

Die Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe

Dr. Dieter Müller
WOW Service, Roßtal

WS 2018
DR. DIETER MÜLLER
12. NOVEMBER 2018

12. November 2018 DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 1

Gliederung der Vorlesung

- Block 1: Grundlagen
- Block 2: Stahl
- Block 3: Glüh- und Härteverfahren
- Block 4: Verzug und Randschichthärten
- Block 5: Thermochemische Diffusionsprozesse
- Block 6: Wärmebehandlung Gusseisen und NE-Metalle
- Block 7: Mess- und Anlagentechnik

Dr. Dieter Müller DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 2

WOW Service Werkstoff – Oberfläche – Wärmebehandlung

Dienstleistungen für

Härtereien	Industrie (Metall- und Kunststoffverarbeitung)
Beratung - Prozesse (Auswahl/Optimierung von Wärmebehandlungsprozessen) - Produktionsanalysen (Effizienz, Qualität) - Schulungen Schadensanalysen Handel mit Chargiermitteln Industrievertretungen für Lohnhärtereien und Verbrauchsmaterialien	Beratung - Beratung der Entwicklung und Konstruktion zur Auswahl von Wärmebehandlungsprozessen - Unterstützung bei der Bemusterung von Wb-Prozessen - Schulungen zu Wärmebehandlung und Beschichtung Schadensanalysen Anbieter für Beschichtungen und beschichtete Sonderwerkzeuge

Dr. Dieter Müller DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 3

Literatur

G. Sauer, T. Stiefel (Hrsg.)
Handbuch der Fertigungstechnik, Band 4/2 Wärmebehandeln
Hanser Verlag, München Wien, 1987
V. Isopke
Wärmebehandlung des Stahls
Verlag Europa-Lehrmittel, Hans-Gruiten, 8. Aufl., 2003
H.P. Hougardy
Umwandlung und Gefüge unlegierter Stähle
Verlag Stahliesen, Düsseldorf, 2. Aufl., 1990
D. Horstmann
Das Gussstahlabbild Eisen-Kohlenstoff
Verlag Stahliesen, Düsseldorf, 5. Aufl., 1985
D. Lüdter, R. Jönsson
Wärmebehandlung
Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 4. Aufl., 2000
D. Lüdter u.a.
Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen II – Nitrieren und Nitrocarburieren
Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 4. Aufl., 2007
K. Heß u.a.
Maß- und Formänderung infolge Wärmebehandlung
Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 1994
J. Grotzch, u.a.
Einsatzhärten
Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 1994
N. Berni, W. Thelen
Eisenwerkstoffe
Springer Verlag Berlin Heidelberg, 4. Aufl., 1991

Dr. Dieter Müller DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 4

Literatur

F.-W. Bach, T. Duda
Moderne Beschichtungsverfahren
Wiley-VCH, Weinheim, 2000
W. Seidel
Werkstofftechnik
Pöhlmann, München Wien, 2007
Stahl Informations-Zentrum (www.stahl.info.de; kostenloser Versand oder als download)
Marktblatt 447: Wärmebehandlung von Stahl – Nitrieren und Nitrocarburieren
Stahl Informations-Zentrum
Marktblatt 450: Wärmebehandlung von Stahl – Härten, Anlassen, Vergüten, Bainitieren
Stahl Informations-Zentrum
Marktblatt 452: Einsatzhärten
Stahl Informations-Zentrum
Marktblatt 236: Wärmebehandlung von Stahl – Randschichthärten
Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie (www.bdguss.de; kostenloser Versand oder als download)
Gusseisen mit Kupfergraphit
Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie (www.bdguss.de; kostenloser Versand oder als download)
Gusseisen mit Lamellengraphit
Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie (www.bdguss.de; kostenloser Versand oder als download)
Werkstoff Temperpass
ASM
The Handbook of Metals – Vol. 4: Heat Treatment
Teile der Vorlesungsunterlagen entzinsten Veröffentlichungen folgender Personen bzw. Unternehmen
Böhler Stahl AG
Dr. Hansjörg Stiefel, EFD Induktionswärnung, Freiburg
i.o.

