

THEORETISCHE UND PRAKTISCHE ANALYSE DER GRUNDLEGENDEN WÄRMEBEHANDLUNGS- METHODEN VON STAHL

Sacha Chapuis

Mathematisch-Naturwissenschaftliches Gymnasium Rämibühl

Klasse 4g

8001 Zürich

Betreuende Lehrperson: Lorenz Marti

Abstract

Diese Maturitätsarbeit befasst sich mit dem Aufbau und den grundlegenden Wärmebehandlungen von Stahl. Es werden die theoretischen Grundlagen der Eisen-Metallurgie, insbesondere die Modifikationen als Funktion der Temperatur und die dabei auftretenden Kristalländerungen, erarbeitet. Die klassischen Wärmebehandlungen wie Weichglühen, Normalglühen, Grobkornglühen und das Härten mit anschliessendem Anlassen werden miteinander verglichen. In einem zweiten Schritt werden diverse Stahlproben vorbereitet und den fünf Wärmebehandlungen unterzogen und anschliessend für die lichtmikroskopische Untersuchung poliert, geätzt und auf Glasträger montiert. Mit Hilfe von Bildanalyse-Software wird die Korn-Struktur ausgewertet, die Korngrössen ermittelt und die Resultate der Umkristallisationen mit der Theorie verglichen.

Inhalt

1	Einleitung.....	7
2	Theorie	9
2.1	Metallische Kristalle.....	9
2.2	Gitteraufbau.....	9
2.2.1	Alpha-Eisen (α -Eisen, Ferrit).....	11
2.2.2	Gamma-Eisen (γ -Eisen, Austenit).....	12
2.2.3	Zustandsschaubild	12
2.2.4	Gitterbaufehler: Punktförmig	13
2.2.5	Gitteraufbaufehler: Versetzungen	14
2.2.6	Gefüge, Körner	15
2.3	Kristallisation	16
2.3.1	Auskristallisation von Legierungen.....	16
2.3.2	Umwandlungen im festen Zustand.....	16
2.4	Stahl	16
2.4.1	Eisenkarbid	17
2.4.2	Eutektoider Stahl (Eisenkarbid und α -Eisen)	17
2.4.3	Lösen von Stoffen in Eisen	18
2.5	Legierungselemente im Stahl	18
2.5.1	Mischkristalle	19
2.5.2	Intermediäre Kristalle (Karbide)	21
2.6	Behandlungsformen zur Eigenschaftsveränderung.....	21
2.6.1	Martensit	22
2.6.2	Härten von Stahl	23
2.6.3	Anlassen	24
2.6.4	Grobkornglügen	24
2.6.5	Weichglügen	25
2.6.6	Normalglügen.....	25
2.6.7	Zusammenfassung der Stahl-Glühbehandlungen.....	26
3	Material und Methoden.....	27
3.1	Mechanische Behandlung	28
3.2	Wärmebehandlung	29
3.2.1	Berechnen der Glühdauer.....	30
3.2.2	Weichglügen	30
3.2.3	Vergüten	31

3.2.4	Normalglühen.....	31
3.2.5	Grobkornglühen	31
3.3	Mechanische Nachbehandlung	31
3.4	Chemische Behandlung (Ätzen).....	32
3.5	Lichtmikroskopie.....	33
4	Resultate	35
4.1	Weichgeglühter Stahl	35
4.2	Vergüteter Stahl	36
4.3	Normalgeglühter Stahl.....	37
4.4	Grobkornggeglühter Stahl	38
5	Diskussion	39
5.1	Weichgeglühter Stahl	39
5.2	Vergüteter Stahl	40
5.3	Normalgeglühter Stahl.....	41
5.4	Grobkornggeglühter Stahl	42
6	Schlusswort.....	44
7	Quellen.....	45
7.1	Literaturverzeichnis	45
7.2	Internetquellen.....	46
8	Danksagung	47

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kubisch raumzentriertes Gitter α -Eisen (20 °C) Kantenlänge: 28.6nm	10
Abbildung 2: Kubisch flächenzentriertes Gitter γ -Eisen (~1100 °C) Kantenlänge: 36.6nm	10
Abbildung 3: Abkühlungs- und Aufheizkurven von Eisen; A_{c_x} = Haltepunkt Erwärmung, A_{r_x} = Haltepunkt Abkühlung	11
Abbildung 4: Eisen-Kohlenstoff Schaubild	13
Abbildung 5: Leerstelle	14
Abbildung 6: Zwischengitteratom	14
Abbildung 7: Einlagerungsatom	14
Abbildung 8: Substitutionsatom	14
Abbildung 9: Zweidimensional dargestellte Versetzung im Gitteraufbau	14
Abbildung 10: Schematische Darstellung eines Perlitkorns Hellgrau: Ferrit (α -Eisen) Dunkelgrau: Zementit (Eisenkarbid)	17
Abbildung 11: Querschnitt eines Perlitkorns Hellgrau: Ferrit (α -Eisen) Dunkelgrau: Zementit (Eisenkarbid)	17
Abbildung 12: Substitutionsmischkristall A: Eisenatome B: Legierungselemente	20
Abbildung 13: Einlagerungsmischkristall A: Eisenatome C: Legierungselemente	20
Abbildung 14: Umkristallisation vom kubisch flächenzentrierten Gitter (γ -Eisen, Kantenlänge: 36.3nm in das kubisch raumzentrierte Gitter (α -Eisen, Kantenlänge: 28.6nm)	22
Abbildung 15: Tetragonales Martensit Gitter	23
Abbildung 16: Kubisches Martensit Gitter	24
Abbildung 17: Stahlproben von Pestalozzi Stahl, Dietikon.	27
Abbildung 18: Benutzte Werkzeuge für die Bearbeitungen der Proben.	28
Abbildung 19: Ein Set mit fünf fertig polierten Proben.	29
Abbildung 20: Versuchsanordnung mit Ofen, Abschreckglas, Eternitplatte und Zange.	30
Abbildung 21: Proben im Ofen während dem Weichglühen.	31
Abbildung 22: Abkühlen einer glühenden Probe an der Luft auf der Eternitplatte.	31
Abbildung 23: Nassschleifen und -polieren einer Probe IIII.	32
Abbildung 24: Lichtmikroskop mit Kamera und Computer mit Analyse-Software (Bild-Quelle: [Olympus, n.d.]).	34
Abbildung 25: Proben IIII (C 45 Stahl) auf Glasträger montiert und bereit für die Mikroskopie.	34
Abbildung 26: Auflichtaufnahme von C 45 weichgeglühtem Stahl (2.6.5).	35
Abbildung 27: Auflichtaufnahme von C 45 Vergütetem Stahl (2.6.2 & 2.6.3).	36

Abbildung 28: Auflichtaufnahme von C 45 normalgeglühtem Stahl (2.6.6).....	37
Abbildung 29: Auflichtaufnahme von C 45 Grobkorngeglühtem Stahl (2.6.4).....	38
Abbildung 30: Auflichtaufnahme von C 45 Weichgeglühtem Stahl (2.6.5) mit eingefärbten Bereichen (Gelb: α -Eisen; Rot: Karbidhaltiges Korn).	39
Abbildung 31: Auflichtaufnahme von C 45 Vergütetem Stahl (2.6.2 & 2.6.3) mit eingefärbten Bereichen.	40
Abbildung 32: Auflichtaufnahme von C 45 normalgeglühtem Stahl (2.6.6) mit Punkten.	41
Abbildung 33: Auflichtaufnahme von C 45 Grobkorngeglühtem Stahl (2.6.4) mit eingefärbten Karbidhaltigen Körnern.....	42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung der Stahl-Glühbehandlungen.....	26
Tabelle 2: Stahlproben	27
Tabelle 3: Verwendete Schleifpapiere vor der Wärmebehandlung.....	29
Tabelle 4: Verwendete Schleifpapiere für die mechanische Nachbehandlung	32

1 Einleitung

Die Ägypter haben schon vor 5000 Jahren begonnen Stahl zu bearbeiten. Sie hatten keine Eisenminen, geschweige denn die Kenntnisse Eisen zu Stahl zu verarbeiten. Ihr Stahl fiel buchstäblich vom Himmel, in Form von Meteoriten. Offensichtlich war dieser Rohstoff für die Ägypter extrem rar und somit wurden damit keine Waffen hergestellt, sondern Schmuck für die Pharaonen. Vor 3500 Jahren wurde erstmals im Nahen Osten Eisen zu Stahl verarbeitet. Das Volk der *Hethiter* verstand es, den härtbaren Stahl für Waffen zu nutzen und konnte so seine Herrschaft ausbauen. Die ersten grossen Eisenvorkommen, die in Europa durch die *Kelten*, vor 2400 Jahren, entdeckt wurden, befanden sich in Oberösterreich, durch erproben konnten sie das Eisen zu Stahl weiterverarbeiten. Sie nutzten den Stahl nicht nur für Waffen und Werkzeuge, sondern auch für Schmuck und Geschirr. Die Herrschaft der *Kelten* über ganz Europa wurde mittels Stahl ermöglicht. Ein Grossteil des fortgeschrittenen Wissens der *Kelten* ging mit dem Aufkommen der Kirche verloren und für eine Zeitspanne von mehr als 1000 Jahren konnte nur noch primitiver Stahl hergestellt werden. Mit der Industrialisierung in Europa wurden Stahl- und Kohlenindustrie zu den Hauptpfeilern für militärische- und die damit verbundene politische Macht. Bis heute ist Stahl der meist verwendete Rohstoff; die Grundlage für unsere Wirtschaft und Lebensweise. Etwa 6% der Erdkruste besteht aus Eisen, pro Tag werden ungefähr vier Millionen Tonnen davon abgebaut. Entsprechend viel wurde an Stahl geforscht und somit sind heute etwas über 2500 Stahlsorten bekannt [Die Kelten, n.d.] & [Erdkruste, n.d.] & [Stahl - Harter Werkstoff, Hartes Geschäft, 14.10.2009] & [Stahl, 22.12.2013].

Dieses Thema habe ich gewählt, weil mich der Werkstoff Stahl seit meiner Kindheit fasziniert. Die Faszination beginnt mit dem Geschichtlichen, wie der Stahl diversen Völkern zum Aufstieg verholfen hat und wie er in der Industrialisierung enorm an Bedeutung gewann, desweiteren fasziniert mich das Verarbeiten von Stahl und die fast unendlichen Möglichkeiten und Einsatzgebiete dieses Werkstoffes. Was mir besonders gefällt, sind die vielen Parameter, die durch kleinste Veränderungen, zu grossen Eigenschaftsunterschieden führen können.

In dieser Arbeit werden die metallographischen Grundlagen von Stahl erklärt. Die Auswirkungen von Wärmebehandlungen auf die Struktur des Stahls werden theoretisch untersucht. Einige der wichtigsten Wärmebehandlungen werden an

verschiedenen Proben angewandt und danach unter einem Lichtmikroskop betrachtet und anhand der erarbeiteten Theorie erklärt.

2 Theorie

2.1 Metallische Kristalle

Wenn ein Metallatom eine Bindung eingeht, strebt es danach, seine Valenzelektronen zu teilen. In einem reinen Metallgitter ist jedoch kein Atom vorhanden, welches die freigegebenen Elektronen aufnehmen könnte, da alle Atome die gleiche Anzahl an Valenzelektronen aufweisen. Ein plausibles Model um das Verhalten der Elektronen zu beschreiben ist, dass die Elektronen sich in Form von einem Elektronengas frei zwischen den positiv geladenen Metall Ionen befinden. Zwischen dem Elektronengas und den einzelnen Atomrümpfen wirken elektrostatische Kräfte als Bindungsmittel, nicht wie z.B. bei Salzen, wo die abgegebenen Elektronen wieder aufgenommen werden und somit keine freien Elektronen, sprich auch keine elektrische Leitfähigkeit vorhanden ist [Bargel, 2012, 1].

Bei einem Gitter welches nur aus einem Metall besteht, sind die einzelnen Ionen einander vollkommen gleichwertig, was wiederum bedeutet, dass die Ionen problemlos miteinander den Platz tauschen können, ohne eine Einwirkung auf irgendeine Eigenschaft des Metalls zu haben. Durch dieses Prinzip ist die plastische Verformbarkeit der Metalle zu erklären [Bargel, 2012, 2].

Zwischen zwei Ionen herrscht eine abstossende Kraft, da beide die gleiche Ladung besitzen. Zwischen diesen beiden Ionen ist jedoch das Elektronengas, welches die entgegengesetzte Ladung aufweist und somit beide Atomrümpfe anzieht. Für jedes Metall ergibt sich bei einem gewissen, für sich eigenen, Atomabstand keine resultierende Kraft, da die beiden oben genannten gleich gross sind und sich somit gegenseitig aufheben [Bargel, 2012, 2].

2.2 Gitteraufbau

Wenn die Atomkern-Abstände immer gleich sind, wieso ist dann die Gitterstruktur von Eisen nicht einfach ein perfekter Würfel, der an jeder Ecke ein Ion aufweist? Wenn man eine Atomebene betrachtet, so haben die Ionen voneinander immer den gleichen Abstand (siehe 2.1). Betrachtet man die nächste Ebene, so trifft das für diese Ebene genauso zu. Wenn man nun aber betrachtet, wie die Ebenen zueinander stehen, so stellt man fest, dass die zweite Ebene zur ersten etwas verschoben ist. Die Ionen

kommen dann so zu liegen, wie wenn man Bälle aufeinander stapelt: Die oberen Bälle fallen in die Lücken zwischen den Bällen hinein, anstatt auf einem Ball zu balancieren, so kann man es sich auch bei den Gittern vorstellen. Bei der dritten Ebene von Bällen sind sie wieder an der genau gleichen Position, wie bei der ersten, einfach zwei Schichten höher gelegen. Diese Anordnung wird als die dichteste Kugelpackung bezeichnet [Gottstein, 2007, 71].

Die Kugelpackung und demzufolge der Gitteraufbau ist bei Metallen allerdings temperaturabhängig. Man spricht in diesem Zusammenhang von Modifikationen¹. Die Tieftemperaturmodifikation wird bei allen Metallen *Martensit* genannt, die Hochtemperaturmodifikation *Austenit*. Bei Eisen wird die Tieftemperaturmodifikation als α -Eisen (Ferrit) bezeichnet, die Hochtemperaturmodifikation als γ -Eisen (Austenit). Das α -Eisen ist in einem kubisch raumzentriertes Gitter angeordnet (Abbildung 1), das γ -Eisen in einem kubisch flächenzentriertes Gitter (Abbildung 2).

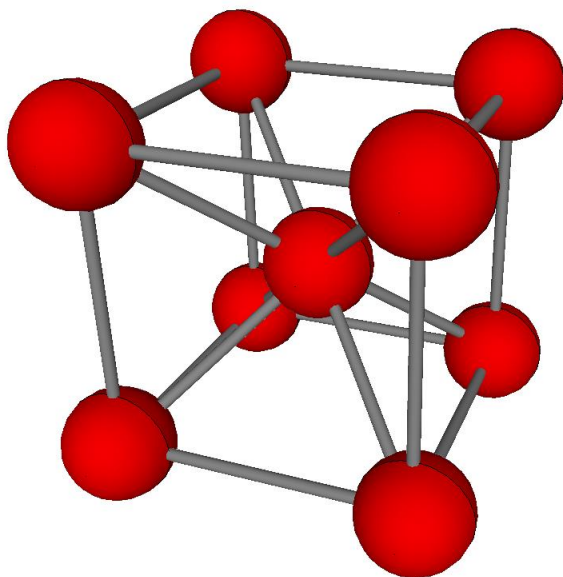


Abbildung 1:
Kubisch raumzentriertes Gitter
 α -Eisen bei $\sim 20\text{ }^\circ\text{C}$
Kantenlänge: 28.6nm

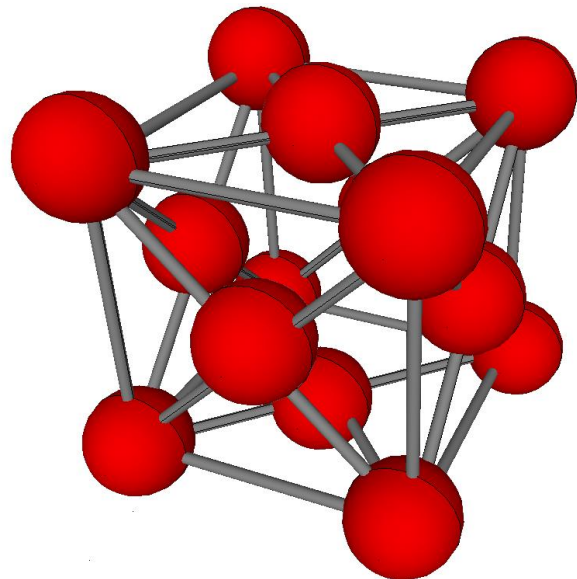


Abbildung 2:
Kubisch flächenzentriertes Gitter
 γ -Eisen bei $\sim 1100\text{ }^\circ\text{C}$
Kantenlänge: 36.6nm

¹ Eine Modifikation ist eine Veränderung im Raumgitter eines Elementarstoffes. Die äussere Erscheinungsform sowie die Eigenschaften können sich verändern, z.B. Kohlenstoff (Russ, Graphit, Diamant).

