



Montanuniversität Leoben
Lehrstuhl für Gießereikunde,
Department für Metallurgie
Vorstand Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr. Peter Schumacher



Masterarbeit

Thema:

***Untersuchung der maßgebenden
metallurgischen Einflussmöglichkeiten auf
Eigenschaften und Gefüge moderner
mischkristallverfestigter Sphärogusswerkstoffe***

Ersteller:

Doris Carolin Michel

Betreuer:

**Univ. Prof. DI Dr. Peter Schumacher
Dipl.- Ing. Dr.mont. Gert Gassner**



Leoben, Juni 2016

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt,
dass ich diese Arbeit selbständig verfasst,
andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel
nicht benutzt und mich auch sonst keiner
unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Doris Carolin Michel

Leoben, im Juni 2016

Danksagung

Einen herzlichen Dank an Herrn Univ. Prof. DI Dr. Peter Schumacher sowie Herrn Dipl.- Ing. Dr. mont. Gert Gassner für die gute Betreuung und Unterstützung im Zuge meiner Diplomarbeit.

Ebenso möchte ich den Mitarbeitern des ÖGI Leoben für die gute Zusammenarbeit danken.

Zuletzt gilt mein Dank all jenen, die mich während meines Studiums gefördert und unterstützt haben.

Kurzfassung

Die neu in die Norm EN ISO 1563 aufgenommenen höher siliziumhaltigen ferritischen Sphärogussorten bedürfen einer genaueren Betrachtung hinsichtlich der Auswirkung von Spurenelementen. Diese besitzen zum einen ausgezeichnete Eigenschaften, woraus die steigende Nachfrage nach diesen duktilen Gussorten resultiert, zum anderen ist jedoch auffallend, dass, abhängig von Spurenelementen, ab einem Siliziumgehalt von ca. 4,3% die mechanischen Eigenschaften sehr stark abfallen.

In dieser Arbeit soll mit Versuchen überprüft werden, ob geeignete Legierungselemente gefunden werden können, welche sich positiv auf das Gefüge und insbesondere auf die Matrix der GJS- Werkstoffe, vor allem auf den des EN-GJS-600-10, auswirken und so die Limitierung der Eigenschaften beeinflussen. Diese werden im Anschluss auf ihre Auswirkungen bezüglich der mechanischen Eigenschaften, des Gefüges sowie der Bildung von Kugeln und deren Dichte untersucht. Zudem wird die Bruchoberfläche der Zugproben auf ihr Bruchverhalten analysiert.

Bei Betrachtung der Ergebnisse konnten qualitativ wirksame Legierungselemente gefunden werden, welche bezüglich ihrer quantitativ notwendigen Menge noch genauer untersucht werden sollten.

Abstract

The recently in Norm EN ISO 1563 incorporated cast irons with higher silicon-content require a detailed investigation regarding the effects of the trace elements. They have on one hand excellent properties, resulting in increasing demand for these ductile grey cast irons and on the other hand those remarkable mechanical properties strongly decrease from approximately 4,3% silicon content. The aim of this work is to investigate, if appropriate alloying elements can be found which have positive impact on the microstructure and the formation of spherulites and their representing number at a high Si content. In addition, the fracture surface of the tensile sample was analyzed to elucidate fracture behavior. Effective alloying elements were detected, which however should be examined more closely with regard to their quantitative amount needed to obtain optimum properties.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	III
Kurzfassung	IV
Abstract.....	V
Inhaltsverzeichnis.....	VI
1 Einleitung	8
2 Stand der Technik	10
2.1 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm.....	10
2.1.1 Allgemeines zum Eisen-Kohlenstoff-Diagramm	10
2.1.2 Gefüge im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm.....	13
2.2 Gusseisen	14
2.2.1 Graues Gusseisen	16
2.2.2 GJL.....	22
2.2.3 GJS	22
2.2.4 GJS-SiMo	23
2.2.5 GJS mit höherem Si-Gehalt	24
2.3 Einfluss von Legierungselementen.....	24
2.3.1 Mangan	25
2.3.2 Kupfer.....	25
2.3.3 Nickel	25
2.3.4 Kobalt	26
2.3.5 Molybdän.....	26
2.3.6 Aluminium.....	26
2.3.7 Phosphor	27
3 Experimentelle Methoden.....	28
3.1 Durchführung der Versuchsabgüsse	28
3.2 Ermittlung von Werkstoffeigenschaften	32
3.2.1 Mechanische Kennwerte	32
3.2.2 Gefügeausbildung	35
3.2.3 Rasterelektronenmikroskop (REM).....	38
3.2.4 Chemische Analyse	39

4	Ergebnisse	40
4.1	Chemische Analysen.....	40
4.2	Mechanische Kennwerte	41
4.3	Perlitgehalt	44
4.4	Graphitkugelauswertung	44
4.5	Gefügebilder.....	45
4.6	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen.....	64
5	Zusammenfassung.....	75
	Literaturverzeichnis	79
	Abbildungsverzeichnis.....	81
	Tabellenverzeichnis.....	84
	Anhang.....	85

1 Einleitung

Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS) wird dank seiner zufälligen Entdeckung seit rund 60 Jahren industriell vergossen. Durch seine Ähnlichkeit zum Stahl ersetzte es diesen bald aufgrund der besseren wirtschaftlichen Effizienz. Es findet, wegen seiner guten Werkstoffeigenschaften, immer mehr Verwendung im Maschinen- und Fahrzeugbau, in der Herstellung von Pumpen und Armaturen sowie Bereichen der Erdöl-, Elektro- und Nukleartechnik. Zudem zeichnet es sich durch ein annähernd vollständiges Recycling aus [1] [2].

In den europäischen Normen, EN 1563 (GJS) und EN 1564 (ADI), wird das Gusseisen mit Kugelgraphit als ein Eisen-Kohlenstoff-Werkstoff bezeichnet, dessen Kohlenstoffanteil zum größten Teil aus einem kugelig auftretenden Graphitanteil besteht [1]. Im Zuge einer Überarbeitung im Jahre 2012 erfolgt eine Aufnahme der ferritischen misch-kristallverfestigten Sorten EN-GJS-450-18, EN-GJS-500-14 und des höher siliziumhaltigen EN-GJS-600-10 in die EN 1563 die Norm [3].

Beim Gusseisen wird durch die Addition von Perlitbildnern (Mn, Cu, Sn), bei einem Siliziumgehalt von 2-2,5 Prozent, ein bestimmtes Ferrit/Perlit-Verhältnis eingestellt. Bei höher siliziumhaltigen Werkstoffen kann auf diese verzichtet werden, da eine Mischkristallhärtung des Ferrits stattfindet. Dies führt zu einer Vereinigung an guten Eigenschaften, wie eine höhere Dehnung und regelmäßige Härteverteilung, bei gleichzeitig höherer Streckgrenze $R_{p0,2}$. Die Siliziumgehalte dieser neueren und interessanten Gussorten betragen dabei in etwa 3 - 4,3 Prozent [3].

Generell führen diese Werkstoffe, aufgrund ihrer einfacheren gleichmäßigen Bearbeitung und besseren Werkstoffeigenschaften, zu einer Senkung der Kosten für die Gießereien und der besseren Beachtung von Härtetoleranzen. Zudem ist es möglich, durch die guten mechanischen Eigenschaften über die Leichtbauweise (geringere Wandstärken) Material und Energie ein zu sparen [1] [3].

Die Wirtschaftlichkeit der Unternehmen kann dadurch erhöht werden und neue Perspektiven bieten sich. Dies führt dazu, dass die Nachfrage bezüglich dieser Werkstoffe in den nächsten Jahren stetig wachsen wird. So ist es notwendig, vorab Informationen und Daten zu generieren, um schon in der Planungsphase des Gussteiles eine günstige Auslegung zu erlangen [1] [3].

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der maßgebenden metallurgischen Einflussmöglichkeiten auf Eigenschaften und Gefüge moderner mischkristallverfestigter Sphärogusswerkstoffe, wie den EN-GJS-600-10. Im Einzelnen werden zuerst, mittels Literatur- und Patentrecherchen geeignete Legierungszusätze für die Schmelze ausgewählt. Anschließend erfolgen die Auswertung von mechanischen Kennwerten und Gefügeparametern sowie die chemische Analyse der Schmelze anhand von im ÖGI-Gießereitechnikum hergestellten Probekörpern. Danach werden die Bruchflächen der Prüfkörper, welche beim Zugversuch entstanden sind, im Rasterelektronenmikroskop untersucht. Letzten Endes findet eine Gegenüberstellung mit der bekannten und genormten, mischkristallverfestigten Sphärogussorte statt. Die herausgearbeiteten Ergebnisse, Einflussfaktoren sowie mögliche Verbesserungsmaßnahmen werden in der Arbeit diskutiert.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Grundlagen der Metallkunde und Metallurgie sowie einige für GJS relevante Prüfverfahren, erläutert. In Tabelle 2.1 sind die ursprünglichen und neu auf-genommenen Gusseisensorten der Norm dargestellt. Diese Arbeit beschäftigt sich genauer mit dem EN-GJS-600-10.

Tabelle 2.1: Ursprüngliche Normsorten und neu in die DIN EN 1563 aufgenommene Werkstoffe, bezogen auf eine Wandstärke von bis zu 30 mm [1] [3]

EN-	GJS-450-10	GJS-450-18	GJS-500-7	GJS-500-14	GJS-600-3	GJS-600-10
Zugfestigkeit R_m [MPa]	450	450	500	500	600	600
Streckgrenze $R_{p0,2}$ [MPa]	310	350	320	400	370	470
Dehnung A [%]	10	18	7	14	3	10
Gefügeausbildung	Ferrit	Ferrit	Ferrit/ Perlit	Ferrit	Ferrit/ Perlit	Ferrit

2.1 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

2.1.1 Allgemeines zum Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

Im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm ist es möglich zu jeder Temperatur in Abhängigkeit des Kohlenstoffgehaltes die entsprechende Phasenzusammensetzung zu ermitteln (Abbildung 2.1). Es kann zwischen dem stabilen Eisen-Graphit- ($Fe-C$) und dem metastabilen Eisen-Zementit- ($Fe-Fe_3C$) Schaubild unterschieden werden, allerdings weist die Lage der Linien darauf hin, dass der Stabilitätsunterschied in den Legierungen nicht sehr hoch ist. Bei hohen Temperaturen, langen Haltezeiten und/oder langsamer Abkühlung zerfällt die spröde intermediäre Fe_3C -Phase, welche sich zuvor aus Eisen und Kohlenstoff gebildet hat, wieder in Kohlenstoff (Graphit) und Eisen, da Kohlenstoff energiereicher ist und somit weniger stabil. In der Technik findet meist eine Erstarrung nach dem metastabilen System statt [4].

Generell lässt sich die Einstellung des Systems steuern, so kann Graphit (dunkel) mit Ferrit (α -Eisen, hell) bei höherem Kohlenstoffgehalt in der Schmelze, mittels Keimbildung über die Silizium-Gehalte und langsamer Abkühlung gebildet werden. Die metastabile Phase über Zementit mit einem geringeren Kohlenstoffgehalt, Mangangehalten und schneller Abkühlung.

Eine Keimbildung für den Graphit ist in diesem Fall nicht vorhanden, sodass sich Zementit-Kristalle (dunkel) und Ferrit bilden. Das Gefüge kann über Glühen verändert werden, im stabilen Fall ist keine Veränderung möglich [5].

Im EKD finden eutektische (4,3% C), eutektoide (0,8% C) und peritektische Phasenübergänge statt [4].

Die Legierungen lassen sich nach dem Kohlenstoffgehalt in drei Gruppen einteilen, bis 2,06% spricht man von den Stählen, darüber, bis zu einem Gehalt von 6,67% Kohlenstoff, was 100% Zementit entspricht, von Gusseisen. Die Gussorten können in unter- und übereutektische Legierungen untergliedert werden. Die Grenze liegt hierfür bei 4,3% Kohlenstoff [4] [5].

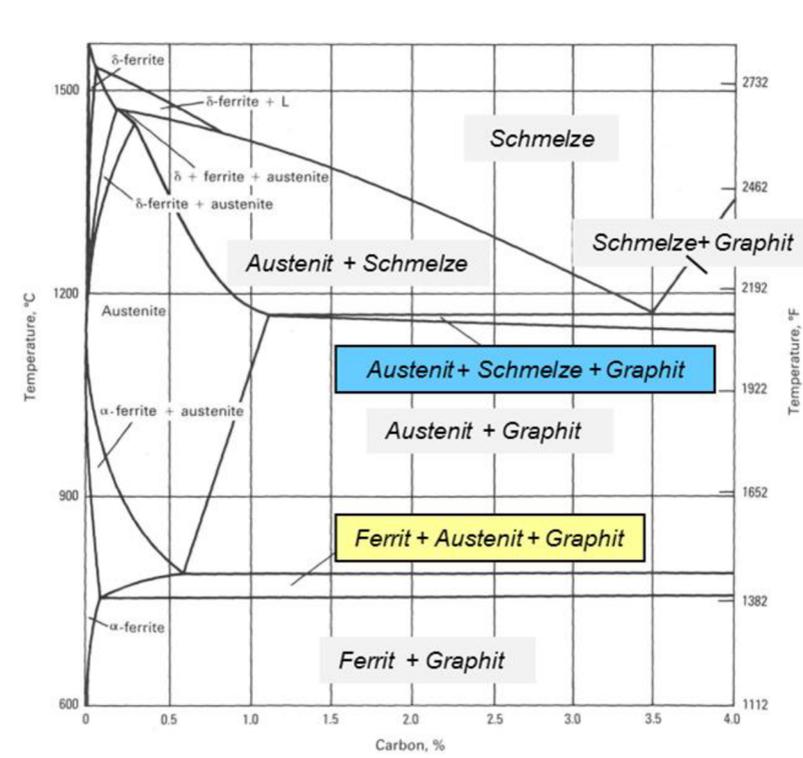


Abbildung 2.1: Eisen-Kohlenstoff-Diagramm bei 2,5 Gew.-% Silizium [6]

Eine Bestimmung des genauen Zustandes der Schmelze, kann über den Sättigungsgrad erfolgen. Dieser lässt sich, wie in Gleichung 2.1 ersichtlich, wie folgt berechnen:

$$Sc = \frac{\% C}{4,23 - 0,3 \times (\% Si + \% P)} \quad (2.1)$$

Der Sättigungsgrad setzt den Gesamtkohlenstoffgehalt und den Anteil des Kohlenstoffes einer eutektischen Schmelze miteinander ins Verhältnis. Eine Verschiebung vom eutektischen Punkt erfolgt über die Wirkung von Begleitelementen, wie Si und P, in der

Schmelze. Berechnet sich ein Sättigungsgrad von über 1, so liegt ein übereutektisches Gusseisen vor. Ebenso lässt sich mittels dem Sättigungsgrad die Festigkeit des Werkstoffes abschätzen. Je niedriger der Sc ist, desto höher ist die Festigkeit, da sich aufgrund des geringeren Kohlenstoffgehaltes weniger Graphit und mehr Primärdendriten im Gefüge befinden [7].

Morphologie des Reineisens

Eisen wird auch als polymorphes Metall bezeichnet, was bedeutet, dass es bei unterschiedlichen Temperaturen in verschiedenen Kristallformen auftritt (siehe Abbildung 2.2).

Bei 1536°C erstarrt reines Eisen zu dem sogenannten δ -Eisen, einer Kristallstruktur mit kubisch-raumzentriertem Gitter (krz). Durch eine plötzliche Gitterumwandlung bei 1392°C entsteht ein kubisch-flächenzentriertes Gitter, das γ -Eisen. Dies ist dichter gepackt.

Bei weiterer Senkung der Temperatur erfolgt bei 911°C eine letzte Gitterumwandlung, wobei α -Eisen mit einem krz Gitter entsteht. Bis Kühlung zur Raumtemperatur bleibt dies erhalten.

Am Curiepunkt, bei 769°C , findet eine Magnetisierung des α -Eisens statt, welches im kfz-Gitter unmagnetisch ist und als β -Eisen bezeichnet wird [5].

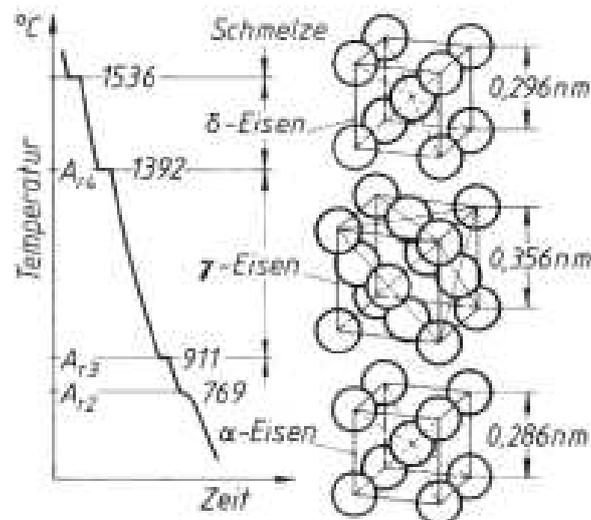


Abbildung 2.2: Abkühlkurve des reinen Eisens und seine Kristallarten [5]

Schon geringfügige Unterschiede in der Konzentration an Kohlenstoff, welcher das wichtigste Legierungselement des Eisens ist, verändern die Werkstoffeigenschaften enorm. Der Kohlenstoff ist aufgrund des geometrischen Aufbaus des allotropen Eisens (α -, β - und δ -Eisen) nur begrenzt löslich. Die unterschiedliche Packungsdichte verhindert ein gänzlich Einlagern des Kohlenstoffes in die Zwischengitterplätze des kubisch-raumzentrierten (krz) oder kubisch-flächenzentrierten (kfz) Eisengitters (Abbildung 2.2) [4].

2.1.2 Gefüge im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

Im Folgenden sind die wichtigsten Gefüge, welche bei der Erstarrung nach dem stabilen und metastabilen Eisen-Kohlenstoff-Diagramm entstehen, genauer erklärt.

Ferrit

Als Ferrit wird ein α -Mischkristall mit kubisch-raumzentrierter Einheitszelle im stabilen Fe-C-System bezeichnet. Bei der Erstarrung erfolgt die gesamte Kohlenstoffausscheidung als Graphit. Aufgrund seiner sehr geringen Löslichkeit für Kohlenstoff im Mischkristall (nur 0,00001%), resultiert die Betrachtung für Ferrit als Reineisen, was zudem auch eine Erklärung für seine niedrige Härte, ungefähr 60 HV und somit gute Verformbarkeit, liefert. Bis zu einer Temperatur von 769°C, der Currie-Temperatur, ist Ferrit magnetisch, im Bereich darüber, bis 911°C unmagnetisch [2] [4] [5] [7].

Perlit

Der Perlit entsteht bei einer Löslichkeit von 0,77% Kohlenstoff und einer Temperatur von 723°C durch den eutektoiden Zerfall der γ -Mischkristalle, im metastabilen System, in ein Kristallgemisch aus Ferrit (0,02% Kohlenstoff) und eutektoiden Zementit (6,67% Kohlenstoff). Dies lässt auf eine starke Umverteilung des Kohlenstoffes über die Diffusion schließen. Sowohl die Diffusion, als auch die Perlitbildung sind zeit- und temperaturabhängig. Als Keim für die Entstehung des Perlits dient eine plattenförmige Anordnung des Zementits, welcher sich, in der Keimbildungs- und Kristallwachstumsphase, an der Korngrenze des Austenits bildet. Wird der Zementit des Perlits so stabilisiert, dass dieser nicht zu Graphit und Ferrit zerfällt, kann er mittels Wärmebehandlung kugelig eingeformt werden. Der streifige Gefügebau des Perlits ergibt sich aus der abwechselnden Anordnung des α -Mischkristalles neben den Zementitplatten, bei sinkender Temperatur wird dieses immer feiner [2] [4] [8].

Austenit

Als Austenit wird ein γ -Einlagerungsmischkristall mit kubisch-flächenzentriertem Gitter bezeichnet. Ab einer Temperatur von 723°C ist er beständig und seine Löslichkeit für Kohlenstoff beträgt bis zu 2,06% bei 1147°C. Der Austenit ist weich, gut verformbar und unmagnetisch. Eine Umwandlung aufgrund von Diffusion, des unterkühlten Austenits kann, in drei Temperaturbereichen erfolgen. Daraus resultieren die verschiedenen Gefügeausbildungen: Perlit, Bainit und Martensit [2] [4].

Zementit

Der Zementit scheidet sich im metastabilen System als intermetallisches Eisencarbid (Fe_3C) aus. Das Eisencarbid enthält 6,67% Kohlenstoff und ist magnetisch. Er entsteht in Kombination mit Austenit und besitzt ein kompliziertes rhomboedrisches Gitter. Mit dem Impfen kann die Unterkühlung und somit die Zementitbildung unterdrückt werden. Der Zementit ist extrem hart (800 HV) und spröde, was bedeutet, dass mit steigendem Zementitgehalt die Zugfestigkeit und das Verformungsvermögen abnehmen. Aufgrund der verschiedenen Erscheinungsformen durch die bedingte Abkühlung, kann eine Unterteilung in Primär-, Sekundär- und Tertiärzementit erfolgen. Der Primäre ist jener, welcher sich bereits bei der Erstarrung in der Schmelze bildet. Der Sekundäre scheidet sich bei weiterer Abkühlung aus dem Austenit aus. Die Bildung des Tertiären findet, im untereutektoiden Bereich ($C < 0,77\%$), neben dem Perlit statt, während der eutektoide Austenit zerfällt [4] [7] [9].

2.2 Gusseisen

Gusseisen gewinnt, im Vergleich mit Stahl, immer mehr an kommerzieller Bedeutung, vor allem hinsichtlich der ähnlichen mechanischen Eigenschaften, des besseren Gießverhaltens, der Formfüllung und Schwindung sowie der freieren konstruktiven Formgestaltung. Aufgrund verschiedenster Möglichkeiten für die Herstellung von Formen und Gießverfahren ist die Produktion von allen Stückzahlen, von Kleinserien bis Großgussteilen, möglich [1] [5].

Unter Gusseisen werden alle Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit einem Kohlenstoffgehalt von 2,5-5% zusammengefasst. Zusätzlich zum Hauptlegierungselement Silizium (0,8-3%) sind weitere Elemente verwendbar. Es kann zwischen grauem und weißem Gusseisen unterschieden werden, je nach Aussehen der Bruchflächen und dem Auftreten des Kohlenstoffes in seiner elementaren Form als Graphit bzw. in gebundener Form als Zementit (siehe Abbildung 2.3). Gusseisen ist ein stahlähnliches Gefüge bestehend aus einer Grundmasse mit Graphiteinlagerungen. Abhängig von der Abkühlgeschwindigkeit und somit von der Wandstärke des Gussstückes, bildet sich ein ferritisches, ein ferritisch-perlitisches oder perlitisches Grundgefüge aus. In Abbildung 2.3 ist die genaue Einteilung der Eisengusswerkstoffe, im stabilen und metastabilen System, dargestellt [4].

