

WERKSTOFFTECHNIK-GRUNDPRAKTIKUM

Versuch G9: Aufkohlung eines Einsatzstahls

Inhalt

- 1 Einleitung
- 2 Grundlagen
- 3 Versuchsdurchführung
- 5 Fragen zum Versuch
- 6 Literatur
- 7 Protokoll
- 8 Anhang

Name:

Vorname:

Matrikelnummer:

Testat:

Grundpraktikum

Laborversuch: Aufkohlung eines Einsatzstahls

Im Versuch soll die praktische Bedeutung der Aufkohlung erläutert werden. Es ist zu untersuchen, welchen Einfluss verschieden lange Aufkohlungszeiten eines Einsatzstahls bei gleichbleibender Temperatur haben.

Für die Vorbereitungen und Auswertung des Versuchs ist von jedem Versuchsteilnehmer ein Taschenrechner mitzubringen!

1 Grundlagen

Viele Bauteile, vornehmlich höher beanspruchte Maschinenbauteile wie Wellen, Achsen oder Zahnräder, unterliegen im Bereich ihrer Oberfläche (Randschicht) besonders kritischen mechanischen Beanspruchungen. In diesen Fällen bietet eine Randschichtverfestigung nicht nur eine kostengünstige, sondern auch eine der Gesamtbeanspruchung des Bauteils technisch angepasste Lösung. Durch das Einsatzhärten werden Werkstücke mit einer harten, dauer- und verschleißfesten Randschicht bei unverändert zähem Kernbereich erzeugt. Dabei finden sogenannte Einsatzstähle mit niedrigem Kohlenstoffgehalt (un- und niedriglegierte Stähle mit weniger als 0,25 Massenprozent Kohlenstoff) Anwendung. Das Einsatzhärten besteht in der Regel aus den drei Arbeitsschritten

- Aufkohlen,
- Härten und
- Anlassen.

Zur Erzielung einer hohen Randhärte muss das Werkstück zunächst aufgekohlt werden. Beim Aufkohlen wird das Werkstück in kohlenstoffabgebender Umgebung längere Zeit bei Temperaturen zwischen 880°C und 1050°C im Gebiet des homogenen Austenits geglüht (Abb.1). Die nachfolgende Härtung, die entweder direkt oder nach geeignet gewählten Zwischenwärmebehandlungen erfolgt, steigert die Härte des aufgekohlten Randes auf 700 bis 850 HV und die des Kernquerschnitts – je nach Bauteilquerschnitt – auf 170 bis 350 HV. Bei der Direkthärtung wird das Werkstück nach Abschluss des Aufkohlens so schnell im Wasser oder Öl abgekühlt, dass Härtung durch Martensitbildung eintritt. Nach dem Härten erfolgt

eine Anlassbehandlung, die dazu dienen soll, die Zähigkeit der gehärteten Randschicht zu verbessern.

