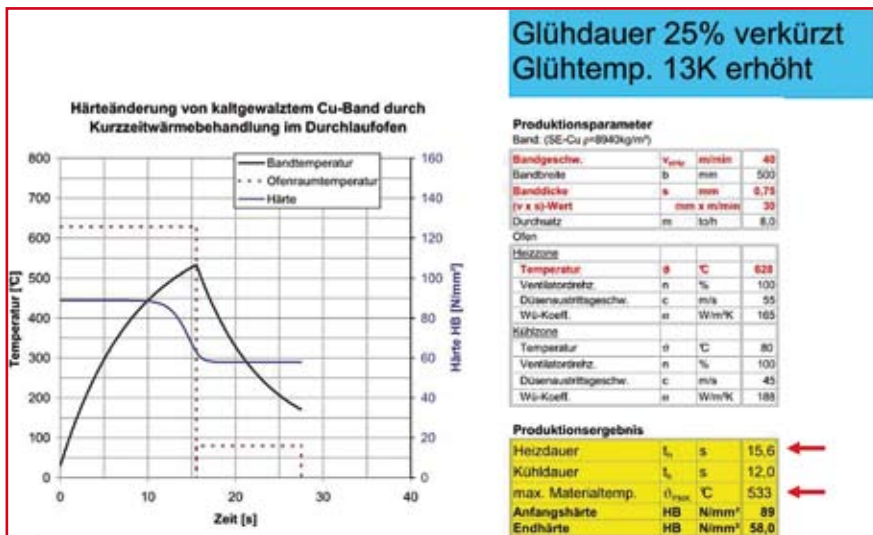


Bild 5: Um die verkürzte Glühdauer (Bild 4) zu kompensieren, muss eine um 13 K erhöhte Materialtemperatur erzielt werden.

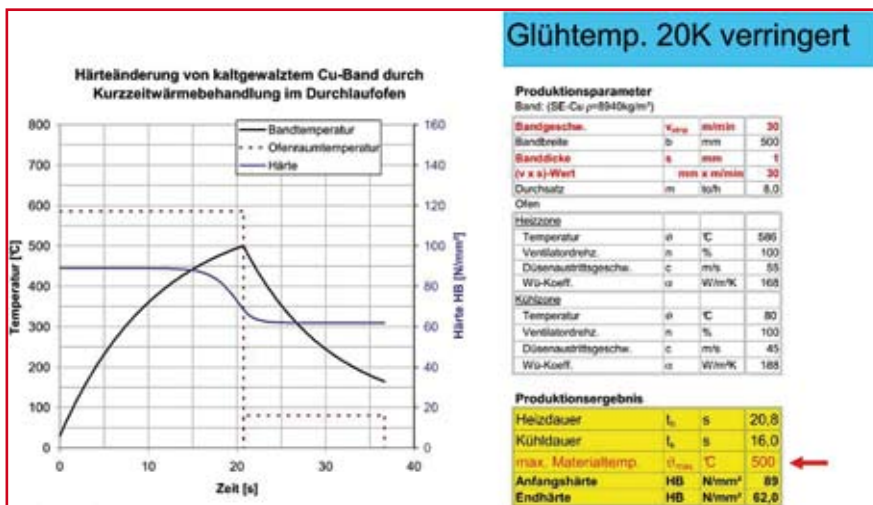


Bild 6: Bei einer gegenüber Referenz (Bild 3) verminderten Glühtemperatur um 20 K nimmt die Endhärte um vier Punkte zu.

Änderung der Werkstoffeigenschaften werden mittels eines physikalisch motivierten Werkstoffmodells berechnet [1] und [2].

