

Entwicklung und Optimierung von Glührezepten für die Kurzzeit-Wärmebehandlung

Dr.-Ing. T. Berrenberg
ITP GmbH, Aachen, Geschäftsführer
WSP GmbH, Aachen, Leiter Thermoprozesstechnik

Einleitung

Für die Herstellung einer Vielzahl von Produkten werden sehr große Mengen metallischer Bänder und Bleche aus Stahl-, Kupfer-, und Aluminiumlegierungen benötigt. Diese Halbzeuge werden in einer immensen Legierungsvielfalt und in den unterschiedlichsten Auslieferungszuständen hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften hergestellt. Die Eigenschaften der Halbzeuge werden häufig sehr genau an die Anforderungen der Produkte angepasst. So müssen z.B. Stahlbleche für die Automobilindustrie neben guter Umformbarkeit auch hohe spezifische Festigkeitsanforderungen erfüllen, so dass sich daraus steife Fahrgastzellen bei gleichzeitig möglichst niedrigem Gewicht herstellen lassen. Ein anderes Beispiel sind Kontaktwerkstoffe aus Kupferlegierung, die z.B. in Mikrosteckern wie USB-Steckern etc. zu finden sind, deren Funktion viele 1000 Zyklen gewährleistet sein muss. Der Kontaktwerkstoff muss neben guter elektrischer Leitfähigkeit auch eine hohe Federsteifigkeit besitzen, um die für einen geringen Kontaktwiderstand erforderliche Flächenpressung der Kontaktflächen zu erzeugen. Dieses sind widersprüchliche Anforderungen, da die zur Festigkeitssteigerung erforderlichen Legierungselemente die elektrische Leitfähigkeit vermindern. In der Luft- und Raumfahrttechnik, aber auch in anderen Anwendungen werden Werkstoffe benötigt, die bei geringer Dichte eine hohe Festigkeit besitzen. Diese Anforderungen erfüllen die aushärtbaren Aluminiumlegierungen der Gruppen 2000, 6000, 7000. Die Kette der Beispiele ließe sich nahezu endlos fortsetzen.

Die Halbzeugeigenschaften der oben genannten Werkstoffe werden neben der Legierungszusammensetzung maßgeblich durch die letzten Produktionsschritte bestimmt. Diese bestehen aus dem abwechselnden Kaltwalzen und Wärmebehandeln der Bleche, bis die endgültige Materialstärke erreicht ist. Bei größeren Materialstärken werden die Bleche meist in Hauben- oder Kammeröfen bei Glühdauern, die sich im Bereich mehrerer Stunden bewegen, geglüht. Bei kleinen Materialdicken werden die Bleche in Durchlaufanlagen einer Kurzzeitwärmebehandlung unterzogen. Die Glühdauer liegt im Minutenbereich oder, bei sehr dünnen Blechen, auch darunter. Mit den Prozessparametern der letzten Kurzzeitwärmebehandlung werden die endgültigen mechanischen Eigenschaften der Bleche eingestellt. In machen 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“ in z.B. Hauben- oder

Kammeröfen hochdynamisch und erfordern die genaue Einstellung und Einhaltung der Prozessparameter, um eine hohe und gleichbleibende Produktqualität zu erzielen.

Ein Dilemma besteht nun bei Optimierung und Neuentwicklung der Werkstoffe und der erforderlichen Produktionsprozesse, da sich der genaue Temperatur-/Zeitverlauf der Kurzzeitwärmebehandlung unter Produktionsbedingungen mit den üblichen Laboröfen, wie z.B. dem Kammerofen, dem Salzbadofen oder dem Sandbadofen, nicht nachbilden lässt. Die Durchführung von Probeglühungen in Produktionsanlagen ist teuer und ineffektiv. Abhilfe schafft hier die ITP-Glühanlage im Labormaßstab, mit der sich ein Aufheiz- und Abkühlverlauf wie im Produktionsprozess erreichen lässt.