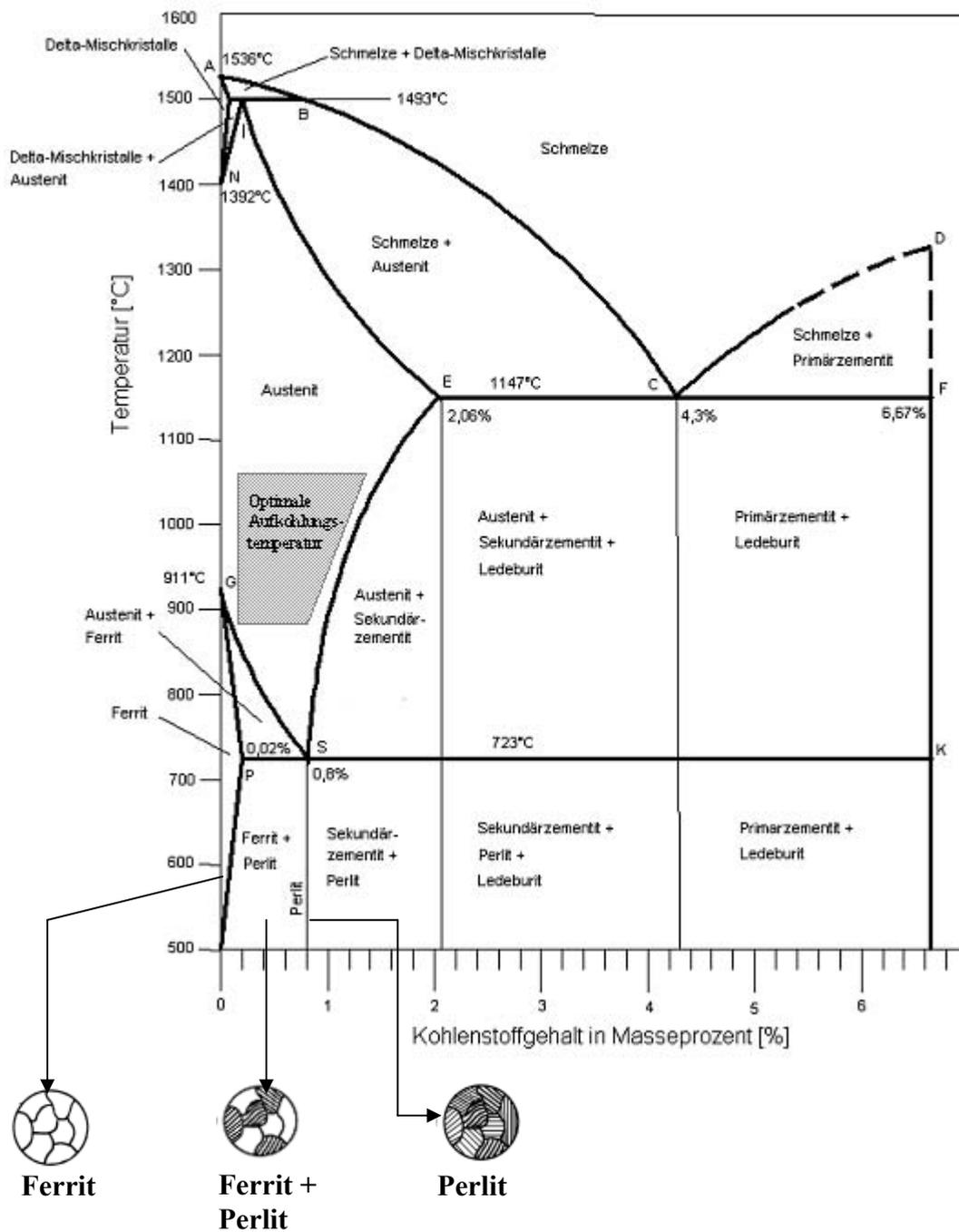


Abbildung 1: Eisen-Kohlenstoffdiagramm mit optimaler Temperatur für das Aufkohlen der Randschicht

Während des Aufkohlens diffundiert der Kohlenstoff aus dem umgebenden Medium in das Innere des Werkstücks. Der Kohlenstoffgehalt steigt dabei in der Randschicht von 0,1%...0,25% (Kohlenstoffgehalt der Einsatzstähle) auf 0,7%...0,8% (Kohlenstoffgehalt der aufgekohlten Randschicht) kontinuierlich an. Kühlt man nun ein aufgekohltes Werkstück mit