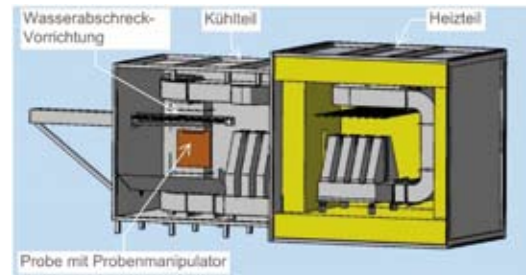


Bild 7: Features der WSP/ITP Labor-Wärmebehandlungsanlage technische Daten

- bis zu 20 Glühungen/h (Serienuntersuchungen)
- Probenabmessungen: 400 mm x 400 mm, 5 µm bis 15 mm (dicker auf Anfrage)
- Glühtemperaturen: bis 1.000 °C (Hochkonvektion), bis 1.150 °C (Strahlung)
- Konvektive Wärmeübergänge *: 300 W/m²K Heizen bis 900 °C, 475 W/m²K Kühlen
- Mittlere Aufheiz- und Abkühlgradienten bei 1 mm Blechdicke *: 105 K/s Heizen von 100 °C auf 400 °C, 35 K/s Heizen von 400 °C auf 800 °C, 120 K/s Kühlen von 800 °C auf 400 °C, 40 K/s Kühlen von 400 °C auf 100 °C
- Anmerkung: bei 0,5 mm Blechdicke verdoppeln sich diese Werte!
- Glühatmosferaen: Luft, N₂, 95 % N₂ 5 % H₂, N₂ mit > 5 % H₂ auf Anfrage
- Spezielle Features: Wasserabschreckvorrichtung zum Einfrieren von Zwischenzuständen
- * die Werte gelten für das Standarddüsensystem. Mit Spezialdüsensystemen sind noch signifikante Steigerungen möglich

Als Referenz dient die Wärmebehandlung eines 1 mm dicken Cu-Band, dessen Eingangshärte nach dem Kaltwalzen mit 89 HB angenommen wird. Die Aufheizung auf 520 °C in knapp 21 s und nachfolgende Abkühlung auf unter 200 °C in 16 s bewirkt eine Härteabnahme auf 58 HB, Bild 3. Wird nun im Vergleich dazu ein dünneres Band mit 0,75 mm Dicke bis auf die gleiche Endtemperatur von 520 °C erwärmt – dies ist bei höherer Bandgeschwindigkeit bereits nach knapp 16 s, also einer um 25 % verkürzten Glühdauer erreicht –, ist die Endhärte mit 61 HB um 3 Punkte größer, Bild 4. Um diesen Effekt zu kompensieren, muss die Glühtemperatur leicht angehoben werden (s. Bild 5).

Die Verminderung der Glühtemperatur von 520 °C aus der Referenzberechnung auf 500 °C resultiert bei gleicher Glühdauer in einer um 4 Punkte höheren Endhärte von 62 HB (s. Bild 6).