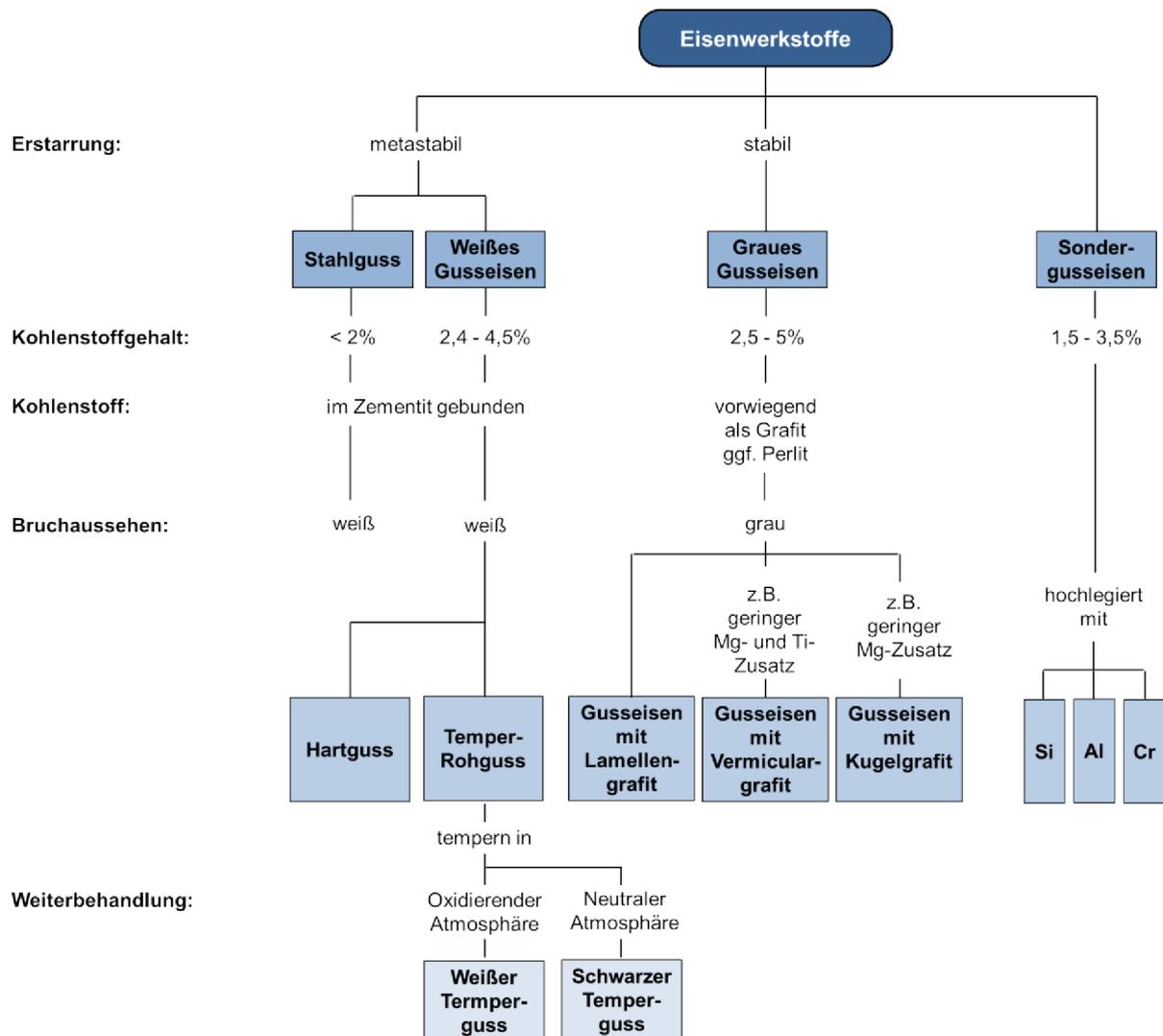


Abbildung 2.3: Einteilung der Eisengusswerkstoffe [4]

Die Benennung des Gusseisens erfolgt über spezielle Kurznamen, welche in der Norm EN 1560 festgehalten sind. In Tabelle 2.2 ist die genaue Bezeichnung aufgeführt. Bezeichnungsposition 1 und 2 sind in jedem Fall gleich. „EN“ zeigt, dass es sich um eine Euronorm handelt, „J“ steht für das schwedische Wort für Eisen, „järn“. In Position 3 wird auf die Graphitstruktur genauer eingegangen (siehe Tabelle 2.3) und in Position 4 erfolgt die Angabe von unterschiedlichen Informationen, wie Bruchdehnung, Mindestzugfestigkeit, Härte oder chemische Zusammensetzung [10].

Tabelle 2.2: Aufbau von Kurznamen für Gusseisen [10]

	1		2	3		4	5	6
allg.	EN	-	GJ	Graphit- struktur	-	Mikro- oder Makrostruktur	Mechanische Eigenschaften oder chemische Zusammensetzung	Zusätzliche Anforderungen
Bsp.	EN		GJ	S	-		600-10	

Als Beispiel für die Benennung ist in Tabelle 2.2 die Gussorte mit Kugelgraphit dargestellt, auf welche in dieser Arbeit genauer eingegangen wird.

Tabelle 2.3: Bezeichnungen für die Graphitstruktur [10]

Buchstabe	Graphitform bzw. Gefüge
L	Lamellengraphit
S	Kugelgraphit
M	Temperkohle
V	Vermiculargraphit
N	Graphitfrei (Hartguss), ledeburitisch
Y	Sonderstruktur

Tabelle 2.4: Beispiele für die Mikro- oder Makrostruktur [10]

A	Austenit
F	Ferrit
P	Perlit
M	Martensit

Im Folgenden wird ein Blick auf das Graue Gusseisen gelegt, welches die Grundgruppe der betrachteten Gussorte bildet.

2.2.1 Graues Gusseisen

Unlegiertes Graues Gusseisen, welches nach dem stabilen System erstarrt, kann, basierend auf der Graphitform sowie den mechanischen Eigenschaften, in drei verschiedene Sorten unterteilt werden, dem

- Gusseisen mit Lamellengraphit (Grauguss), Norm EN ISO 1561
- Gusseisen mit Kugelgraphit (Sphäroguss), Norm EN ISO 1563 und
- Gusseisen mit Vermiculargraphit, Norm EN ISO 16079 [4] [11] [12].

Die Modifizierung der Graphitstruktur im Gefüge erfolgt über die Einteilung der unterschiedlichen Sorten, wie in Abbildung 2.4 dargestellt [4].

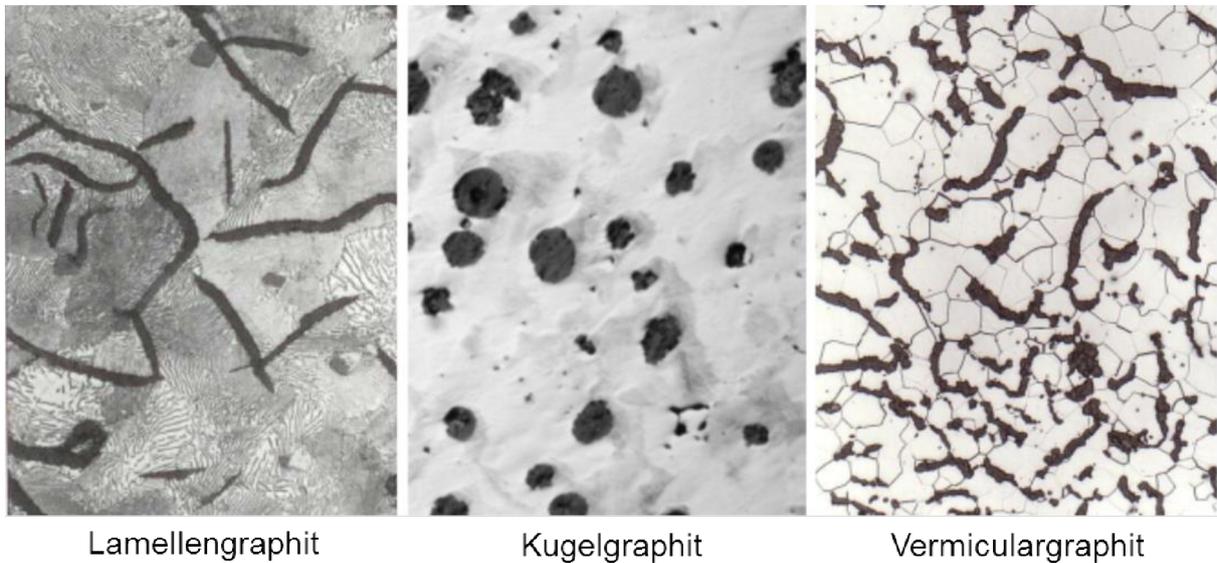


Abbildung 2.4: Einteilung des Grauen Gusseisens über die Graphitausbildung [13]

Eine genauere Bewertung kann über die Ausbildung des metallischen Grundgefüges und die sechs Formen des Graphits, nach DIN EN ISO 945-1, bestimmt werden. So definieren die Graphitausscheidungen in Größe und Gestalt, neben ihrer Menge und Verteilung, maßgebend die mechanischen Eigenschaften [4].

Magnesiumbehandlung zur Kugelbildung

Bei den Werkstoffsorten des Gusseisens sind Gusseisen mit Lamellen- und Kugelgraphit mit rund 90% die am häufigsten verwendeten Sorten. Die Herstellung der beiden Sorten erfolgt über die Erstarrung einer Eisen-Kohlenstoff-Silizium-Schmelze in Verbindung mit weiteren Legierungselementen [4].

Aufgrund der Neigung des Graphits zu einer plattenförmigen Kristallisation, bedingt durch seine hexagonale Schichtstruktur, erfolgt die Bildung von Lamellen. Diese hemmen den Kraftfluss im Werkstoff und wirken zudem als innere Kerben.

Die Bildung der Kugeln im Gefüge erfolgt über Sonderbehandlungen der Schmelze mit Magnesium oder auch Cer. Wird Magnesium zugegeben, erfolgt eine starke Desoxidation und Entschwefelung der Schmelze, der Magnesiumgehalt ergibt sich aus der Menge des Schwefels in der Schmelze. Ist dieser hoch, so bedarf es auch eines höheren Magnesiumgehaltes. Aufgrund der Desoxidations- und Entschwefelungswirkung des Magnesiums geht der Schmelze auch einiges daran verloren, sodass mit der Zeit weniger Magnesium zur Kugelbildung zur Verfügung steht. Für die Kugelbildung werden zwischen

0,035 – 0,050 % Magnesium benötigt. In Form von MgS und MgSiO erfolgt die Abbindung in einer aufschwimmenden Schlacke. Die Behandlung kann z.B. mittels konventionellen Übergießen von Mg- Vorlegierungen, dem Georg- Fischer-Verfahren oder dem Einspulen eines magnesiumhaltigen Drahtes, erfolgen [4] [7] [8] [9].

Die Bildung des Graphits lässt sich mit Abbildung 2.5 über die Wachstumsgeschwindigkeiten erklären. Ist der Schwefel in Magnesiumsulfid gebunden und die Schmelze desoxidiert, so erfolgt ein Spiralwachstum des Graphites in prismatischer Richtung und die makroskopische Geschwindigkeit in Basalrichtung ist höher als jene in prismatische Richtung, folglich bildet sich eine Kugel über Kugelsegmente aus. Wird der Schwefel und Sauerstoff auf der Basalfläche des Graphites absorbiert, verlangsamt er das Wachstum in diese Richtung. Die Lamellenbildung findet über die Wachstumsgeschwindigkeit v_p statt [7] [14].

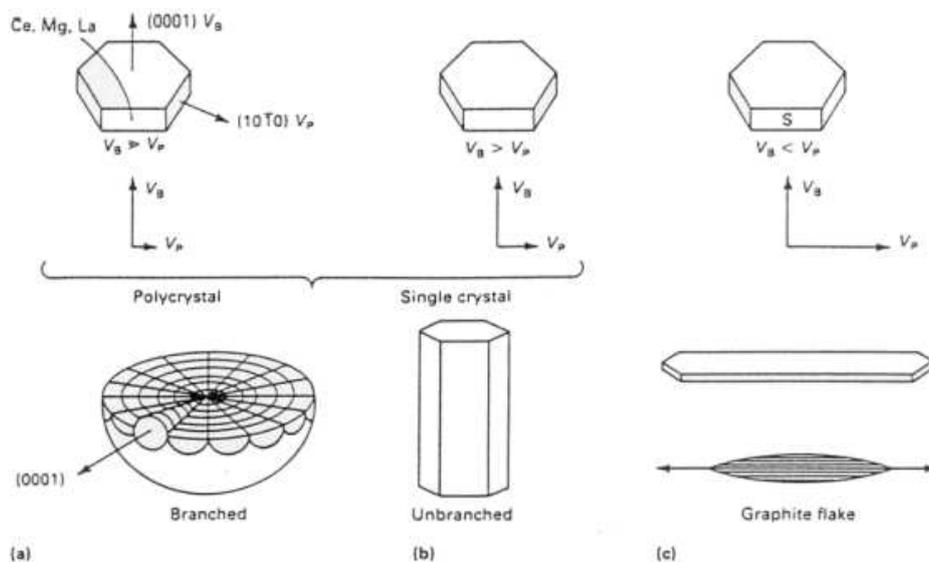


Abbildung 2.5: Einfluss von Magnesium und Schwefel auf die Wachstumsgeschwindigkeit des Graphits [14]

Impfen der Schmelze

Das Impfen der Schmelze bildet einen wichtigen Schritt in der Herstellung von Gusseisen, da die gezielte Graphitausscheidung, insbesondere beim Sphäroguss, eine wichtige Rolle spielt. Über das Einbringen von Silizium z.B. mit Ferrosilizium (FeSi) oder über Siliziumpakete, kann aufgrund der Keimbildung, die Einstellung des Grundgefüges erfolgen, zudem werden die mechanischen Eigenschaften ausgebildet bzw. das Bauteil homogenisiert. Zugfestigkeit, Dehnung, Härte und Bearbeitbarkeit der Gussstücke werden verbessert, da die Nodularität gesteigert, die Kugelzahl erhöht und die Karbidbildung verringert wird. Es ist notwendig zwischen Impfen und Legieren zu unterscheiden. Beim Legieren werden Elemente zur

Schmelze gegeben, um die Eigenschaften zu verbessern, beim Impfen soll über die Zugabe von Keimen die stabile eutektische Erstarrung erleichtert werden. Diese Impfmittel enthalten neben Silizium andere Elemente, welche eine hohe Affinität zu Schwefel und Sauerstoff haben und so in der Schmelze Ausscheidungen bewirken und somit auch die Graphitmorphologie gezielt beeinflussen. Eine Impfung lässt sich über die thermische Analyse prüfen. Die Impfwirkung ist zu Beginn am höchsten und klingt mit der Zeit ab. Um die richtige Einstellung des Impfmittels für das verwendete Gusseisen zu treffen, müssen Parameter wie der Gehalt der übrigen Legierungselemente, besonders der des Kohlenstoffes, die Abkühlgeschwindigkeiten des Gusseisens sowie die Wanddicke des Gussteiles analysiert werden. Es gibt verschiedene Arten, das Impfen durchzuführen, z.B. mittels Draht, in der Pfanne oder im Gießstrahl [2] [9] [15].

Eine Überprüfung der grauen Erstarrung wird in der Praxis auch oftmals über Gießkeilproben durchgeführt. In Abbildung 2.5 ist schematisch eine Versuchsserie von unterschiedlichen Vorgehensweisen zur GJL-Bildung und Überprüfung dargestellt [8].

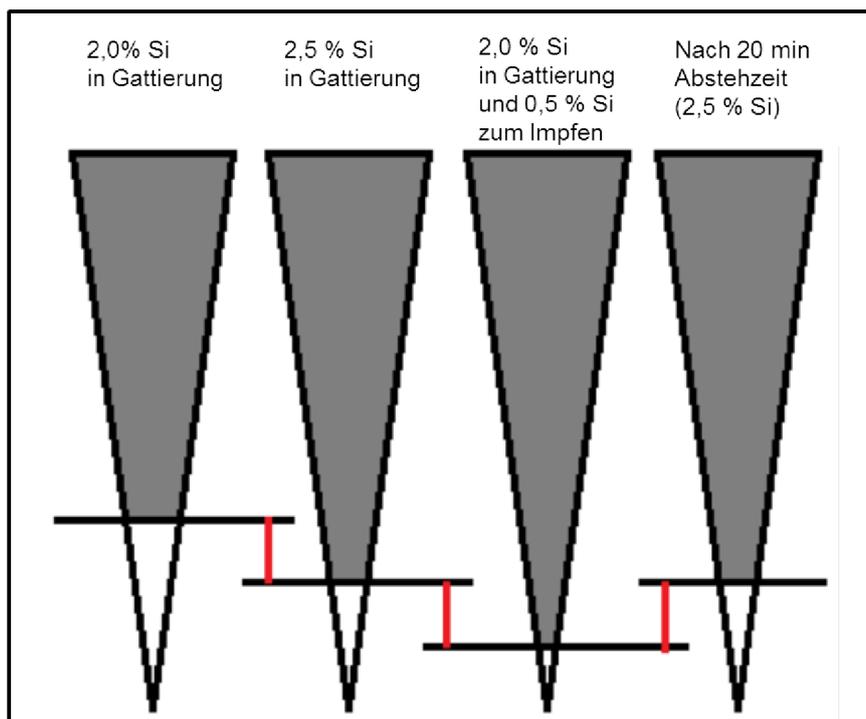


Abbildung 2.6: Gießkeilprobe am Gusseisen mit Lamellengraphit [8]

Bei Probe 1 wurden nur 2% Silizium in die Schmelze hingegeben, bei Probe 2 der Gehalt auf 2,5% erhöht. In jedem der beiden Fälle fand eine Grau/Weiß-Mischerstarrung statt. Die Weißerstarrung ist vor allem in der Spitze des Keiles ersichtlich, was mit einer schnellen Abkühlung aufgrund einer dünnen Wandstärke zu erklären ist. Allerdings ist bei Probe 2 der

Bereich der Weißerstarrung geringer, was die These unterstützt, dass Silizium die Grauerstarrung fördert (siehe Phasendiagramm).

Bei Probe 3 wurde eine Kombination aus Hinzugabe von Silizium in die Schmelze und zusätzlichem Impfen nach dem Abstich durchgeführt. Diese Probe weist die beste Grauerstarrung auf, obwohl der Siliziumgesamtgehalt dem von Probe 2 entspricht.

Der Abguss von Probe 4 fand erst nach einer gewissen Wartezeit statt, im Ergebnis ist erkennbar, dass wieder ein Bereich der Weißerstarrung vorhanden ist, was darauf schließen lässt, dass die Impfwirkung nach einiger Zeit abklingt. Ein schnelles Gießen nach dem Impfen ist also von Nöten. In weiteren Versuchen konnte festgestellt werden, dass noch andere Elemente wie Barium, Calcium oder Aluminium die Impfwirkung positiv beeinflussen [8].

Wirkung des Siliziums

Generell besteht das Gusseisengefüge aus einer Eisen-Kohlenstoff-Siliziumlegierung. Bei steigenden Si-Gehalten lassen sich grundsätzlich folgende Aussagen über den Einfluss des Siliziums, auf das Fe-C- Si-Diagramm treffen. Im Vergleich der beiden Systeme in Abbildung 2.7, welche einen Vertikalschnitt bei 2,4 bzw. 4,8% Si darstellen, sind diese ersichtlich.

- Aufgrund der Zugabe von Silizium findet eine Verschiebung des Eutektikums, bzw. des eutektoiden Punktes zu geringeren Kohlenstoffgehalten statt, dies stellt eine ternäre Phasenfeldaufwertung dar.
- Die Lage der Eutektikalen, bzw. des Eutektoides wird jedoch zu höheren Temperaturen verschoben, zudem bildet sich ein Intervall aus [8] [16].

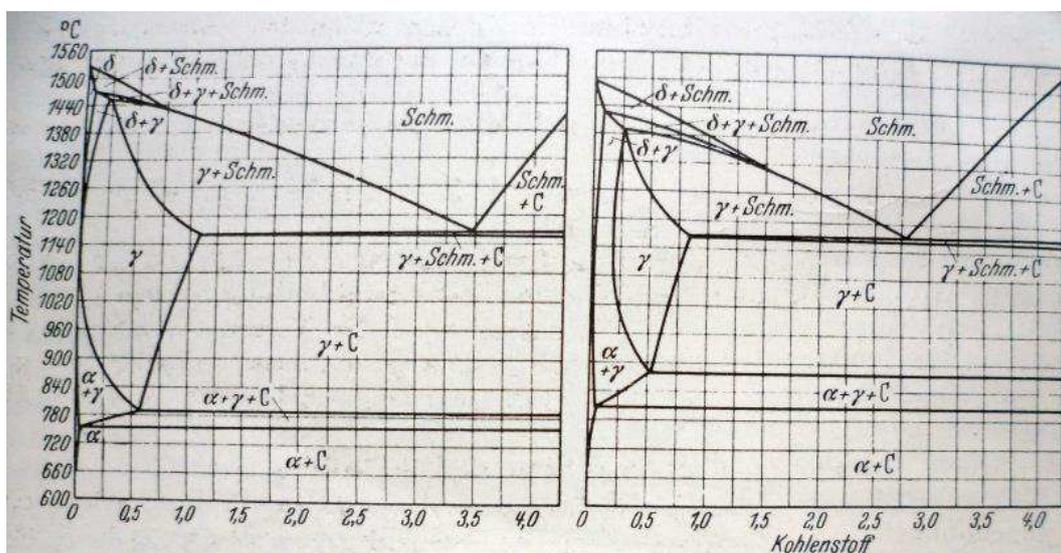


Abbildung 2.7: Schnitt im System bei 2,4 und 4,8% Silizium [16]

Anhand des MAURER-Diagramms (Abbildung 2.7) lassen sich genaue Aussagen bezüglich der Bildung des Gefüges unter Anwesenheit von Kohlenstoff und Silizium treffen. Maurer bezog seine Erkenntnisse, dass nicht nur die Elemente Einfluss auf die Ausbildung nehmen, sondern auch die Abkühlgeschwindigkeit. Diese lässt sich über die Wanddicke des Gussteiles steuern. Die verwendeten Proben mit 30 mm Durchmesser ließ er an der Luft abkühlen [4] [16].