2.2.1 Alpha-Eisen (α -Eisen, Ferrit)

Das α -Eisen besitzt die Raumzentrierte Gitterstruktur (Abbildung 1). Diese Struktur ist beim Erwärmen bis 906 °C vorhanden (Abbildung 3, Ac3). Bis 768 °C ist das α -Eisen magnetisch und es vermag kaum Kohlenstoff zu lösen, dagegen in relativ grossen Mengen Nickel, Mangan, Chrom, Silizium, Aluminium, Kupfer, Wolfram und Molybdän. Das α -Eisen sowie das δ -Eisen (1401 °C bis 1528 °C, Abbildung 3, Ac4), welche dieselben Gitterstrukturen aufweisen, nennt man *Ferrite* [Christen, 1952, 11,12].

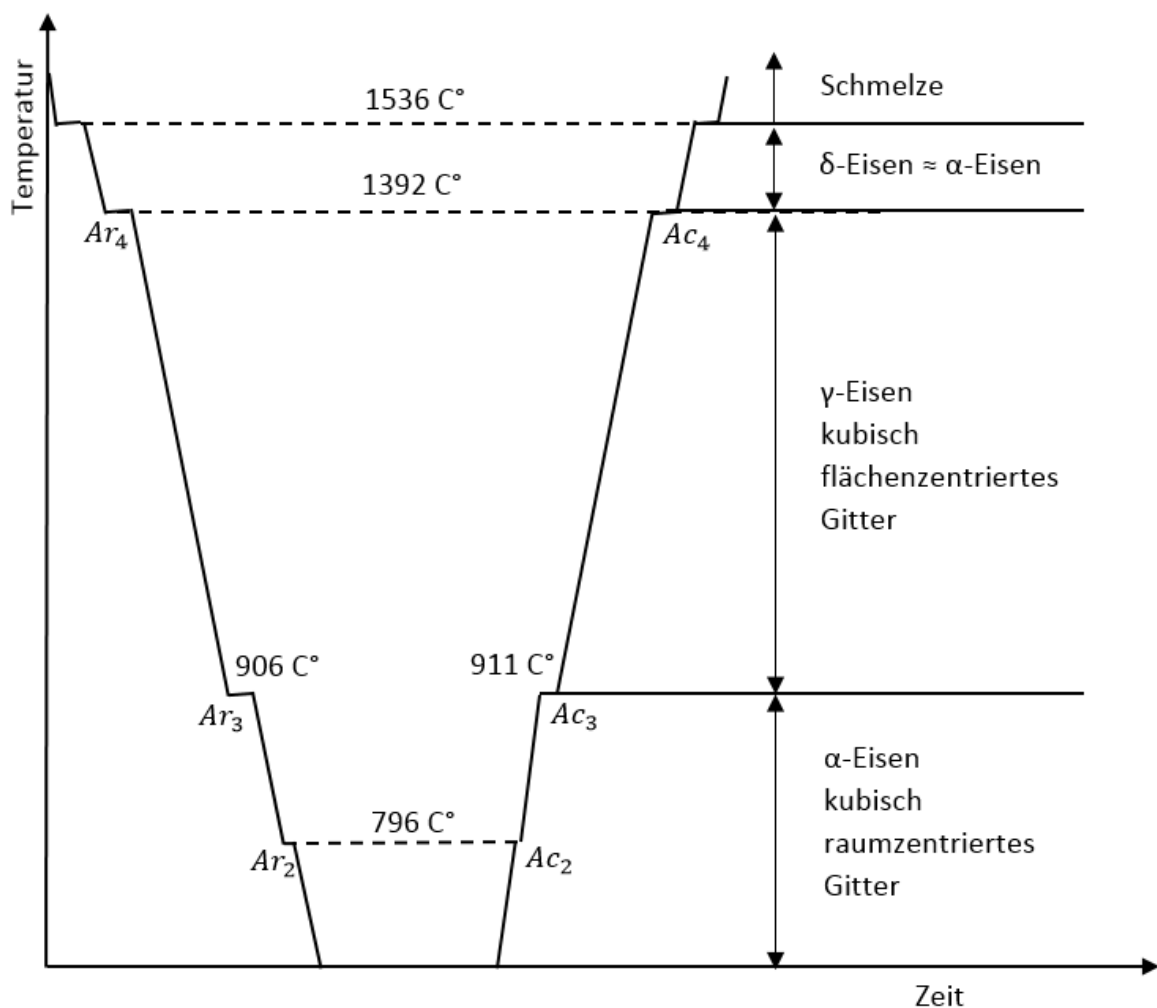


Abbildung 3: Abkühlungs- und Aufheizkurven von Eisen; Ac_x = Haltepunkt Erwärmung, Ar_x = Haltepunkt Abkühlung¹

¹ A von frz. arrêt = Halt; r von frz. refroidissement = Abkühlung; c von frz. chauffage = Erwärmung [Kammer, 2009, 12]

Gemessen werden die Phasenübergänge mithilfe eines *Dilatometers*, welcher die lineare thermische Ausdehnung einer Probe in Abhängigkeit der Temperatur messen kann [Dilatometer, 22.12.2013].

2.2.2 Gamma-Eisen (γ -Eisen, Austenit)

Die Hochtemperaturmodifikation von Eisen wird als γ -Eisen, beziehungsweise *Austenit*, bezeichnet und besitzt die kubisch flächenzentrierte Gitterstruktur (Abbildung 2). Austenit vermag bis zu 2% Kohlenstoff zu lösen, ist nicht magnetisch und schlecht wärmeleitend. γ -Eisen ist dichter als α -Eisen, das heisst die Atome sind im γ -Eisen dichter aneinander gepackt. Bei der Umkristallisation von α -Eisen zu γ -Eisen findet immer eine Volumenänderung statt. Der Punkt für die γ/α -Umwandlung auf der Abkühlungskurve liegt tiefer als der Punkt der α/γ -Umwandlung auf der Erhitzungskurve. Dieser Temperaturunterschied kann durch Legierungselemente erhöht werden. Da Eisen nie perfekt rein ist besteht auch hier ein kleinen Unterschied. α - sowie γ -Eisen sind beide ziemlich weich und in dieser Form nicht verwendbar, wobei γ -Eisen in reiner Form bei Raumtemperatur nicht vorkommt. Legiert kann es auch bei tiefen Temperaturen bestehen, wobei gleichzeitig seine Eigenschaften verändert werden [Christen, 1952, 12,13].

2.2.3 Zustandsschaubild

Sobald dem Eisen ein Legierungselement beigemischt wird, verändern sich die Temperatur-Haltepunkte an welchen sich das Eisen umkristallisiert. Die Abbildung 4 zeigt das Eisen-Kohlenstoff Schaubild. In einem solchen Diagramm sind die Phasenumwandlungen für verschiedene Kohlenstoffgehalte zu erkennen. Die Verschiebung der Kristallisationsgrenzen ist klar zu erkennen. Um für einen gewissen Kohlenstoffgehalt eine gewisse Übergangsschwelle herauszufinden, wird bei dem entsprechenden Kohlenstoffgehalt eine senkrechte Linie nach oben gezogen. Die Schnittpunkte geben nun die Umwandlungstemperatur(en) an [Reissner, 1976, 2.20].

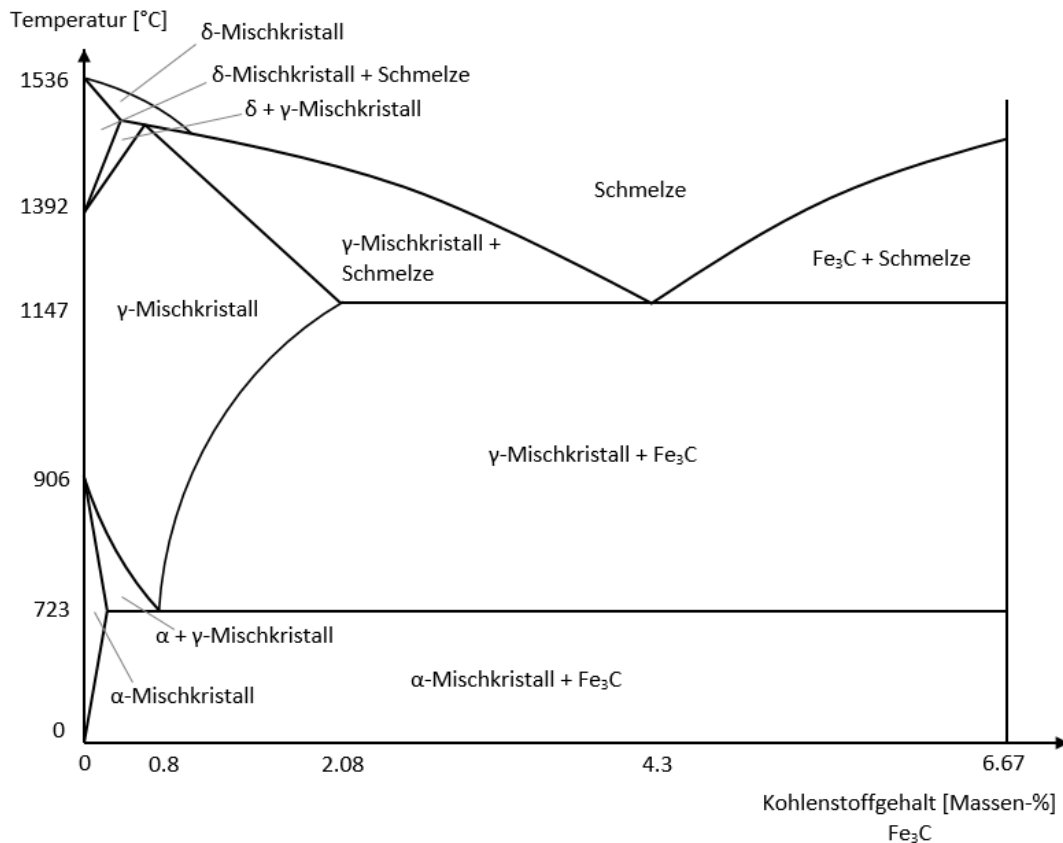


Abbildung 4: Eisen-Kohlenstoff Schaubild

2.2.4 Gitterbaufehler: Punktförmig

Bei realen Gitteraufbauten treten Fehler auf. Diese Fehler sollen jedoch nicht negativ betrachtet werden, denn vor allem ihnen haben wir die grosse Eigenschaftsbandbreite des Stahls zu verdanken. Es kann vorkommen, dass an einem Platz, an dem ein Ion vorhanden sein müsste, keines vorhanden ist. Nun stimmt für die Ionen in unmittelbarer Nähe das Verhältnis von abstossender und anziehender Kraft nicht mehr, das Gitter verzieht sich lokal (Abbildung 5). Das gleiche gilt für ein Ion, welches sich an einer Stelle befindet, an der eigentlich gar kein Platz mehr vorhanden ist (Abbildung 6 und Abbildung 7). Oder auch wenn ein fremdes Ion den Platz eines Ions im Gitter einnimmt und dieses nicht dieselben Kräfte auswirkt, wie das ursprüngliche (Abbildung 8) [Hornbogen, 2008, 96].

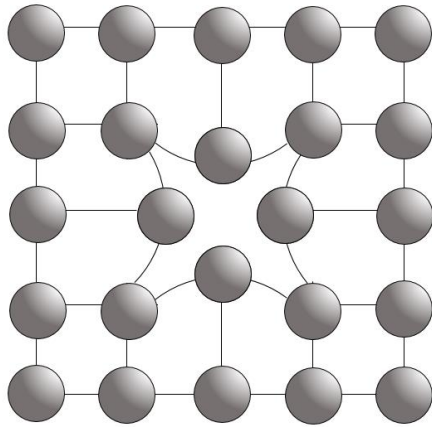


Abbildung 5: Leerstelle

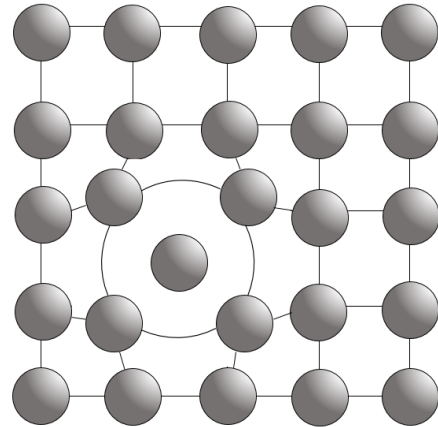


Abbildung 6: Zwischengitterion

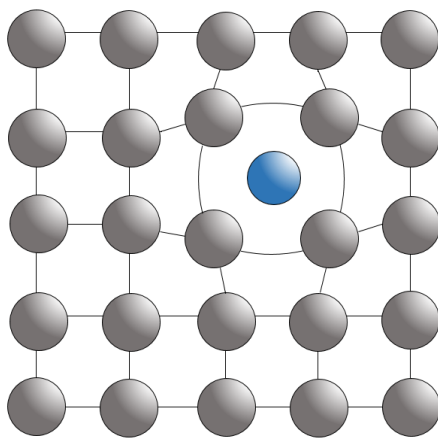


Abbildung 7: Einlagerungsision

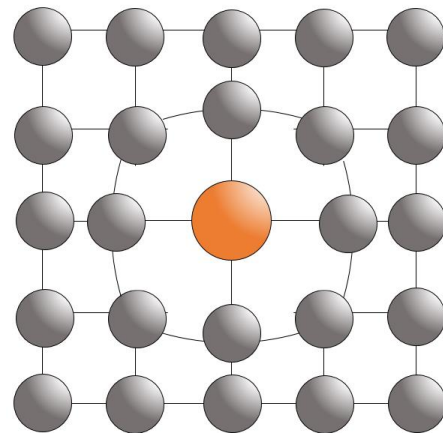


Abbildung 8: Substitutionsion

2.2.5 Gitteraufbaufehler: Versetzungen

Versetzungen sind linienförmige Baufehler des Gitters, bei welchen nicht mehr nur ein einzelnes Ion zu viel oder zu wenig vorhanden ist, sondern eine ganze Reihe, beziehungsweise Ebene, nicht vorhanden ist oder am falschen Ort auftaucht. Eine mögliche Versetzung wird in Abbildung 9 dargestellt. Solche Versetzungen entstehen häufig bei Kaltverformungen und lassen den Stahl hart, aber auch brüchig werden [Hornbogen, 2008, 161] & [Reissner, 1976, 1.14 - 1.16].