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 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 3 verschiedenen Mechanismen, die Erholung, die Rekristallisation und das Kornwachstum ab, die die Gefügestruktur unter Abnahme der Enthalpie verändert. 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 sehr kleinen festigkeitssteigernden Ausscheidungen fein verteilt im Gefüge hergestellt. Bei genauer Prozessführung können die Ausscheidungen auch bereits beim Abkühlen erzeugt werden. Ein sehr frühes Beispiel für ausscheidungshärtende Legierungen bildet das vor gut 100 Jahren von Alfred Wilm entwickelte Duraluminium aus der AlCuMg-Werkstoffgruppe (Werkstoffnummern 2000-2999) in dem sich die intermetallische Phase CuAl₂ durch Kalt- oder Warmaushärtung bildet. Duraluminium erreicht Festigkeiten, die

vergleichbar mit denen von Stahl sind. Heute stehen eine Vielzahl ausscheidungsgehärteter Legierungen in allen 3 Werkstoffgruppen, Stahl, Kupfer und Aluminium zu Verfügung.

Die Metallphysik bildet die Grundlage der Werkstoffforschung der Metalle. Der kurze und sicher unvollständige Einblick, der in diesem Kapitel gegeben wurde, kann durch das Studium der einschlägigen Fachliteratur, z.B. [1] und [2] vertieft werden.

Beispiel für die Dynamik der Kurzzeitwärmebehandlung

Auf dem IWCC Technical Seminar 2008 in Chicago [3] hat die WSP ein „einfaches“ physikalisch motiviertes Werkstoffmodell für die Rekristallisation am Beispiel von Se-Cu vorgestellt, das auf der bekannten JMAK-Gleichung [1] basiert. Diese wurde so modifiziert, dass auch dynamische Effekte, die bei hohen Aufheizraten beobachtet werden, in dem Modell beschrieben werden. Das in den nachfolgenden Beispielen verwendete Modell wurde so parametrisiert, dass die Härteänderung als Funktion des Zeit-/Temperaturverlaufs für ein Cu-Blech bei einer angenommenen vorausgegangen Kaltumformung und einer entsprechenden Versetzungsdichte berechnet werden kann. Die Modellparameter sind legierungsabhängig und hier nur exemplarisch zu sehen. Die Berechnungsergebnisse können in ihren Absolutwerten Abweichungen gegenüber Ergebnissen zeigen, die bei realen Wärmebehandlungen erzielt werden.

Anhand des Modells wird hier exemplarisch für die Rekristallisationsglühung von Cu-Bändern in einem Banddurchlaufofen 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 Ventilatorumdrehzahl und dem davon abhängigen umgewälzten Gasvolumenstrom variiert werden.

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 Glüh Temperatur leicht angehoben werden, **Bild 5**.

Die Verminderung der Glüh Temperatur von 520°C aus der Referenzberechnung auf 500°C resultiert bei gleicher Glühdauer in einer um 4 Punkte höheren Endhärte von 62 HB, **Bild 6**.

Die ITP Glühanlage im Labormaßstab

Die Glühanlage, **Bild 7**, besteht aus einer Hochkonvektions-Heizzone und einer Hochkonvektions-Kühlzone. In den Zonen kann der Wärmeübergangskoeffizient und die daraus resultierende Aufheiz- und Abkühlrate über die Drehzahl des jeweiligen Ventilators in einem weiten Bereich eingestellt werden. Die max. 400 mm x 400 mm große Materialprobe ist vertikal angeordnet. Die Probe ist an einem temperaturwechselfesten SiSiC-Träger aufgehängt, der von einer Lineareinheit horizontal verfahren wird. Damit lässt sich die Probe nach erfolgter Aufheizung schnell von der Heizzone in die Kühlzone fahren. Als besonderes Feature ist die Anlage mit einer Wasserabschreckung ausgestattet, mit deren Hilfe Materialzustände zu beliebigen Zeitpunkten der Wärmebehandlung „eingefroren“ werden können. Die Wärmebehandlung kann unter Luft oder unter Schutzgasatmosphäre erfolgen. Bei brennbaren Schutzgasen, z.B. N₂ mit mehr als 95% H₂, muss die Anlagensteuerung mit einer H₂-Sicherheitsüberwachung ausgestattet werden. Ein Probenmanipulator in der Fronttür der Kühlzone ermöglicht das Wechseln von mehreren Proben, so dass mehrere Proben nacheinander prozessiert werden können, ohne dass die Anlage geöffnet werden muss.