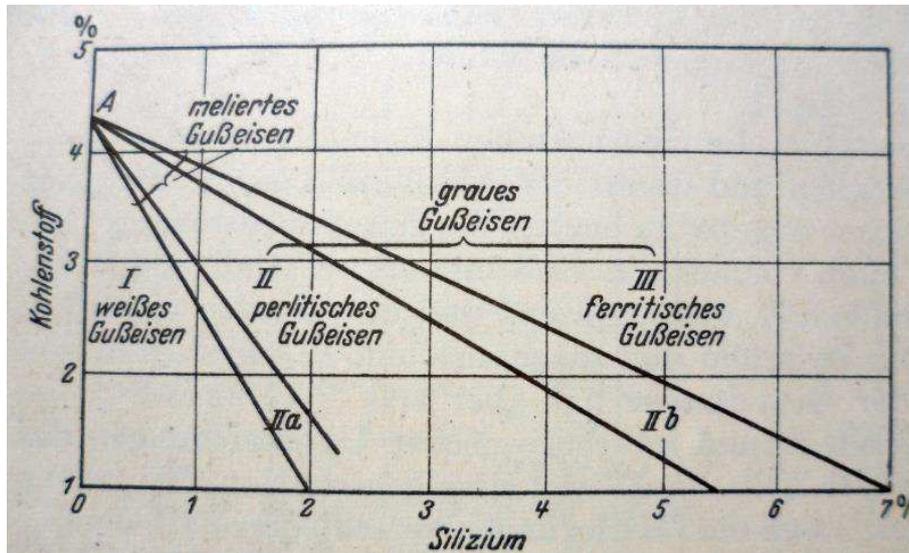


Abbildung 2.8: Gusseisendiagramm nach MAURER [4]

Auf der Kohlenstoffachse beginnen die Linien im Bereich des eutektischen Punktes (4,5% C) im Fe-C-Diagramm. Sie unterteilen das MAURER-Diagramm je nach Siliziumgehalt in die Bereiche des weißen, melierten und grauen Gusseisens. Nehmen Kohlenstoff- und Siliziumgehalt ab, steigen hingegen die Härte und die Festigkeit [4] [16]. Hingegen gehen Greiner und Klingenstein (Abbildung 2.8) von einer Abhängigkeit der Ausbildung des Gefüges vom (Si-C)-Gehalt zur Wanddicke aus. Es bildet sich von links nach rechts mit steigender Wandstärke:

- I: Ledeburitischer Hartguss
- IIa: Meliertes Eisen
- II: Perlitguss
- IIb: Ferritisch-perlitischer Grauguss
- III: Ferritischer Grauguss

Der Knickpunkt der oberen Begrenzungskurven liegt bei einem Si-/C- Gehalt von 5,5%, im höherwertigen Guss sollte unter dieser Zahl geblieben werden. Auch ist eine Gleichstellung der Eigenschaften von Kohlenstoff und Silizium im Gusseisen nur bei bestimmten perlitischen Gussorten möglich [5] [16].

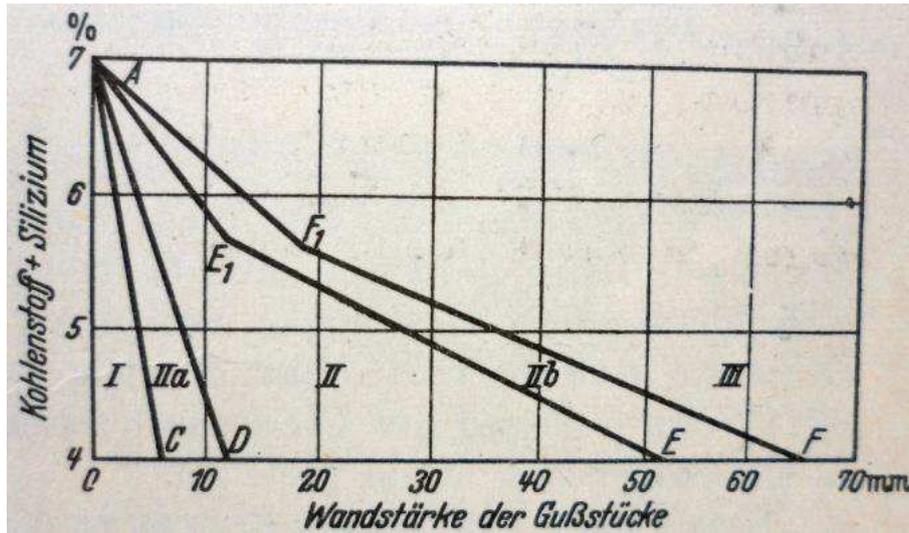


Abbildung 2.9: Strukturdiagramm nach F. Greiner und Th. Klingenstein [16]

2.2.2 GJL

Nach der EN 1561:2011(D) ist Gusseisen mit Lamellengraphit ein „Gusswerkstoff, basierend auf Eisen und Kohlenstoff, wobei der Kohlenstoff überwiegend in Form von blättrigen (lamellaren) Graphitpartikeln vorliegt“ [11]. Sein Grundgefüge besteht hauptsächlich aus Perlit. Es besitzt eine gute Druckfestigkeit, allerdings ist die Zugfestigkeit aufgrund der Kerbwirkung der Lamellen gering und hängt von der Wandstärke des Gussteiles ab, daher ist Grauguss für die Leichtbauweise nicht geeignet. Eine Erhöhung der Festigkeit kann über die Verfeinerung der Graphitlamellen, z.B. mittels schnellerer Abkühlung, erfolgen. Grauguss besitzt eine gute Selbstspeisung, ein gutes Dämpfungsvermögen und kann über die Lamellen mehr Druckfestigkeit aufnehmen. Die Lamellen senken zudem die Zähigkeit, erhöhen jedoch die Vergießbarkeit und die Bearbeitbarkeit. Bleibt die Gushaut unverletzt, besitzt das Gusseisen mit Lamellengraphit eine gute Korrosionsbeständigkeit und Wärmeleitfähigkeit. Es findet breit gefächert Verwendung, insbesondere bei komplexeren Formen, im Straßenfahrzeug-, Großmotoren- und Allgemeinen Maschinenbau [4] [8].

2.2.3 GJS

Gusseisen mit Kugelgraphit ist nach EN 1563:2011 (D) ein „Gusswerkstoff auf der Basis Eisen-Kohlenstoff-Silizium, wobei der Kohlenstoff überwiegend in Form von kugeligen Graphitpartikeln vorliegt“ [12]. Die innere Kerbwirkung beim GJS ist sehr gering, so dass über die Art und Ausbildung des Grundgefüges die mechanischen Eigenschaften bestimmt werden. Der Sphäroguss besitzt eine hohe Zugfestigkeit und gute Plastizität. Seine kugelige Form führt zu einer Erhöhung der Zähigkeit, jedoch ist die schwingungsdämpfende Wirkung geringer. Gusseisen mit Kugelgraphit, welches auch als Duktiles Gusseisen bezeichnet wird,

ist warm- und limitiert kaltumformbar und besitzt gute thermisch-physikalische Eigenschaften. Vielfach wird es in Bereichen eingesetzt, wo hohe Festigkeiten, bei gleichzeitig guter Zähigkeit wünschenswert sind. Der Sphäroguss wird über die Zugfestigkeit, die $R_{p0,2}$ -Dehngrenze sowie die Bruchdehnung definiert. Durch Wärmebehandlungen können die mechanischen Eigenschaften noch zusätzlich verbessert werden. GJS wird zum Beispiel für die Fertigung von Motornaben von Windenergieanlagen, im Straßenfahrzeugbau und Rohrleitungsbau verwendet [2] [4] [5] [8].

2.2.4 GJS-SiMo

In der EN 16124:2011 (D) wird der GJS-SiMo, welcher seit mehr als 30 Jahren bekannt ist, als ein „Gusswerkstoff mit Kohlenstoff hauptsächlich in Form von kugeligen Graphitpartikeln, legiert mit Silicium, um eine vorwiegend ferritische Matrix zu erhalten und legiert mit Molybdän, um die mechanischen Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen zu verbessern“ bezeichnet [17]. Die Siliziumgehalte liegen bei diesem Gusseisen zwischen 2,3-5,2%, die Molybdängehalte betragen 0,4-1,1%. Das Gefüge besteht zu mindestens 85% aus Ferrit, der Rest teilt sich auf Perlit und Carbide auf. Der Kohlenstoffgehalt sollte jedoch bei dieser Gussorte, aufgrund des hohen Siliziumgehaltes, auf 2,5-3,4% abgesenkt werden, um eine Graphitflotation zu vermeiden. Eine Erhöhung der Umwandlungstemperatur durch die Zugabe von Molybdän, Silizium und Aluminium konnte nachgewiesen werden. Zu einem noch besseren Ergebnis führt jedoch eine Kombination der Elemente, z.B. über das Si-Äquivalent, bestehend aus Silizium und Aluminium. Dies lässt sich wie folgt berechnen:

$$\text{Si eq.} = \% \text{ Si} + 0,8 \times \% \text{ Al} \quad (2.2)$$

Bei hohen Temperaturen besitzen die daraus entstandenen Gussteile eine Warmfestigkeit bei längeren Temperaturbelastungen, hohe Zunder- und Volumenbeständigkeit, gute Zerspanbarkeit und sind zudem gegen Oxidation resistent. SiMo-Werkstoffe können erst bei einer Gießtemperatur von ca. 40°C über jener von GJS vergossen werden, beim Auspacken ist es wichtig, die Teile vorsichtig zu behandeln, da diese im gegossenen Zustand spröde sind und leicht Risse entstehen. Eine oftmals durchgeführte Wärmebehandlung ermöglicht eine gleichmäßigere Verteilung der Spannungen. Meist finden diese Gussorten Verwendung bei Turbinengehäusen und Kompressorteilen sowie bei Abgaskrümmern oder Turboladergehäusen in der Automobilindustrie [9] [17] [18] [19].

2.2.5 GJS mit höherem Si-Gehalt

Im März 2012 wurde das „Gusseisen mit Kugelgraphit mit einem Grundgefüge (Matrix), das überwiegend aus Ferrit besteht, der durch Silicium mischkristallverfestigt ist“ bei der Überarbeitung der Norm EN 1563 neu mit aufgenommen [12]. Im Gegensatz zu den anderen ferritischen bis perlitischen Gusswerkstoffen, besitzt diese Gusseisensorte bei gleicher Zugfestigkeit eine höhere Dehnung und 0,2%-Dehngrenze. Diese bessere Dehnung kann allein durch die höhere Zugabe (3-4,3%) von Silizium erreicht werden, da dieses mit in der α -Matrix einen Mischkristall bildet. Auffallend ist zudem eine leichtere Bearbeitbarkeit und gleichförmigere Verteilung von Härte und Festigkeit über das gesamte Gussstück. Für den Leichtbau ergibt sich daraus die Möglichkeit von dünneren Wandstärken, was zu einer Einsparung an Energie und Rohstoffen führt. Auch bei dieser Werkstoffsorte wurden Überlegungen bezüglich des Einflusses von Legierungselementen getroffen. Die Erhaltung von mechanischen Eigenschaften kann z.B. über den Zusatz von perlitstabilisierenden Elementen wie Mangan, Kupfer oder Zinn gesteuert werden. Diese Gusseisensorte toleriert höhere Gehalte an Carbidbildnern (Cr, Mn), woraus eine Verwertung von billigeren, niedriglegierten Schrotten resultiert. Allerdings sollte der Phosphorgehalt unter 0,05% liegen, da dieser durch eine zu starke Mischkristallhärtung zu einer starken Senkung der Zähigkeit führt. Als kritische Untergrenze für das Erreichen der von der Norm geforderten Werte, sowohl für die Ferritbildung, als auch für die mechanischen Eigenschaften, wird ein Siliziumgehalt von 3% angegeben. Ab 4,3% Silizium ist jedoch eine starke Abnahme der Festigkeit und Bruchdehnung bemerkbar. Verwendung findet diese Gussorte im Automobilbau sowie der Energie und Umwelttechnik [3] [12] [20] [21].

2.3 Einfluss von Legierungselementen

Für die Wahl von geeigneten Legierungselementen wurden Vorüberlegungen, bezüglich deren Einfluss auf das Metall, getroffen. Diese können in folgende Gruppen eingeteilt werden: [1]

- Elemente, die graphitisierend wirken, was bedeutet, dass unter der Bildung von Graphitkristallen die Erstarrung nach dem stabilen Fe-C-Diagramm erfolgt.
- Elemente, die Carbide stabilisieren. Die Erstarrung findet im metastabilen Fe-C-Diagramm ohne Entstehung von Graphitkristallen statt.
- Störelemente, diese beeinflussen die Bildung des Kugelgraphites sowie die Form der Kugeln, negativ.

2.3.1 Mangan

Mangan gehört grundsätzlich zu den ständigen Begleitern im Gusseisen. Generell öffnet es, wie Nickel, das γ -Gebiet, wirkt im Gefüge karbidstabilisierend durch die Bildung komplexer Carbide und ist zudem ein austenitstabilisierendes Legierungselement. Zwischen Eisen und Mangan besteht eine lückenlose Mischkristallreihe, jedoch sinkt mit zunehmendem Mangangehalt die γ/α -Umwandlung, wodurch eine Perlitausbildung erreicht wird. Bei zu hohen Gehalten ($>1,5\%$) kann es zu Graphitentartungen (z.B. Chunkygraphit) kommen. Es führt zu einer leichten Erhöhung der Härte, der Streckgrenze und Festigkeit. Grundsätzlich ist ein niedriger Mangangehalt ($<0,20\%$) ausschlaggebend für die Bildung von ferritischem Gefüge im Sphäroguss. Mit einer anschließenden Wärmebehandlung können zusätzlich Graphitabscheidungen herbeigeführt werden [5] [9] [15] [16].

2.3.2 Kupfer

Das Austenit stabilisierende Kupfer hat eine stark perlitisierende Wirkung, da es die Anlagerung des Kohlenstoffes an den Graphit behindert, welche zur Ferritisierung notwendig wäre. Zudem steigen die Zugfestigkeit, die 0,2%-Dehngrenze und die Härte mit zunehmenden Cu-Gehalt ohne dass die Dehnung verändert wird, was bedeutet, dass Kupfer zu einer Verfestigung des Perlits führt, ohne ihn zu verspröden. Ebenso wird die Grauerstarrung gefördert. Graphitentartungen bei Gehalten von mehr als 1,5% können auftreten. Mit Kupfer ist es möglich ein vollständiges perlitisches Gusseisen zu bilden, da es eine Diffusionssperre für Ferrit bildet, ohne dass eine Carbidbildung stattfindet. Der Einfluss des Kupfers ist von der Wandstärke unabhängig, sodass in dünnen Teilen noch eine Graphitisierung während der Erstarrung stattfindet [2] [3] [15].

2.3.3 Nickel

Da Nickel ein stark austenitstabilisierendes Element ist, verursacht schon 1% Nickel die Verschiebung der Umwandlungstemperatur des Austenits um 15 K nach unten, was eine Aufweitung des Austenitgebietes mit sich zieht. Werden die Werte von Nickel erhöht, bildet sich ein überwiegend bainitisches oder martensitisches Grundgefüge mit steigenden Gehalten an Restaustenit, in Abhängigkeit der Wandstärke.

Nickel dient zur Förderung der Grauerstarrung, erweitert bei 0,5-3 Gew.-% das γ -Gebiet und begünstigt die Entstehung von Perlit durch die Unterdrückung der Ferritisierung. Aufgrund dessen wird Nickel gerne zur Einstellung des Ferrit-/Perlitverhältnisses gewählt. Zur Stabilisierung des Carbides trägt es nicht bei, wirkt jedoch unterstützend bei der Magnesiumbehandlung, die Wirkung klingt langsamer ab. Außerdem erhöht sich durch die Anwesenheit von Nickel die Kupfer-Löslichkeit im Ferrit, was eine Verhinderung von spröden kupferreichen Ausscheidungen zur Folge hat. Nickel erhöht zudem die Zugfestigkeit und

Härte im Gusseisen, ohne dass die Dehnung merklich abfällt. Es wird oft als Ersatz für Silizium verwendet [2] [15].

2.3.4 Kobalt

Kobalt ist bei höheren Gehalten ein Mischkristallverfestiger und wirkt sich stabilisierend auf den Ferrit aus. [18] Zudem ist es ein Carbide-Stabilisator und Austenitbildner, welcher die Kugelausbildung nicht behindert. Bei niedrigen Gehalten sinkt die Zugfestigkeit, die 0,2%-Dehngrenze bleibt gleich aber die Dehnung erhöht sich. Bei höheren Gehalten steigt die Festigkeit und fällt die Dehnung. Die Schlagzähigkeit kann, besonders bei niedrigen Siliziumgehalten, mit einer Wärmebehandlung verbessert werden, allerdings ist Kobalt sehr kostenintensiv. [2] [5] [15]

2.3.5 Molybdän

Molybdän wirkt mit Gehalten von unter 0,3 Gew.-% schwach Carbide stabilisierend, was zu einer stark verzögerten Austenitumwandlung führt und deshalb vor allem die Perlitumwandlung behindert. Die Bildung von Ferrit und die Umwandlung in der Bainitstufe sind von diesem Einfluss weniger betroffen. Der ferritisierende Einfluss des Molybdäns, bei Gehalten von 0,1-0,3 Gew.-%, ist meist in der Ausdehnung der Ferrithöfe oder im ferritischen Eisen durch eine Senkung des Perlitanteils erkennbar. Eine Unterdrückung der Perlitbildung durch höhere Molybdängehalte führt zu einer Bainit- oder Martensitbildung, ohne, dass die Ferritanteile verschwinden. Mit Molybdän findet eine Erhöhung der Warmfestigkeit statt, was eine Verminderung des Verziehens der Gussteile bei Temperaturwechseln zur Folge hat. Die Dehnung und die Zähigkeitseigenschaften werden mit zunehmendem Anstieg der Festigkeit im Gusseisen verringert [2] [15].

2.3.6 Aluminium

Aluminium engt den γ -Bereich stark ein, da die Löslichkeit des Kohlenstoffes gesenkt wird. Es begünstigt die Ferritphase und Graphitbildung, neutralisiert Aluminium den Stickstoff. [22] Aluminium ist zudem notwendig zur Unterstützung der Keimbildung als Oxid- und Sulfidbildner. Bei Zugabe von 1-2% Aluminium zum Gusseisen nimmt die Biegefestigkeit, Zugfestigkeit und Bearbeitbarkeit mit zunehmendem Al-Gehalt ab, die Härte jedoch zu. Werden Siliziumgehalte von 1-4% mit Aluminiumgehalten von 2-4% kombiniert, findet ein interkristalliner Zerfall unter Bildung einer kaolinartigen Korrosionsmasse statt [15] [16].

2.3.7 Phosphor

Phosphor tritt, als perlitstabilisierendes Element, im Gusseisen meist in Form von Phosphid, Fe_3P , auf, welches hart und spröde ist. Jedoch besitzen die Graphiteinlagerungen starke Kerbwirkungen, wodurch das Phosphid, in Abhängigkeit mit dem Kohlenstoff- bzw. Graphitgehalt, seine versprödende Wirkung angleichen muss. Bei ferritischem Gusseisen diffundiert der Phosphor bei hohen Temperaturen in den Ferrit. Mit einem steigendem Gehalt an Phosphor, wird der Schmelzpunkt des Eisens stark herab gesetzt. Er steigert die Härte und die Zugfestigkeit, erniedrigt allerdings die Bruchdehnung. Zudem erhöht er die Übergangstemperatur von duktil zu spröde. Der Einfluss auf die Härte und die Bruchdehnung kann mit einer zusätzlichen Wärmebehandlung etwas vermindert werden. Grundsätzliche sollte der Phosphorgehalt im ferritischen GJS unter 0,03% liegen [9] [16].

3 Experimentelle Methoden

Im Nachfolgenden sind die gesamten Abläufe und Versuchsdurchführungen dieser Arbeit dargestellt welche am Österreichischen Gießereinstitut in Leoben durchgeführt wurde. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Werkstoffsorte EN-GJS-600-10, deren Abguss in Form von Y2- ähnlichen Probegeometrien, für die Erstellung von Zugproben erfolgte. Des Weiteren werden der Zugversuch, die chemische Analyse, die Gefügeauswertung sowie die Betrachtung der Bruchflächen der einzelnen Zugproben unter dem Rasterelektronenmikroskop für jeden Versuch durchgeführt. Auf Basis dessen können verschiedene Aussagen getroffen werden und so einige Versuche wiederholt bzw. mit angepasster Legierungszusammensetzung vergossen werden.

3.1 Durchführung der Versuchsabgüsse

Für die Herstellung der Proben sind verschiedene Schritte notwendig, welche im folgenden Ablaufschema (Abbildung 3.1) dargestellt sind. Die gesamten Arbeiten fanden im ÖGI-Gießerei- Technikum statt.

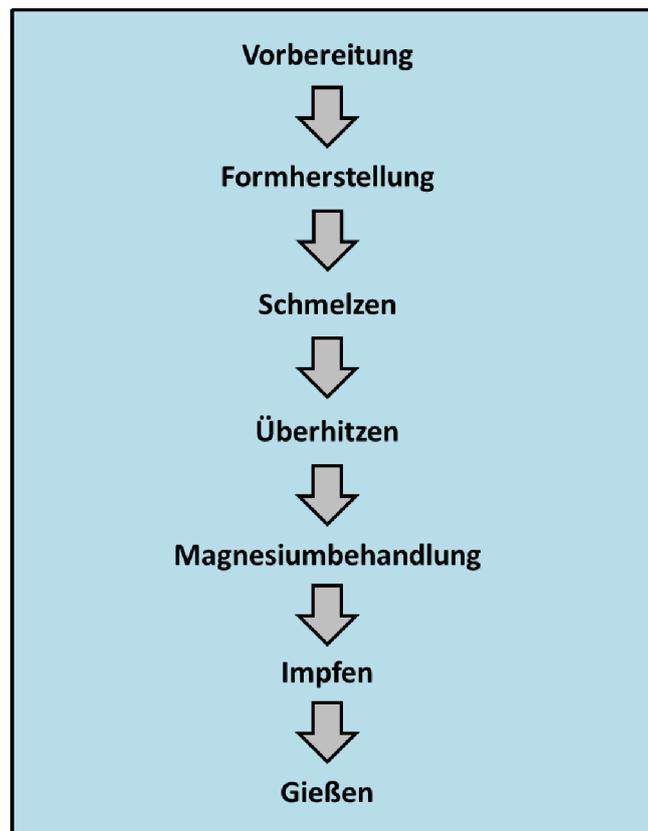


Abbildung 3.1: Ablaufschema zur Erstellung des Probenstückes

Vorbereitung

Als erstes mussten einige Vorbereitungen, wie die Bereitstellung der benötigten Materialien, die Zusammenstellung der Beschickung für den Ofen, bestehend aus Roheisen und Kreislaufmaterial sowie die Einwaage der Legierungselemente getroffen werden. Zur Orientierung während der Vorbereitung und Gießens diente ein Schmelzblatt (Abbildung 3.2 und Anhang), wo die benötigten Größen eingetragen wurden.

Des Weiteren wurden die Formkästen, welche mit bentonitgebundenem Quarzsand gefüllt sind, für den Abguss der Proben, ebenso wie die Tauchglocke, für die folgende Magnesiumbehandlung zur Kugelbildung, bereitgestellt. Die Einsatz- und Zuschlagsstoffe der Versuche, welche verwendet wurden, sind in folgender Tabelle 3.1 dargestellt.