langsamer Geschwindigkeit ab, dann beginnt mit Erreichen von G-S (A3-Linie) die Umwandlung des Austenits in Ferrit. Es bildet sich dadurch ein mehr oder weniger ausgeprägtes Ferritnetz, während sich der Austenit aufgrund der geringen Kohlenstofflöslichkeit des Ferrits zunehmend mit Kohlenstoff anreichert. Mit Unterschreiten des Abschnitts P-S der Eutektoiden (A1-Linie) bei 723°C ist die Aufnahmefähigkeit des Austenits für Kohlenstoff erschöpft. Der noch vorhandene Austenit zerfällt in Perlit, einem Kristallgemisch aus plattenförmig nebeneinander angeordneten Ferrit- und Zementitkristallen. Bei weiterer Abkühlung finden keine weiteren wichtigen Gefügeumwandlungen mehr statt, sodass bei Raumtemperatur im Inneren des Werkstückes schließlich ein ferritisch-perlitisches Gefüge vorliegt. Der beschriebene Bildungsmechanismus ist an die Diffusion von Kohlenstoff- bzw. Eisenatomen gebunden. Da die Legierung in der Randschicht eine höhere Kohlenstoffkonzentration aufweist (bis 0,8%), ist dort ein erheblich verändertes Gefüge aus reinem Perlit zu erkennen (s. Abb.1). Mit zunehmender Abkühlgeschwindigkeit steht für eine Diffusion weniger Zeit zur Verfügung, der Austenitkristall wird in zunehmendem Maß unterkühlt. Bei diesen niedrigen Temperaturen ist sowohl die Diffusion von Kohlenstoffatomen als auch die Diffusion von Eisenatomen praktisch nicht mehr möglich. Die Bildung des Martensits stellt einen besonderen Umwandlungstyp dar, der dadurch gekennzeichnet ist, dass sich das kfz - Austenitgitter durch eine diffusionslose, gekoppelte, koordinierte Bewegung ganzer Atomgruppen in eine raumzentrierte Gitterstruktur umwandelt. Das Gefüge des Martensits besitzt eine sehr hohe Härte und Festigkeit, die Zähigkeit und Verformbarkeit ist demgegenüber äußerst gering. Abb.2 zeigt den Verlauf des Kohlenstoffgehaltes sowie die Härte in der Randschicht eines aufgekohlten und gehärteten Werkstückes. Die Kohlenstoffkonzentration und Härte in der Randschicht nehmen bis zu den Werten des Werkstoffkerns ab. Für die Praxis des Aufkohlens ist neben der Kohlenstoffverlaufskurve besonders die Aufkohlungstiefe von Interesse. Sie ist eine Kenngröße für die Kohlenstoffanreicherung in der Randschicht. Nach DIN EN 10 052 ist die Aufkohlungstiefe derjenige Abstand zur Oberfläche, bei dem ein vereinbarter Kohlenstoffgehalt erreicht wird. Im Rahmen des Praktikumsversuchs wird für die Ermittlung der Aufkohlungstiefe ein Kohlenstoffgehalt von 0,4% zugrundegelegt. Das für diesen Kohlenstoffgehalt charakteristische Gefüge besteht aus 50% Ferrit und 50% Perlit.

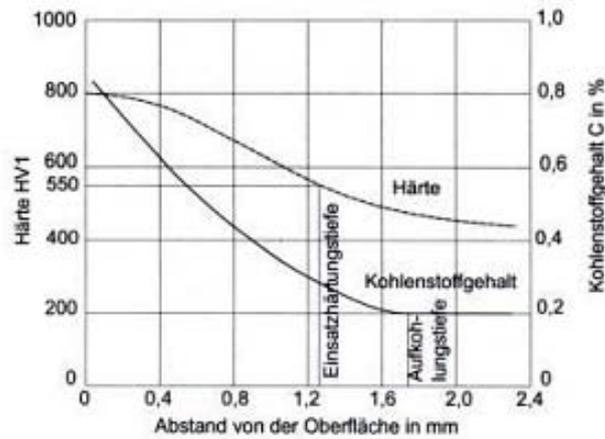


Abb.2: Verlauf des Kohlenstoffgehaltes und der Härte in der Randschicht

Der beim Aufkohlen im Bereich der Randschicht erreichbare Kohlenstoffgehalt des Stahls hängt im Wesentlichen vom Kohlenstoffpegel c_p ab. Der Kohlenstoffpegel entspricht dem Kohlenstoffgehalt in Masseprozent, den eine Probe aus Reineisen im homogenen Austenitgebiet bei einer gegebenen Temperatur im Gleichgewicht mit dem umgebenden Medium annimmt. Ist der Kohlenstoffpegel c_p geringer als der Sättigungswert c_s (entspricht dem Schnittpunkt der jeweiligen Aufkohlungstemperatur mit der SE-Linie des Eisen-Kohlenstoffdiagramms), so kann in der Randschicht höchstens der Wert des Kohlenstoffpegels erreicht werden. Ist er größer, dann ist der Kohlenstoffpegel nur fiktiv und der Randkohlenstoffgehalt kann einen Wert entsprechend c_s annehmen. Abbildung 3 zeigt, dass Stähle mit niedrigen Kohlenstoffgehalten nur bis zu einem dem Wert des Kohlenstoffpegels des Aufkohlungsmittels entsprechenden Kohlenstoffgehalt aufgekohlt werden können. Stähle, deren Kohlenstoffgehalte über dem Kohlenstoffpegel des Aufkohlungsmittels liegen, werden dagegen entkohlt.