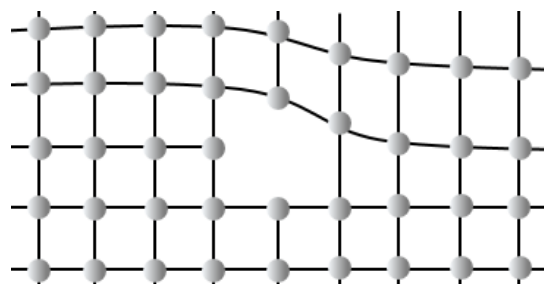


Abbildung 9: Zweidimensional dargestellte Versetzung im Gitteraufbau

2.2.6 Gefüge, Körner

Wenn man einen Block Eisen hat, so besteht dieser nicht einfach aus einem Kristallgitter, welches so aussieht wie wenn man lauter Würfel aufeinander gestapelt hätte, sondern aus lauter kleinen Körnern. Ein einzelnes Korn verfügt über ein regelmässiges Gitter. Die Körner selber stehen vollkommen zufällig zueinander, so dass die einzelnen Gittersegmente durch Versetzungen miteinander verbunden sind. Stahl ist also Polykristallin: Jedes dieser Körner ist in sich ein vollständiger Kristall. Die riesigen Versetzungen rund um das Korn herum werden *Korngrenzen* genannt. Sie sind extrem energiereich, demzufolge tragen sie zur Zähigkeit des Stahls bei. Im inneren der Körner können zudem noch andere Gitteraufbaufehler vorhanden sein. Eine Versetzung bringt Spannungen mit sich. Je mehr Versetzungen, desto mehr Energie ist im Werkstoff vorhanden. Aber wie jeder andere Stoff, strebt auch das Eisen das tiefst mögliche Energieniveau (Entropie) an. Logischerweise neigt es eher dazu grosse Körner zu bilden, weil dann weniger Korngrenzen gebildet werden müssen. Der Korndurchmesser kann von wenigen μm bis zu mehreren mm reichen, je nach Erstarrungs- und Wärmebehandlungsprozess. Heutzutage können aber sogar Einkristalline Werkstücke hergestellt werden. Um dies zu erreichen, muss das Erstarren des Werkstücks vollkommen kontrolliert und langsam ablaufen. Wenn Eisen im flüssigen Zustand ist, sind die Atome nicht im regelmässigen Gitter geordnet, sondern schwirren einfach frei in der Schmelze herum. Wenn das flüssige Eisen sich langsam abkühlt, beginnen sich an gewissen „Verunreinigungen“¹ Kristalle zu bilden. Wenn viele solche Verunreinigungen in der Schmelze vorhanden sind, beginnt das Eisen an vielen Stellen sich zu kristallisieren, dabei bilden sich kleine Körner. Verunreinigungen im Eisen die nicht als Kristallisationszentrum wirken, werden beim Auskristallisieren der Körner vor ihnen her geschoben und schwächen die Korngrenzen, was meistens zu einer Zähigkeitsabnahme führt [Bargel, 2012, 11,12].

¹ Stoffe mit höherem Schmelzpunkt wie Carbide oder Nitride

2.3 Kristallisation

2.3.1 Auskristallisation von Legierungen

In der liquiden Form sind sich die zwei verschiedenen Atomsorten vollkommen gleichgültig. Beim Auskristallisieren an Verunreinigungen bildet sich jetzt aber ein sogenannter Mischkristall (siehe 1.4.2), zu dessen Bildung Energie benötigt wird. Diese Energie wird der Temperatur der Schmelze entzogen. Darum ist an den sich bildenden Korngrenzen aussen eine kühlere Schicht die wächst und hinter sich das Gitter der Körner nachzieht. Das Abkühlen des Gitters bewirkt eine kontrollierte Auskristallisation, bei welcher die Körner sich sehr geordnet ausprägen. Bei sehr vielen Legierungselementen können sich an den Rändern sogar sogenannte *Dendriten* bilden: Die Kristalle wachsen in die Verunreinigung hinein, wie ein Bergkristall in einer Höhle. Eine markante Tannenbaum Form zeichnet sich ab [Worch, Pompe, Schatt, 2011, 50,51].

2.3.2 Umwandlungen im festen Zustand

Man unterscheidet zwischen zwei Phasenumwandlungen:

Umwandlungen: Die Gitterstruktur wandelt sich bei einer gewissen Temperatur in eine, für diese Temperatur beständigere, stabilere Modifikation um.

Ausscheidungen: Wenn mit abnehmender Temperatur die Löslichkeit eines Stoffes im gegebenen Gitter abnimmt, wird er ausgeschieden und sammelt sich in Einschlüssen. Der gelöste Stoff macht eine Phasenumwandlung durch, die von der Zeit und der Temperatur abhängig ist. Bei einer solchen Umwandlung wird folglich viel Energie benötigt. Diese findet man in den energiereichen Korngrenzen, in welchen die Umwandlung immer beginnt [Worch, Pompe, Schatt, 2011, 51,52].

2.4 Stahl

Stahl besteht neben seinem Hauptbestandteil Eisen aus verschiedensten anderen Elementen, die zum Teil schon vorhanden sind oder auch absichtlich zulegiert werden. Einige Beispiele für solche Elemente sind: Kohlenstoff, Silizium, Mangan, Schwefel, Aluminium, Arsen, Bor, Chrom, Nickel, Kobalt, Wolfram, Stickstoff. Eisen mit weniger als 1.7% Kohlenstoff, wird grundsätzlich als Stahl bezeichnet [Christen, 1952,5].

2.4.1 Eisenkarbid

Eisenkarbid mit der chemischen Formel Fe_3C besteht zu 6.67%¹ aus Kohlenstoff und zu 93.33%¹ aus Eisen. Man nennt Eisenkarbid auch *Zementit*. Es ist sehr hart², extrem spröde, magnetisch und der leichteste Bestandteil des Stahlgefüges.

Sind weniger als 6.67% Kohlenstoff im Eisen vorhanden, so ergibt sich ein Gemisch von Zementit (Eisenkarbid) und Ferrit (α -Eisen). Ist z.B. 1% Kohlenstoff im Eisen vorhanden, so besteht der Stahl zu $1/6.67 = 15\%$ aus Zementit und zu 85% aus Ferrit [Hermann, 1952, 16].

2.4.2 Eutektoider Stahl (Eisenkarbid und α -Eisen)

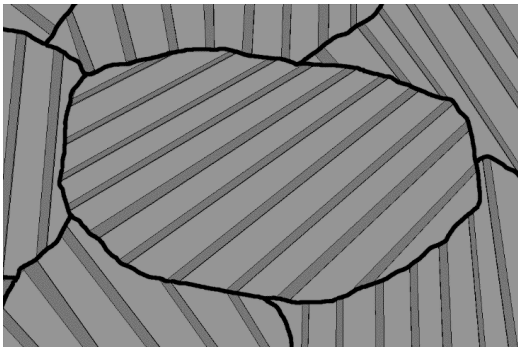


Abbildung 10:
Schematische Darstellung eines
Perlitkorns Hellgrau: Ferrit (α -Eisen)
Dunkelgrau: Zementit (Eisenkarbid)

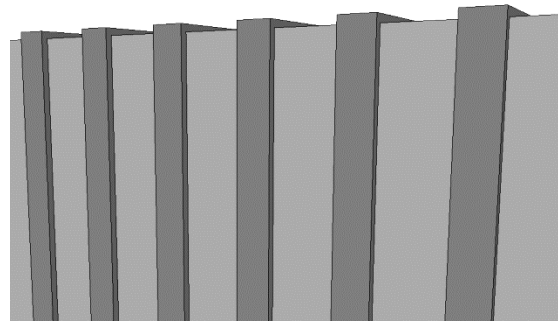


Abbildung 11:
Querschnitt eines Perlitkorns
Hellgrau: Ferrit (α -Eisen)
Dunkelgrau: Zementit (Eisenkarbid)

Beim Abkühlen des Stahls bilden sich einzelne Perlitkörner, die jeweils aus Ferrit und Zementit bestehen. In einem solchen drei-Dimensionalen Korn (Abbildung 10 und Abbildung 11) sind jeweils Eisenkarbid Platten im Ferrit eingelagert. Durch die Härte des Eisenkarbids (2.5.2) und die Weichheit des α -Eisens entsteht ein robuster Stahl. Bei kurzem Glühen bildet sich der lamellare Perlit wie in Abbildung 10 und Abbildung 11 zu sehen; bei langem Glühen der körnige Perlit. Im körnigen Perlit kristallisiert der Zementit kugelförmig aus. Dieser Stahl ist dann weicher als der Lamellare.

Ein einzelnes Perlitkorn, lamellar oder körnig, hat immer einen Kohlenstoffgehalt von 0.9%. In einem Stahl mit weniger als 0.9% Kohlenstoff reicht der Kohlenstoff nur um

¹ Massenprozent

² Lässt sich nicht von gehärtetem Stahl ritzen.

einige Perlitkörner zu bilden. Die anderen Körner müssen sich mit reinem α -Eisen begnügen. Dieser Stahl wird *untereutektoider Stahl* genannt. Bei einem Stahl mit mehr als 0.9% Kohlenstoff, aber weniger als 1.7% Kohlenstoff, lagert der Zementit sich an den Korngrenzen der Perlitkörner ab (siehe 2.2.6) [Hermann, 1952, 17, 18].

2.4.3 Lösen von Stoffen in Eisen

Wie in Kapitel 2.2.1 erwähnt, kann α -Eisen kaum Kohlenstoff lösen. Dies ist auf die Gitterstruktur zurückzuführen. Im kubisch raumzentrierten Gitter können sich jeweils in der Mitte einer jeden Würfelkante ein Fremdatom von der Grösse $0.154 R$, wobei R die Grösse des Eisenatoms ist, einlagern. In den Hohlräumen zwischen drei Eck-Atomen und dem mittleren kann sich ein Fremdatom von der Grösse $0.291 R$ einlagern. Sobald sich ein Element mit einem grösseren Atomdurchmesser einlagern will, so müssen die Eisenatome rundherum Platz machen. Es resultieren höhere statische Kräfte was einem erhöhten Energiezustand entspricht (höhere Entropie) und demzufolge vermieden wird. Im γ -Eisen hingegen können sich, trotz der dichter gepackten Form auf jeder Würfelkante, $0.41 R$ grosse Fremdatome einlagern. Darum lagert sich der Kohlenstoff lieber im γ -Eisen ein als im energieaufwendigeren α -Eisen. Im α -Eisen scheidet er sich als Karbid aus. Mit diesem Platzphänomen hängt auch zusammen, dass α -Eisen eine 100...1000-mal stärkere Diffusion¹ aus dem Eisen selber betreibt, als γ -Eisen. Wegen der höheren Diffusionsrate von α -Eisen ist es bei höheren Temperaturen unbeständiger, da Phasenübergänge aller Art leichter möglich sind. Bei höheren Betriebstemperaturen ist also der Gebrauch von kubisch flächenzentrierten Stählen eher zu empfehlen [Bargel, 2012, 40, 41].

2.5 Legierungselemente im Stahl

Stahl ist der Werkstoff mit der grössten Bandbreite an Eigenschaften die durch diverse Legierungselemente hervorgerufen werden können. Die Menge des Legierungselements im Stahl definiert dessen Eigenschaften. Mehrere Elemente miteinander im Stahl addieren nicht einfach ihre Eigenschaftsveränderungen, sondern rufen zusammen eine oder mehrere neue Eigenschaften hervor. Man unterscheidet Stähle in *niederlegierte Stähle* und *hochlegierte Stähle*, je nach Menge der Legierungselemente.

¹ Die Diffusion bezeichnet die Beweglichkeit von Stoffen in der Gitterstruktur.

Niedriglegierte Stähle. Kein Legierungselement macht mehr als 5%¹ des Stahls aus, wobei Kohlenstoff nicht als Legierungselement gezählt wird. Grundsätzlich unterscheiden sich diese Stähle nicht massgebend von unlegierten - beziehungsweise Kohlenstoffstählen. Es kann jedoch eine bessere Härtebarkeit herausgeholt werden oder auch eine bessere Warmfestigkeit z.B. durch das Legieren mit Molybdän und Chrom [Verein Deutscher Eisenhütten Leute, 1954, 98].

Hochlegierte Stähle. Die Voraussetzung für einen hochlegierten Stahl ist dann erfüllt wenn ein oder mehrere Elemente den Wert von 5% überschreiten. Hochlegierte Stähle kommen immer dann zum Einsatz, wenn Eigenschaften verlangt werden, die niedriglegierte Stähle nicht bieten können, wie Korrosionsbeständigkeit², elektrische- oder auch magnetische Eigenschaften [Verein Deutscher Eisenhütten Leute, 1954, 98,99].

Es gibt verschiedene Arten wie ein Element im Eisen die Eigenschaft des Stahls verändern kann. Man unterscheidet im Wesentlichen zwischen Mischkristallen und intermediären Kristallen.

2.5.1 Mischkristalle

Sehr viele Elemente bilden mit Eisen Mischkristalle aus. Die zahlreichen Eigenschaften, die durch Legierungselemente hervorgerufen werden im Stahl, verdanken wir vor allem der Mischkristallbildung. Wie zuvor schon erwähnt, lösen sich die Elemente in den beiden Gitterstrukturen des Eisens unterschiedlich gern (siehe 2.4.3). Elemente die sich lieber im α -Eisen lösen, werden *Ferritbildner* genannt (Cr, Al, Ti, Ta, Si, Mo, V, W). Diejenigen die das γ -Eisen bevorzugen, werden als *Austenitbildner* bezeichnet (Ni, C, Co, Mn, N). Bei den Mischkristallen wird unterschieden zwischen den Substitutions- und den Einlagerungsmischkristallen.

¹ Massenprozent

² Rostfrei

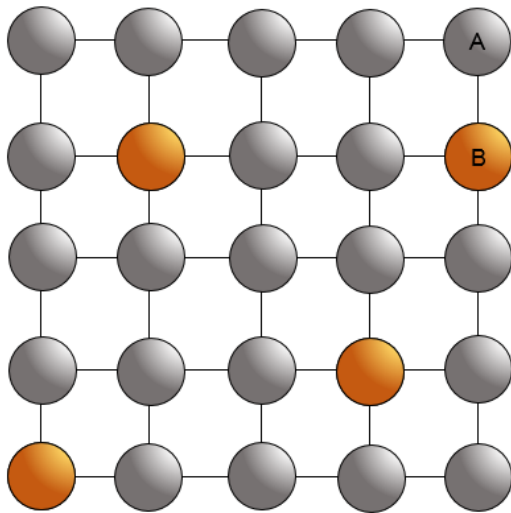


Abbildung 12:
Substitutionsmischkristall
A: Eisenatome
B: Legierungselemente

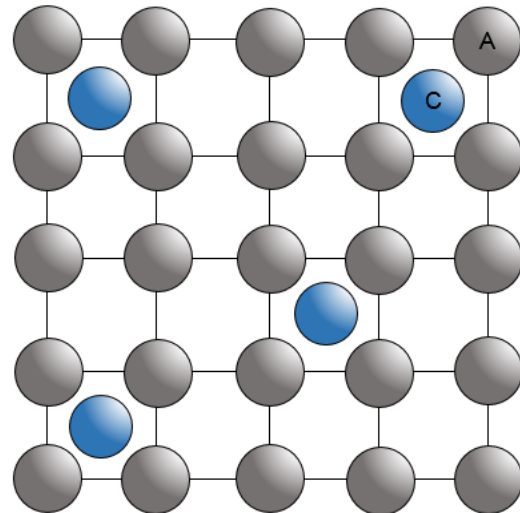


Abbildung 13:
Einlagerungsmischkristall
A: Eisenatome
C: Legierungselemente

Substitutionsmischkristalle (Abbildung 12): Hier werden Eisenatome A mit denen des Legierungselementes B ausgetauscht. Die fremden Atome substituieren¹ die Eisenatome. Damit sich die Atome im Metall lösen können, sind hohe Temperaturen erforderlich, denn nur dann bewegen sich die Atome ausreichend. Eine alltagsnähere Situation wäre das Lösen von Zucker in Kaffee, dies geht besser wenn der Kaffee möglichst heiss ist. Damit die regelmässige Anordnung so bleibt, darf der Stahl nur ganz langsam abkühlen, da sich sonst kein schönes Gitter bilden kann. Die Eigenschaftsveränderung ist auf die verschiedenen Atomdurchmesser zurückzuführen. Da z.B. ein grösseres Atom B die Atome A abstösst, entstehen Spannungen, weil das Atom A eigentlich sein Platz behalten will. Diese Spannungen beinhalten Energie, welche wiederum zu einem robusteren Stahl führt [Verein Deutscher Eisenhütten Leute, 1954, 103,104].