GJS-600.10	Schmelze N 16-3-332					vom: 03.03.2016			kg: 47	
Material/Nr.	Chemische Zusammensetzung, Materialien [%]								Einsatz	
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Mg	%	kg
273/274	3,13	3,98	0,31	0,010	0,005	0,03	0,00		42,20	19,83
Roheisen TRM	3,79	2,83	0,57	0,100	0,008				25,00	11,75
Stahlschrott Zeppek	0,06	0,06	0,31	0,015	0,014	0,01	0,01		31,30	14,71
FeP				25,00					0,02	0,01
FeSi75		75,00							0,65	0,31
FeMn	6,70	0,03	73,00						0,00	0,00
Graphit	100								0,90	0,42
									100,07	47,03
Vorprobe QCTe										
Spektrometerprobe										
Korrigieren auf										
Korrektur Graphit	100									
Korrektur FeSi75		75,00								
Überhitzen auf 1500 °C										
Tauchen Elmag 6039		47,80						6,020	1,1	0,517
B. Abstich Impfen mit VP216 und Einrühren		69,70							0,4	0,188
Sollzusammensetzung										
Istzusammensetzung										
Gießtemperatur messen										
Gießbeginn										
Proben		Pr. Nr.	Pr. Nr.	Pr. Nr.	Pr. Nr.					
1 x Spektrometerprobe										
QuickCup ohne Te										
1 Kasten mit 2x25 mm Platten	730	731				je 1x KS2 Speiser mittig				
1 x Y2 offen	732									
Gießende										

Abbildung 3.2: Ausschnitt aus einem Schmelzblatt

Tabelle 3.1: Einsatz- und Zuschlagsstoffe für die Versuchsreihen

Einsatzstoffe für die Schmelze	<ul style="list-style-type: none"> • Kreislauf 30% • Blasstahl (ÖGI) od. Stahlschrott Zeppek 30% • Sorelmetall od. Roheisen 30% • FeSi75 • FeMo • FeMn
Magnesiumbehandlung	1,1% ELMAG 6039
Impfen	0,4%VP 216
Legierungselemente	<ul style="list-style-type: none"> • Kobalt (1,0 – 2,0%) • Kupfer (0,5 – 1,0%) • Molybdän (0,5 – 1,0%) • Mangan (0,5 – 1,0%) • Nickel (1,0 – 1,5%) • Aluminium (1,0 – 2,0%)

Einschmelzen

Der nächste Schritt war das Einschmelzen des Materials im Mittelfrequenzinduktionsofen „JUNKER MFT 150“. In Tabelle 3.2 sind die genauen Ofendaten aufgeführt. Die Korrektur des Kohlenstoff- und Siliziumgehaltes fand über die Thermoanalyse der Erstarrung statt. Über Thermolemente (Abbildung 3.3) konnten Abkühlkurven aufgenommen, mit Hilfe der Thermoanalyse OCC und dem daran gekoppelten Programm konnte die Abweichungen zum gewünschten Silizium- und Kohlenstoffwert berechnet werden. Eine Korrektur erfolgte durch Zugabe von FeSi 75 und Elektronengraphit zur Schmelze. Für das Schmelzen und den Abguss wurde eine Pfanne mit einer Höhe von 360 mm, einem Durchmesser von 210 mm und einem Füllvolumen von 47 kg verwendet.



Abbildung 3.3: Thermoelement zur Bestimmung des Silizium- und Kohlenstoffgehaltes

Tabelle 3.2: Betriebswerte des Multifrequenzinduktionsofens

Spannung	720 V
Stromstärke	190 A
Leistung	150 kW
Frequenz	3 kHz

Magnesiumbehandlung und Impfen

Nachdem die Schmelze auf über 1500 °C aufgeheizt war, erfolgte die Durchführung der Magnesiumbehandlung. Die Tauchglocke, befüllt mit der benötigten Menge an Magnesium, wurde in den Tiegel gehalten, was zu einer heftigen Reaktion und in weiterer Folge zur Ausbildung des Sphärogusses führte. Im Anschluss daran fand die Impfung des Gießstrahles statt.

Abguss

Das Gusseisen wurde in die Formkästen zu den erwünschten Proben (Abbildung 3.4) und überschüssiges Material zu Masseln vergossen. Die Kästen wurden anschließend mit Lunkerpulver abgedeckt.

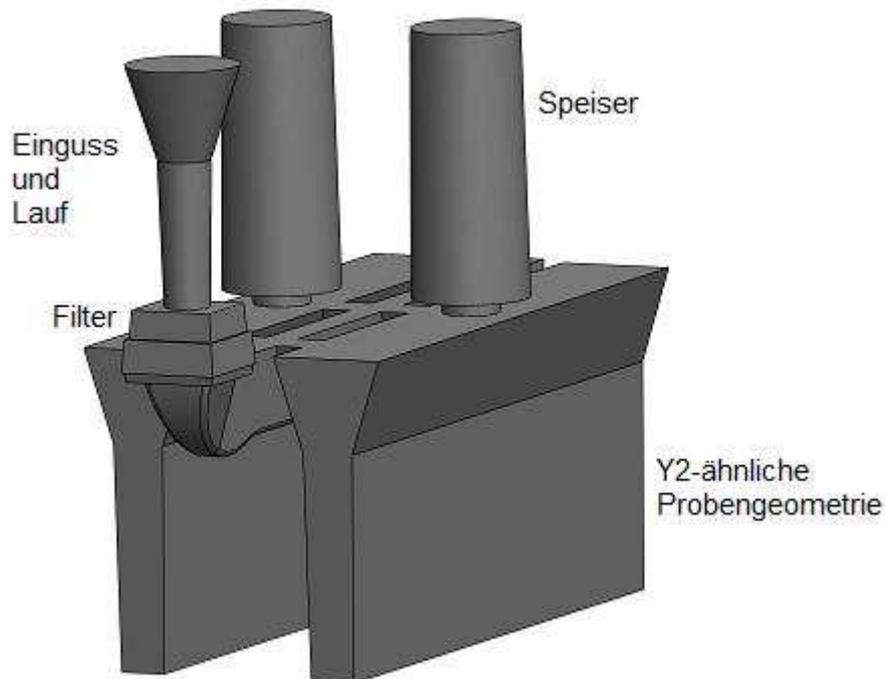


Abbildung 3.4: Abgegossene Proben für die Auswertung, inkl. Speiser, Lauf und Filter

3.2 Ermittlung von Werkstoffeigenschaften

3.2.1 Mechanische Kennwerte

Das wichtigste Verfahren zur Ermittlung von mechanischen Kennwerten, ist der Zugversuch, welcher Aussagen über die Entwicklung der Probe unter Belastung liefert. Aus den vergossenen Proben wurden, in der Werkstatt des ÖGI, kurze ungekerbte Zugprobenstäbe B10x50 mit rundem Durchmesser (Abbildung 3.5 und 3.6) nach DIN 50125 erstellt und anschließend unter Normprüfbedingungen Zugversuche, nach EN ISO 6892-1, zur Ermittlung der Dehnung (A), der Zugfestigkeit (R_m) sowie der oberen Streckgrenze ($R_{p0,2}$) durchgeführt.

Die Maße der Probenstäbe sind nach dem Verhältnis

$$L/d = 5 \quad (3.1)$$

zu berechnen. L bezieht sich dabei auf die Anfangslänge im unbelasteten Fall, d ist der Durchmesser der Probe [4] [12].

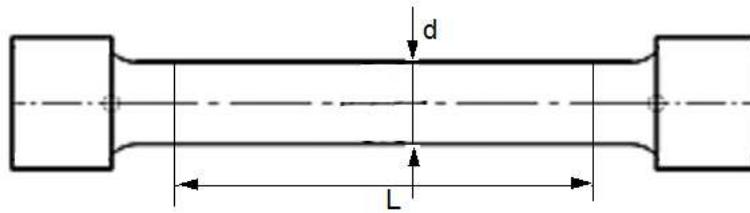


Abbildung 3.5: Probenstab für den Zugversuch gemäß EN 1563

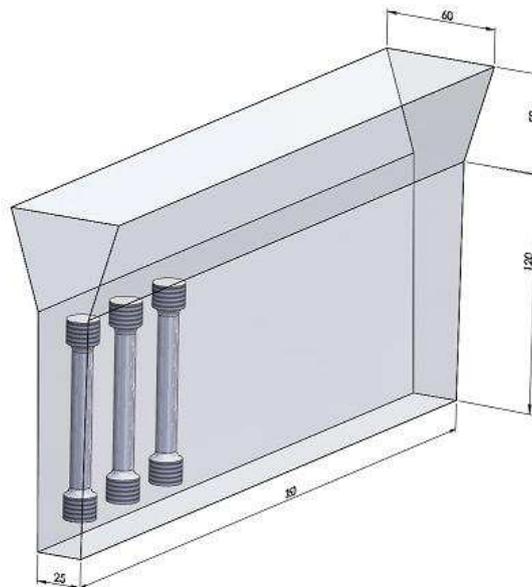


Abbildung 3.6: Erstellung von Norm-Zugstäben aus der Probe

Die Rundstäbe für die Probe werden in eine spezielle Maschine für Zugversuche der Marke Zwick/ Roell Z250 (Abbildung 3.7) eingespannt und jeweils mit derselben Belastung, welche elektromechanisch oder hydraulisch erzeugt werden kann, über die Streckgrenze hinaus geprüft. Die Messung und Steuerung der Kraft erfolgt, bei konstanter Geschwindigkeit, in einem erlaubten Schwankungsbereich, über Kraftmessdosen, die im Kraftverlauf angeordnet sind. Bis zum Bruch wird dabei eine Kraft von max. 250 kN auf die Probe aufgebracht [4] [5].

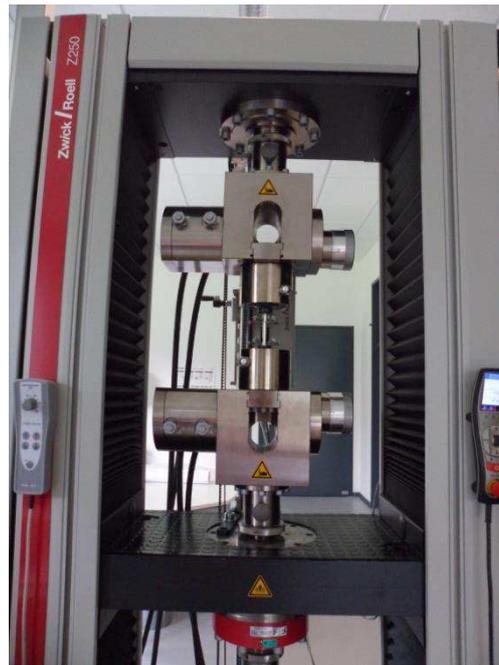


Abbildung 3.7: Zugprüfmaschine am ÖGI Leoben

In Abbildung 3.8 ist eine Spannungs-Dehnungs-Kurve dargestellt, wie sie ein typischer Zugversuch bei maximaler Belastung liefert. Sie lässt sich in einen elastischen, einen plastischen sowie einen Bereich der Einschnürung aufteilen. Im letzten Teil der Kurve erfolgt der Bruch. Dem Diagramm können einige Werkstoffkennwerte, wie die Bruchdehnung (A) und einzelne Dehngrenzen (z.B. $R_{p0,2}$), entnommen werden. Es ist möglich weitere Kennwerte, wie die Zugfestigkeit, aus damit gewonnenen Größen der Kurve zu berechnen [4] [5].

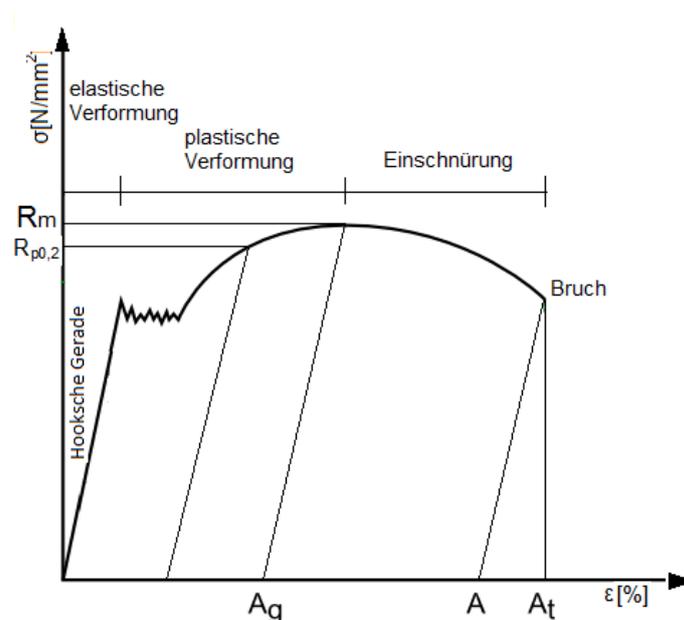


Abbildung 3.8: typisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Die Bruchdehnung (A) ist jener Punkt der Probe an welchem diese aufgrund der Einschnürung bricht. Sie kann mit folgender Formel berechnet werden und wird in Prozent angegeben:

$$A = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% \quad (3.2)$$

ΔL bezieht sich dabei auf den Längenunterschied zwischen Anfang und Bruch, L_0 ist die Ausgangslänge der Probe.

Unter Dehngrenzen sind Spannungen bei bestimmten Dehnungen zu verstehen. Von Interesse ist meist die 0,2%-Dehngrenze, auch als 0,2-Grenze $R_{p0,2}$, bezeichnet. Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm wird eine Parallele zur Hookschen Geraden um eine Dehnung von 0,2% verschoben. Der Schnittpunkt mit der Kurve ergibt die dazugehörige Spannung [4] [5] [7].

Die Zugfestigkeit (R_m) ist das Verhältnis der größten Zugkraft (F_m) zum Anfangsquerschnitt (S_0) der verwendeten Zugprobe. [4] [5] [7].

$$R_m = F_m/S_0 \quad (3.3)$$

3.2.2 Gefügeausbildung

Die Auswertung der Gefügeausbildung erfolgte über eine Schlibfbetrachtung mit dem Mikroskop und einer anschließenden Gussauswertung mit dem Programm AMguss. Diese mussten zuerst in mehreren Schritten in der Metallographie des ÖGI erstellt werden, wie in Abbildung 3.9 dargestellt. In Abbildung 3.10 wird ein Schliff wie er für die Untersuchung verwendet wurde, gezeigt.



Abbildung 3.9: Fertiger Schliff für die Untersuchung

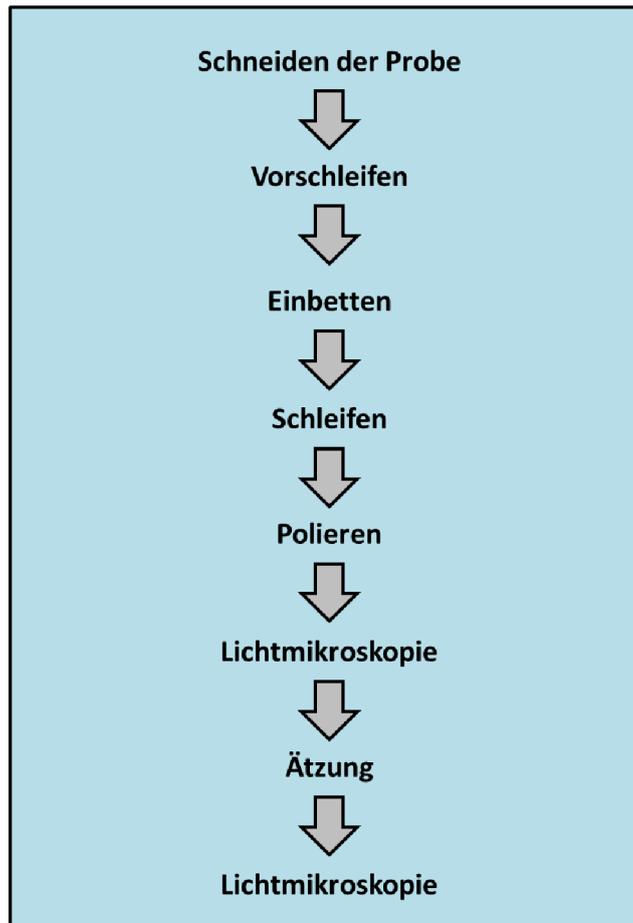
Ablaufschema Schlifferstellung

Abbildung 3.10: Verfahrensschema zur Erstellung eines Schliffes

Schneiden der Probe und Vorschleifen

Im ersten Schritt wurden eine Rand- und eine Mittelprobe aus den Proben typen des Zugversuches geschnitten und auf einer Schleifmaschine („Phönix 4000“) mit Papier der Körnung 160 vorgeschliffen und plan gemacht. Dies diente der Vorbereitung der Schlifffläche für die weiteren Schritte.

Einbetten

Anschließend fand die Einbettung der Proben mittels der Maschine „CitroPress- 20“ statt. Die Proben wurden mit der Schlifffläche nach unten auf einen Stempel gelegt, nach unten gefahren und mit 10 ml Duro- und 20 ml Multigranulat aufgefüllt. Die Warmeinbettung erfolgte nach dem Prinzip, dass die beiden Kunststoffpulver bei ca. 180°C miteinander verschmelzen und so die Proben umhüllen. Die fertigen Schliffe besitzen eine Höhe von 2-3 cm, wurden entgratet und beschriftet.

Schleifen und Polieren

Im nächsten Schritt wurden die Proben erneut mit Körnungen von 220 bis 600 unter ständigem Zufluss von Wasser geschliffen und anschließend mithilfe der Maschine „ATM Rubin 520“ auf eine Rauheit von 30 auf 1 μm , auf Diamantscheiben, herunterpoliert. Zur Unterstützung wurden eine Poliersuspension sowie ein Schmiermittel zugegeben.

Lichtmikroskop

Mit dem Lichtmikroskop ColorView Bx51 von Olympus (Abbildung 3.11) und der damit verbundenen Software analySIS auto wurden zuerst 6 ungeätzte und danach 4 geätzte Bilder der einzelnen Schlitze für die darauffolgende Auswertung aufgenommen. Zudem erfolgte eine Untersuchung auf mögliche Lunker und Gussfehler.



Abbildung 3.11: Lichtmikroskop am ÖGI Leoben

Ätzung

Die Probenätzung wurde mit 5% HNO_3 (Nital-Ätzung) durchgeführt und die Schlitze im Anschluss mit Wasser und Ethanol gesäubert. Durch die Ätzung konnten die Korngrenzen, Ferrit- und Perlitanteile sichtbar gemacht werden.

Auswertung

Die zuvor aufgenommenen Bilder wurden anschließend zu einer Bildserie zusammengefasst und mit Softwareprogramm Gussanalyse AMGuss konnte die Graphitauswertung bezüglich Graphitkugeldichte und -form sowie die Überprüfung des Ferrit-/Perlitverhältnisses durchgeführt werden. Die Ergebnisse wurden von fachlich geschultem Personal überprüft.

3.2.3 Rasterelektronenmikroskop (REM)

Die Untersuchung der Bruchflächen fand mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops am Lehrstuhl für Eisen-Stahl-Metallurgie der Montanuniversität Leoben statt, welches in Abbildung 3.12 dargestellt ist.

Das Prinzip des Rasterelektronenmikroskops beruht auf der Untersuchung von dicken Proben mit rauen Oberflächen, welche z.B. über Bruch, Korrosion oder Verschleiß entstanden sind oder räumlichen Strukturen, wie Gefügen. Ein Elektronenstrahl des Mikroskops tastet die Oberfläche eines Objektes Punkt für Punkt ab. Durch die Wechselwirkung des Primärstrahles mit dem Probenmaterial bilden sich Sekundärelektronen und Rückstreuielektronen, welche mit Detektoren erfasst werden.

Die sich draus ergebende Intensität wird in ein Signal umgewandelt und erzeugt so eine Vergrößerung der abzubildenden Probe mit einer starken Tiefenschärfe, was auch eine Abbildung räumlich komplizierter Objekte ermöglicht. Zur Vermeidung von Wechselwirkungen zwischen Elektronen mit Atomen und Molekülen findet die Untersuchung im Hochvakuum statt.

Mit dem verwendeten REM der Marke FEI Quanta ist ein Auflösungsvermögen von maximal 3,8 nm möglich, bei der Vergrößerung ist ein Wert von bis zu 30000 erreichbar, welcher noch zu sinnvollen Ergebnissen führt [7] [23] [24].



Abbildung 3.12: Rasterelektronenmikroskop am Lehrstuhl für Eisen-Stahl-Metallurgie

3.2.4 Chemische Analyse

Die chemische Analyse der Schmelzen wurde in mehreren Schritten durchgeführt.

Als erstes erfolgte die Analyse von Gusseisenblättchen über die Infrarotspektroskopie mit einem Gerät der Firma Leco. Dort wurde eine Probe im Sauerstoffstrom verbrannt und so der CO_2 - und SO_3 -Gehalt gemessen. Durch zurückrechnen konnte der Kohlenstoff- und Schwefelgehalt bestimmt werden.

Die Analyse des Siliziumgehaltes fand über einen Säureaufschluss von Spänen und anschließend folgender Gravimetrischer Bestimmung statt. Die Probe wurde in einer Per-Chlor- Mischsäure gelöst, geglüht, ab fluoriert mit Fluorsäure und erneut geglüht. Die Differenz bildet den SiO_2 -Gehalt. Es konnte so auf den Siliziumgehalt zurückgerechnet werden.

Die Lösung, welche bereits für die Ermittlung des Siliziumgehaltes entstanden ist, diente auch zur Ermittlung der übrigen Elemente in der Schmelze. Diese Lösung wurde einem Massenspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP) zugeführt. Die einzelnen Elemente und ihre Isotope wurden bei ca. 5000°C erhitzt und dadurch ionisiert. Um ein Plasma zu erzeugen, wurde ionisiertem Argon ein hochfrequenter Strom zugeführt. Die im entstandenen Plasma beschleunigten Ionen, wurden dem Vakuumsystem des Massenspektrometers zugeführt und detektiert. Die Bestimmung der Elemente erfolgte über die Masse des jeweiligen Isotopes [7] [25].

4 Ergebnisse

Im Folgenden sind Ergebnisse der verschiedenen durchgeführten Versuche dargestellt. Der GJS-600-10 wird hinsichtlich der Einflüsse von Legierungselementen untersucht. In Tabelle 4.1 sind die Probennummern mit dem jeweiligen getesteten Element und seiner Zugabe in % ersichtlich.

Werte, die auffällig sind und den Normen nicht entsprechen werden rot markiert. Auf diese wird in Kapitel 5, der Diskussion und Zusammenfassung, genauer eingegangen.

Tabelle 4.1: Probennummer und dazugehöriges Legierungselement

Probennummer	Legierungselement [%]
660	1,0 Co
663	2,0 Co
676	0,5 Cu
679	1,0 Cu
690	0,5 Mo
693	1,0 Mo
702	0,5 Mn
705	1,0 Mn
708	1,0 Ni
711	1,5 Ni
714	2,0 Al
720	1,0 Al
723	1,0 Ni
726	0,7 Cu
729	1,0 Mo
732	0,032 P

4.1 Chemische Analysen

In Tabelle 4.3 sind die chemische Zusammensetzung der einzelnen Schmelzen und der sich daraus ergebende Sättigungsgrad aus dem Verhältnis von Kohlenstoff zu Silizium und Phosphor (siehe Formel 2.1) dargestellt. Dieser sollte über 1,0-1,5% liegen, da es sich um eine leicht übereutektische Zusammensetzung handelt [12]. Der Kohlenstoffgehalt ist bei

Probe 729 in Bezug auf die Richtwerte, der Norm EN 1563, zu gering, ebenso wie der Siliziumgehalt bei einigen Proben (690, 693, 720 und 729). Auch der Magnesiumgehalt bewegt sich bei drei Proben an der unteren Grenze.