Vorteile der ITP-Glühanlage im Labormaßstab:

1. Mit der Anlage können in kurzer Zeit Serienuntersuchungen unter sehr produktionsnahen Bedingungen durchgeführt werden. Dabei lassen sich die Glühparameter in einem weiten Bereich variieren. Zeit und Kosten zur Optimierung von Glührezepten für Durchlaufglühanlagen für bestehende Legierungen und für neue Legierungsentwicklungen können enorm verkürzt werden.
2. Die Glühparameter lassen sich auch unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienzsteigerung der Wärmebehandlung optimieren. Potential bietet hier vor allem der Kühlprozess, da unnötig hohe Ventilatordrehzahlen viel elektrische Energie kosten.
3. Produktionsanlagen, auf denen neu entwickelte Legierungen produziert werden sollen, können genauer spezifiziert werden, da bereits die mit der ITP-Glühanlage im Labor gewonnen Kurzzeitwärmebehandlungsrezepte auf die Produktionsanlage übertragen werden können. Bisher besteht bei der Übertragung von Kurzzeitwärmebehandlungsrezepten, die mit herkömmlichen Laboröfen und Abschreckvorrichtungen gewonnen werden, eine relativ große Unsicherheit, da die Temperatur-/Zeitverläufe nicht besonders exakt und reproduzierbar sind und da außerdem die Aufheiz- und Abkühlraten einer Produktionsanlage nicht unbedingt erreicht werden können.
4. Die Möglichkeit, Serienuntersuchungen in kurzen Zeiträumen durchführen zu können, kann für grundlegende Untersuchungen genutzt werden, um z.B. legierungsbezogene Werkstoffmodelle zu entwickeln.

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

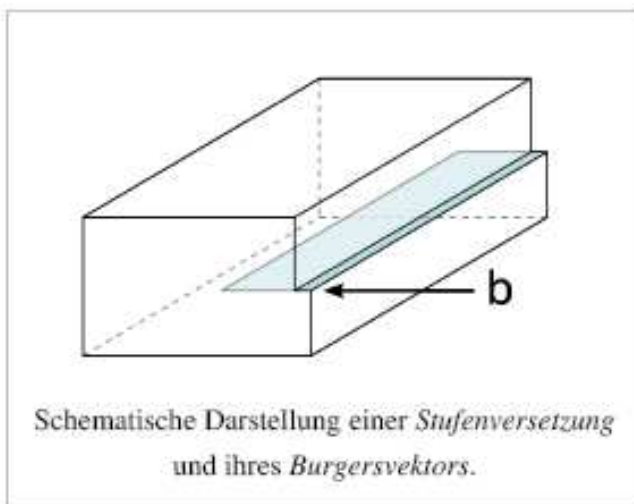
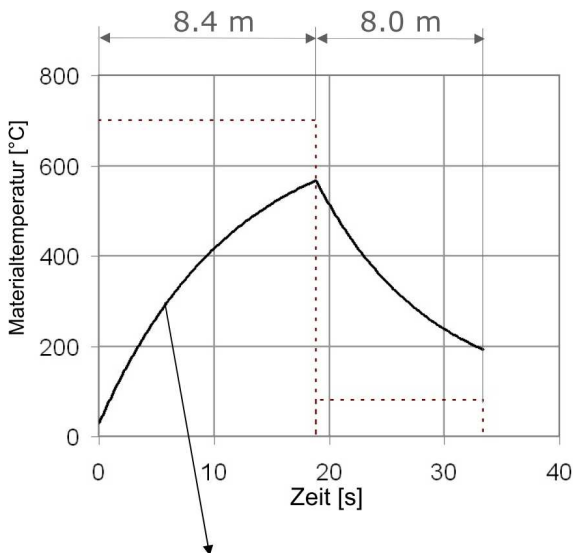


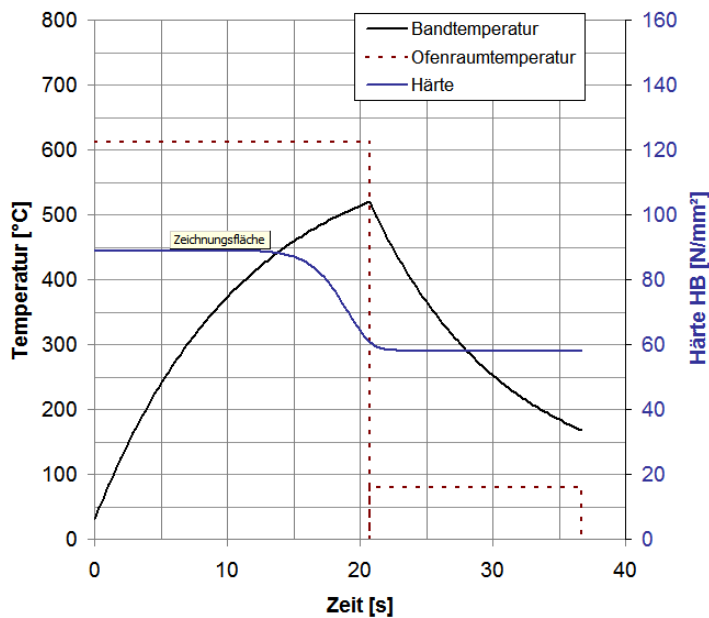
Bild 1: Schematische Darstellung und transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme von Versetzungen in einem kristallinen Gitter (Quelle: Wikipedia)