Dr. Dieter Müller DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 5

Inhalt Block 1

- Grundlagen
 - Bedeutung der Wärmebehandlung
 - Temperaturzyklus, Begriffe
 - Wärmeerzeugung
 - Wärmetransport
 - Atmosphären
 - Diffusion
 - Härtungsmechanismen

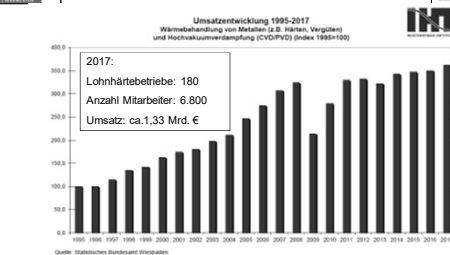
Dr. Dieter Müller DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 6

Inhalt Block 1

- Grundlagen
 - BEDEUTUNG DER WÄRMEBEHANDLUNG**
 - Temperaturzyklus, Begriffe
 - Wärmeerzeugung
 - Wärmetransport
 - Atmosphären
 - Diffusion
 - Härtungsmechanismen

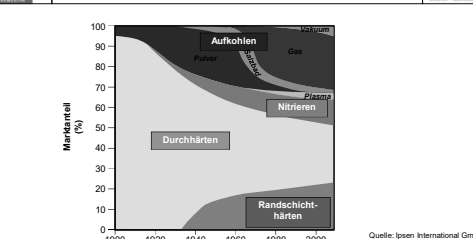
Dr. Dieter Müller DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 7

Umsatzentwicklung der Lohnhärtereien in Deutschland



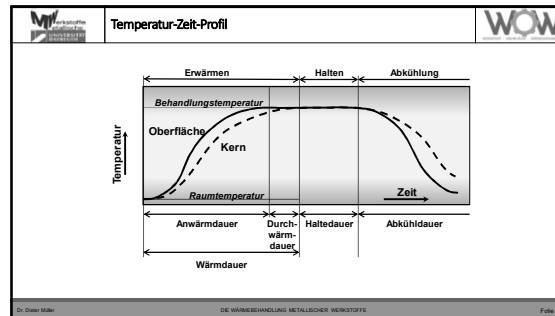
Dr. Dieter Müller DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 8

Entwicklungstrends in der Wärmebehandlung



Dr. Dieter Müller DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 9

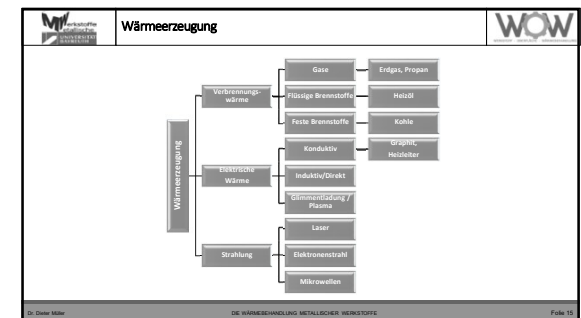
	Inhalt Block1	
1 Grundlagen 1.1 Bedeutung der Wärmebehandlung 1.2 TEMPERATURZYKLUS, BEGRIFFE 1.3 Wärmeerzeugung 1.4 Wärmetransport 1.5 Atmosphären 1.6 Diffusion 1.7 Härtungsmechanismen		
Dr. Dieter Mäder	DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE	Folie 10