Von der EN 1563 werden für den EN-GJS-600-10 folgende Maximalgehalte für Silizium, Phosphor und Mangan als Richtwerte angegeben:

Tabelle 4.2: Geforderte Zusammensetzung der Schmelze laut Norm (Richtwerte) [12]

Kurzzeichen	Silizium [%]	Phosphor [%]	Mangan [%]
EN-GJS-600-10	4,30	0,05	0,50

Tabelle 4.3: Chemische Analysen der Schmelze und Sättigungsgrad

Proben- nummer	Legierungs- element [%]	Chemische Zusammensetzung [%]							
		C	Si	Mn	P	S	Cu/ Ni	Mg	Sc
660	1,0 Co	3,08	4,37	0,17	0,010	0,003	0,017	0,029	1,05
663	2,0 Co	3,07	4,22	0,17	0,011	0,004	0,02	0,031	1,04
676	0,5 Cu	2,99	4,26	0,13	0,015	0,003	0,56	0,035	1,014
679	1,0 Cu	3,05	4,29	0,130	0,018	0,004	1,020	0,040	1,038
690	0,5 Mo	2,96	3,95	0,12	0,006	0,005	0,04	0,039	0,973
693	1,0 Mo	3,12	3,93	0,110	0,006	0,006	0,030	0,037	1,023
702	0,5 Mn	3,06	4,36	0,460	0,005	0,006	0,050	0,041	1,048
705	1,0 Mn	3,05	4,31	0,880	0,004	0,008	0,050	0,038	1,039
708	1,0 Ni	3,01	4,36	0,12	0,004	0,007	1,31	0,038	1,031
711	1,5 Ni	3,03	4,3	0,110	0,011	0,007	0,13/1,58	0,039	1,03
714	2,0 Al	2,72	4,79	0,130	0,01	0,004	0,05/0,065	0,031	0,98
720	1,0 Al	3,04	3,99	0,150	0,008	0,003	Al 1,13	0,012	1,003
723	1,0 Ni	3,02	4,16	0,110	0,007	0,007	0,970	0,032	1,013
726	0,7 Cu	3,11	4,26	0,260	0,034	0,007	0,720	0,038	1,057
729	1,0 Mo	3,23	3,73	0,330	0,022	0,009	Mo 0,93	0,041	1,04
732	0,032 P	3,1	4,29	0,380	0,032	0,01	0,000	0,04	1,057

4.2 Mechanische Kennwerte

In nachfolgender Tabelle 4.4 sind die ermittelten Kenngrößen der Zugproben aufgeführt.

Auffällige Werte sind auch hier wieder rot markiert. Diese erfüllen die von der Norm EN 1563 geforderten Anforderungen, welche eine Dehngrenze von 470 MPa, eine Zugfestigkeit von 600 MPa und eine Dehnung von 10% verlangt, nicht. Auf die Einflüsse wird in der Zusammenfassung genauer eingegangen.

Tabelle 4.4: Mechanische Kennwerte; Zugfestigkeit [MPa], Streckgrenze $R_{p0,2}$ [MPa], Bruchdehnung A [%], für Bauteile mit einer Wandstärke von < 30mm

Probennummer	Legierungselement [%]	Rp [MPa]	Rm [MPa]	A[%]
Norm		470	600	10
660	1,0 Co	498	630	15,1
663	2,0 Co	486	623	17,3
676	0,5 Cu	502	620	17,8
679	1,0 Cu	669	735	0,9
690	0,5 Mo	492	591	17,3
693	1,0 Mo	464	600	15,9
702	0,5 Mn	501	628	17,2
705	1,0 Mn	503	629	17
708	1,0 Ni	524	677	13,7
711	1,5 Ni	528	683	8,8
714	2,0 Al	-	406	0
720	1,0 Al	452	469	0,4
723	1,0 Ni	480	602	11,8
726	0,7 Cu	518	632	14,6
729	1,0 Mo	446	583	6,4
732	0,032 P	497	616	17,7

In den Abbildungen 4.1- 4.3 sind die mechanischen Werte in Bezug auf den Siliziumgehalt der jeweiligen Probe dargestellt. Auch hier sind die durchaus überwiegend erfolgreichen Versuche und einige weniger erfolgreichen in Bezug auf die Norm (rot eingrahmt) erkennbar.

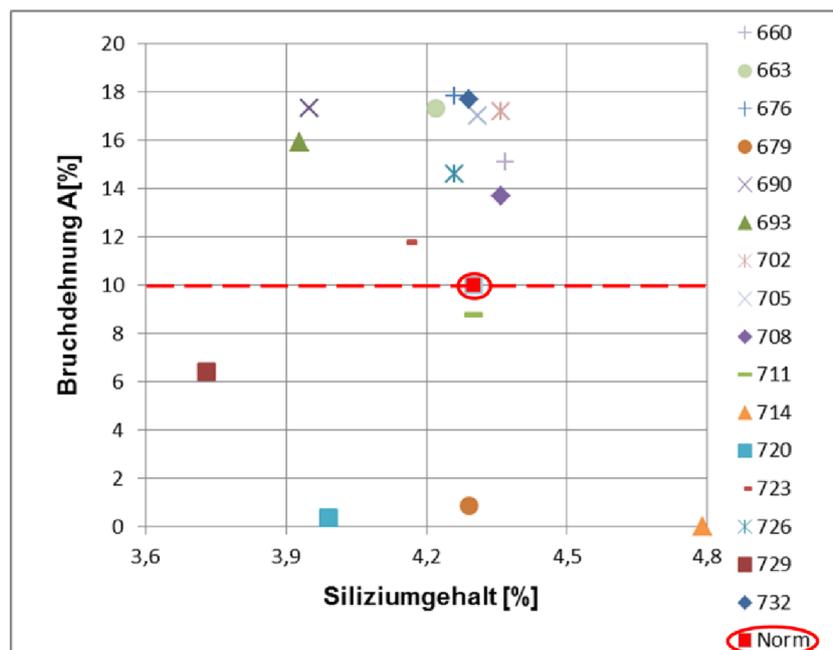


Abbildung 4.1: Bruchdehnung über den jeweiligen Siliziumgehalt

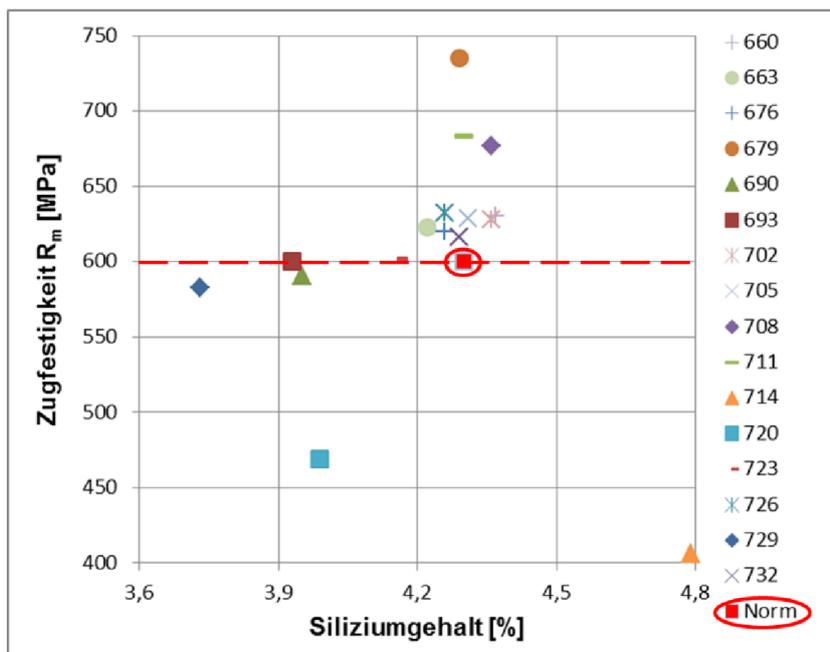


Abbildung 4.2: Zugfestigkeit über den jeweiligen Siliziumgehalt

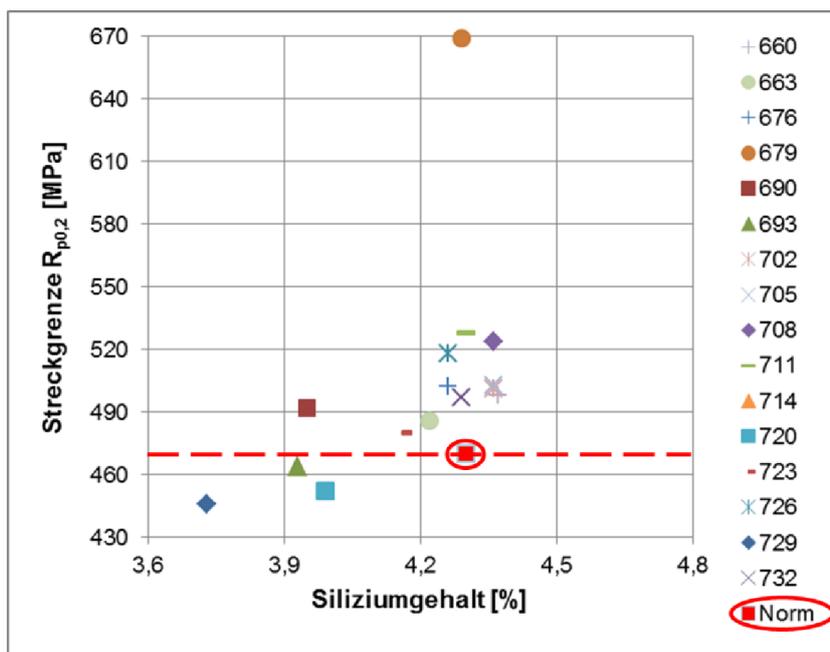


Abbildung 4.3: Streckgrenze über den jeweiligen Siliziumgehalt

4.3 Perlitgehalt

In Tabelle 4.5 ist der Perlitgehalt dargestellt, welches sich aus der Auswertung der geätzten Bilder ergibt. Von der Norm wird ein ferritisches Gefüge mit höchstens 5% Perlit gefordert [12]. Die Proben 679, 690, 693, 726 und 729 erfüllen diese Voraussetzung nicht.

Tabelle 4.5: Perlitanteil der einzelnen Proben

Probennummer	Legierungselement [%]	Perlitanteil [%]
660	1,0 Co	0.0
663	2,0 Co	4.5
676	0,5 Cu	0.0
679	1,0 Cu	69.1
690	0,5 Mo	6.9
693	1,0 Mo	17.7
702	0,5 Mn	0.0
705	1,0 Mn	2.2
708	1,0 Ni	0.9
711	1,5 Ni	0.0
714	2,0 Al	1.1
723	1,0 Ni	0.6
726	0,7 Cu	9.1
729	1,0 Mo	19.7
732	0,032 P	0.4

4.4 Graphitkugelauswertung

In Tabelle 4.6 sind die Kugelauswertung und die Kugeldichte aufgeführt, welche sich aus der Analyse, der geätzten und ungeätzten Bilder, mit der Software ergeben hat. In der ISO 945 wird die Gruppe III als Vermiculargraphit bezeichnet, die Gruppen V und VI stellen den Kugelgraphit dar. Der Versuch mit der Nummer 720, welcher eine Wiederholung von Aluminium mit 1% war, ergab erneut kein auswertbares Ergebnis. Auch Versuch 714 und 723 entsprechen nicht den von der Norm EN 1563 im Anhang D angegebenen Richtwerten. Dort wird ein Mindestanteil an Graphitkugeln der Gruppen V und VI von 80% sowie ein Anteil an Gruppe III von weniger als 20% gefordert. Werte, die diese Anforderungen nicht erfüllen, sind rot markiert.

Tabelle 4.6: Auswertung der Kugelform und -dichte

Proben- nummer	Legierungs- element [%]	Gefüge				Kugeldichte /mm ²
		III	V	VI	V + VI	
660	1,0 Co	5,9	20,3	73,0	93,3	393
663	2,0 Co	2,3	25,1	72,0	97,1	314
676	0,5 Cu	3,1	17,8	78,7	96,5	379
679	1,0 Cu	2,7	32,3	64,5	96,8	358
690	0,5 Mo	2,8	39,0	57,4	96,4	329
693	1,0 Mo	2,1	40,9	56,6	97,5	267
702	0,5 Mn	1,7	13,1	84,9	98,0	420
705	1,0 Mn	1,2	18,0	80,1	98,1	283
708	1,0 Ni	2,8	14,8	81,7	96,5	383
711	1,5 Ni	1,3	13,3	84,9	98,2	347
714	2,0 Al	39,1	25,1	31,3	56,4	504
720						
723	1,0 Ni	22,3	25,4	49,5	74,9	281
726	0,7 Cu	1,0	15,6	83,2	98,8	271
729	1,0 Mo	0,7	19,4	75,2	94,6	243
732	0,032 P	1,1	19,1	79,0	98,1	264

4.5 Gefügebilder

Als grundlegendes Beispiel für die nicht explizit aufgeführten Proben dient Probe 660, mit 1% Kobalt. Bei diesen Proben (705, 708, 711, 723) unterscheiden sich die ungeätzten und geätzten Bilder nur geringfügig. Bei allen war die geforderte Ferrit- und Kugelausbildung vorhanden (siehe Abbildungen 4.4 und 4.5).

Auffallende schwarze Flächen stellen Lunker dar, welche sich bei der Erstarrung gebildet haben.

Beispielprobe, Kobalt 1%, Probe 660



Abbildung 4.4: Ungeätzte Schlieffläche, gute Kugelausbildung

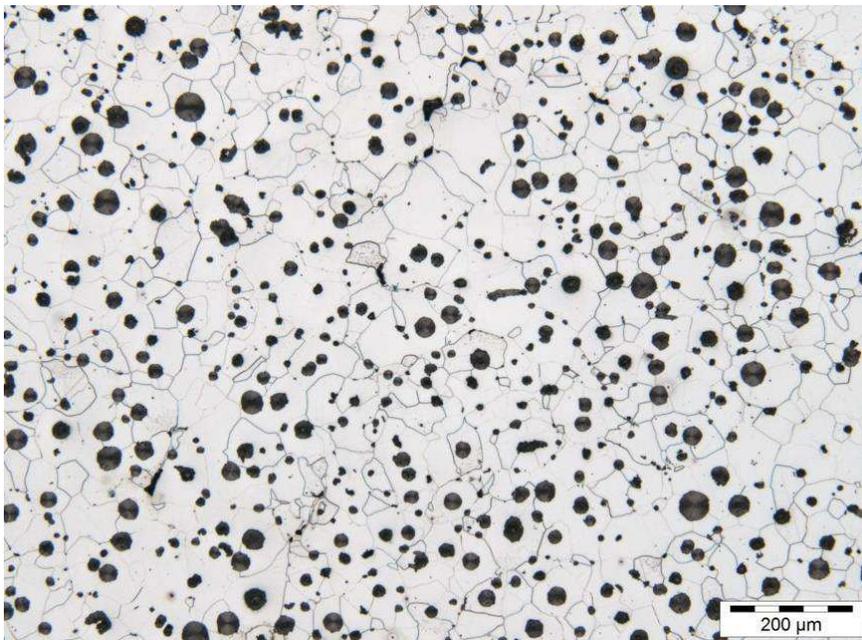


Abbildung 4.5: Geätzte Schlieffläche, ferritisches Gefüge, gute Kugelausbildung

Kobalt 2%, Probe 663

Bei Betrachtung der Abbildungen 4.6 – 4.8 konnten sowohl im ungeätzten, als auch im geätzten Zustand Formen von Graphitentartungen und unvollständige Ausbildungen der Kugeln entdeckt werden. Ansonsten handelt es sich um ein ferritisches Gefüge.



Abbildung 4.6: Ungeätzte Schliifffläche, Graphitentartungen

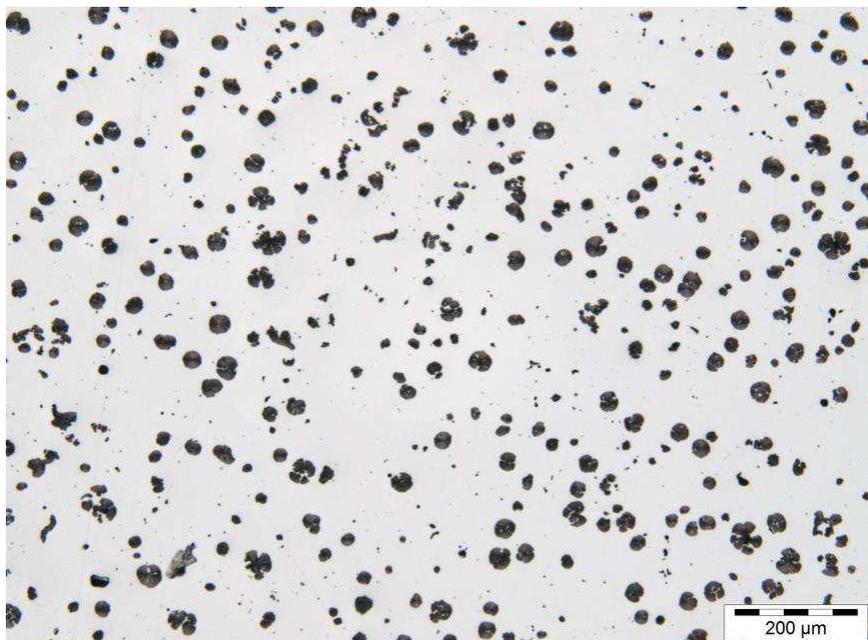
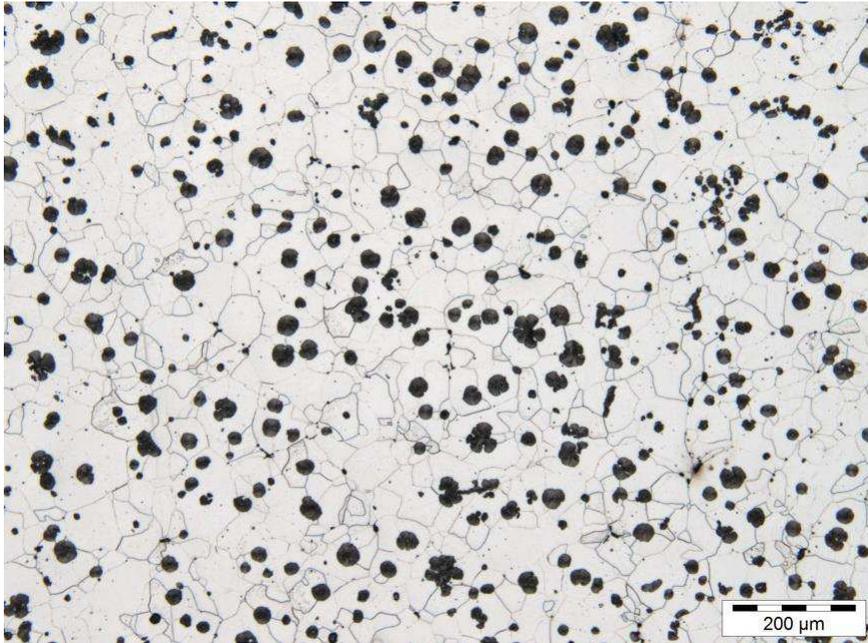


Abbildung 4.7: Ungeätzte Schliifffläche, Entartung des Graphits



**Abbildung 4.8: Geätzte Schliiffläche, ferritisches Gefüge,
unvollständige Ausbildung der Kugeln**

Kupfer 0,5%, Probe 676

In Abbildung 4.9 zeigt sich eine regelmäßige Kugelausbildung, allerdings fällt im geätzten Bild der Schlieffläche das ferritische Grundgefüge mit Kugelgraphit und Graphitentartungen auf (Abbildung 4.10).

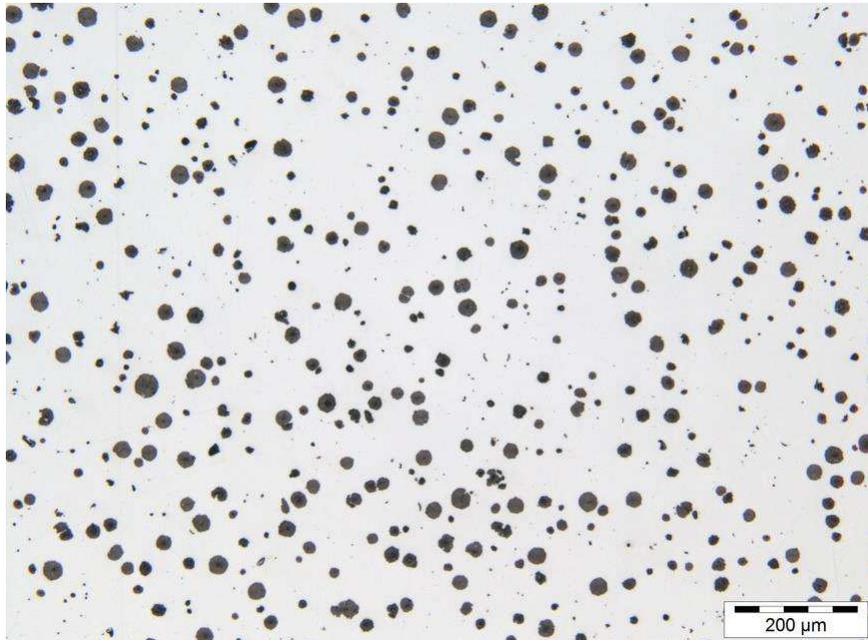


Abbildung 4.9: Kugelbildung im Inneren

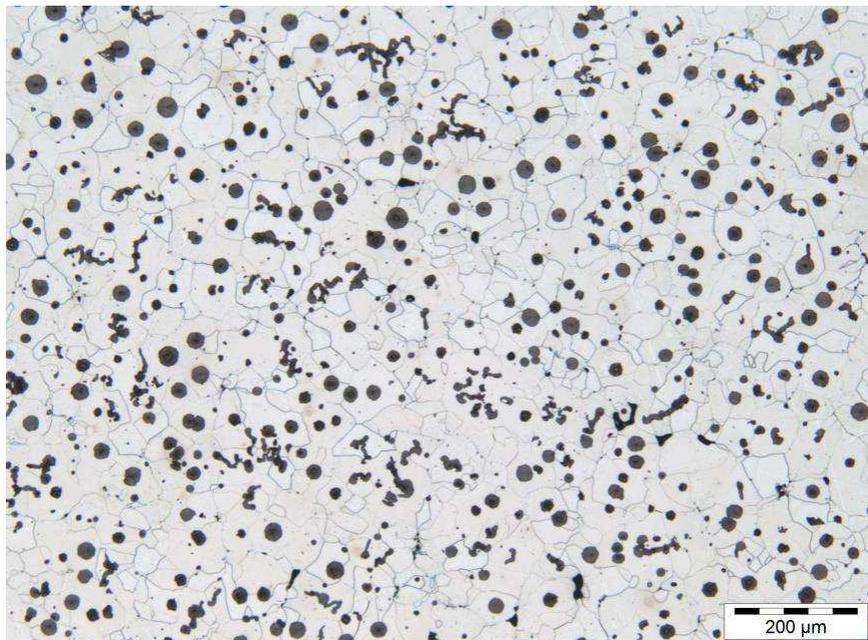


Abbildung 4.10: Geätzte Schlieffläche, ferritisches Gefüge, Chunkygraphit

Kupfer 1%, Probe 679

Auch bei dieser Probe ist in Bild 4.11 die ausgeprägte Lamellenbildung bzw. Graphit-entartungen am Probenrand erkennbar. Im Inneren zeigt sich eine homogene Kugelverteilung (Abbildung 4.12). Nach dem Ätzen der Probe zeigt sich ein vollständig perlitisches ausgebildetes Gefüge (Abbildung 4.13).