Einlagerungsmischkristalle. (Abbildung 13) Hier lagern sich die Elemente C zwischen den Eisenatomen A ein. Dabei wird kein Atom ersetzt. Für diese Elemente ist eine Maximalgrösse gegeben und somit können sich nicht alle Elemente im Eisengitter einlagern. Wie beim Substitutionsmischkristall, ist auch hier eine hohe Temperatur für das Lösen der Elemente erforderlich. Anschliessend ist ein schnelles Abkühlen von Nöten, weil sonst die eingelagerten Elemente wieder ausgefällt werden

¹ Ersetzen

und somit aus dem Gitter diffundieren [Verein Deutscher Eisenhütten Leute, 1954, 104,105].

2.5.2 Intermediäre Kristalle (Karbide)

In einem Intermediären Kristall sind neben der normalen Metallgitterkraft, je nach Atomsorte, noch andere nicht metallische Bindungen vorhanden, wie Kovalente oder Ionenbindungen. Diese Bindung summiert sich mit der bereits vorhandenen Bindung auf. Die nun vorhandene intermediäre¹ Bindung liegt also irgendwo zwischen der chemischen und metallischen Bindung. Die kompliziert aufgebaute und dicht gepackte Struktur führt zu einer enormen Härte und Hitzebeständigkeit. Die wichtigsten Stoffe für solche Verbindungen sind Kohlenstoff und Stickstoff. Verbindungen mit diesen Elementen nennt man demzufolge auch *Karbide* und *Nitride*. Es gibt nicht etwa nur Eisenkarbide, sondern auch z.B. Tantalkarbid (TaC Smp. 3'800 °C) oder Wolframkarbid (WC Smp. 2'700 °C). Diese Verbindungen können mit Eisen legiert werden. Bei Raumtemperatur ist jedoch kaum ein Unterschied zwischen Stahl mit Eisenkarbid und Stahl mit Tantalkarbid auszumachen. Unter grosser Hitzebelastung behält der Stahl mit dem Tantalkarbid jedoch seine Härte, während der Kohlenstoff-Stahl weich wird. Legierungen mit Nichteisenkarbiden führen zu hitzeresistenten Stählen. Die Nitrid Legierungen ermöglichen bei Hitzebelastung eine grosse Zähigkeit mit erhöhter Streckgrenze [Bargel, 2012, 43].

2.6 Behandlungsformen zur Eigenschaftsveränderung

Nicht nur durch das Hinzufügen von anderen Elementen können die Eigenschaften des Stahls verändert werden, sondern auch durch diverse Bearbeitungs- oder Behandlungstechniken. In diesem Abschnitt wird auf die Wärmebehandlungen eingegangen.

¹ Intermediate (engl.) bedeutet dazwischenliegend

2.6.1 Martensit

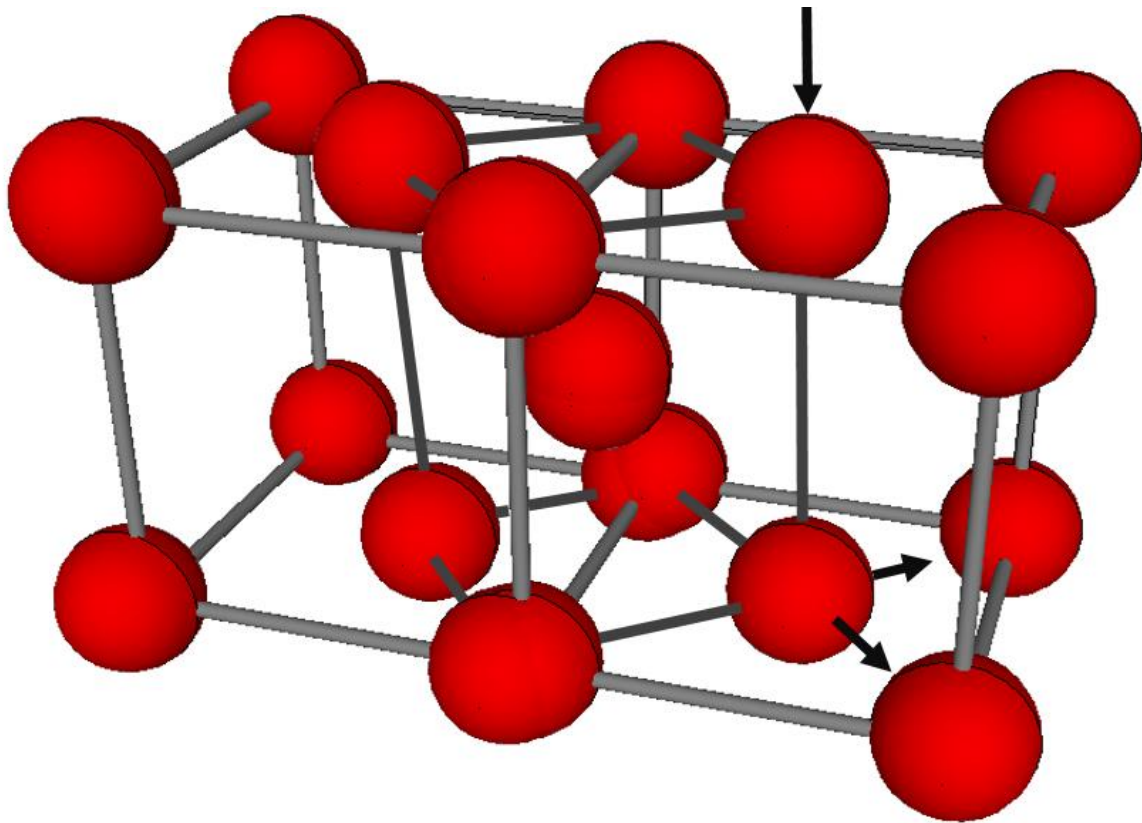


Abbildung 14: Umkristallisation vom kubisch flächenzentrierten Gitter (γ -Eisen, Kantenlänge: 36.3nm) in das kubisch raumzentrierte Gitter (α -Eisen, Kantenlänge: 28.6nm)

Bekanntlich kann das γ -Eisen Elemente lösen, die das α -Eisen kaum oder gar nicht lösen kann. Bekannt ist auch, dass der Austenit bei einer gewissen Abkühlungstemperatur zu Ferrit umkristallisiert. Was wenn nun Austenit, mit einem in α -Eisen nicht löslichen Element (z.B. Kohlenstoff), zu α -Eisen umkristallisiert?

Bei der kubisch raumzentrierten Gitterstruktur sind die einzelnen Atome näher zusammen, als bei der kubisch flächenzentrierten Struktur. Wie in Abbildung 14 mit schwarzen Pfeilen dargestellt, müssen sich die einzelnen Atome verschieben um ihre bevorzugte Kantenlänge zu erreichen. Nun wird der Stahl so schnell abgekühlt, dass keine Diffusionsvorgänge stattfinden können (siehe 2.3.2). Diese Geschwindigkeit hängt sehr stark von Legierungselementen ab. Bei einer solch schnellen Abkühlung kann das Gitter nicht homogen auskristallisieren. Es entstehen massenhaft Gitteraufbaufehler (Leerstellen, Versetzungen), die alle die gegeneinander wirkenden Kräfte in sich speichern. Die einzelnen Körner stechen in Form von Nadeln durch das

ganze Gefüge hindurch. Ist Kohlenstoff im Austenit gelöst und wird schneller abgekühlt als der Kohlenstoff rausdiffundieren kann, wird er im kubisch raumzentrierten Gitter *zwangseingelagert*. Bei dieser Zwangseinlagerung des Kohlenstoffs, in ein Gitter indem kein Platz für ihn vorhanden ist, verursacht er enorme Spannungen und lässt den Stahl extrem hart werden. Das gleiche gilt auch für jegliche andere Elemente, die sich im γ -Eisen besser lösen lassen, als im α -Eisen [Eckstein, 1970, 70].

Durch den abstossenden Kohlenstoff fällt es dem Gitter während der Umkristallisation schwer, sich in der z-Achse zu stauchen (Abbildung 15). Aus dem kubisch raumzentrierten Gitter bildet sich das tetragonale Martensit Gitter, welches durch seine unsymmetrisch (langgezogene) Struktur ohnehin schon sehr viele Spannungen mit sich bringt. Der Kohlenstoff ist regelmässig dazwischen verteilt, so dass noch mehr Spannungen entstehen. Der Begriff *Martensit* bezeichnet grundsätzlich die Tieftemperaturmodifikation eines Elements. Beim Stahl wird α -Eisen, welches zwangseingelagerte Elemente aufweist, ebenfalls als *Martensit* bezeichnet [Eckstein, 1970, 71].

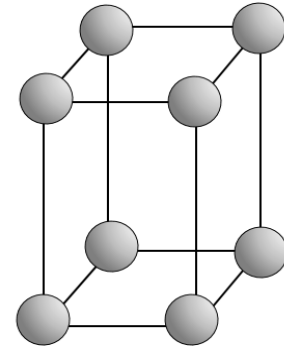


Abbildung 15:
Tetragonales Martensit
Gitter

2.6.2 Härten von Stahl

Beim Härten von Stahl macht man sich genau diese Martensit-Bildung zu nutzen. Durch die rasche Umkristallisation zu α -Eisen wird die Kohlenstoffdiffusion verhindert. Der Kohlenstoff wird im Kristallgitter zwangsgelöst und es bildet sich Martensit. Die dadurch entstehenden inneren Spannungen machen den Stahl extrem hart aber auch so spröde, sodass fast keine Verwendung für ihn zu finden ist. Allfällige Legierungselemente beeinflussen vor allem die Geschwindigkeit mit welcher der Stahl abgekühlt werden muss, damit sich der Martensit bildet. Bei unlegierten Stählen die abgeschreckt werden, wird meist nur die äussere Schicht zu Martensit, da die Temperatur des Werkstücks gegen innen ein zu grosses Gefälle aufweist. Bei hochlegierten Stählen kann die Martensitbildung sogar bei langsamer Abkühlung an der Luft vollzogen werden: Der Stahl ist von aussen bis innen komplett durchgehärtet [Eckstein, 1970, 72-75].

2.6.3 Anlassen

Das Anlassen ist der Vorgang um die unbrauchbare Spröde vom gehärteten Stahl zu entfernen. Um die Spröde zu entfernen, müssen die Spannungen abgebaut werden. Das macht man indem das Werkstück auf geringe Temperatur gebracht wird. Bei dieser Hitze ist eine geringe Beweglichkeit der Atome gewährleistet. Das sogenannte

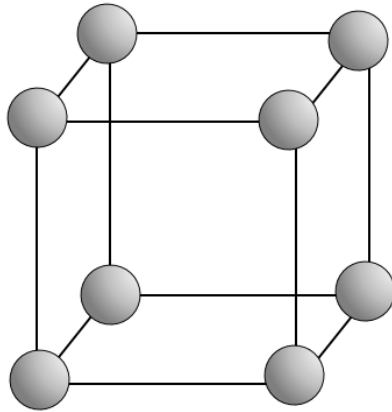


Abbildung 16: Kubisches Martensit Gitter

Entspannen erfolgt, bei unlegierten Stählen, schon bei Temperaturen von 100 bis 200 °C. Die Beweglichkeit der einzelnen Atome ist bereits so gross, dass sich kleinste Karbidmengen ausscheiden. Durch den nun vorhandenen Platz kann sich aus dem tetragonalen Martensit Gitter ein stabileres, kubisches Martensit Gitter einstellen (Abbildung 16). Das kubische Martensit Gitter bringt durch die gleich langen Kanten weniger Spannung mit sich. Der Härteverlust ist gering, während einiges an

Duktilität¹ zurück gewonnen wird. Bei Sonderkarbiden (eingelagerte Karbide von anderen Elementen) ist eine bedeutend höhere Anlasstemperatur bis zu 800 °C notwendig, um den Karbid auszufällen. Stahl der gehärtet wird und anschliessend angelassen, bezeichnet man als *vergüteten* Stahl [Eckstein, 1970, 76,77].

2.6.4 Grobkornglühen

Stahl der von Maschinen bearbeitet werden soll, darf nicht so zäh sein wie vergüteter Stahl. Er soll zum Beispiel auf einer Drehbank einen sauberen, kurzen Reissspan² von sich geben und dabei den Drehbank schonen. Das Werkstück muss auf 950-1100 °C aufgeheizt werden, damit sich die Korngrenzen auflösen können. Anschliessend muss das Werkstück sehr langsam abgekühlt werden, damit grosse Körner auskristallisieren. Weniger Korngrenzen resultieren in eine verringerte Zähigkeit des Stahls [Bargel, 2012, 194].

¹ Duktilität ist die Eigenschaft eines Werkstoffs, sich unter Belastung plastisch zu verformen, bevor er versagt [Duktilität, 2013]

² In einer Drehbank wird das Werkstück zum Drehen gebracht und vom Drehstuhl Stück für Stück abgetragen.

2.6.5 Weichglühen

Das Ziel des Weichglühens ist, den Stahl möglichst weich zu machen. Ist lamellarer Perlit vorhanden, so werden beim Weichglühen die Karbid Lamellen aufgespalten und das Karbid lagert sich kugelförmig in den Körnern ab. Bei untereutektoiden Stählen muss die Glühentemperatur oberhalb von A_{c1} (Abbildung 3) liegen, weil sich das Karbid sonst an den Ferritkorngrenzen ablagert. Bei übereutektoiden Stählen leicht über A_{c1} , jedoch nicht so hoch dass sich Austenit bildet, welcher den Kohlenstoff löst. Das Weichglühen sorgt für eine regelmässige Verteilung des Karbids beziehungsweise des Kohlenstoffs. Deswegen wird weichgeglühter Stahl gerne gehärtet, denn bei ihm ist die Kohlenstoff Verteilung am regelmässigsten [Bargel, 2012, 195].

2.6.6 Normalglühen

Das Ziel des Normalglühens ist es, möglichst feinkörniger Stahl herzustellen. Ein Normalgeglühter Stahl hat im Allgemeinen das beste Verhältnis von Festigkeit und Zähigkeit. Der Stahl muss möglichst schnell auf eine Temperatur die 30-50 K über A_{c3} (Abbildung 3) liegt aufgeheizt werden. Bei diesen Temperaturen wandelt sich das α -Eisen in γ -Eisen um und der Kohlenstoff wird zum Grossteil gelöst. Danach kann der Stahl an der Luft abkühlen. Das schnelle Erwärmen verhindert das vollständige Auflösen aller Zementit Lamellen. Diese Überresten wirken als Keime, an welchen die Kristallisation von α -Eisen beginnen kann [Bargel, 2012, 196, 197].

2.6.7 Zusammenfassung der Stahl-Glühbehandlungen

Tabelle 1 fasst die gängigsten Glühbehandlungen zusammen. Je nach Stahlsorte variieren diese z.T. beträchtlich. Im Folgenden soll nun in praktischen Versuchen diese thermischen Verfahren an Stahlproben angewandt und bezüglich resultierenden Korngrössen und Korngrenzen untersucht werden.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Stahl-Glühbehandlungen

Verfahren	Typ. Temperatur	Abkühlmethode	Eigenschaften	Anwendung
Weichglühen	Knapp unterhalb A_{c1}	An der Luft	weich	Als Vorbehandlung für spangebende Bearbeitung
Normalglühen	850 – 950 °C	An der Luft	Bestes Verhältnis zwischen Festigkeit und Zähigkeit	Schmiedestücke und Walzwerkerzeugnisse
Grobkornglühen	950 – 1100 °C	An der Luft	spröd	Als Vorbehandlung für Drehteile; teuer
Härten	850 – 950 °C	In Wasser	hart, spröd	z.B. Werkzeuge
Anlassen	100– 800 °C	An der Luft	Gewinn an Zähigkeit	Nachbehandlung nach dem Härten

3 Material und Methoden

Um die verschiedenen Wärmebehandlungen praktisch zu erforschen wurden von der Firma *Pestalozzi Stahl* in Dietikon fünf verschiedene Stahl Reststücke besorgt (Tabelle 2, Abbildung 17). Die Proben wurden mit eingeritzten Strichen gekennzeichnet.