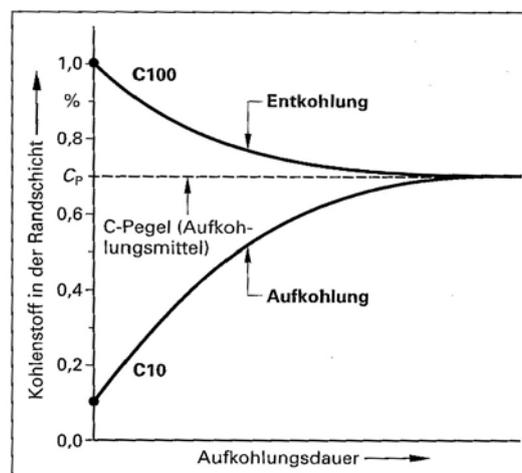


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen dem Kohlenstoffgehalt des Stahls und dem Kohlenstoffpegel des Aufkohlungsmittels am Beispiel der Stähle C10 und C100

Das Aufkohlen kann in unterschiedlichen Medien erfolgen. Hinsichtlich des Aggregatzustandes des aufkohlenden Mediums unterscheidet man:

- Aufkohlen in festen Aufkohlungsmitteln,
- Aufkohlen in flüssigen Aufkohlungsmitteln (Salzschmelzen) und
- Aufkohlen in gasförmigen Aufkohlungsmitteln.

Trotz des unterschiedlichen Aggregatzustandes der Aufkohlungsmittel erfolgt der Übergang der Kohlenstoffatome vom Aufkohlungsmittel auf die Werkstückrandschicht grundsätzlich über die Gasphase.

Das Aufkohlen in festen Aufkohlungsmitteln stellt ein einfaches und insgesamt kostengünstiges Verfahren dar. Als Aufkohlungsmittel wird in der Regel eine Mischung aus einem Kohlenstoffträger (60%) und einem Aktivierungsmittel (40%) verwendet. Als Kohlenstoffträger kommt Holzkohle in Frage. Bei den Aktivierungsmitteln, die zur Beschleunigung der Kohlenstoffaufnahme zugesetzt werden, handelt es sich meist um Alkali- oder Erdalkalicarbonate (wie z.B. BaCO_3).

Nach Erwärmen auf Aufkohlungstemperatur (etwa 880°C bis 1050°C) bildet sich über mehrere Reaktionsschritte aus dem im Aufkohlungsmittel enthaltenen Kohlenstoff und dem Sauerstoff der Luft zunächst gasförmiges Kohlenmonoxid:



Die Freisetzung des Kohlenstoffs erfolgt dann aus dem gasförmigen Kohlenmonoxid (CO) entsprechend der Boudouard- Reaktion:



Die Boudouard- Reaktion läuft so lange ab, bis sich zwischen der CO bzw. CO_2 enthaltenden Atmosphäre auf der Werkstückoberfläche und dem Randkohlenstoffgehalt des Stahls [C] ein temperaturabhängiges Gleichgewicht eingestellt hat.

Die im Falle einer Aufkohlung freigesetzten Kohlenstoffatome dringen in die Werkstückoberfläche ein und werden im Kristallgitter des Austenits interstitiell (d.h. im Zwischengitter) gelöst. Der weitere Vorgang des Eindringens der Kohlenstoffatome in den Werkstoff aufgrund atomarer Platzwechselforgänge erfolgt durch Diffusion. Grundlage für die mathematische Beschreibung von Diffusionsvorgängen sind die beiden *Fickschen Gesetze*. Der Materialfluss \mathbf{j} , d.h. die Anzahl von Atomen, die pro Zeiteinheit die Fläche \mathbf{A} in

einem Konzentrationsgradienten $\mathbf{dc/dx}$ durchwandert, wird phänomenologisch durch das 1. Ficksche Gesetz (für den eindimensionalen Fall) beschrieben:

$$\mathbf{j} = - \mathbf{D} \frac{\mathbf{dc}}{\mathbf{dx}} \quad (3)$$

Die Proportionalitätskonstante \mathbf{D} heißt Diffusionskoeffizient und hat die Einheit m^2/sec . Das Minuszeichen gibt an, dass die Diffusion aus Bereichen hoher Konzentration in Bereiche niedriger Konzentration erfolgt. Bei der 2. Fickschen Gleichung dagegen verfolgt man den zeitlichen Verlauf der Konzentration an einem Ort entlang des Diffusionsweges:

$$\frac{\partial \mathbf{c}}{\partial \mathbf{t}} = \mathbf{D} \frac{\partial^2 \mathbf{c}}{\partial \mathbf{x}^2} \quad (4)$$