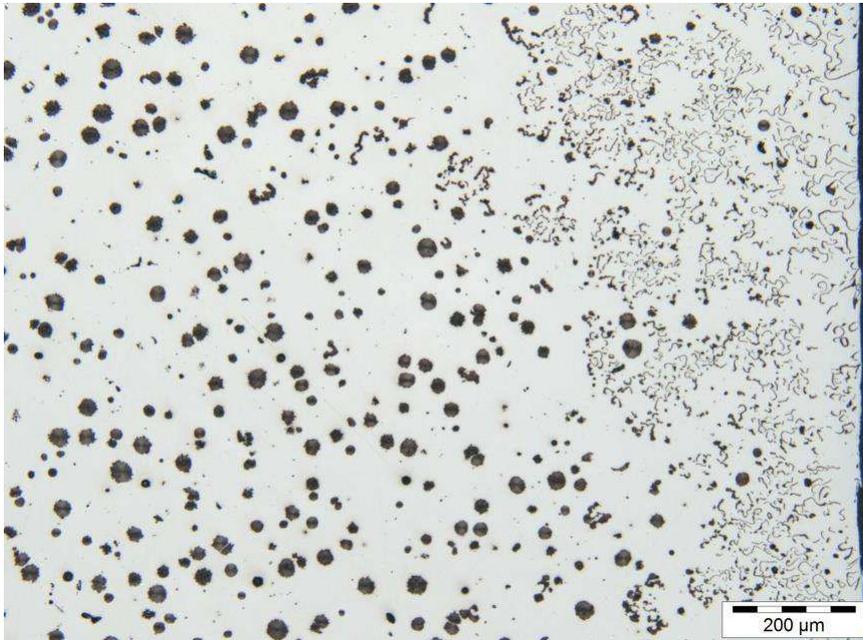


Abbildung 4.11: Lamellenbildung am Rand

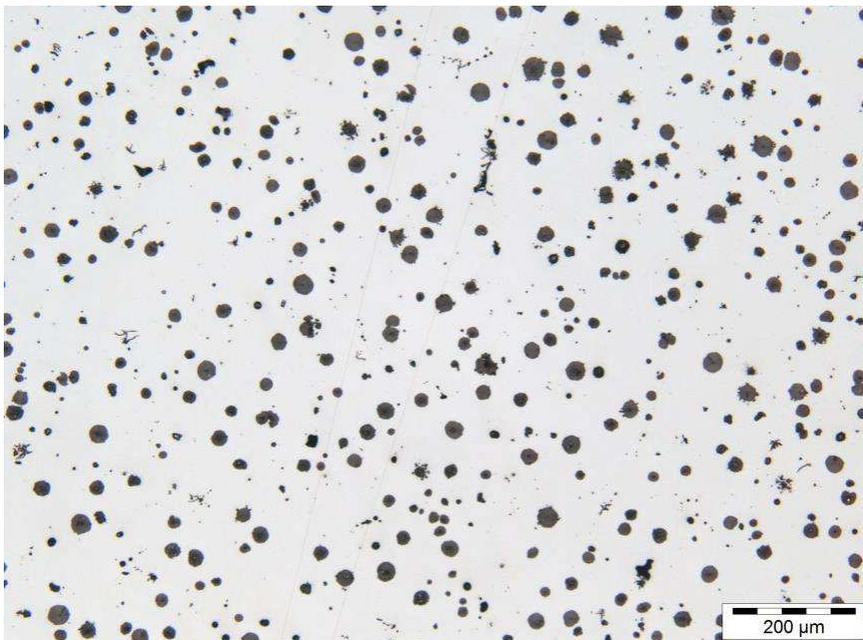


Abbildung 4.12: Kugelbildung im Inneren

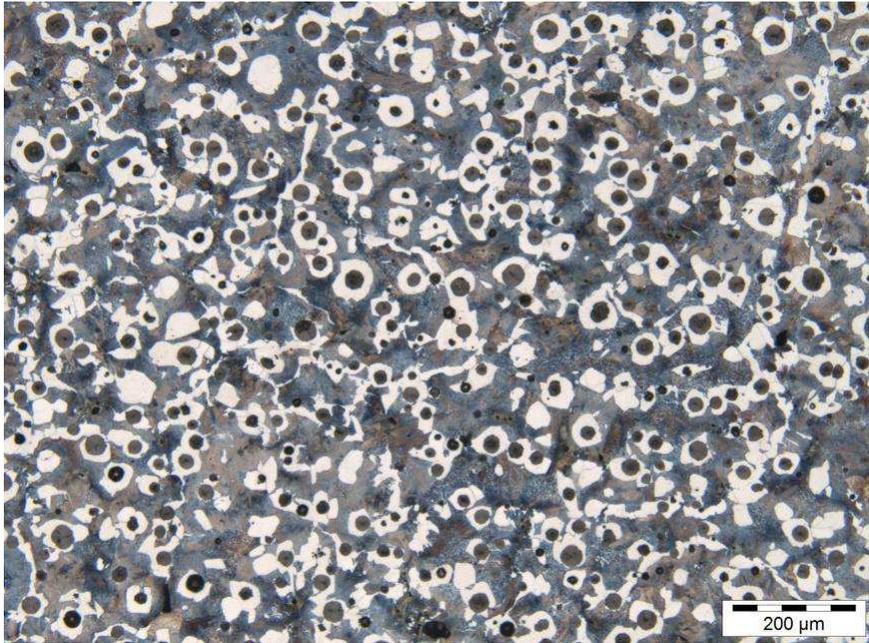


Abbildung 4.13: Geätzte Schlieffläche, Perlitbildung

Molybdän 0,5%, Probe 690

Abbildung 4.14 zeigt eine gute Kugelausbildung. Vereinzelt findet sich ein Lunker. Beim Betrachten der Probe nach dem Ätzen ist erkennbar, dass sich ein gewisser Anteil an Perlit im Gefüge befindet (Abbildung 4.15). Dieser wird einer genaueren Untersuchung unterzogen. Die Vergrößerung in Abbildung 4.16 lässt allerdings darauf schließen, dass sich auch Karbide gebildet haben.

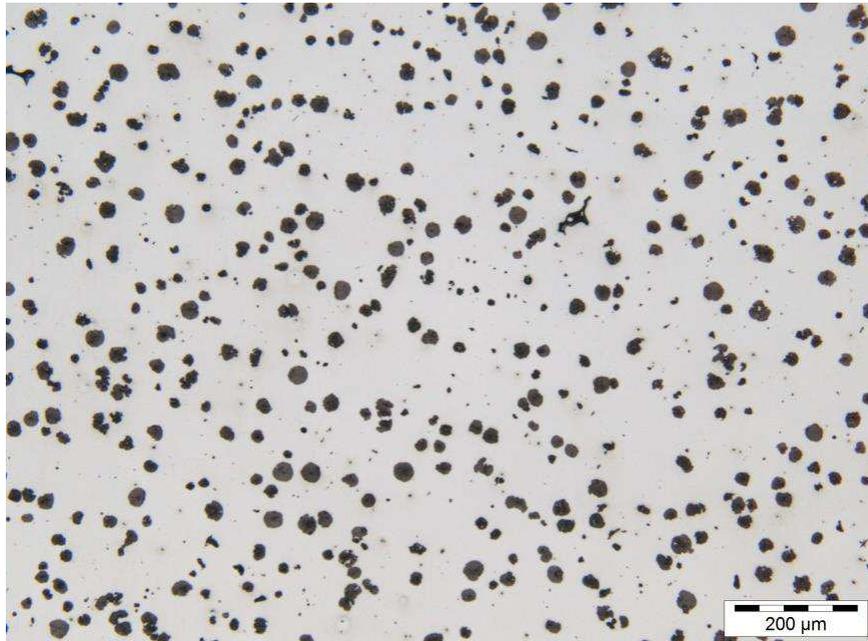


Abbildung 4.14: Ungeätzte Schliifffläche, Kugelbildung

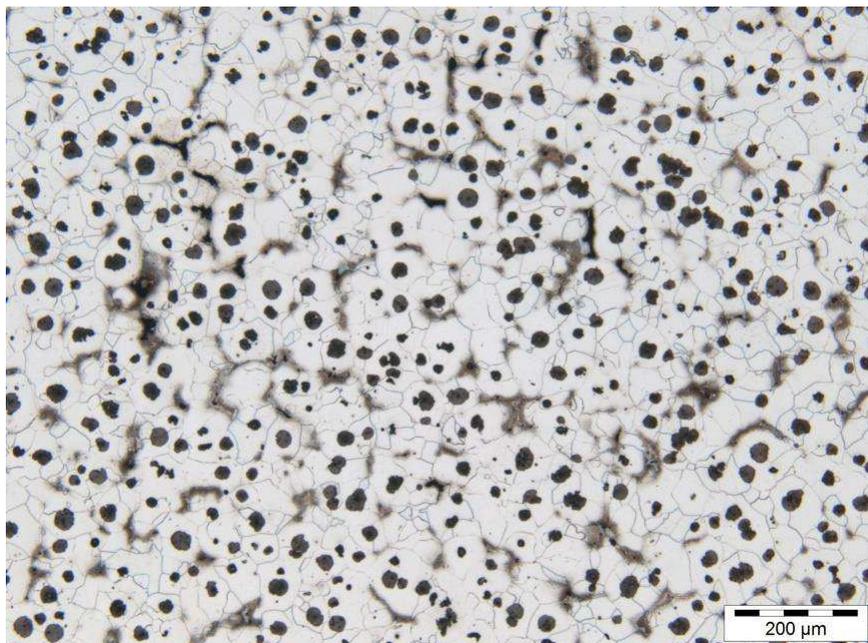


Abbildung 4.15: Geätzte Schliifffläche, teilweise Perlitbildung

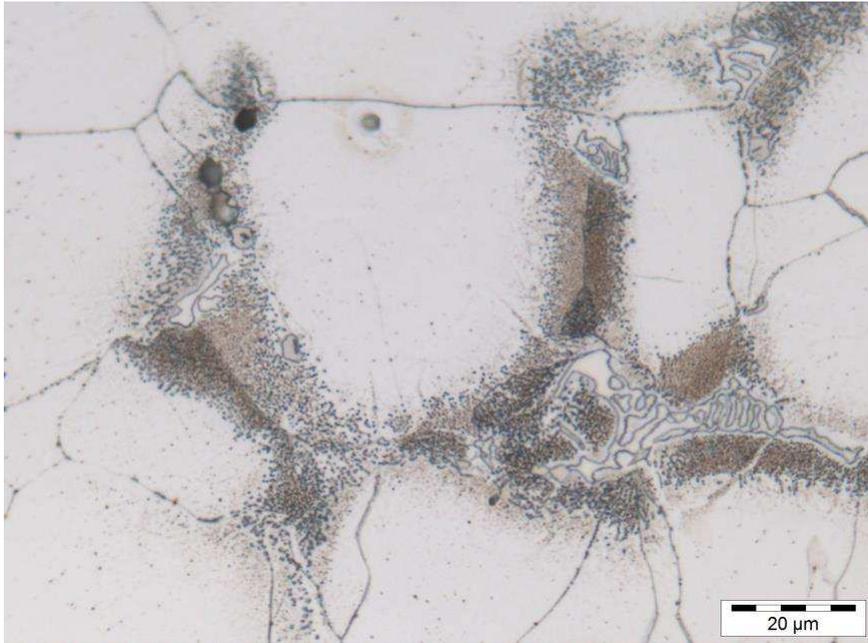


Abbildung 4.16: Genauere Betrachtung des Perlites, Karbidanteile

Molybdän 1%, Probe 693

Die ungeätzte Schlieffläche in Abbildung 4.17 zeigt keine Auffälligkeiten. Nach dem Ätzen der Probe ist eine Perlitbildung erkennbar (Abbildung 4.18). Erneut wurden genauere Betrachtungen unternommen (Abbildungen 4.19 und 4.20) und auch hier konnte in der Vergrößerung eine Karbidbildung festgestellt werden.

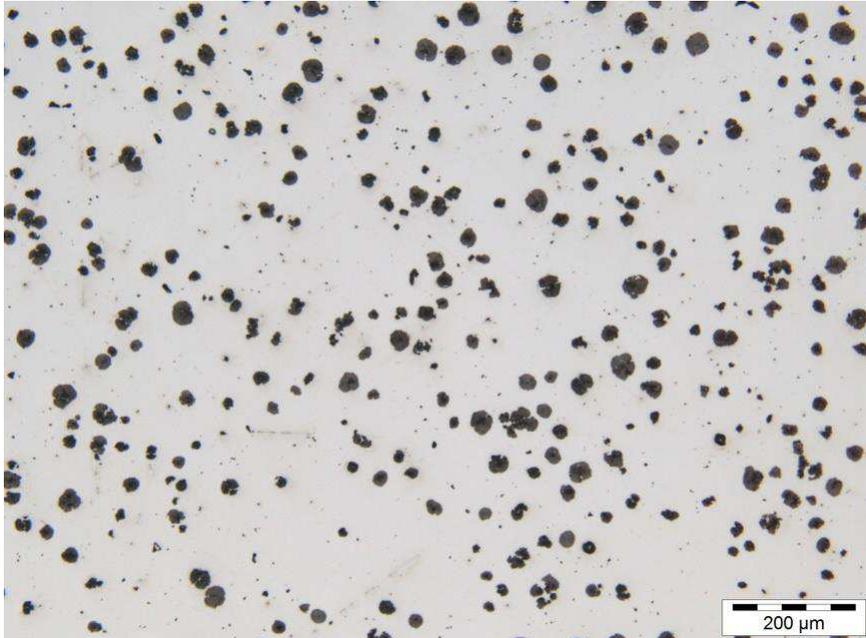


Abbildung 4.17: Ungeätzte Schlieffläche, Kugelbildung

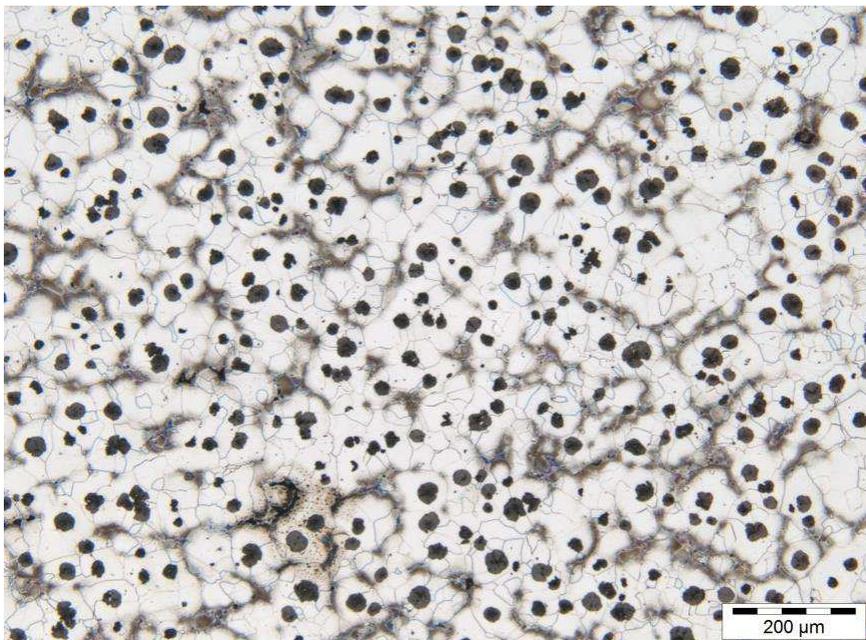


Abbildung 4.18: Geätzte Schlieffläche, Perlitbildung

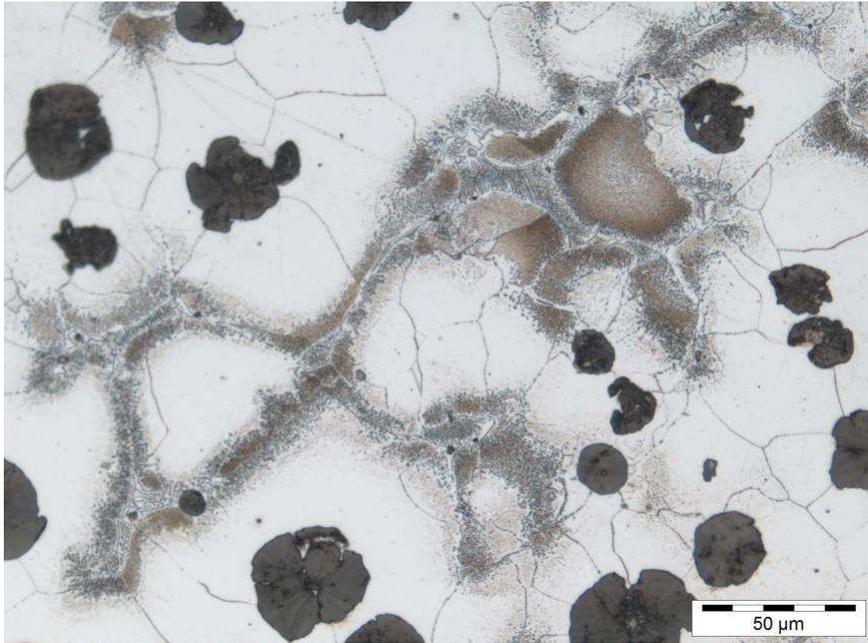


Abbildung 4.19: Genauere Betrachtung des Perlits



Abbildung 4.20: Genauere Betrachtung des Perlits, Karbidbildung

Mangan 0,5%, Probe 702

In Abbildung 4.21 ist die ungeätzte Probe mit einer guten Kugelausbildung dargestellt. Bei genauerer Betrachtung im geätzten Zustand konnte ein Bereich mit Graphitentartungen gefunden werden (Abbildung 4.22). Weiters wurden jedoch die Normwerte erfüllt und ein vollständig ferritisches Gefüge ausgebildet (Abbildung 4.23).

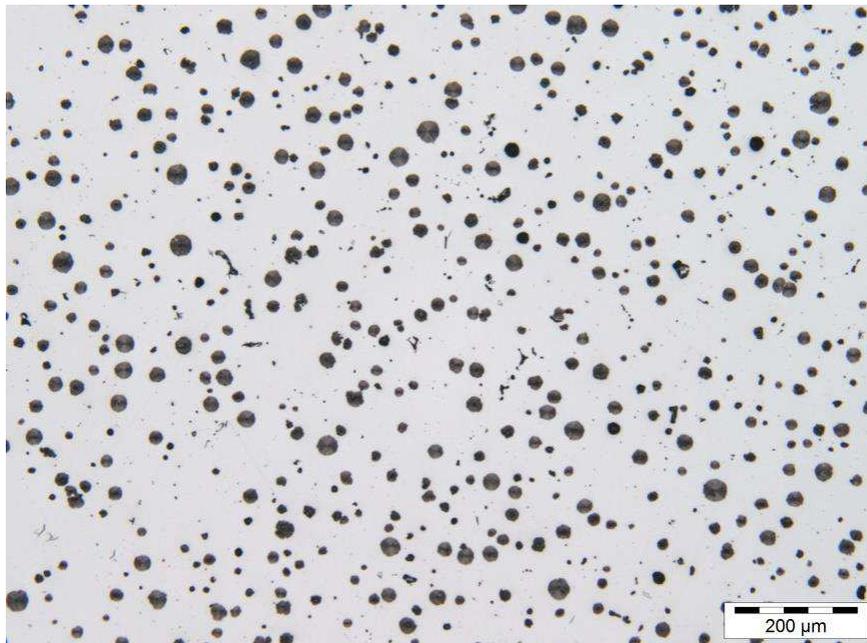


Abbildung 4.21: Ungeätzte Schlieffläche, Kugelbildung

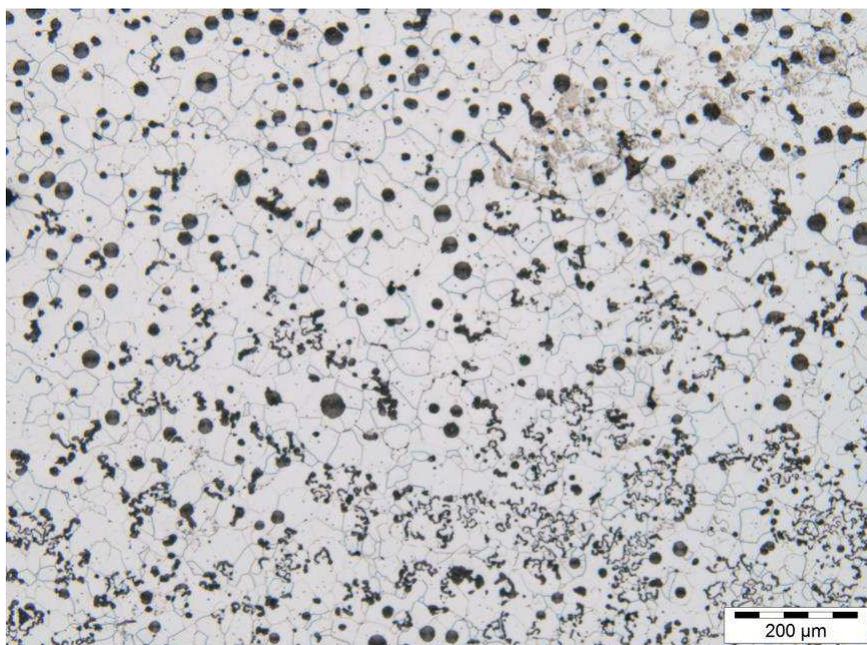


Abbildung 4.22: Geätzte Schlieffläche, Graphitentartungen

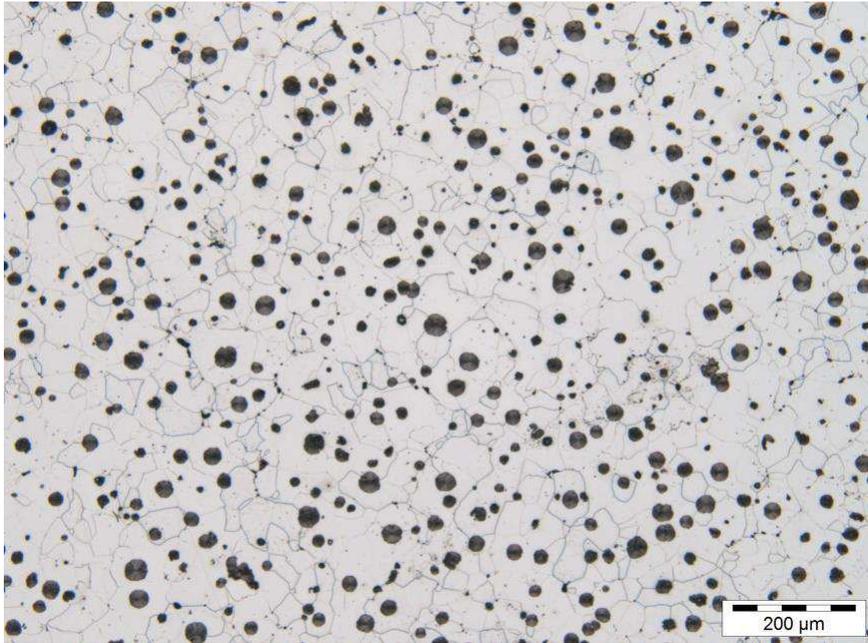


Abbildung 4.23: Geätzte Schliifffläche, Ferritbildung

Aluminium 2%, Probe 714

Bei dieser Probe (Abbildungen 4.24 und 4.25) war deutlich erkennbar, dass die Kugelbildung nicht erfolgreich war. Das Gefüge besteht zum größten Teil aus Lamellen. Auch die Auswertung bestätigte diesen zu geringen Wert. Dennoch liegt ein vollständig ferritisches Grundgefüge vor.