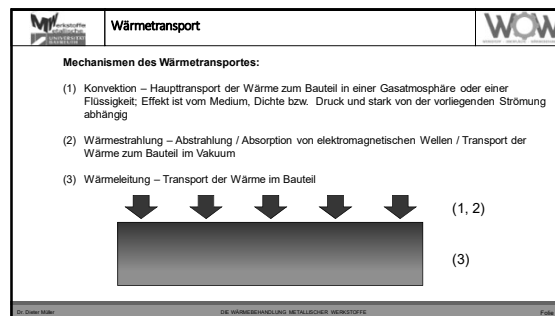
	Begriffe der Wärmebehandlung (DIN EN 10052:1994)	
➤ Wärmebehandlung Folge von Wärmebehandlungsschritten, in deren Verlauf ein Werkstück ganz oder teilweise Zeit-Temperatur-Folgen unterworfen wird, um eine Änderung seiner Eigenschaften und/oder seines Gefüges herbeizuführen. Ggf. kann während der Behandlung die chemische Zusammensetzung des Werkstoffes geändert werden. ➤ Wärmen Erhöhung der Temperatur eines Werkstückes ➤ Erwärmen Wärmen eines Werkstückes bis zum Erreichen der vorgegebenen Temperatur im gesamten Querschnitt, d.h. Anwärmen und Durchwärmen ➤ Anwärmen Wärmen eines Werkstückes bis zum Erreichen der vorgegebenen Temperatur an der Oberfläche ➤ Durchwärmen Wärmen nach dem Erreichen der vorgegebenen Temperatur an der Oberfläche eines Werkstückes bis zum Erreichen dieser Temperatur im gesamten Querschnitt ➤ Wärmegeschwindigkeit Zeitbezogene Temperaturänderung während eines Wärmens. Man unterscheidet: • Die momentane Wärmegeschwindigkeit bei einer vorgegebenen Temperatur, • Die mittlere Wärmegeschwindigkeit in einem vorgegebenen Temperaturintervall ➤ Halten Teil einer Zeit-Temperatur-Folge, bei dem die Temperatur konstant gehalten wird.		
Dr. Dieter Mäder	DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE	Folie 12

	Begriffe der Wärmebehandlung (DIN EN 10052:1994)	
➤ Abkühlen Senken der Temperatur eines Werkstückes. Das Abkühlen kann in einem Schritt oder mehreren Schritten erfolgen. ➤ Abkühl-dauer Zeitspanne zwischen zwei vorgegebenen Temperaturen eines Abkühlverlaufes. Diese Temperaturen sind genau anzugeben ➤ Abkühlverlauf Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit für einen bestimmten Punkt des Werkstückes vom Beginn des Abkühlens bis zum Ende des Wärmebehandlungsschrittes. ➤ Abkühlkurve Grafische Darstellung des Abkühlverlaufes ➤ Abkühlgeschwindigkeit Die gibt die Temperaturänderung in Abhängigkeit von der Zeit während des Abkühlens an. Man unterscheidet: • Die momentane Abkühlgeschwindigkeit bei einer bestimmten Temperatur und • Die mittlere Abkühlgeschwindigkeit in einem Temperaturintervall ➤ Abkühlvermögen Fähigkeit eines Abkühlmittels, ein Abkühlprogramm zu verwirklichen. ➤ Abschrecken Wärmebehandlungsschritt, bei dem ein Werkstück mit größerer Geschwindigkeit als an ruhender Luft abgekühlt wird. ➤ Abkühlbedingungen Bedingungen, unter denen ein Werkstück abgekühlt wird, z.B. Art und Temperatur des Abkühlmittels, Relativbewegung, Umwälzung usw.		
Dr. Dieter Mäder	DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE	Folie 13

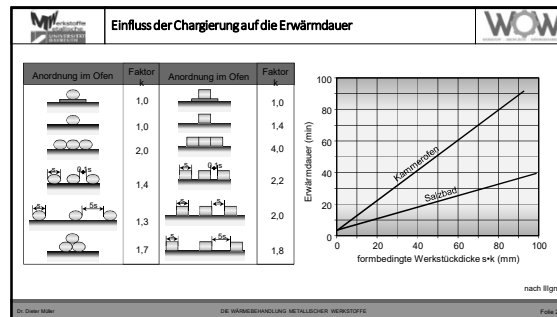
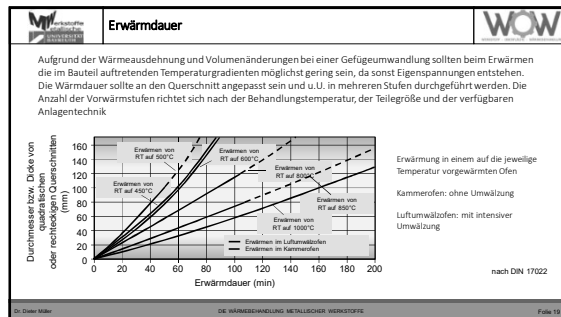
	Inhalt Block1	
1 Grundlagen 1.1 Bedeutung der Wärmebehandlung 1.2 Temperaturzyklus, Begriffe 1.3 WÄRMEERZEUGUNG 1.4 Wärmetransport 1.5 Atmosphären 1.6 Diffusion 1.7 Härtungsmechanismen		
Dr. Dieter Mäder	DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE	Folie 14