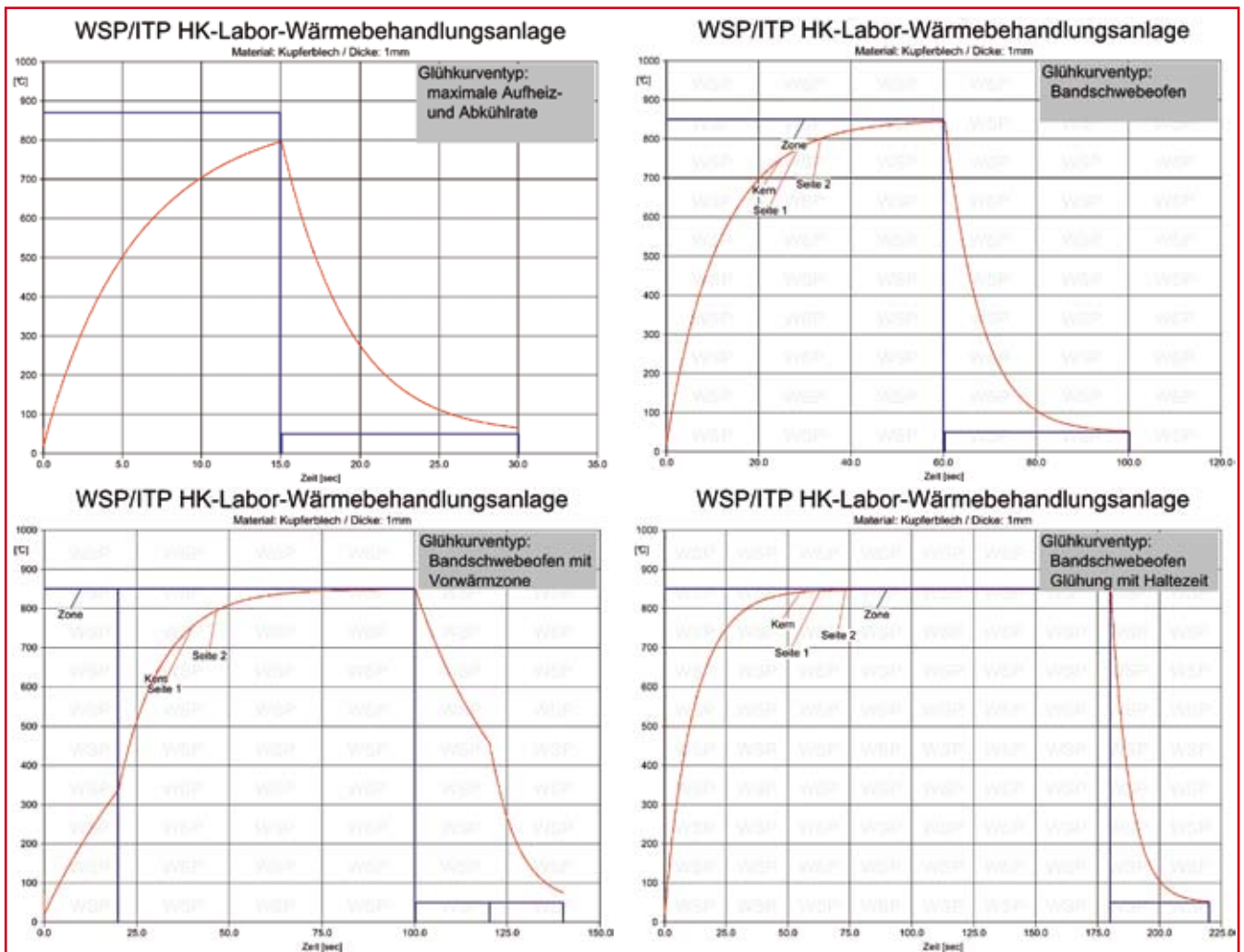


Bild 8: Verschiedene Glühkurventypen

Die Hochkonvektions-Wärmebehandlungsanlage im Labormaßstab

Die Wärmebehandlungsanlage (Bild 7) besteht aus einer Hochkonvektions-Heizzone und einer Hochkonvektions-Kühlzone. In den Zonen können der Wärmeübergangskoeffizient und die daraus resultierende Aufheiz- und Abkühlrate über die Drehzahl des jeweiligen Ventilators in einem weiten Bereich eingestellt werden. Da die max. 400 mm x 400 mm große Materialprobe an dem Probenmanipulator vertikal befestigt ist, muss das Hochkonvektions-Düsensystem keine Schwebekräfte wie in einem Bandschweifeofen aufbringen und kann voll auf das Erreichen hoher Wärmeübergangskoeffizienten optimiert werden. Der Probenmanipulator besteht im Wesentlichen aus einem temperaturwechselfesten SiSiC-Rohr, das von einer Lineareinheit horizontal verfahren wird. Damit lässt sich die Probe nach erfolgter Aufheizung schnell von der Heizzone in die Kühlzone fah-

ren. Als besonderes Feature ist die Anlage mit einer Wasserabschreckvorrichtung ausgestattet, mit deren Hilfe sich Materialzustände zu beliebigen Zeitpunkten der Wärmebehandlung „eingefrieren“ lassen. Die Wärmebehandlung kann unter Luft oder unter Schutzgasatmosphäre erfolgen. Werden brennbare Schutzgase, z.B. N₂ mit mehr als 95 % H₂, eingesetzt, müssen die Vorschriften im Umgang mit brennbaren Gasen beachtet werden. Eine Glovebox in der Fronttür der Kühlzone kombiniert mit einer Probenschleuse ermöglicht das manuelle Wechseln der Proben, ohne die Schutzgasatmosphäre in der Anlage zu kontaminieren.

Bild 8 zeigt exemplarisch einige Glühkurventypen, die sich mit der Anlage realisieren lassen.