Anschaulich besagt dieses Gesetz, dass Konzentrationsberge abgebaut und Täler aufgefüllt werden. Die je nach Randbedingungen mathematisch recht aufwändigen Verfahren zur Lösung dieser partiellen Differentialgleichung durch Trennung der Variablen und doppelter Aufintegration werden in einschlägigen Monografien ausführlich dargestellt [5]. Für den Sonderfall der Aufkohlung ergibt sich folgende Lösung:

$$\frac{\mathbf{c}_{\mathbf{x},\mathbf{t}} - \mathbf{c}_0}{\mathbf{c}_s - \mathbf{c}_0} = 1 - \text{erf} \left(\frac{\mathbf{x}}{2\sqrt{\mathbf{D}\mathbf{t}}} \right) \quad (5)$$

$\mathbf{c}_{\mathbf{x},\mathbf{t}}$ die von Zeit \mathbf{t} und dem Abstand von der Oberfläche \mathbf{x} abhängige Kohlenstoffkonzentration in dem aufzukohlenden Werkstück,

\mathbf{c}_s die von der Temperatur und dem Kohlenstoffpotential des aufzukohlenden Mediums abhängige maximale Kohlenstofflöslichkeit des Stahls (Endkonzentration nach unendlicher Zeit),

\mathbf{c}_0 Kohlenstoffkonzentration des aufzukohlenden Werkstoffs (Anfangskonzentration),

$\text{erf}(\mathbf{z}) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\mathbf{z}} \mathbf{e}^{-\mathbf{u}^2} \mathbf{d}\mathbf{u}$ die *error function* (Gaußsches Fehlerintegral). Diese Funktion ist

tabelliert, sie kann nicht analytisch berechnet werden.

Die Integration der Lösung des 2. Fickschen Gesetzes für den eindimensionalen Fall für einen begrenzten Bereich (z.B. eine ebene Platte, deren Dicke \mathbf{l} klein gegenüber den anderen Dimensionen ist) über \mathbf{x} liefert die zur Zeit \mathbf{t} aufgenommene Kohlenstoffmenge:

$$\mathbf{M}(\mathbf{t}) = \mathbf{l} - \frac{8}{\pi^2} \sum_{\mathbf{n}=0}^{\infty} \frac{1}{(2\mathbf{n} + 1)^2} \exp \left\{ - (2\mathbf{n} + 1)^2 \pi^2 \frac{\mathbf{D}\mathbf{t}}{\mathbf{l}^2} \right\} \quad (6)$$

Darin bedeutet n eine nichtnegative ganze Zahl, d.h. $n = 0,1,2,3...$ Nach dem dritten Term kann die Berechnung in guter Näherung abgebrochen werden. Gl. (6) kann zur Bestimmung von Diffusionskoeffizienten verwendet werden. Ist die mittlere Kohlenstoffkonzentration \bar{c} des aufgekohlten Werkstückes bekannt, wird die aufgenommene Kohlenstoffmenge wie folgt berechnet:

$$M(t) = \frac{\bar{c}(t) - c_0}{c_s - c_0} \quad (7)$$

2 Aufgabenstellung

Der Stahl CK15 soll durch Glühen in Holzkohlepulver aufgekühlt werden. Es ist zu untersuchen, welchen Einfluss verschieden lange Glühzeiten bei gleichbleibender Temperatur haben. Nach der Glühbehandlung sind von den Proben Mikroschliffe für die Auswertung anzufertigen.