	Inhalt Block1	
1 Grundlagen 1.1 Bedeutung der Wärmebehandlung 1.2 Temperaturzyklus, Begriffe 1.3 Wärmeerzeugung 1.4 WÄRMETRANSPORT 1.5 Atmosphären 1.6 Diffusion 1.7 Härtungsmechanismen		
Dr. Dieter Mäder	DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE	Folie 16



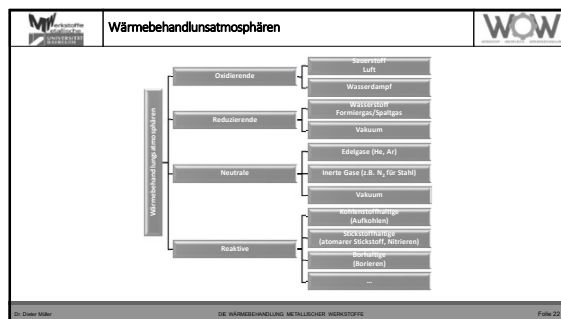
	Wärmeübertragung und -leitung	
Eindimensionale Wärmeleitungsgleichung für den instationären Zustand: $\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ Temperaturleitfähigkeit $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \left[\frac{m^2}{s} \right]$ λ: Wärmeleitfähigkeit $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ ρ: Dichte $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$ c: spezifische Wärmekapazität $\left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$ Lösung als Fourier-Reihe: $T(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} [C_1 \cos(n\pi x) + C_2 \sin(n\pi x)] e^{-\alpha n^2 t}$ C, B: Konstanten		
Dr. Dieter Mäder	DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE	Folie 18



Inhalt Block 1

- Grundlagen
 - Bedeutung der Wärmebehandlung
 - Temperaturzyklus, Begriffe
 - Wärmeerzeugung
 - Wärmetransport
- 1.5 ATMOSPHÄREN**
 - Diffusion
 - Härtungsmechanismen

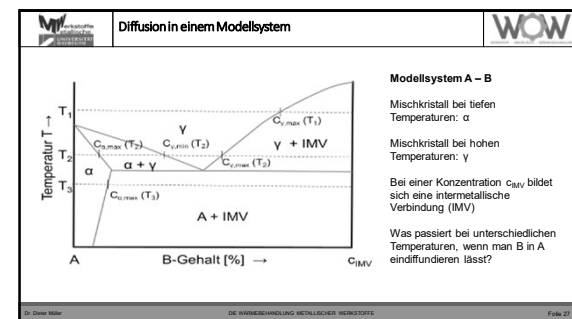
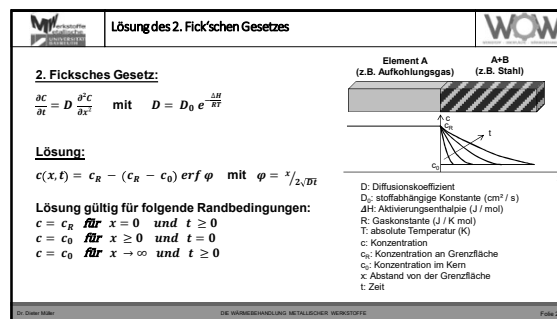
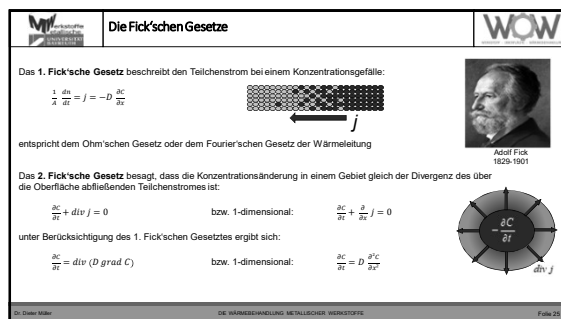
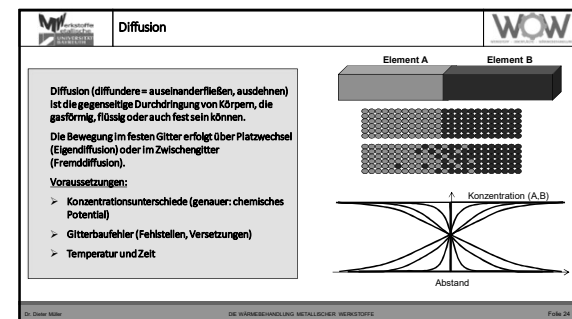
Dr. Dieter Müller DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 21