Tabelle 2: Stahlproben

Material	Bezeichnung	Typ / Anwendung	Kohlenstoffgehalt [Massenprozent]	Zugfestigkeit / Andere Eigenschaften
I	St 37-2 K	Allgemeiner Baustahl	0.15 – 0.5%	235 N/mm ²
II	St 52-3 K	Unlegierter Qualitätsstahl, Baustahl	0.24%	355 N/mm ²
III	C 15 Pb K	Unlegierter Qualitätsstahl für Maschinenteile und Fahrzeugbau	0.15 %	400-500 N/mm ²
IIII	C 45 K	Unlegierter Qualitätsstahl für Maschinenteile und Fahrzeugbau	0.45 %	700-850 N/mm ²
IIIII	11SMnPb30/37	Automatenstahl, spanende Verarbeitung	0.09 %	550-650 N/mm ² Nicht für Schweissanwendungen

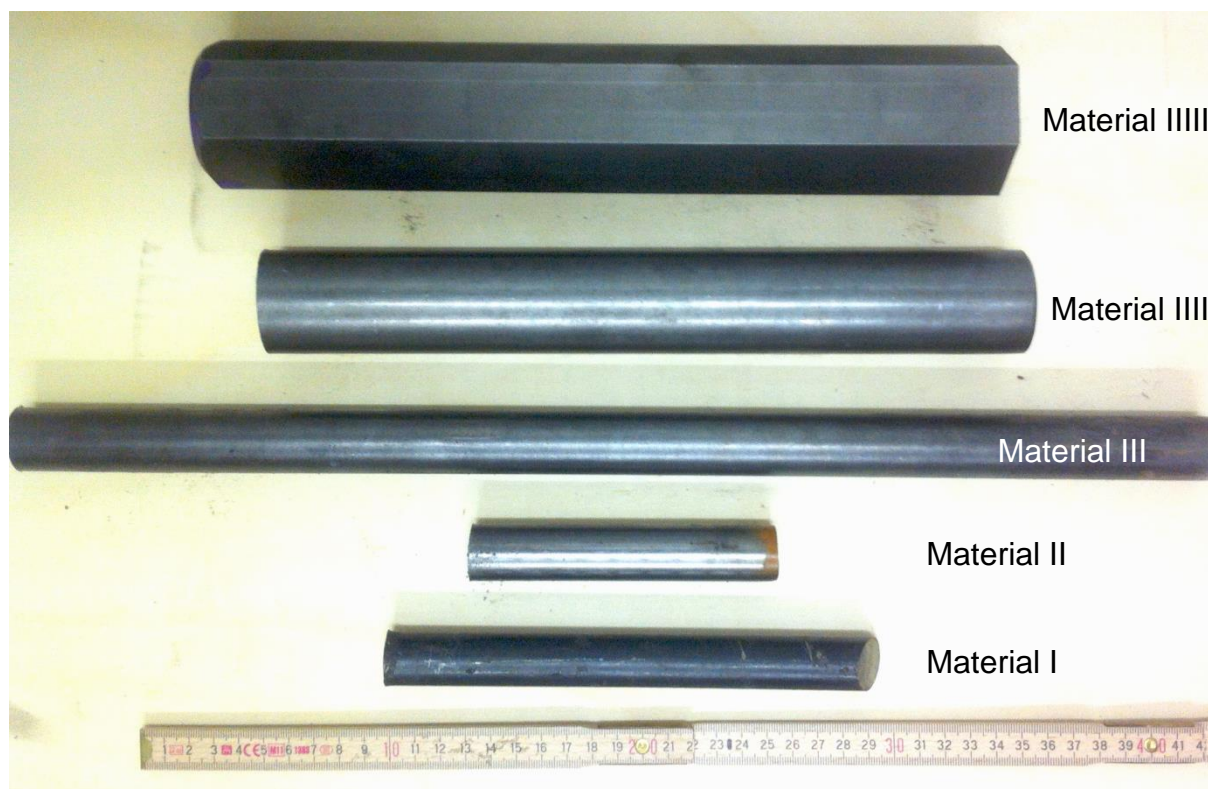


Abbildung 17: Stahlproben von Pestalozzi Stahl, Dietikon.

Die Stahlbezeichnungen sind international nicht einheitlich. Auch gibt es verschiedene Normen innerhalb Europa (europäische und nationale Normen). Z.T. folgen die

Stahlbezeichnungen auch alten Deutschen Normen (z.B. Baustahl St37) welche heute nicht mehr gültig sind, da aber die Bezeichnungen so geläufig sind, werden sie weiterhin benutzt.

3.1 Mechanische Behandlung

Von all diesen Reststücken wurden je vier ungefähr gleich grosse Proben hergestellt. Abbildung 18 zeigt die Werkzeuge welche für die Herstellung der Proben verwendet wurden.

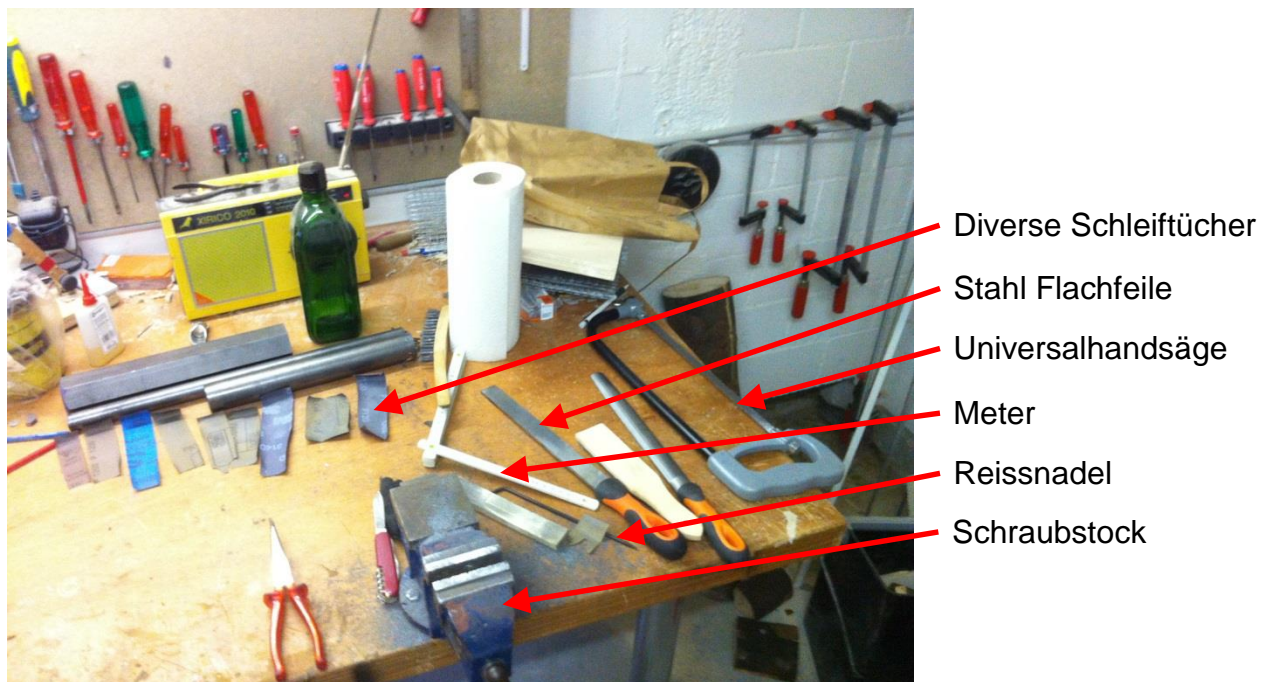


Abbildung 18: Benutzte Werkzeuge für die Bearbeitungen der Proben.

Mit der Reissnadel wurden die Reststücke auf die richtige Grösse eingeritzt. Anschliessend wurden sie mit der Universalhandsäge den eingeritzten Linien nach zersägt. Nach dem Zersägen wurde mindestens eine Fläche eben gefeilt. Danach musste die Fläche geschliffen und poliert werden, damit unter dem stark vergrössernden Lichtmikroskop die tatsächliche Materialstruktur erkennbar wird und nicht nur die Feil- und Schleifspuren. Die diversen Schmirgel- und Poliertücher sind wie folgt verwendet worden: Begonnen wurde mit dem Tuch der Körnung 60. Nach jedem Tuchwechseln wurde auch die Schleifrichtung um 90° geändert und wiederum geschliffen bis von Auge keine, senkrecht zur Schleifrichtung verlaufenden, Schleifspuren zu erkennen waren. Dies wurde insgesamt 11 Mal wiederholt bis zum Tuch mit Körnung 1500. Ab der Körnung 400 wurde zudem nass geschliffen. Das

Nassschleifen verbessert die Oberflächengüte da die Flüssigkeit als Schmiermittel dient und zudem das abgetragene Material wegschwemmt. Die Beschichtung der Schleif- sowie Poliertücher besteht aus Siliziumkarbidkörner, welche durch ein Bindemittel zusammengehalten werden.

Tabelle 3: Verwendete Schleifpapiere vor der Wärmebehandlung

Methode	Verwendete Schleiftücher/Poliertücher [Körner pro Zoll]
Trocken	60; 80; 120; 240; 320
Nass	400; 600; 800; 1000; 1200; 1500; 2000; 2500; 3000; 5000

Abbildung 19 zeigt ein Set von fertig polierten Proben. Total wurden vier gleiche Sets hergestellt.

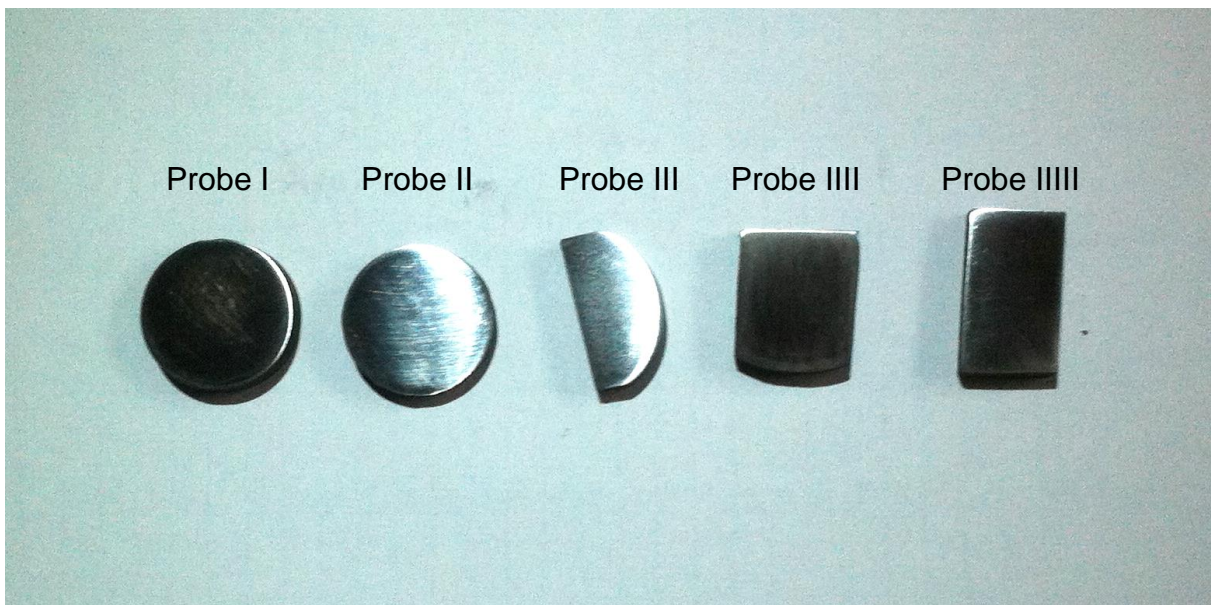


Abbildung 19: Ein Set mit fünf fertig polierten Proben.

3.2 Wärmebehandlung

Anschliessend wurden die Proben vier verschiedenen Wärmebehandlungen unterzogen. Die Proben wurden in einem auf die entsprechende Temperatur vorgeheizten Vorwärmofen L3/11/B180 der Firma Nabertherm behandelt. Eine Eternitplatte diente als Fläche zum langsamen Auskühlen der Proben an der Luft. Destilliertes Wasser diente zum blitzartigen Abkühlen der Proben (Abbildung 20).



Abbildung 20: Versuchsanordnung mit Ofen, Abschreckglas, Eternitplatte und Zange.

3.2.1 Berechnen der Glühdauer

Die Glühdauer lässt sich für die in diesem Bericht erwähnten Glühbehandlungen folgendermassen berechnen:

$$t = \left(20 + \frac{s}{2\text{mm}}\right) \cdot \text{min}$$

Wobei für s die Dicke der Probe in mm eingesetzt werden muss und t die Glühdauer in Minuten darstellt. Die Proben sind alle ca. 4 mm dick. Es ergibt sich demnach eine Glühdauer von ca. 22 Minuten. Diese Formel wurde dem Buch Bargel, 2012 von Seite 194 entnommen.

3.2.2 Weichglühen

Die fünf Proben wurden bei 750 °C für 22 Minuten geglüht (Abbildung 21). Anschliessend wurden sie herausgenommen und auf die Eternitplatte zum langsamen Abkühlen an der Luft gelegt (Abbildung 22) [Bargel, 2012, 195].



Abbildung 21: Proben im Ofen während dem Weichglühen.



Abbildung 22: Abkühlen einer glühenden Probe an der Luft auf der Eternitplatte.

3.2.3 Vergüten

Die Proben wurden bei 850 °C für 22 Minuten geglüht. Anschliessend wurden die Proben blitzartig unter schwenkend in destilliertem Wasser abgekühlt. Darauf folgte eine erneute Aufheizung auf 240 °C. Die Proben wurden für 22 Minuten angelassen und anschliessend an der Luft ausgekühlt [Eckstein, 1970, 72-77].

3.2.4 Normalglühen

Der Ofen wurde auf 950 °C aufgeheizt und die Proben eingeführt. Für 22 Minuten wurden sie geglüht. Anschliessend wurden sie, für ein langsames Abkühlen an ruhender Luft, herausgenommen und auf die Eternitplatte gelegt [Bargel, 2012, 196, 197].

3.2.5 Grobkornglühen

Weitere fünf Proben wurden bei 1000 °C für 22 Minuten grobkorngeglüht. Es folgte das Abkühlen bei ruhender Luft auf der Eternitplatte [Bargel, 2012, 194].

3.3 Mechanische Nachbehandlung

Nach dem Glühen ist es notwendig alle Proben erneut zu polieren. Hierfür wurden dieselben Schleiftücher verwendet wie in Tabelle 3, beginnend mit der Körnung 320. Ab Körnung 400 wurde wiederum nass geschliffen (Abbildung 23). Tabelle 4 fasst die verwendeten Schleif- und Poliertücher zusammen für die mechanische Nachbehandlung.

Tabelle 4: Verwendete Schleifpapiere für die mechanische Nachbehandlung

Methode	Verwendete Schleiftücher/Poliertücher [Körner pro Zoll]
Trocken	320
Nass	400; 600; 800; 1000; 1200; 1500; (2000; 2500; 3000; 5000) ¹

¹ siehe Bemerkung weiter unten



Abbildung 23: Nassschleifen und -polieren einer Probe IIII.

Bemerkung:

Zuerst wurden die Proben nur bis zur Körnung 1500 geschliffen. Da auf dem Lichtmikroskop allerdings fast nur Schleifspuren zu erkennen waren, wurde nochmals nachgeschliffen bis Körnung 5000.

3.4 Chemische Behandlung (Ätzen)

Um die Körner auf dem Lichtmikroskop sichtbar zu machen, müssen die Korngrenzen weggeätzt werden. Wenn alles auf einer Ebene wäre, so würden die Korngrenzen und die Körner das Licht auf dieselbe Weise zurückwerfen, wie ein Spiegel. Sind die Korngrenzen aber weggeätzt, so werfen sie das Licht im Gegensatz zu den glatten Körnern nicht zurück und erscheinen dunkel.