3 Versuchsdurchführung

Die Holzkohle wird mit einem Mörser pulverisiert und anschließend mit Bariumkarbonat im Verhältnis 60:40 vermischt. Bariumkarbonat dient als Aktivierungsmittel. Die vier durch das Aufkohlen zu behandelnden Werkstücke, die metallisch blank und fettfrei sein müssen, werden vollständig in das als Pulver zur Verfügung stehende Aufkohlungsmittel eingepackt und in den Ofen gestellt. Zwei Proben werden 6 Stunden in Holzkohlepulver geglüht, zwei andere jeweils 1 ½ und 3 Stunden. Für jede Glühdauer ist jeweils ein 2 mm dickes Plättchen mit aufzukohlen. Nach Beendigung des Glühvorgangs werden die Proben und die Plättchen aus dem Ofen herausgenommen und an der Luft abgekühlt. Eine der zwei Proben mit 6 Stunden Glühzeit wird direkt nach dem Herausnehmen durch das Abschrecken im Wasser gehärtet. Anschließend werden die Proben getrennt, je eine Hälfte jeder Probe eingebettet, mechanisch geschliffen und poliert. Auf die Bedienungsanleitung der Schleif- und Poliergeräte wird hingewiesen. Vor dem Ätzen der Proben ist mit dem Betreuer Rücksprache zu halten! Durch die Ätzbehandlung mit 3%iger HNO_3 wird das Gefüge der Probe sichtbar gemacht. Nach dem Ätzen werden die Proben zunächst mit Wasser und nachfolgend mit Ethanol abgespült und unter dem Föhn getrocknet. Die Schliffe werden unter dem Lichtmikroskop betrachtet, die Gefügeunterschiede sind hinsichtlich ihrer Art und Form zu beurteilen und mit vorgelegten Gefügebildern zu vergleichen (s. Anhang). Die Aufkohlungstiefen mit $c_c \approx 0,4\%$ (entspricht in etwa 50% Ferrit und 50% Perlit) für die

jeweiligen Aufkohlungszeiten sind mit Hilfe des Lichtmikroskops näherungsweise zu bestimmen und in die Tabelle 1 des Versuchsprotokolls einzutragen.

Die aufgenommene Kohlenstoffmenge jedes der drei Plättchen ist nach der Gl. (6) zu berechnen. Der Kohlenstoffgehalt der drei aufgekohlten Plättchen wird in einem Kohlenstoffanalysator bestimmt. Die gemessenen sowie die berechneten Werte sind in Tabelle 2 einzutragen und auszuwerten.

Bei der gehärteten Probe wird die Vickershärte HV 0,5 in Abhängigkeit von der Oberflächenentfernung bestimmt. In Randnähe sind die Messpunkte möglichst dicht zu legen. Die Härtewerte sind in das im Protokoll enthaltene Diagramm einzutragen und zu diskutieren.

4 Fragen zum Versuch

- 1) Wo und welche Veränderungen bewirkt das Einsatzhärten in Bauteilen?
- 2) Aus welchen Schritten besteht das Einsatzhärten?
- 3) Im welchen Gebiet im Zustandsdiagramm wird aufgekühlt?
- 5) Wie erfolgt üblicherweise die Härtung?
- 6) Welche Gefügeumwandlungen finden bei langsamer bzw. schneller Abkühlung statt?
- 4) In welchen Medien kann die Aufkohlung stattfinden?
- 5) Welche Parameter beeinflussen die Kinetik der Aufkohlung?
- 6) Welchen maximalen Kohlenstoffgehalt kann ein Stahl bei der Aufkohlung annehmen?
- 7) Wann tritt die Entkohlung auf?
- 8) Nach welchen beiden Reaktionen erfolgt die Freisetzung des Kohlenstoffes?
- 9) Durch welchen Mechanismus erfolgt die Aufkohlung?
- 10) Wie lautet das 1. Ficksche Gesetz?
- 11) Was ist die Aussage des 2. Fickschen Gesetzes?

5 Literatur:

- [1] Läßle V.: Wärmebehandlung des Stahls, Europa Lehrmittel 2003
- [2] Macherauch E.: Praktikum in Werkstoffkunde, Vieweg 1992
- [3] Bergmann W.: Werkstofftechnik, Hanser 1987
- [4] Lawrenz D.A., Mitchell J.: Thermal Evolution Methods for Carbon, Sulfur, Oxygen, Nitrogen and Hydrogen in Iron and Steel Analysis, Steel and Related Materials
- [5] Crank J., The Mathematics of Diffusion, Clarendon Press, Oxford 1975