$\alpha = 161 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ at
 $\vartheta = 700 \text{ °C}$ and
 $c_{\text{Nozzle}} = 55 \text{ m/s}$

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

Härteänderung von kaltgewaltem Cu-Band durch Kurzzeitwärmebehandlung im Durchlaufofen



Referenz

Produktionsparameter

Band: (SE-Cu $\rho=8940\text{kg}/\text{m}^3$)

Bandgeschw.	v_{strip}	m/min	30
Bandbreite	b	mm	500
Banddicke	s	mm	1
(v x s)-Wert		mm x m/min	30
Durchsatz	m	to/h	8,0

Ofen

Heizzone			
Temperatur	ϑ	°C	612
Ventilatordrehz.	n	%	100
Düsenaustrittsgeschw.	c	m/s	55
Wü-Koeff.	α	W/m²K	166

Kühlzone

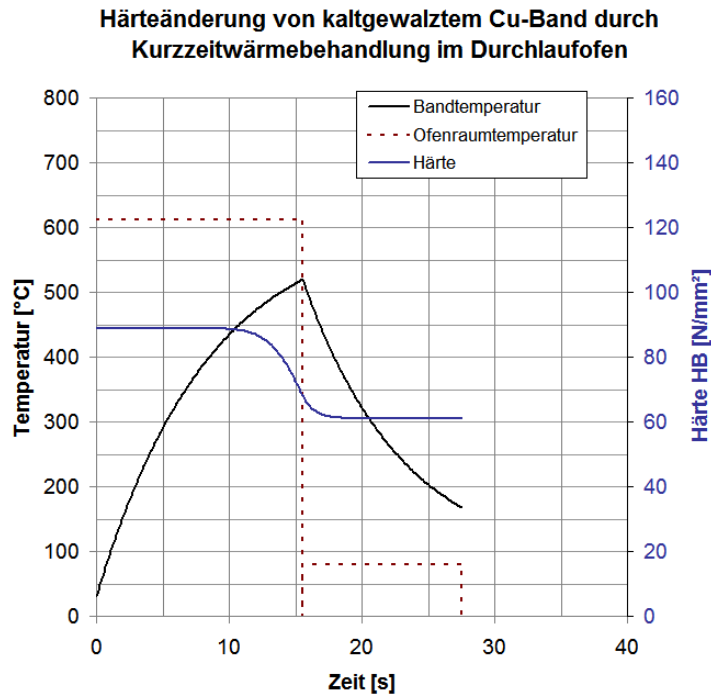
Temperatur	ϑ	°C	80
Ventilatordrehz.	n	%	100
Düsenaustrittsgeschw.	c	m/s	45
Wü-Koeff.	α	W/m²K	188

Produktionsergebnis

Heizdauer	t_h	min	20,8
Kühldauer	t_k	min	16,0
max. Materialtemp.	ϑ_{max}	°C	520
Anfangshärte	HB	N/mm²	89
Endhärte	HB	N/mm²	58,0

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

Glühdauer 25% verkürzt



Produktionsparameter

Band: (SE-Cu $\rho=8940\text{kg/m}^3$)

Bandgeschw.	v_{strip}	m/min	40
Bandbreite	b	mm	500
Banddicke	s	mm	0,75
(v x s)-Wert	mm x m/min		30
Durchsatz	m	to/h	8,0

Ofen

Heizzone			
Temperatur	ϑ	°C	612
Ventilatorrehz.	n	%	100
Düsenaustrittsgeschw.	c	m/s	55
Wü-Koeff.	α	W/m²K	166