Vorteile der Hochkonvektions-Wärmebehandlungsanlage im Labormaßstab:

1. Serienuntersuchungen unter sehr produktionsnahen Bedingungen können

in sehr kurzer Zeit durchgeführt werden. Dabei lassen sich die Glühparameter in einem weiten Bereich von Versuch zu Versuch variieren.

2. Neue Produktionsanlagen, auf denen neu entwickelte Legierungen produziert werden sollen, können genauer spezifiziert werden, da bereits die mit der Laboranlage gewonnen Kurzzeitwärmehandlungsrezepte auf die Produktionsanlage übertragen werden können.
3. Die Möglichkeit, Serienuntersuchungen in kurzen Zeiträumen durchführen zu können, kann für grundlegende Untersuchungen genutzt werden, um z.B. legierungsbezogene Werkstoffmodelle zu entwickeln.
4. Einen weiteren großen Nutzen bietet diese Labor-Wärmebehandlungsanlage bei der Planung und dem Betrieb von energieeffizienten Banddurchlaufanlagen, in denen ein Teil der Abkühlwärme zur Vorerwärmung der Bänder genutzt wird. Das Energieeinsparpotential solcher hocheffizienter Anlagen

liegt bei 30 %! Gegenüber konventionellen Bandanlagen unterscheiden sich allerdings die Glühverläufe hinsichtlich einer kleineren Aufheizrate in der Vorwärmstrecke und einer geringeren Abkühlrate im ersten Abschnitt des Kühlteils, siehe Bild 8, was Einfluss auf die metallphysikalischen Vorgänge haben kann. Um dennoch vergleichbare Werkstoffeigenschaften zu erzielen, müssen die Glührezepte angepasst wer-

den. Solche Untersuchungen können sehr zügig und mit großer Aussagekraft in der Labor-Wärmebehandlungsanlage durchgeführt werden.

Die Labor-Wärmebehandlungsanlage steht ab dem 2. Quartal 2013 zur Verfügung.

Literatur

[1] Physikalische Grundlagen der Metallkunde, Günter Gottstein, Springer Lehrbuch, 2007

[2] Dynamische Rekristallisation unter konstanten und transienten Umformbedingungen, Matthias M. Frommert, Cuvillier Verlag, 2008

[3] Control of continuous strip annealing for copper and copper alloys by means of real-time recrystallisation modeling, Thomas Berrenberg, IWCC technical seminar Chicago, 2009

(1) Dr.-Ing. T. Berrenberg, WSP GmbH, Aachen, Leiter Thermoprozesstechnik; ITP GmbH, Aachen, Geschäftsführer

111 Tage Kreislaufwirtschaftsgesetz: bvse-Tagung zieht eine erste Bilanz

28. Sept. 2012 - Die stoffliche Verwertung hat im neuen Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) nicht den Stellenwert gefunden, der ressourcenpolitisch sinnvoll gewesen wäre. Zwar sei die fünfstufige Abfallhierarchie implementiert worden, die das Recycling über die Verbrennung stellt, das Gesetz sei aber so komplex ausgestaltet, dass eine Umsetzung kaum möglich ist, so das Fazit von Prof. Dr. Martin Beckmann nach 111 Tagen KrWG, auf der bvse-Jahrestagung am 21. September 2012 in Dresden.

Dabei hätte die fünfstufige Abfallhierarchie das Potential, die Kreislaufwirtschaft und damit die Schonung von Ressourcen mittel- bis langfristig voran zu bringen. Beckmann zog den Schluss, dass insbesondere die Überkapazitäten der Müllverbrennung die Bundesregierung von einer eindeutigen Regelung und höheren Verwertungsquoten abgehalten habe. Um den Weg zu einer Ressourcengesellschaft tatsächlich zu beschreiten, reiche das Gesetz offenkundig nicht aus. Der Jurist forderte deshalb, den Vorrang des Recyclings in gesonderten Verordnungen für einzelne Stoffströme festzuschreiben, wie es in den Ermächtigungen des KrWG vorgesehen ist, hat jedoch erhebliche Zweifel, dass dies passieren wird.