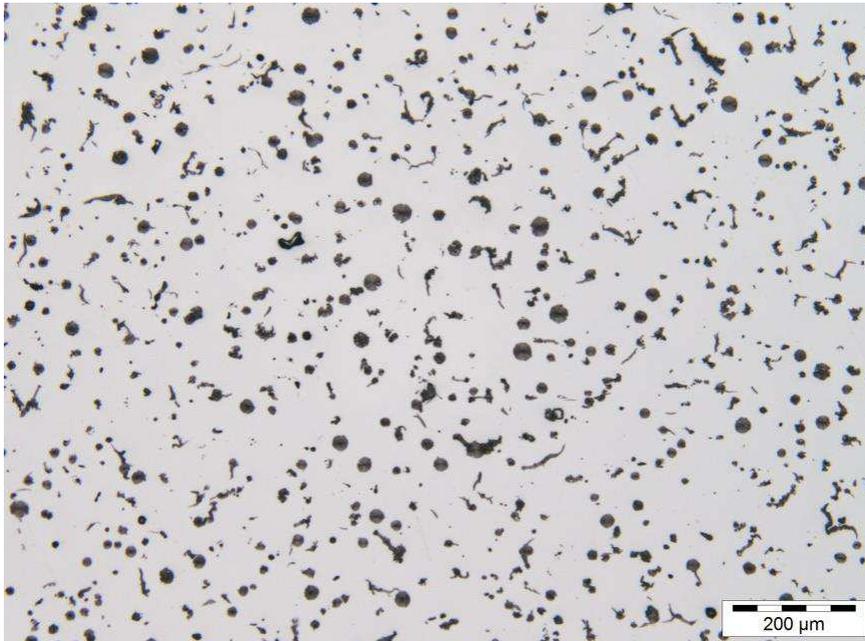


Abbildung 4.24: Ungeätzte Schlieffläche, Störung der Kugelbildung

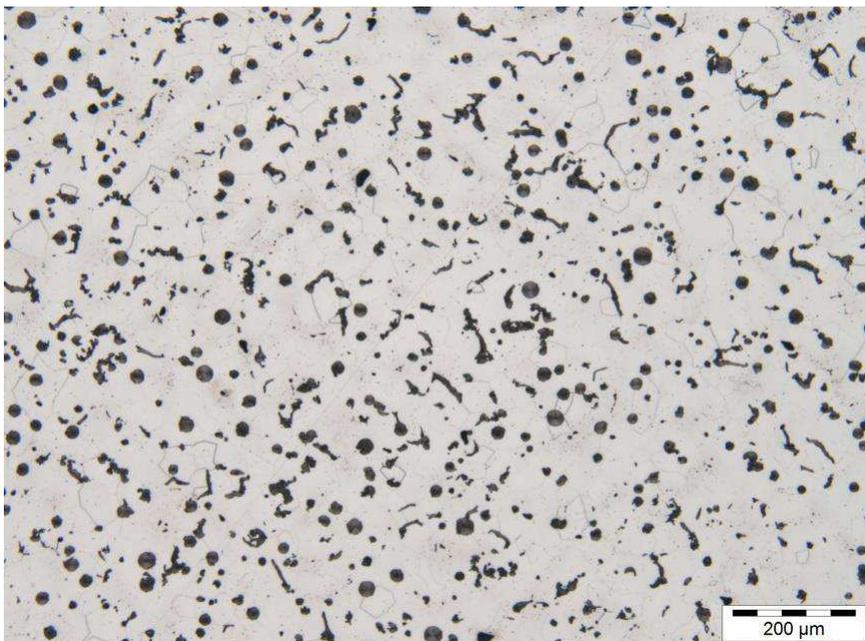


Abbildung 4.25: Geätzte Schlieffläche, Hemmung der Kugelbildung, ferritisches Gefüge

Aluminium 1%, Probe 720

Eine Wiederholung des Versuches mit Aluminium, aber einer deutlich geringeren Menge, führte wiederum zu keinem verwendbaren Ergebnis. Eine weitere Auswertung des Versuches wurde nicht durchgeführt, da die ungeätzten Bilder aufgrund der mangelnden Kugelbildung, schon auffällig genug waren (Abbildungen 4.26 und 4.27).

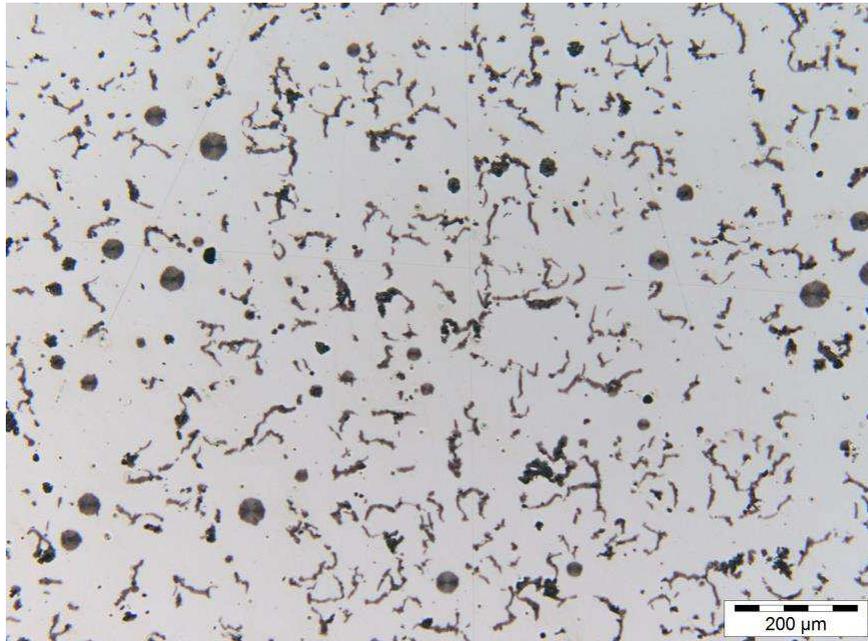


Abbildung 4.26: Ungeätzte Schlieffläche, mangelnde Kugelbildung aufgrund von Al-Anteilen

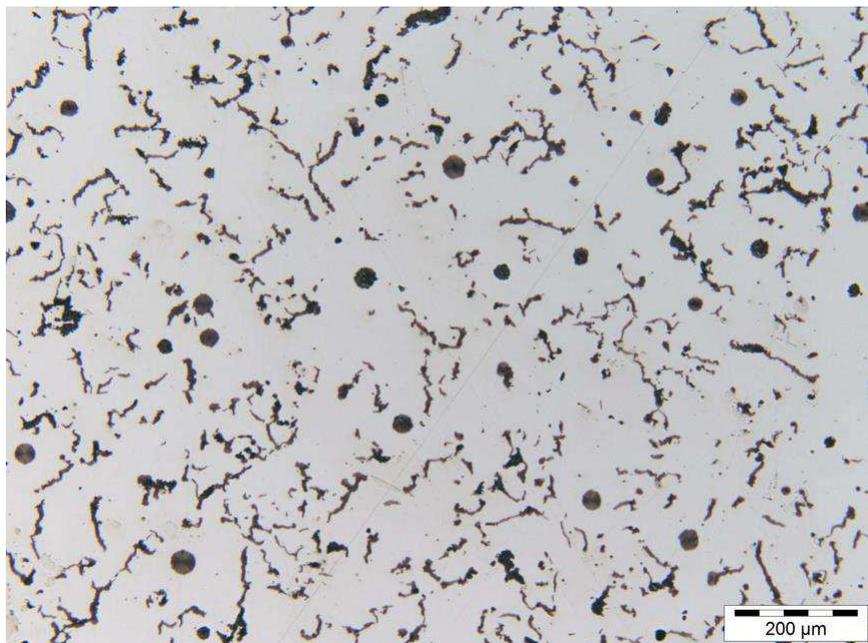


Abbildung 4.27: Ungeätzte Schlieffläche, schlechte Kugelbildung

Nickel 1%, Probe 723

Bis auf die schlechte Kugelausbildung des Graphits, welche in Abbildungen 4.28 und 4.29 erkennbar ist, konnte in diesen Gefügebildern nichts Auffälliges gefunden werden.

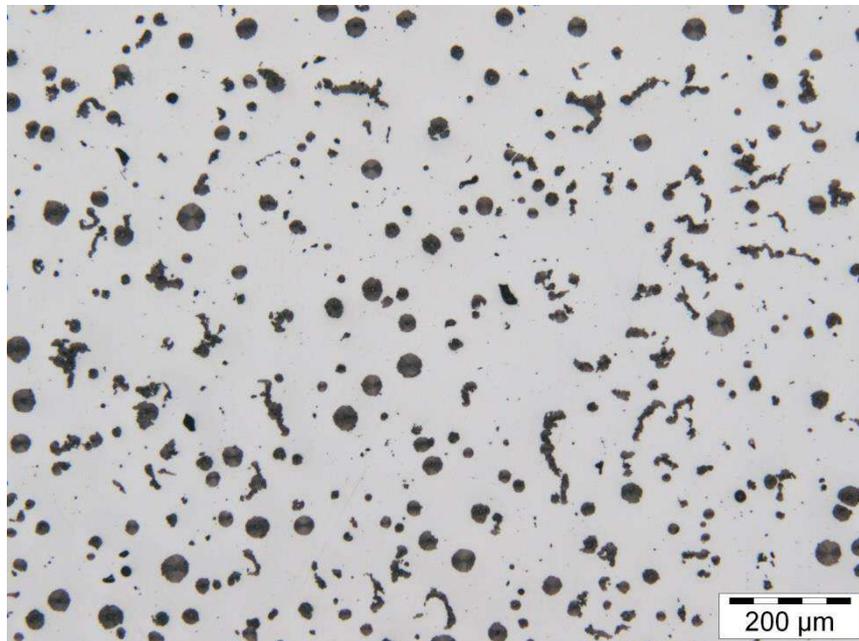


Abbildung 4.28: Ungeätzte Schliifffläche, schlechte Kugelausbildung

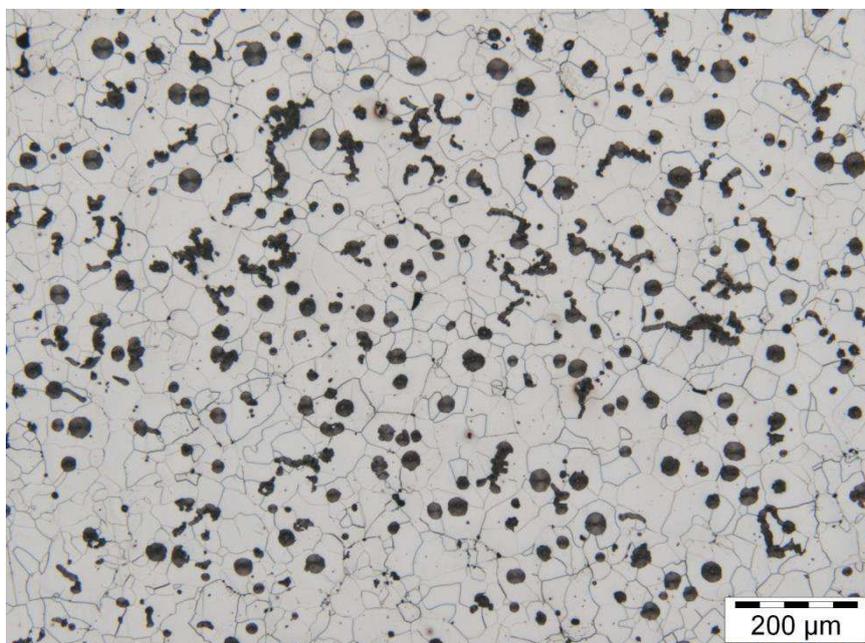


Abbildung 4.29: Ungeätzte Schliifffläche, Ferritbildung, unvollständige Kugelausbildung

Kupfer 0,7%, Probe 726

Abbildung 4.30 zeigt die ungeätzte Fläche mit guter Kugelausbildung. Im geätzten Zustand ist neben der Ferritbildung auch perlitisches Gefüge vorhanden, siehe Abbildung 4.31.

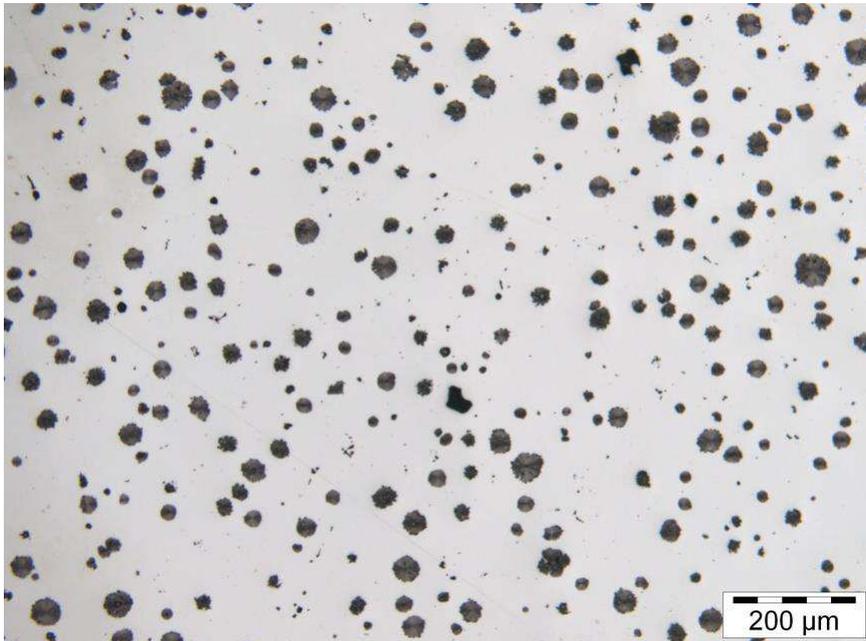


Abbildung 4.30: Ungeätzte Schlieffläche, Kugelbildung

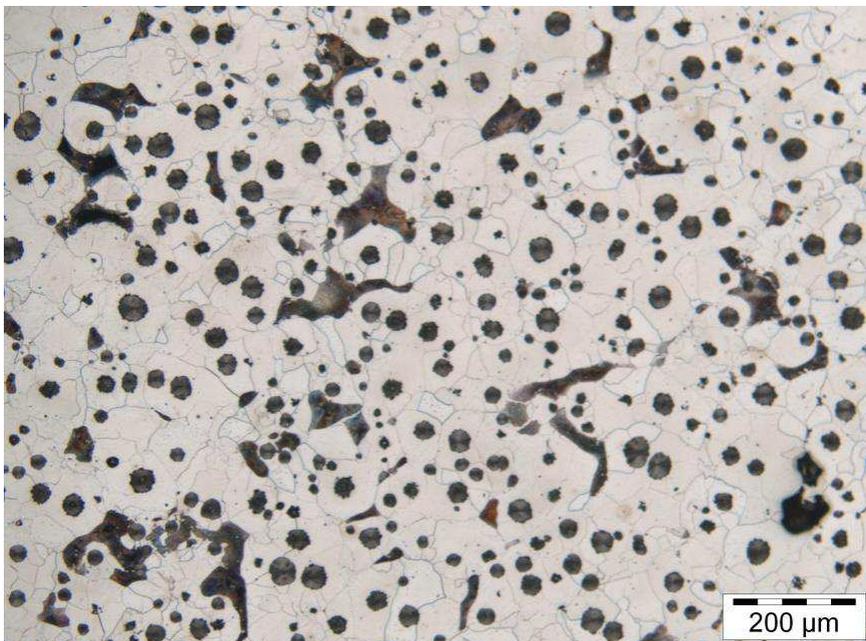


Abbildung 4.31: Geätzte Schlieffläche, Ferrit-/ Perlitbildung

Molybdän 1 %, Probe 729

Bei Betrachtung der Abbildungen 4.32 und 4.33 konnte zuerst eine gute Kugelbildung festgestellt werden, ebenso fanden sich Bereiche mit Lamellengraphit. Nach dem Ätzen ergab sich im Gefüge eine Ferrit-/ Perlitmischung (Abbildung 4.34). Auch hier wurde der Perlit einer detaillierteren Untersuchung unterzogen und wie auch schon bei den anderen Molybdän- Proben, war eine Karbidbildung an den Korngrenzen ersichtlich (Abbildung 4.35).

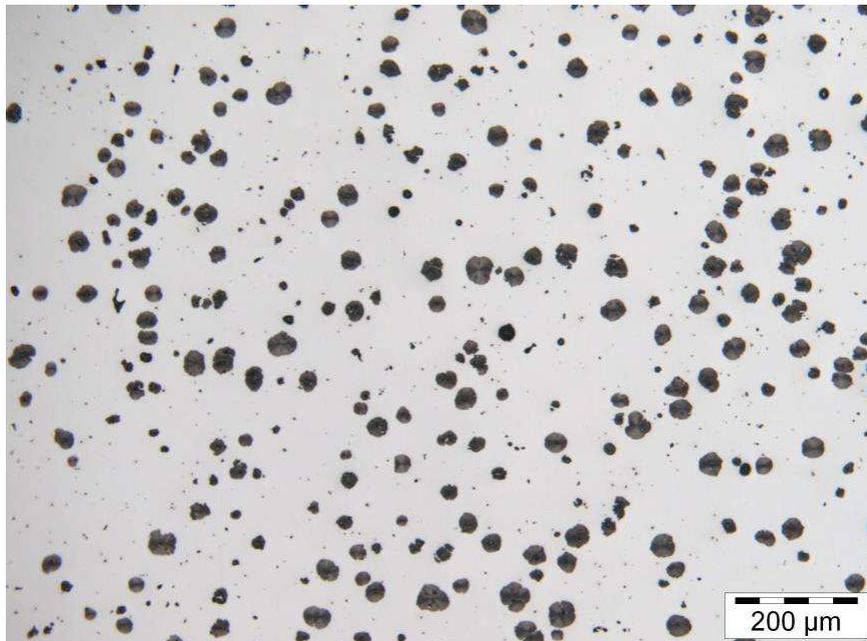


Abbildung 4.32: Ungeätzte Schliifffläche, Kugelbildung

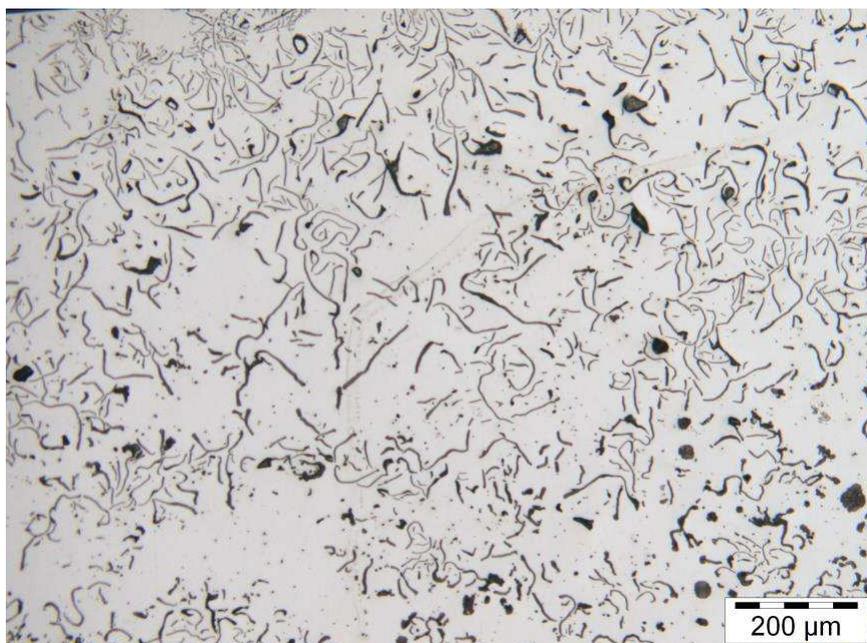


Abbildung 4.33: Lamellenbildung in der Mitte

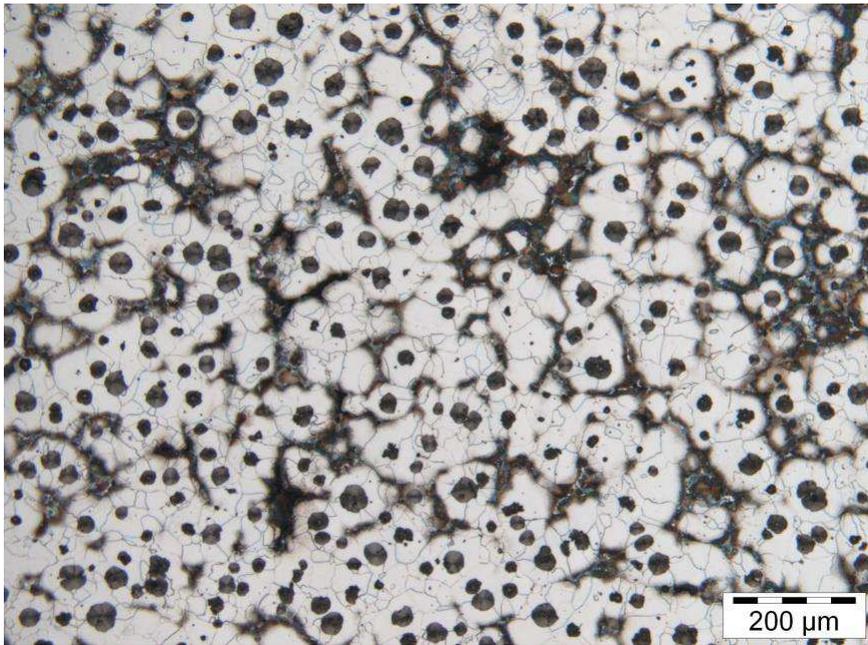


Abbildung 4.34: Geätzte Schliiffläche, Ferrit-/ Perlitbildung

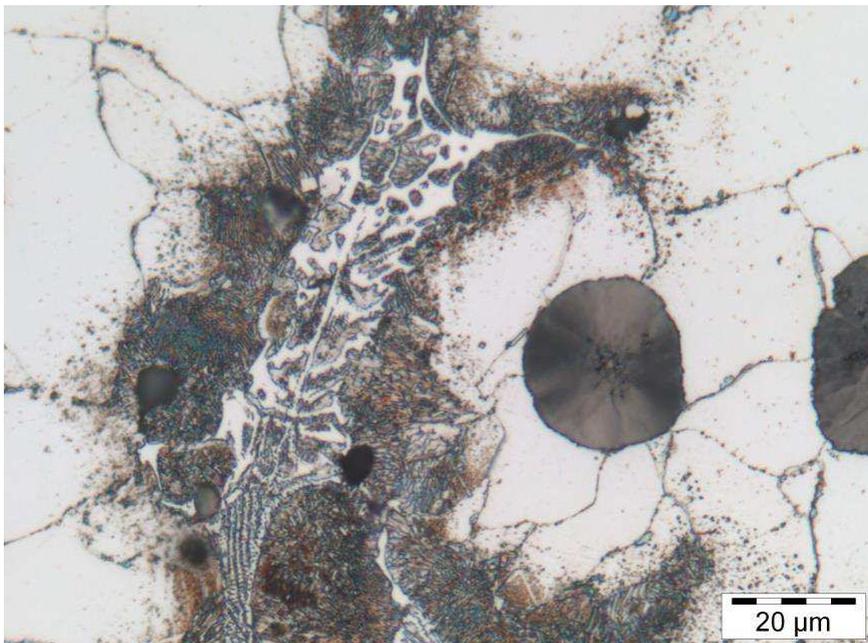


Abbildung 4.35: Geätzte Schliiffläche, Perlitbildung, Karbidbildung

4.6 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen

Im Folgenden sind die Bilder aus der Untersuchung mit dem Rasterelektronenmikroskop dargestellt. Die Aufnahmen wurden mit 400-facher Vergrößerung aufgenommen, Detailbilder mit 2800-facher. Als Grundlage, für die Auswertung der Bruchflächen der Zugproben, diente Probe 612, welche ohne zusätzliche Legierungselemente, hergestellt wurde. Des Weiteren erfolgte bei vier Schlifflen eine REM- Untersuchung.