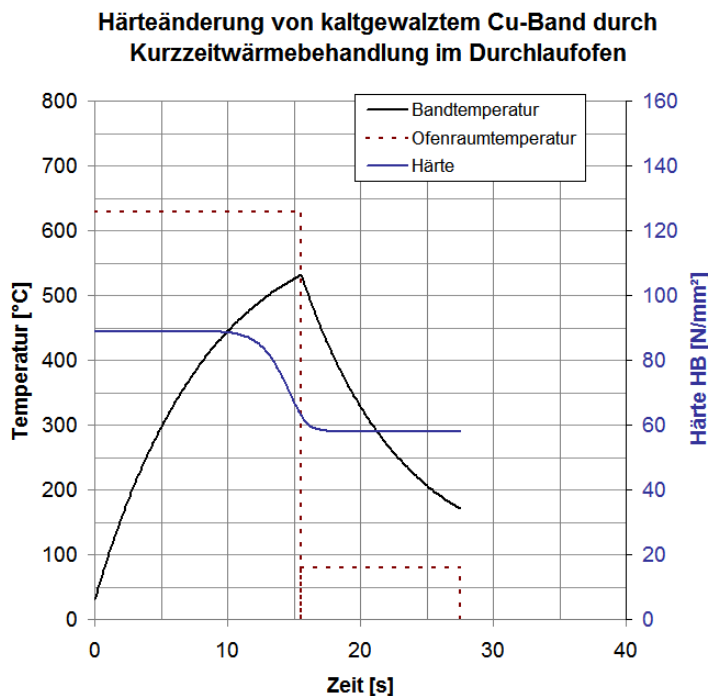
Kühlzone			
Temperatur	ϑ	°C	80
Ventilatorrehz.	n	%	100
Düsenaustrittsgeschw.	c	m/s	45
Wü-Koeff.	α	W/m²K	188

Produktionsergebnis

Heizdauer	t_h	min	15,6
Kühldauer	t_k	min	12,0
max. Materialtemp.	ϑ_{max}	°C	520
Anfangshärte	HB	N/mm²	89
Endhärte	HB	N/mm²	61,1

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

Glühdauer 25% verkürzt Glühtemp. 13K erhöht



Produktionsparameter

Band: (SE-Cu $\rho=8940\text{kg/m}^3$)

Bandgeschw.	v_{strip}	m/min	40
Bandbreite	b	mm	500
Banddicke	s	mm	0,75
(v x s)-Wert	mm x m/min		30
Durchsatz	m	to/h	8,0

Ofen

Heizzone			
Temperatur	ϑ	°C	628
Ventilatorrehz.	n	%	100
Düsenaustrittsgeschw.	c	m/s	55
Wü-Koeff.	α	W/m²K	165

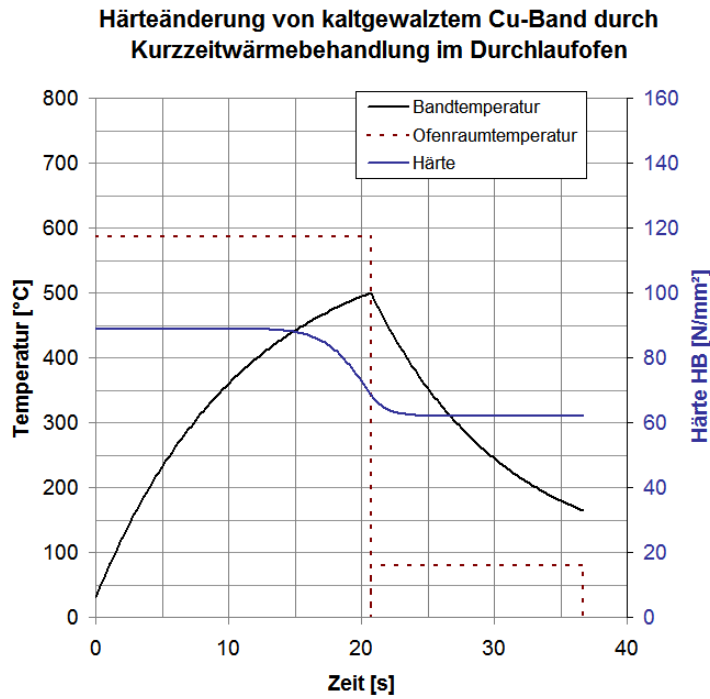
Kühlzone			
Temperatur	ϑ	°C	80
Ventilatorrehz.	n	%	100
Düsenaustrittsgeschw.	c	m/s	45
Wü-Koeff.	α	W/m²K	188