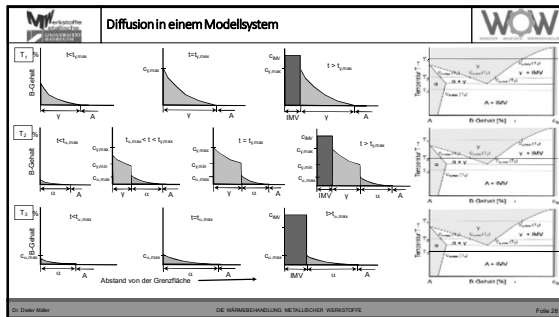


Inhalt Block 1

- Grundlagen
 - Bedeutung der Wärmebehandlung
 - Temperaturzyklus, Begriffe
 - Wärmeerzeugung
 - Wärmetransport
 - Atmosphären
- 1.6 DIFFUSION**
 - Härtungsmechanismen

Dr. Dieter Müller DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 23





Inhalt Block 1

- 1 Grundlagen
 - 1.1 Bedeutung der Wärmebehandlung
 - 1.2 Temperaturzyklus, Begriffe
 - 1.3 Wärmezeugung
 - 1.4 Wärmetransport
 - 1.5 Atmosphären
 - 1.6 Diffusion
- 1.7 HÄRTUNGSMECHANISMEN**

Dr. Dieter Mader DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 29

Härtungsmechanismen

Verfestigung

Kaltverfestigung durch Umformen

Erhöhung der Versetzungsdichte, gezielte Festigkeitssteigerung bei der Bauteilherstellung, kzt: mittlere Verfestigungsneigung, kzt: hohe, hdp: geringe.

- Mischkristallverfestigung

Verzerrung des Gitters durch Fremdatome erschwert Versetzungsbewegung. Metallatome auf Gitterplätzen, Nichtmetall-Atome auf Zwischengitterplätzen (große Auswirkung auf Festigkeit und Duktilität bei geringer Löslichkeit)
- Korngrenzenverfestigung

Feinkörniges Gefüge erhöht Anzahl der Korngrenzen. Diese wirken als Hindernisse. Gleichzeitig Duktilitätserhöhung aufgrund vieler Gleitsysteme.
- Partikelverfestigung

Kleine harte Teilchen (Ausscheidungen, Dispersion) behindern die Versetzungsbewegung. Große Wirkung bei kohärenten Teilchen.

Dr. Dieter Mader DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 30

Verfestigungsmechanismen

Hindernisarten	Dimensionen	Effekt	Festigkeitsabhängigkeit
Fremdatome	0 - dimensional	Mischkristallhärtung	$R \sim \sqrt{c}$
Versetzungen	1 - dimensional	Kaltverfestigung	$R \sim \sqrt{\rho}$
Korngrenzen	2 - dimensional	Kornfeinung	$R \sim \frac{1}{\sqrt{d}}$
Ausscheidungen	3 - dimensional	Teilchenhärtung	$R = R(r, l)$

R - Festigkeit, c - Konzentration der Fremdatome, ρ - Versetzungsdichte, d - mittlere Korngröße, r - Teilchengröße, l - mittlerer Teilchenabstand

Quelle: Uni Hannover, Institut für Werkstoffkunde, Prof. Bach

Dr. Dieter Mader DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 31