Um die Proben zu ätzen wurde ein Universalätzmittel verwendet. Für 100ml Lösung wurden 97ml 96% Ethanol und 3ml 65% Salpetersäure zusammengemischt. Die Proben wurden bei 20 °C nacheinander im Universalätzmittel für je fünf Sekunden unter Schwenken geätzt, danach direkt mit destilliertem Wasser abgespült. Die Materialien die hierfür verwendet wurden sind: Messzylinder 100ml, Becherglas 100ml, Becherglas 400ml, Zange, Ethanol (96%), Salpetersäure (65%) und destilliertes Wasser [Stahl für Metallographen, 2011].

Bemerkung:

Nach der Ätzung konnten die Proben nicht direkt unter dem Lichtmikroskop begutachtet werden und die Proben begannen zu korrodieren. Sie mussten nachgeschliffen und nochmals geätzt werden. Dann wurden sie direkt nach der Ätzung unter das Mikroskop gelegt und untersucht.

3.5 Lichtmikroskopie

Die für die Lichtmikroskopie verwendeten Materialien sind: Lichtmikroskop BX41 mit der dazugehörigen Kamera SC-30 (beides von OLYMPUS) und einem Zusatz-Objektiv mit 63x Vergrößerung um das Kamerabild dem Binokular Bild gleichzusetzen. Im Objektivrevolver befanden sich Objektive mit den Vergrößerungen 10x, 20x, 30x und 50x. Die Kamera hat eine Auflösung von 3.2 Mega-Pixel und wird direkt mit dem PC über einen USB2.0 Port verbunden. Der Computer mit dem Programm *OLYMPUS Stream Image Analysis Software 1.8* erlaubt es die Belichtungsdauer und die Bildauflösung manuell oder automatisch einzustellen. Das Lichtmikroskop und die Software wurden von der Firma *Gloor Instruments AG* in Kloten zur Verfügung gestellt.

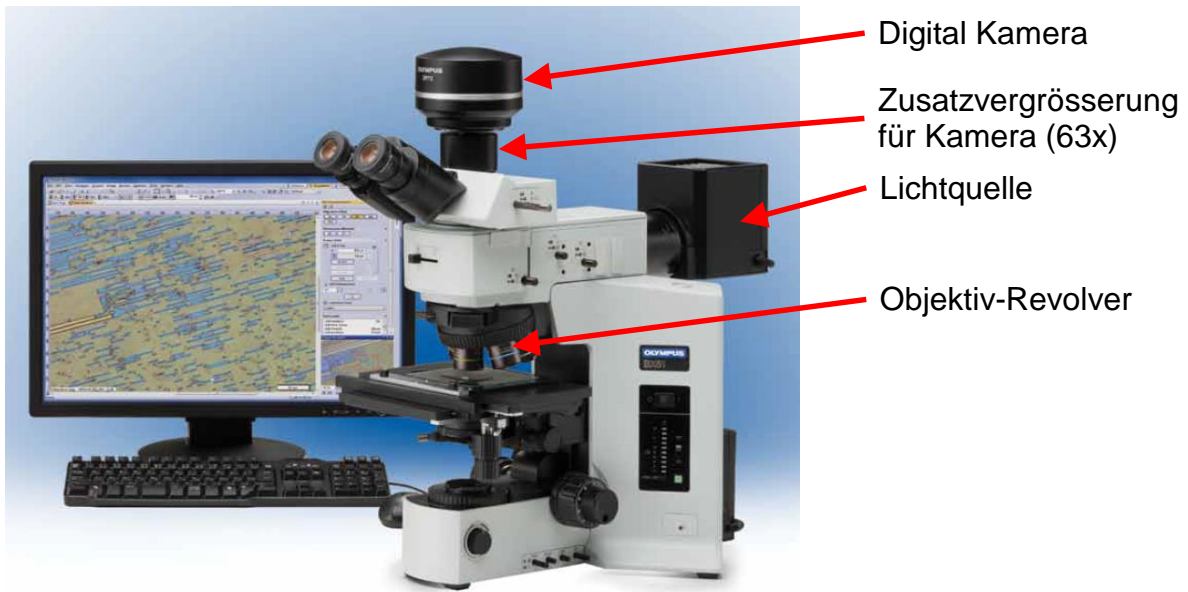


Abbildung 24: Lichtmikroskop mit Kamera und Computer mit Analyse-Software (Bild-Quelle: [Olympus, n.d.]).

Die Proben wurden direkt nach dem Ätzen mit Hilfe von Plastilin auf Glasplatten befestigt. Mit dem Plastilin können die Proben auf der Glasplatte auch ausnivelliert werden so dass der Fokus über einen möglichst grossen Flächen-Bereich zu stimmen kommt (Abbildung 25).

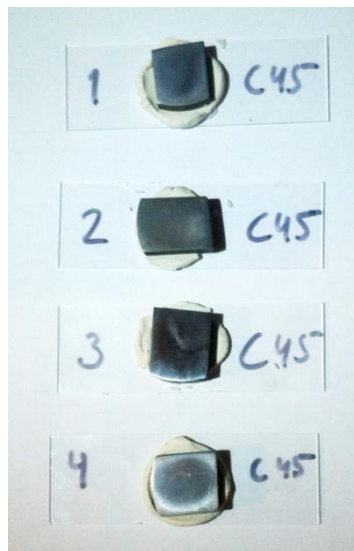


Abbildung 25: Proben IIII (C 45 Stahl) auf Glasträger montiert und bereit für die Mikroskopie.

4 Resultate

Die in diesem Abschnitt gezeigten Bilder wurden alle mit der 50 fachen Objektiv-Vergrösserung und der SC-30 Kamera aufgenommen. Der Massstab in der unteren rechten Ecken zeigt eine Distanz von 500µm an. Im Folgenden werden nur die Proben IIII des C 45 Stahls miteinander verglichen. Da der C 45 Stahl einen relativ hohen Kohlenstoffanteil hat, wird erwartet dass die Unterschiede nach den diversen Wärmebehandlungen klar ersichtlich sein sollten.

4.1 Weichgeglühter Stahl

Dieses Bild wurde mit einer manuell eingestellten Belichtungszeit von 70.65ms aufgenommen. Die Behandlung der Probe erfolge gemäss Abschnitt 3.2.2.

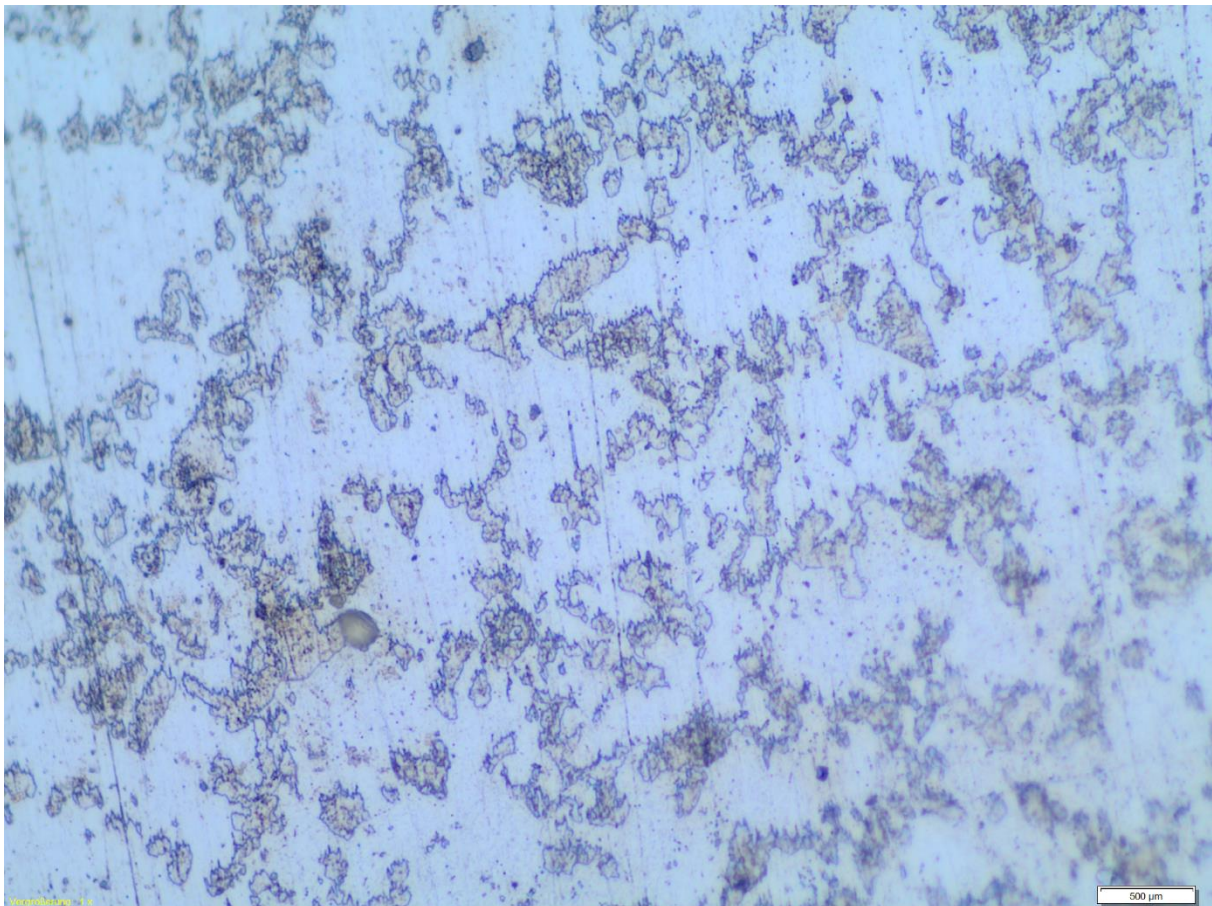


Abbildung 26: Auflichtaufnahme von C 45 weichgeglühtem Stahl (2.6.5).

4.2 Vergüteter Stahl

Dieses Bild wurde mit einer manuell eingestellten Belichtungszeit von 40.04ms aufgenommen. Die Behandlungen, Härten und Anlassen, dieser Probe erfolgten gemäss Abschnitt 3.2.3.

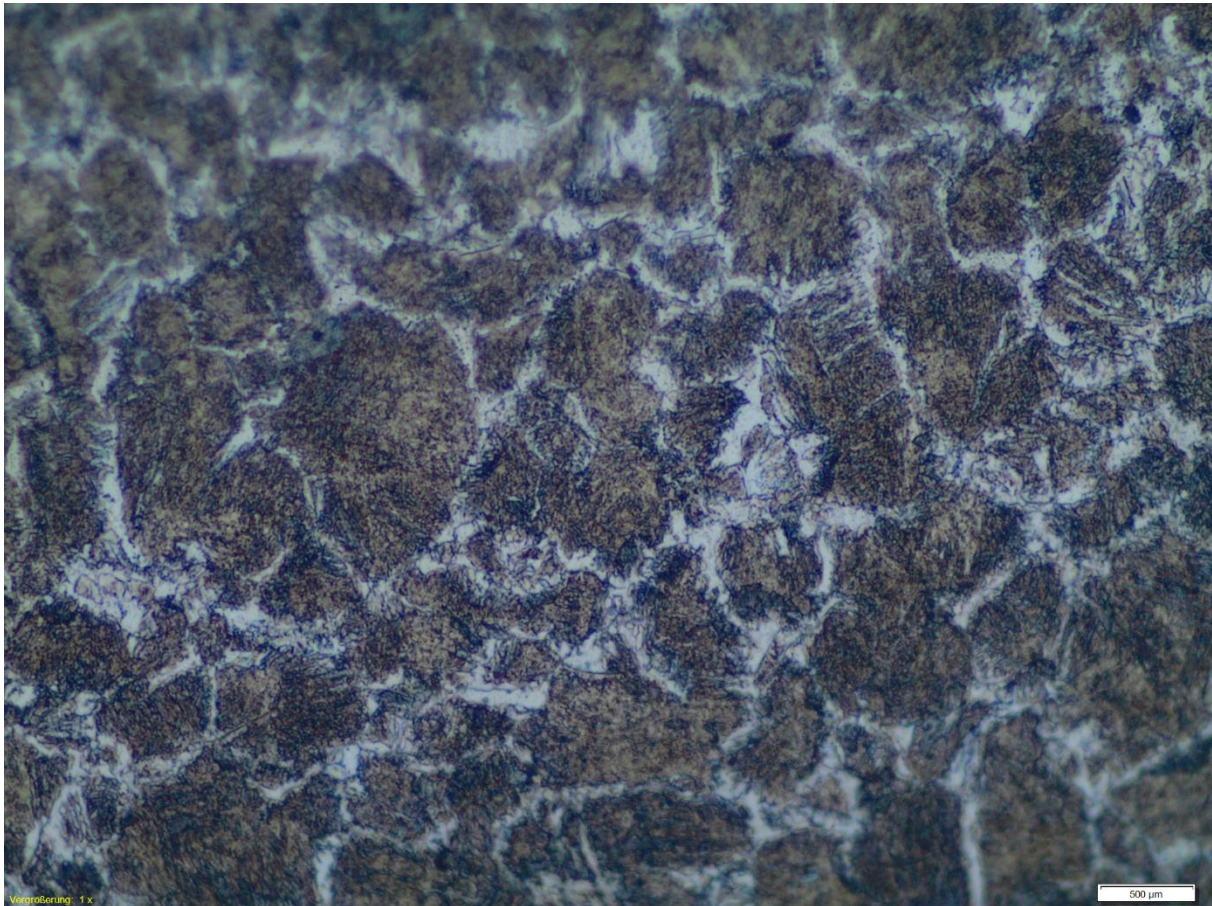


Abbildung 27: Auflichtaufnahme von C 45 Vergütetem Stahl (2.6.2 & 2.6.3).

4.3 Normalgeglühter Stahl

Dieses Bild wurde mit einer manuell eingestellten Belichtungszeit von 40.04ms aufgenommen. Die Behandlung dieser Probe erfolgte gemäss Abschnitt 3.2.4.

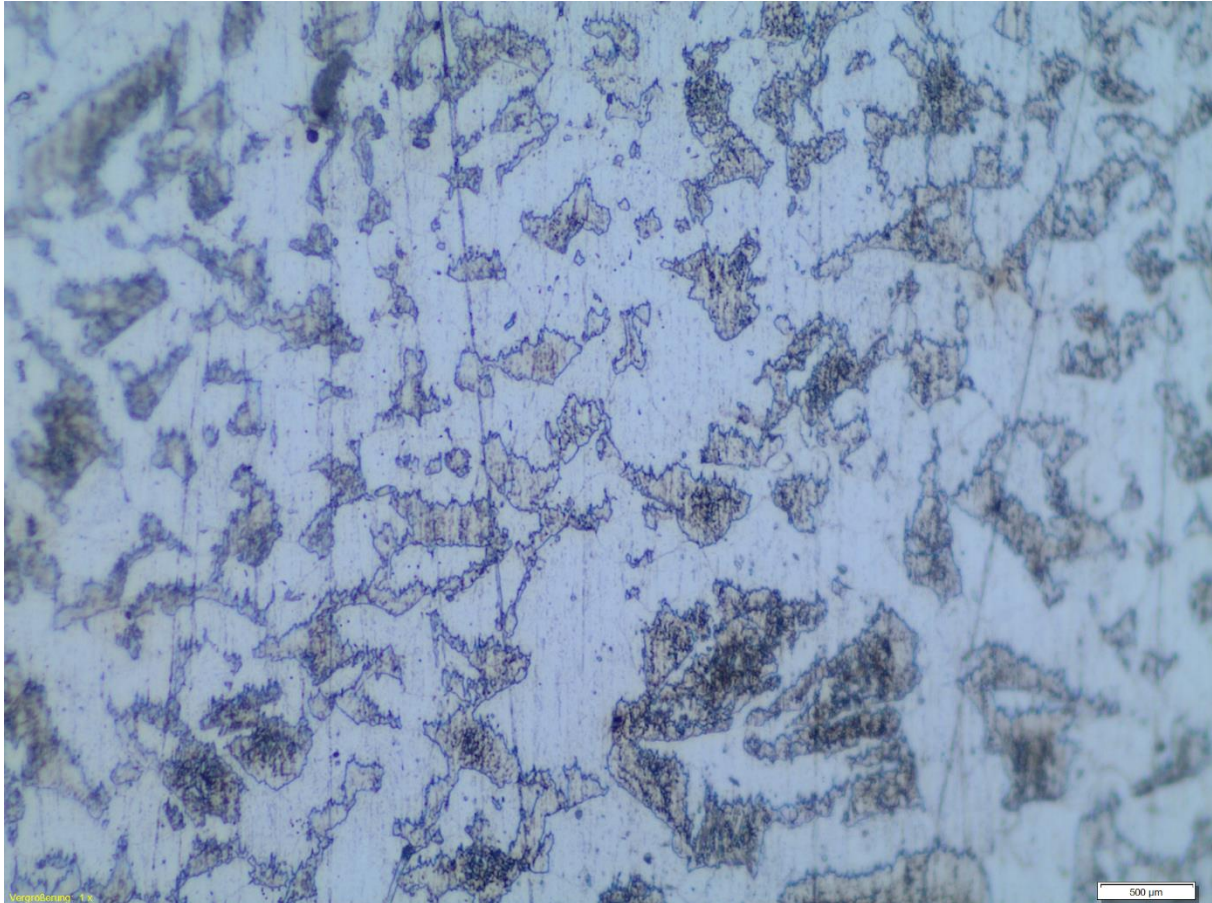


Abbildung 28: Auflichtaufnahme von C 45 normalgeglühtem Stahl (2.6.6).