Spontan reagierte der anwesende Ministerialdirektor Dr. Helge Wendenburg vom Bundesumweltministerium und bestätigte, dass die Umsetzung der Abfallhierarchie derzeit kaum zu überprüfen sei. Er machte aber auch klar, dass es nicht die Absicht der Bundesregierung war, das Recycling mit der Verbrennung gleichzusetzen. Auch im Bundesimmissionsschutzgesetz werde dies deutlich. Die von Beckmann angesprochenen stoffstromspezifischen Verordnungen seien in Vorbereitung, kämen jedoch erst in der nächsten Legislaturperiode. Im Vorfeld sollten aber auch die technischen Möglichkeiten sowie die Marktgegebenheiten in die Überlegungen einbezogen werden. Eine stoffstromspezifische Betrachtung fordert der bvse bereits seit geraumer Zeit; bvse-Hauptgeschäfts-

führer Eric Rehbock begrüßte die Ankündigung deshalb sehr.

Weniger Rechtssicherheit, mehr Bürokratie – Gemeinnützige Sammlung als Möglichkeit

Erfreulich im Hinblick auf das neue Kreislaufwirtschaftsgesetz beurteilte Beckmann die erfolgte Definition der gewerblichen und gemeinnützigen Sammlung sowie die Abgrenzung zu Nebenprodukten. Was zuvor über die Rechtsprechung geregelt werden musste, finde nun im Gesetz Anklang. Zu mehr Rechtssicherheit führe das neue KrWG deshalb aber nicht. Gerade das „Regelungsmonster“ des § 17 zu den Überlassungspflichten Sorge mit unbestimmten Rechtsbegriffen wie „überwiegend öffentliche Interessen“ für wenig Klarheit. Der Referent entnimmt der Regelung die Botschaft:

„Wenn die Kommunen wollen, sollen sie die Stoffe bekommen.“ Eine wettbewerbskonforme Auslegung sei deshalb unbedingt geboten, denn eins sei klar: „Eine Einschränkung des Wettbewerbs macht das System nicht effizienter.“

Die anwesenden Unternehmen wies er darauf hin, die Möglichkeiten der Zusammenarbeit mit gemeinnützigen Sammlungen nicht zu unterschätzen, da diese nicht unter die Überlassungspflichten fallen.

Der anvisierte Bürokratieabbau sei mit dem neuen Gesetz ebenfalls nicht gelungen. Gerade die Anzeigeverfahren nach § 8 seien ein ganz „neues bürokratisches

Erlebnis“, das zu vielen Nachfragen, unterschiedlichen Reaktionen verschiedener Behörden in den Städten und Landkreisen und teilweise vierstelligen Gebührenbescheiden führe.

Auch hier hakte Wendenburg ein: Er sieht die Länder in der Pflicht, ihre Kommunen zu unterstützen. Darüber hinaus müsse die Gebührenordnung eingehalten werden. Wie Behörden zu solch hohen Bescheiden kommen könnten, sei ihm unverständlich.

Auseinandersetzungen um gewerbliche Sammlung: Heiße Phase beginnt erst

Nach 111 Tagen können die Auswirkungen des KrWG auf die gewerbliche Sammlung noch nicht abschließend bewertet werden. Die entscheidende Phase beginne erst, so Beckmann, und ob Untersagungen Bestand haben, werde auch von Gerichtsentscheidungen abhängen. Jedenfalls erfordere die Einschränkung des Wettbewerbs eine stichhaltige Rechtfertigung. Eine bloße Gebührenänderung könne beispielsweise nicht als Gefährdung der Gebührenstabilität ins Feld geführt werden. Auch müsse geklärt werden, wann ein öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger seine Pflichten nicht mehr zu „wirtschaftlich ausgewogenen Bedingungen“ ausführen kann, zumal diese Unternehmen gebührenfinanziert sind. Man dürfe nicht zulassen, dass eine Kommune immer dann selbst sammeln will, wenn sich ein Markt entwickelt hat. Den Branchenvertretern gab der Jurist deshalb zwei Empfehlungen mit auf den Weg: Erstens, darauf hinzuwirken, dass die Bundesregierung ihr Versprechen einhält, bestehende Strukturen zu erhalten und zweitens, den Gerichten Argumente für eine europarechts- und wettbewerbskonforme Auslegung des Gesetzes zu liefern.