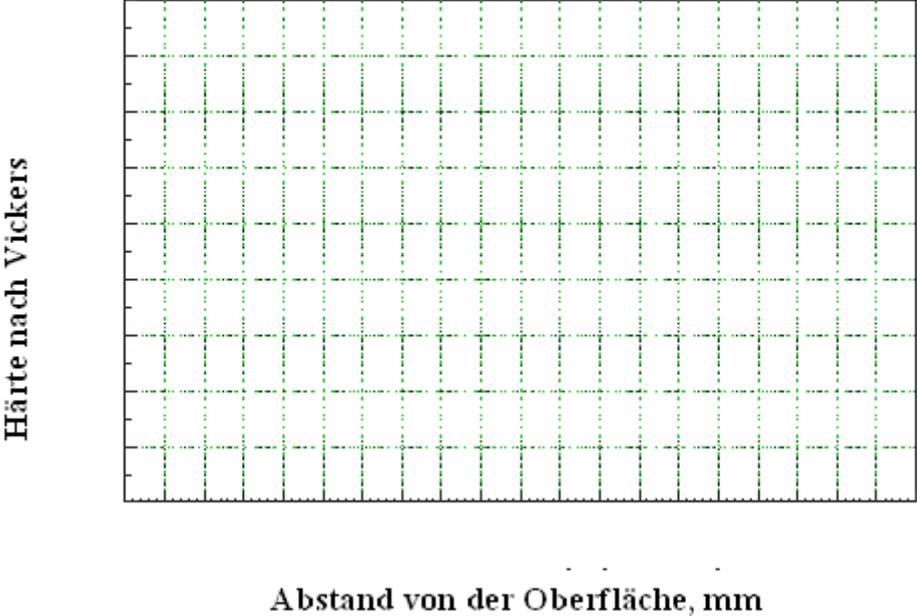
7 Protokoll

Tabelle 1

Zeit t, St	Ort mit $c_c \approx 0,4\%$

Tabelle 2

Zeit t, St	berechneter Kohlenstoffgehalt	gemessener Kohlenstoffgehalt



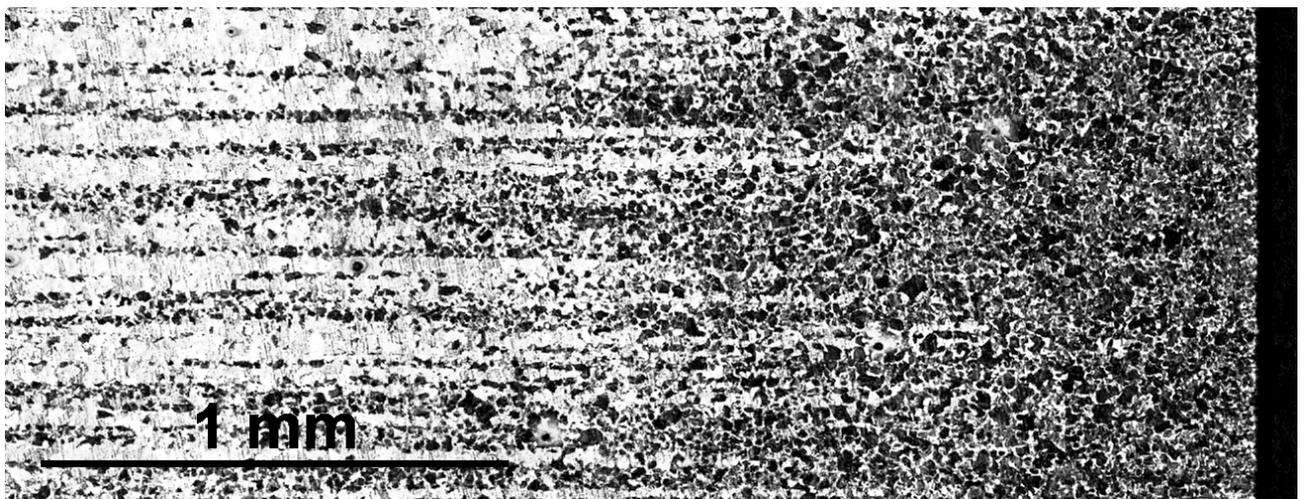
Anhang 1



a)



b)



c)

Abbildung 4: Aufkohlung des Stahls CK15 durch Glühen bei 1000°C in Holzkohle; (a) nach 1,5 Stunden, (b) nach 3 Stunden, (c) nach 6 Stunden

Anhang 2

Arbeitsschritte für die Versuchsdurchführung

	1.Probe	2.Probe	3.Probe	4.Probe	1.Plättchen	2.Plättchen	3.Plättchen
Aufkohlen 1,5 St.	x				x		
Aufkohlen 3 St.		x				x	
Aufkohlen 6St.			x	x			x
Abkühlen an Luft	x	x	x		x	x	x
Abschrecken in Wasser				x			
Schliffanfertigung	x	x	x	x			
Ätzen	x	x	x				
Härtemessung				x			
Gefügeanalyse	x	x	x				
Kohlenstoffgehaltmessung					x	x	x