4.4 Grobkorngeglühter Stahl

Dieses Bild wurde mit einer manuell eingestellten Belichtungszeit von 54.17ms aufgenommen. Die Behandlung dieser Probe erfolgte gemäss Abschnitt 3.2.5.

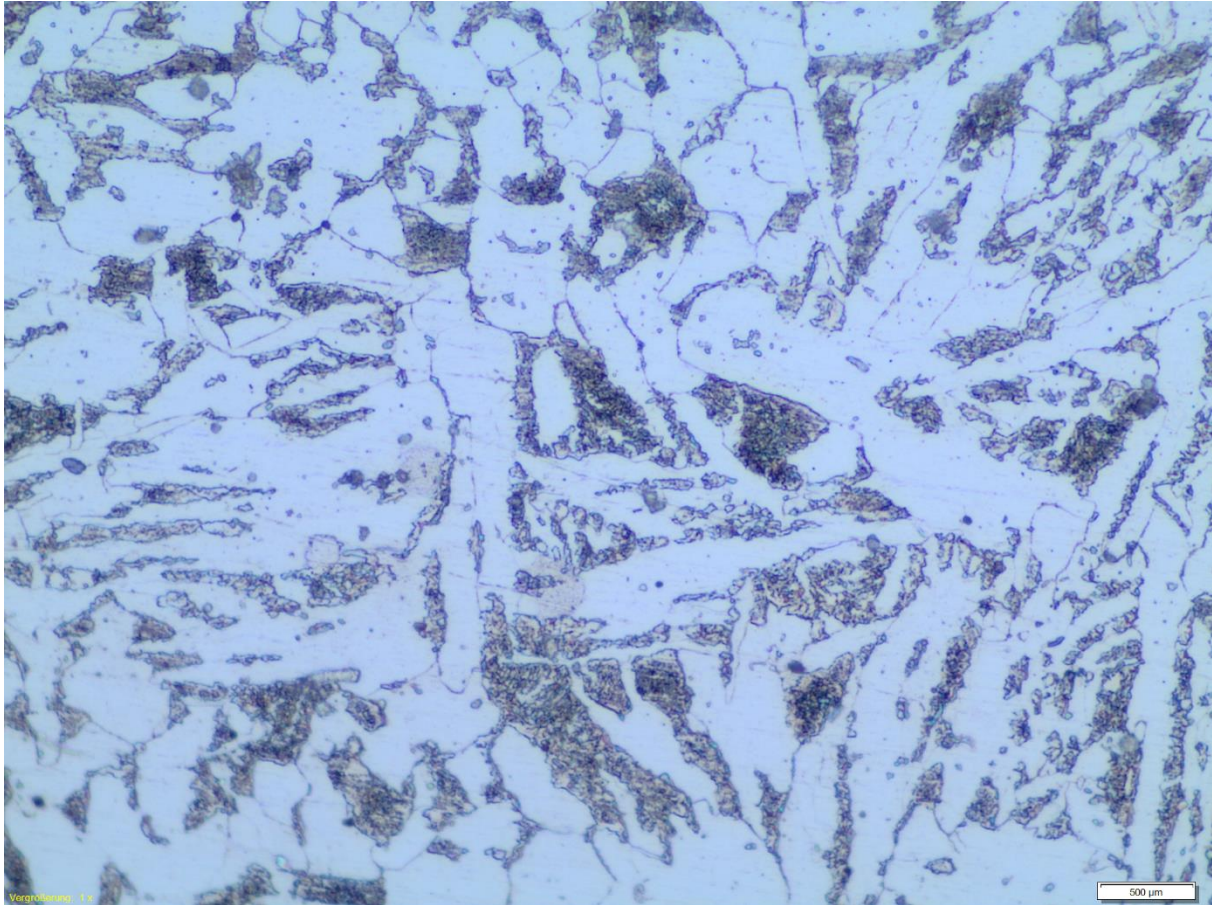


Abbildung 29: Auflichtaufnahme von C 45 Grobkorngeglühtem Stahl (2.6.4).

5 Diskussion

Für alle gezeigten Bilder wurde aus den fünf verschiedenen behandelten Stählen der Stahl C45 ausgewählt. Durch seinen Kohlenstoffgehalt von 0.45% ist ein gutes Verhältnis zwischen kohlenstoffhaltigen Körnern und Eisen gegeben. Es wurde immer der gleiche Stahl verwendet, um einen Vergleich zwischen den einzelnen Glühbehandlungen aufstellen zu können.

5.1 Weichgeglühter Stahl

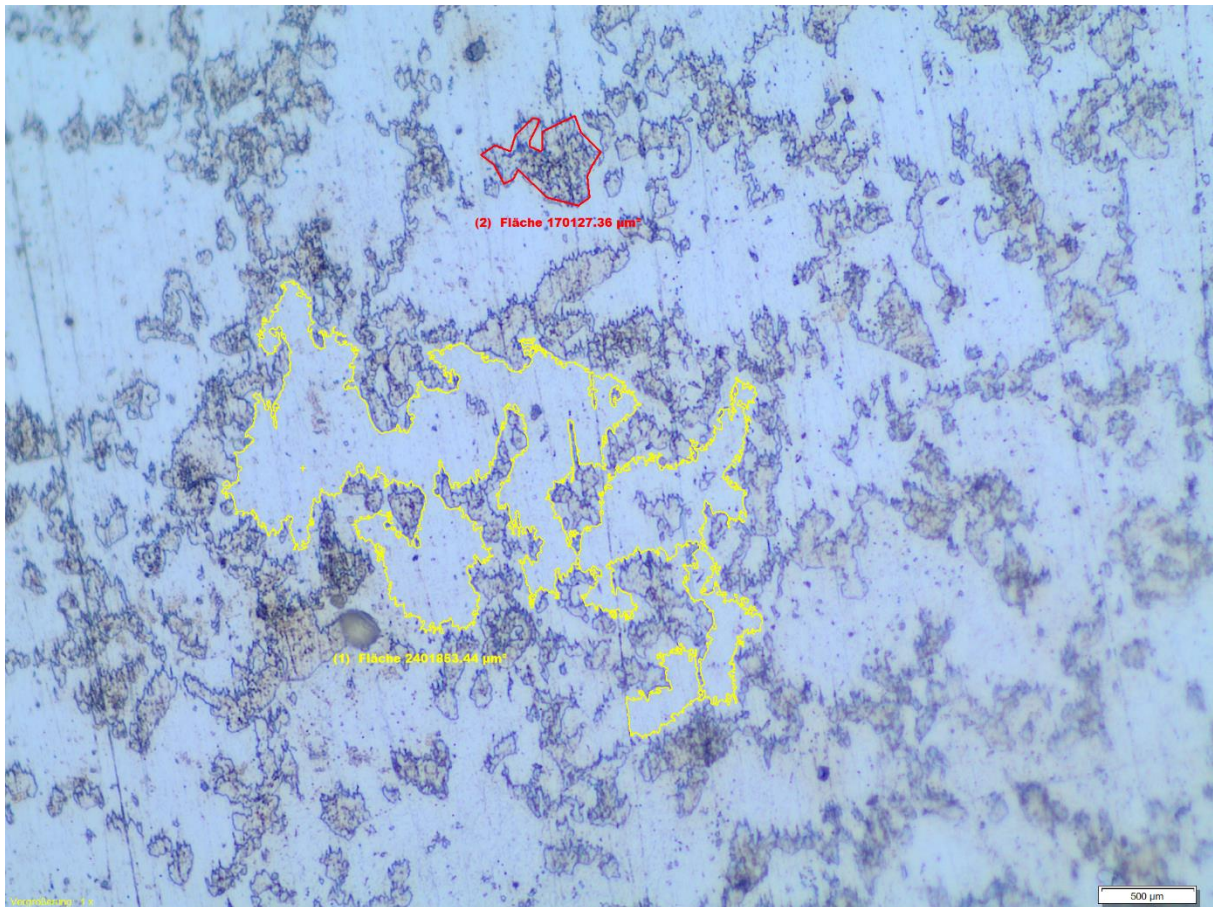


Abbildung 30: Auflichtaufnahme von C 45 Weichgeglühtem Stahl (2.6.5) mit eingefärbten Bereichen (Gelb: α -Eisen; Rot: Karbidhaltiges Korn).

Ein Kohlenstoff reiches Korn ist rot umrandet. Ein Teil der hell erscheinenden Grundmasse ist gelb umrandet.

Beim weichgeglühtem Stahl sind die kohlenstoffhaltigen Körner (Eisenkarbid) im Verhältnis zur kohlenstoffarmen Grundmasse (α -Eisen) klein, dafür in grosser Zahl vorhanden. Die einzelnen Körner sind in sich hart jedoch nicht sehr stabil, da sich körniger Perlit ausgebildet hat. Das Karbid ist demzufolge in kleinen Kügelchen

vorhanden und trägt somit zur Härte aber nicht zur Festigkeit bei. Die kohlenstoffarme Grundmasse ist weich und da die in sich harten Körner von dieser weichen Grundmasse zusammengehalten werden, ist der ganze Stahl weich.

Weichgeglühter Stahl eignet sich besonders gut wenn man Stahl verformen will, da die in Kugelform vorhandenen Karbide wenig Widerstand leisten und sich weniger Spannungen an den verformten Stellen ergeben. Danach wird er häufig einer anderen Glühbehandlung unterzogen, um ihn verwendbar zu machen. Für eine Vergütung eignet er sich, weil die Karbide in kleinen Kügelchen und regelmässig vorhanden sind und somit gut gelöst werden können.

5.2 Vergüteter Stahl

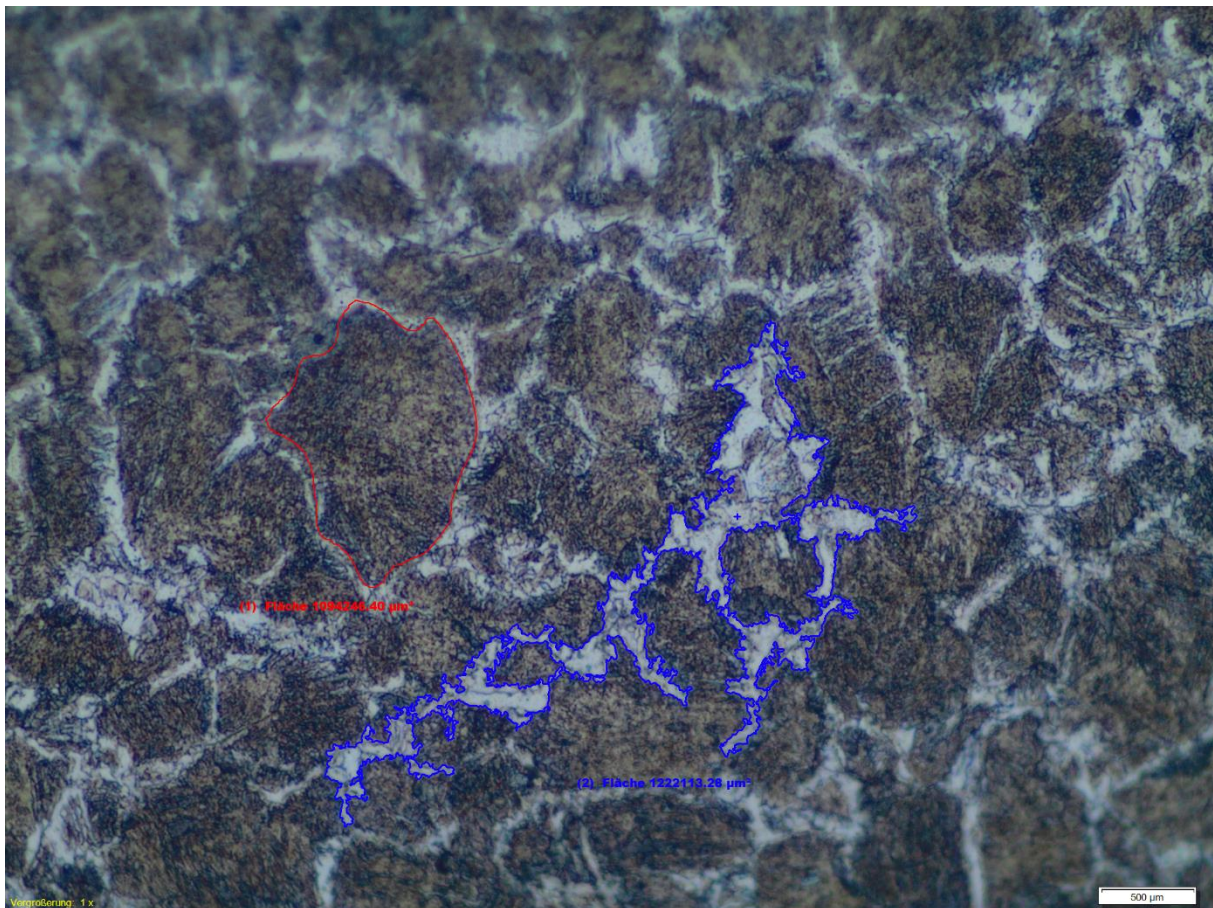


Abbildung 31: Auflichtaufnahme von C 45 Vergütetem Stahl (2.6.2 & 2.6.3) mit eingefärbten Bereichen.

Die rot umrandete Fläche zeigt ein dunkel erscheinendes perlitisches Korn an und die blau umrandete Fläche ein Teil der Korngrenzen.

Die Körner haben sich lamellar auskristallisiert (2.4.2). Das regelmässig verteilte Karbid lässt die Körner Dunkel erscheinen. Jedes Korn in sich verfügt über 0.7% Kohlenstoff, der Stahl C 45 enthält aber nur 0.45% Kohlenstoff, das heisst bei der Auskristallisation der Körner bleibt Eisen übrig, welches sich nicht lamellar mit dem Karbid anordnet. Dieses Eisen wird bei der Kornbildung vor den auskristallisierenden Körnern her geschoben und lagert sich somit an den Korngrenzen ab. Deswegen sind so dicke Korngrenzen vorhanden, welche heller erscheinen als die kohlenstoffhaltigen Körner.

Das Vergüten ist die häufigste Wärmebehandlung von Stahl. Die damit hervorgerufenen Eigenschaften von beträchtlicher Härte und enormer Robustheit, finden in fast allen Bereichen ihren Nutzen.