Produktionsergebnis

Heizdauer	t_h	min	15,6
Kühldauer	t_k	min	12,0
max. Materialtemp.	ϑ_{max}	°C	533
Anfangshärte	HB	N/mm²	89
Endhärte	HB	N/mm²	58,0

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

Glühtemp. 20K verringert



Produktionsparameter

Band: (SE-Cu $\rho=8940\text{kg/m}^3$)

Bandgeschw.	v_{strip}	m/min	30
Bandbreite	b	mm	500
Banddicke	s	mm	1
(v x s)-Wert		mm x m/min	30
Durchsatz	m	to/h	8,0

Ofen

Heizzone			
Temperatur	ϑ	°C	586
Ventilatordrehz.	n	%	100
Düsenaustrittsgeschw.	c	m/s	55
Wü-Koeff.	α	W/m²K	168

Kühlzone

Temperatur	ϑ	°C	80
Ventilatordrehz.	n	%	100
Düsenaustrittsgeschw.	c	m/s	45
Wü-Koeff.	α	W/m²K	188

Produktionsergebnis

Heizdauer	t_h	min	20,8
Kühldauer	t_k	min	16,0
max. Materialtemp.	ϑ_{max}	°C	500
Anfangshärte	HB	N/mm²	89
Endhärte	HB	N/mm²	62,0



Bild 6: Bei einer gegenüber Referenz (Bild 3) verminderten Glühtemperatur um 20 K nimmt die Endhärte um 4 Punkte zu.

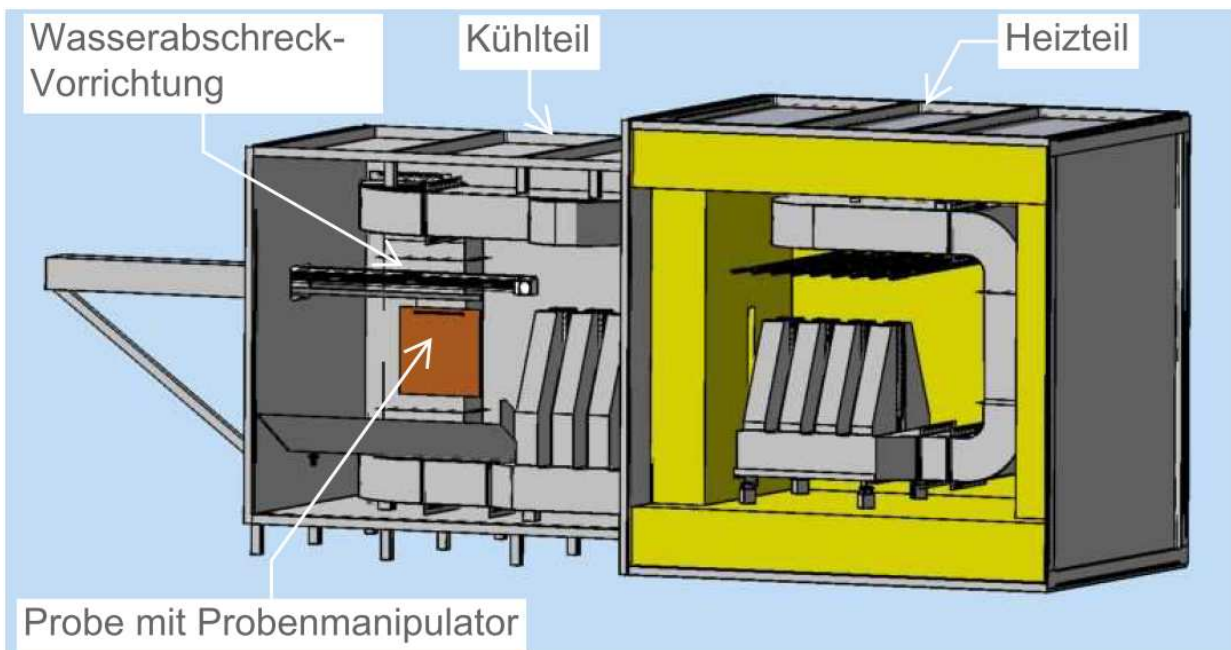


Bild 7: Skizze der ITP Glühanlage im Labormaßstab