5.3 Normalgeglühter Stahl

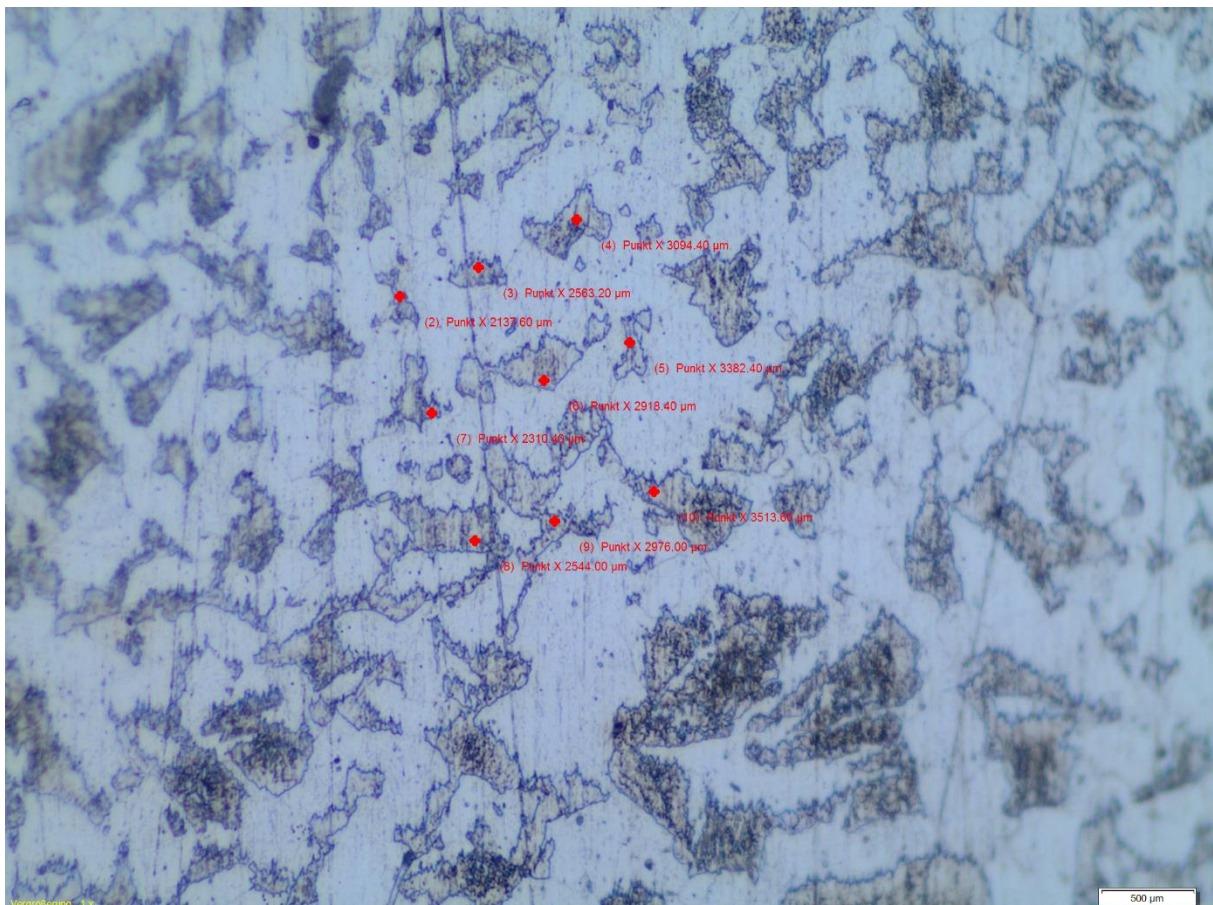


Abbildung 32: Auflichtaufnahme von C 45 normalgeglühtem Stahl (2.6.6) mit Punkten.

Bei dieser Behandlung strebt man danach den Karbid möglichst regelmässig zu verteilen. Der Kohlenstoff verteilt sich möglichst regelmässig, wenn genau die richtige Diffusion erreicht wird. Die Diffusion des Kohlenstoffs muss so hoch sein, dass sich der Kohlenstoff gleichmässig verteilen kann, aber die Diffusion nicht soweit erleichtert ist, dass grosse Kohlenstoff Anhäufungen entstehen können.

In der Aufnahme liegt in einem gewissen Bereich auf jedem Korn ein roter Punkt, betrachtet man die Anordnung der roten Punkte, fällt die angestrebte regelmässige Anordnung der Punkte auf.

Meistens wird der Stahl vor dem Vergüten normalisiert, mit dem Ziel beim Vergüteten Stahl eine möglichst regelmässige Perlitbildung zu erhalten.

5.4 Grobkorngeglühter Stahl

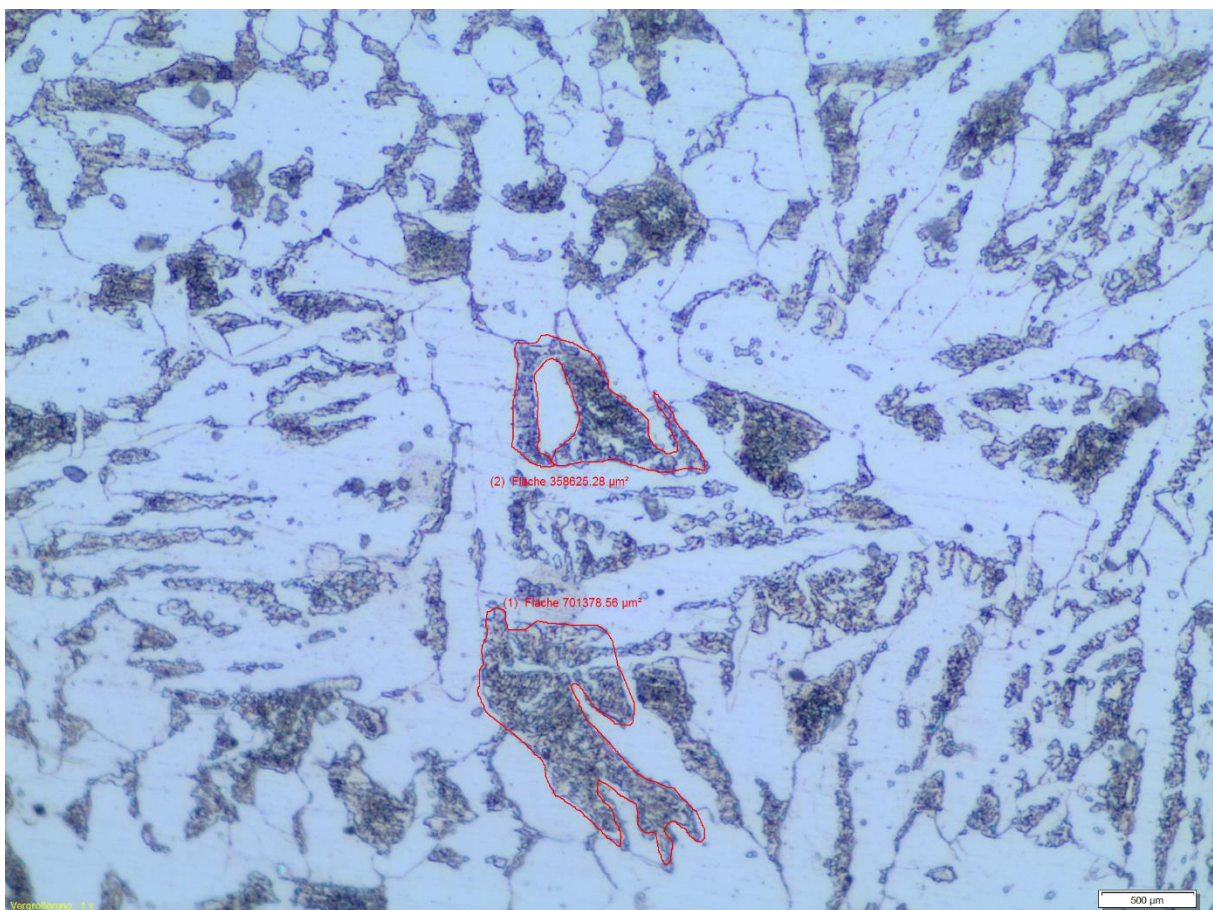


Abbildung 33: Auflichtaufnahme von C 45 Grobkorngeglühtem Stahl (2.6.4) mit eingefärbten Karbidhaltigen Körnern.

Im Gegensatz zum Normalisieren ist hier die Temperatur höher und somit die Diffusion des Kohlenstoffs soweit erleichtert, dass sich grosse kohlenstoffhaltige Körner

auskristallisieren können, wie die in der Aufnahme rot umrandeten Körner zeigen. Auf der Aufnahme sind jedoch auch Ansammlungen von vielen kleinen Körner zu erkennen. Dies weist darauf hin, dass die Glühtemperatur zu niedrig war oder die Glühdauer zu kurz. Der Kohlenstoff hatte nicht die Zeit oder Beweglichkeit sich zusammen zu häufen. Eines der grossen weichgeglühten Körner weist eine Fläche von $\sim 0.17\text{mm}^2$ auf. Ein grobkorngeglühtes Korn sollte jedoch eine Fläche von $\sim 0.7\text{mm}^2$ haben. Auf dem Bild sind auch langgezogene, dünne karbidhaltige Adern zu sehen. Diese machen den Stahl spröde, was wiederum für die Nachbehandlung (maschinelle Bearbeitung) von Vorteil ist. Bei der spanenden maschinellen Bearbeitung (z.B. auf dem Drehbank) bewirkt die Spröde des Stahls, dass sich keine langen Späne bilden. Diese lassen sich wesentlich einfacher entfernen, z.B. können sie einfach mit der Kühlflüssigkeit weggespült werden und kommen demzufolge dem Werkstück und dem Werkzeug nicht mehr in den Weg.

6 Schlusswort

Mithilfe der aufgenommenen Bilder der Stahlproben wurde dargestellt wie verschieden die Struktur des Metalls aussehen kann. Durch die Theorie konnte das Zustandekommen sowie die Eigenschaften dieser Strukturen erklärt werden. Zudem wurden die diversen Wärmebehandlungen mit einer Anwendung verbunden und erklärt. Die zum Ziele gesetzten Versuche wurden schliesslich erfolgreich durchgeführt und die dazu nötige Theorie wurde entsprechend erarbeitet. Einzig beim grobkorngeglühten Stahl entsprach das Resultat nicht ganz den Erwartungen.

Die in diesem Bericht gezeigten Versuche sind die Grundlage für die Stahlwissenschaft. Sie bringen in diesem Sinne keine neuen Erkenntnisse, dennoch sind sie wichtig für das grundlegende Verständnis der verschiedenen Eigenschaften von Stahl. Diese grundlegenden Wärmebehandlungen machen Stahl zu einem der vielfältigsten und meistverwendeten Werkstoffe unserer Zeit.

Inzwischen ist die Stahl-Metallurgie, wie viele andere Gebiete, so gross geworden, dass sie in verschiedene Zweige aufgeteilt wird und die in diesem Bericht gezeigten Versuche nur den kleinsten und grundlegendsten Teil des Wärmebehandlungszweiges abdecken. Stahl ist und bleibt einer der wichtigsten Rohstoffe für die Menschheit, bei einem aktuellen Jahresverbrauch von 1.5 Milliarden Tonnen und einem voraussichtlichen Verbrauch von 2.5 Milliarden Tonnen im Jahre 2025, bleibt die Metallurgie ein essentieller Forschungsbereich [Stahl, 22.12.2013].

Im Rückblick habe ich persönlich die Arbeit an diesem Thema als herausfordernd, aber dennoch als extrem spannend empfunden. Die erarbeiteten Grundlagen sind von enormer Bedeutung und kommen überall zum Tragen: Vom *iPhone* bis zum *Burj Khalifa*. Diese Tatsache beeindruckt mich in grossem Masse. Im Grossen und Ganzen bin ich sehr zufrieden mit den erzielten Resultaten, jedoch war es leider nur eine oberflächliche Bearbeitung. Ein weiteres und vertieftes Eintauchen hätte allerdings den Rahmen dieser Arbeit gesprengt.

7 Quellen

7.1 Literaturverzeichnis

Bargel, Hans-Jürgen & Günter Schulze (Hrsg.) (2012). *Werkstoffkunde*. 11. bearbeitete Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag

Christen, Hermann (1952). *Stahl als Werkstoff*. 3. Auflage, Frauenfeld: Huber & Co. Aktiengesellschaft

Eckstein, Hans-Joachim (1970). *Wärmebehandlung von Stahl*. 2. Auflage, Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie

Gottstein, Günter (2007). *Grundlagen der Materialkunde*. 3. Auflage, Berlin: Springer-Verlag

Hornbogen, Erhard (2008). *Werkstoffe*. 9. Auflage, Berlin: Springer-Verlag

Kammer, Catrin & Läßle, Volker (2009). *Werkstoffe für Praktiker*. 6. Auflage, Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel

Reissner, J. (1976). *Werkstoffe 1a*. 3. Auflage, Zürich: Verlag des akademischen Maschinen- und Ingenieur-Vereins an der ETH Zürich

Worch, Hartmut & Pompe, Wolfgang & Schatt, Werner. *Werkstoffwissenschaft*. 10. Auflage, Weinheim: Wiley WCH. Verlag

Verein Deutscher Eisenhüttenleute. *Werkstoffkunde Stahl, Band 1: Grundlagen*. 20. Auflage, Düsseldorf: Verlag Stahleisen

7.2 Internetquellen

Die Kelten (n.d.), *Verbreitung*, Verfügbar unter: <http://www.norikum.eu/kelten.htm>, [29.12.2013]

Dilatometer (22.12.2013), *Dilatometer*, Verfügbar unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Dilatometer>, [30.12.2013]

Duktilität (2013). *Duktilität*. Verfügbar unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Duktilität>, [4.1.2014]

Erdkruste (n.d.), *Aus welchen Elementen besteht die Erde*, Verfügbar unter: http://www.geophysik.uni-kiel.de/~sabine/DieErde/Mineralogie/Schalenbau_Element1.htm, [29.12.2013]

Olympus (n.d.), *Microscope Solutions BXiS*, Verfügbar unter: <http://www.olympus-ims.com/en/microscope/bx61/>, [4.1.2014]

Stahl für Metallographen (2011), *Alkoholische Salpetersäure zur Entwicklung des Mikrogefüges*, Verfügbar unter: <http://www.metallograf.de/start.htm?grundlagen/waermebehandlung.htm>, [19.10.2013]

Stahl - Harter Werkstoff, Hartes Geschäft (14.10.2009), *Die Entdeckung als Werkstoff*, Verfügbar unter: http://www.planet-wissen.de/alltag_gesundheit/werkstoffe/stahl/, [29.12.2013]

Stahl (22.12.2013), *Einleitung*, Verfügbar unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Stahl>, [29.12.2013]

8 Danksagung

Diese Arbeit wäre nicht möglich gewesen ohne die unentgeltliche Unterstützung von Firmen und Personen die mir Material und Gerätschaften zur Verfügung gestellt haben. Bei der Fa. Pestalozzi AG in Dietikon konnte ich alle Stahlproben für meine Versuche beziehen. Ein ganz besonderer Dank geht an die Fa. Gloor Instruments AG in Kloten mit den Herren Fritz Gloor und Jörg Meier welche mir ein hochprofessionelles Mikroskop inklusive Digital Kamera und Analysesoftware zur Verfügung gestellt haben. Herr Meier hat mich zudem in die Bedienung des Mikroskops und der Software eingeführt. Auch möchte ich mich ganz herzlich bei meinem Betreuer und der Kantonsschule Rämibühl bedanken welche mir den Temperaturofen und das Chemie-Labor zur Verfügung gestellt haben. Meinem Nachbar Andreas Kraus und meinem Vater danke ich für das Korrekturlesen der vorliegenden Maturitätsarbeit.

Der/die Unterzeichnete bestätigt mit Unterschrift, dass die Arbeit selbständig verfasst und in schriftliche Form gebracht worden ist, dass sich die Mitwirkung anderer Personen auf Beratung und Korrekturlesen beschränkt hat und dass alle verwendeten Unterlagen und Gewährspersonen aufgeführt sind.

Datum, Ort: _____

Unterschrift: _____