Die Bruchflächen- Analyse fand an folgenden Proben statt: 612, 663, 676, 726, 729, die Schliffflächen- Analyse bei den Proben 708,726 und 729.

Rasterelektronenmikroskop- Bruchflächen:

Norm GJS-600-10, Probe 612:

Bei Betrachtung der folgenden Bilder war erkennbar, dass es einen Bereich von Graphitansammlungen gibt. An den Korngrenzen findet sich ein duktiler Bruch, ansonsten fand ein Sprödbbruch statt. Ebenso ist die Einlagerung der Kugeln in das Gefüge gut erkennbar. Teilweise sind diese spröde ausgebrochen (Abbildungen 4.36 und 4.37).

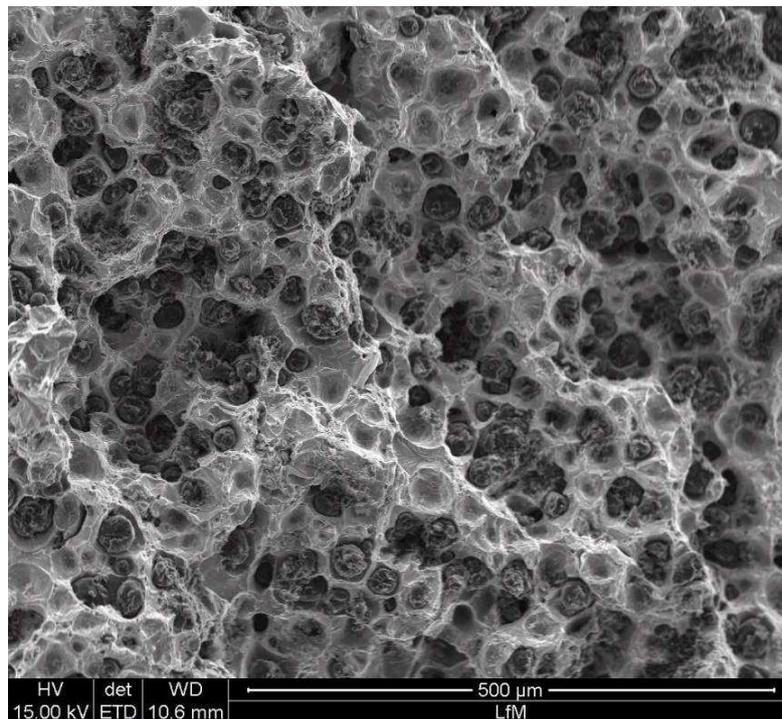


Abbildung 4.36: Allgemeine Betrachtung

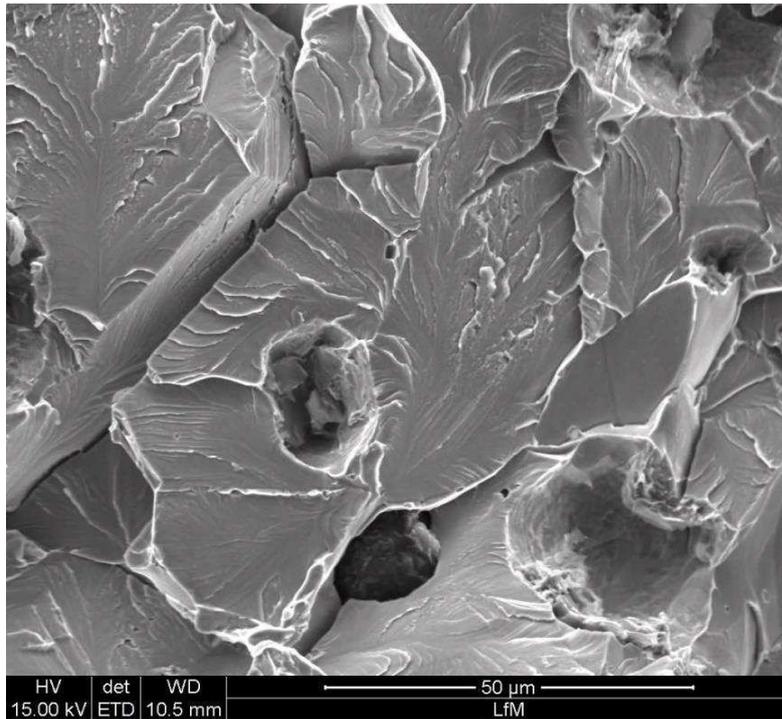


Abbildung 4.37: Genauere Betrachtung, Sprödbruch

Kobalt 2%, Probe 663

In der allgemeinen Betrachtung (Abbildung 4.38) ist eine relativ gleichmäßige Verteilung der Graphitkugeln erkennbar, einzig im Bereich links oben findet sich eine geringe Ansammlung. In Abbildung 4.39 ist deutlich ein Sprödbbruch zu sehen.

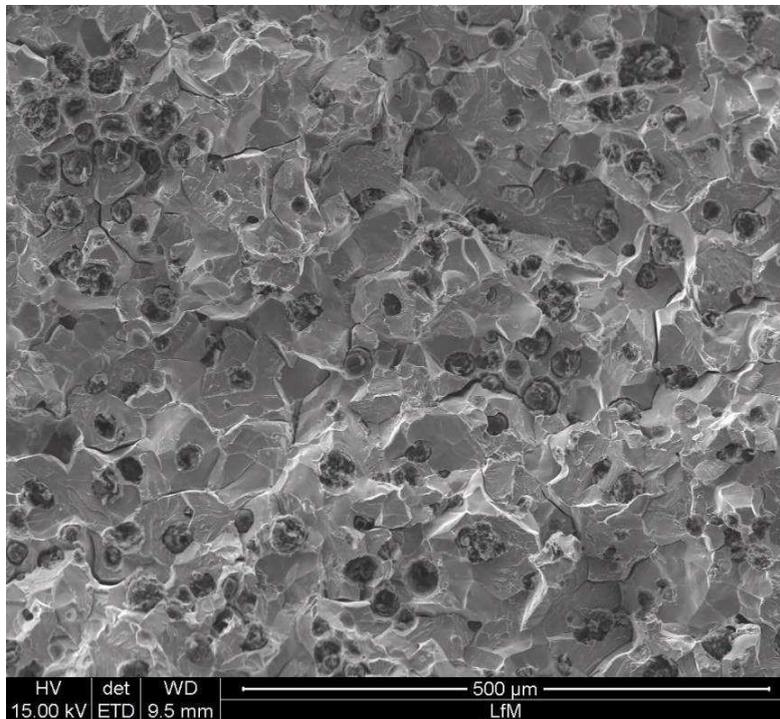


Abbildung 4.38: Allgemeine Betrachtung

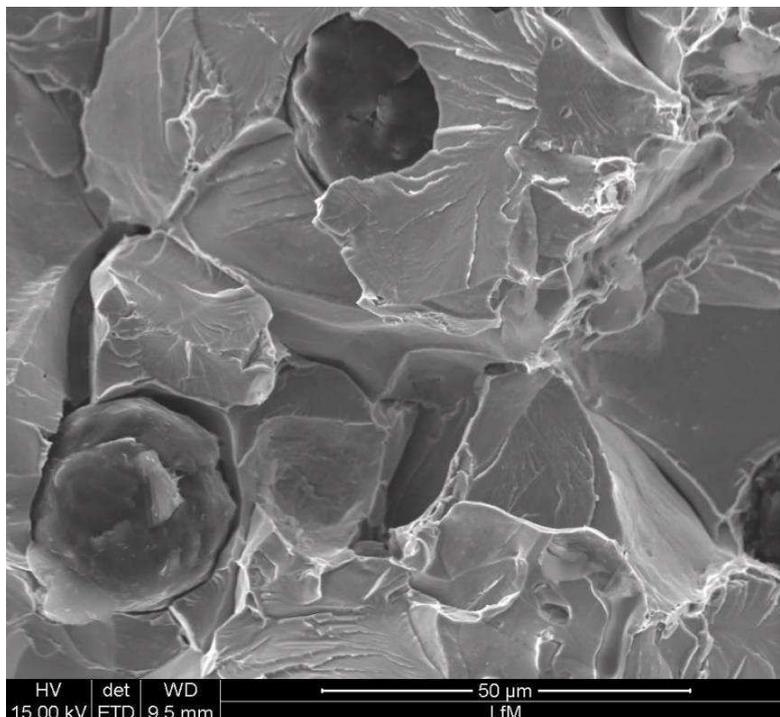


Abbildung 4.39: Kugelausbildung und Korngrenzen

Kupfer 0,5%, Probe 676

Im generellen Überblick in Abbildung 4.40 zeigt sich deutlich eine Ansammlung von Chunky Graphit. Dieser Bereich wurde in Abbildung 4.41 genauer betrachtet und es konnte festgestellt werden, dass an den Korngrenzen ein duktiler, ansonsten ein spröder Bruch stattgefunden hat. Bei der Analyse von weiteren Bereichen im Gefüge (Abbildung 4.42) war nur noch Sprödbruch vorhanden.

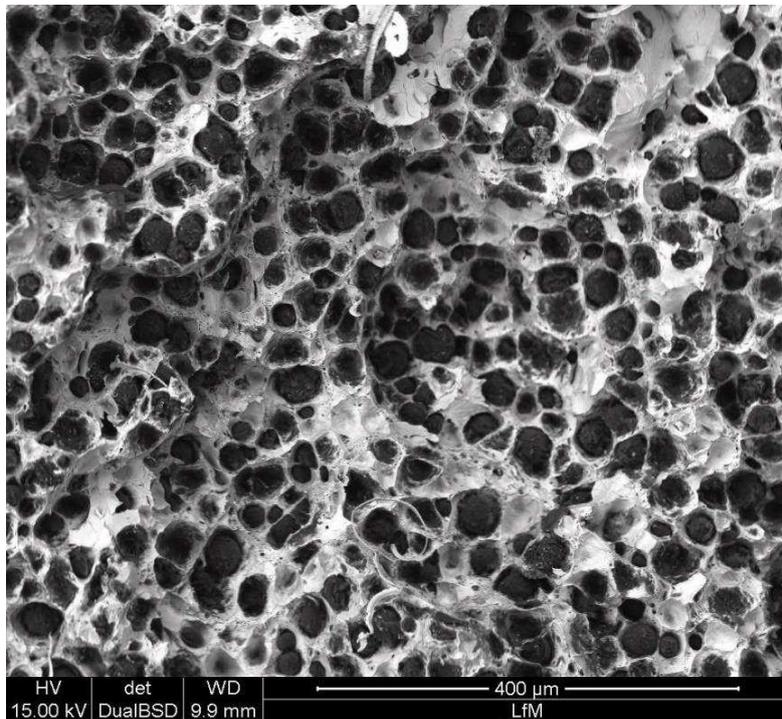


Abbildung 4.40: Allgemeiner Überblick

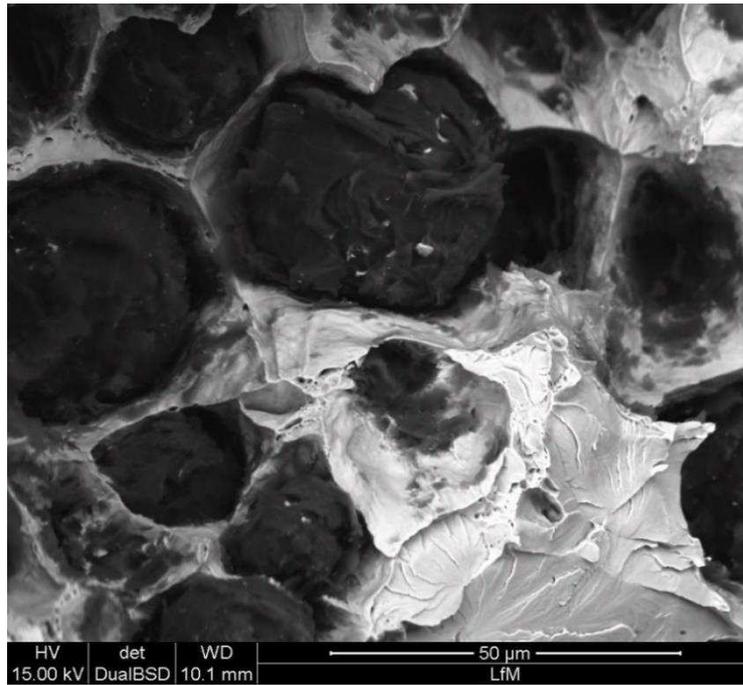


Abbildung 4.41: Genauere Betrachtung der Graphitansammlungen

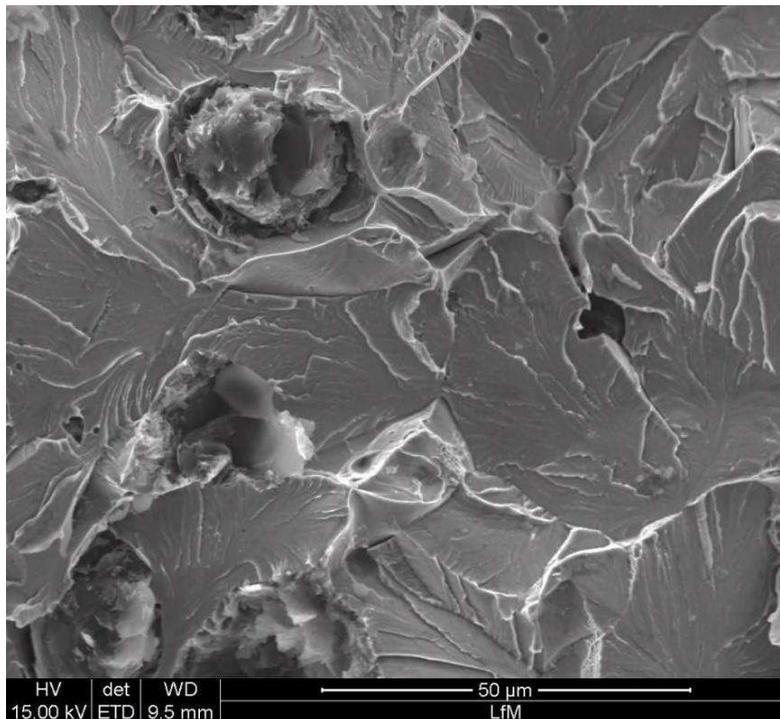


Abbildung 4.42: Sprödbbruch außerhalb der Ansammlung des Graphits

Kupfer 0,7%, Probe 726

Bei Betrachtung der Abbildungen 4.43 und 4.44 zeigte sich wieder eine gute Verteilung der Kugeln sowie Sprödbruch. Bei dieser Probe wurde im Anschluss noch die Schliifffläche analysiert.

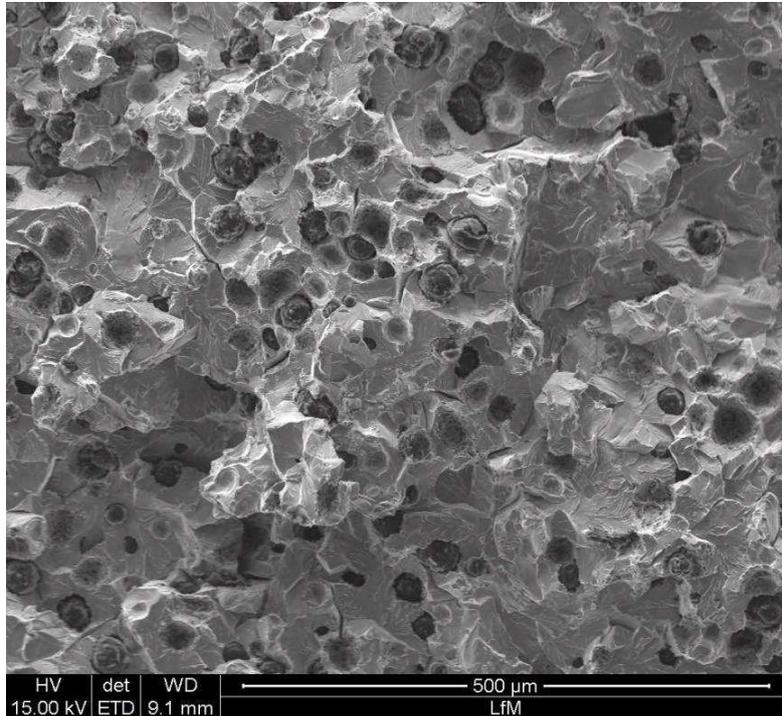


Abbildung 4.43: Allgemeiner Überblick

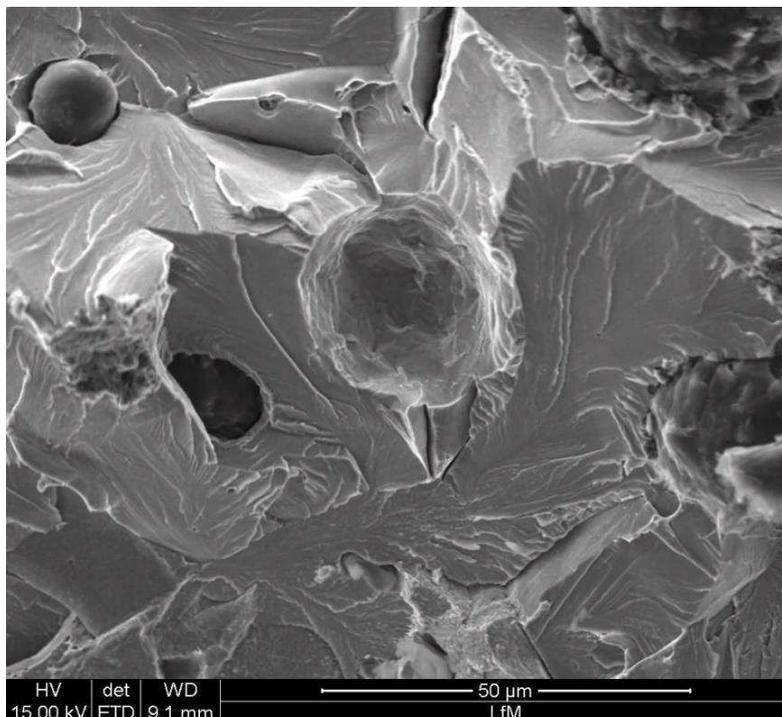


Abbildung 4.44: Genauere Betrachtung, Sprödbruch

Molybdän 1%, Probe 729

Nach der Analyse des Gesamtüberblickes (Abbildung 4.45), wurden einige Bereiche genauer betrachtet. Erneut war erkennbar, dass die Probe spröde gebrochen ist. Ein weißer Einschluss, in Abbildung 4.46, erwies sich, bei einer durchgeführten Spektralanalyse als Molybdän.

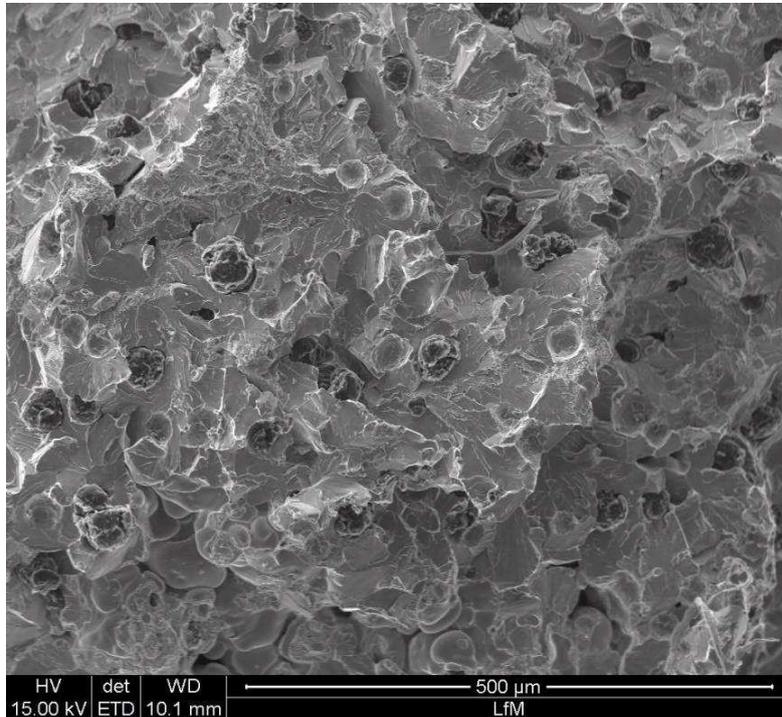


Abbildung 4.45: Allgemeine Betrachtung

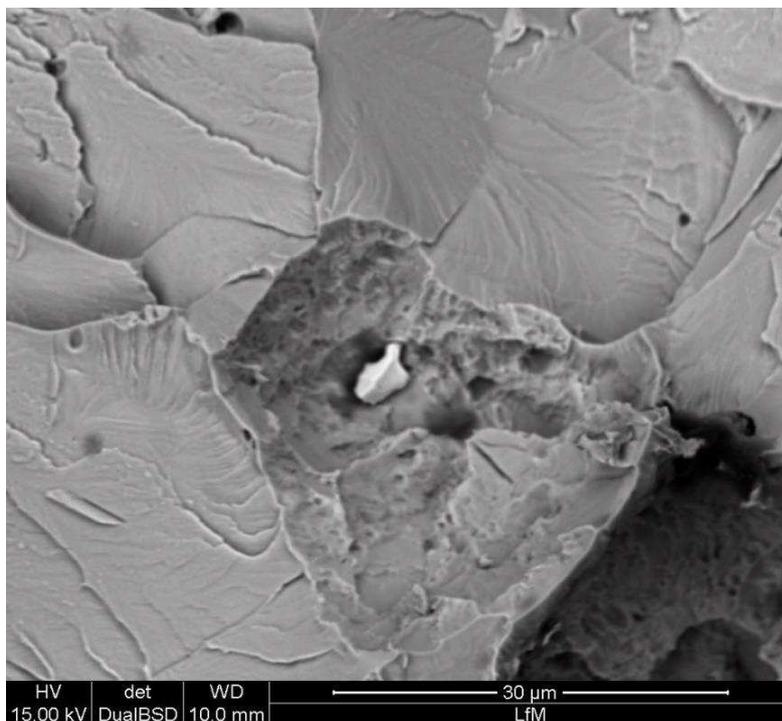
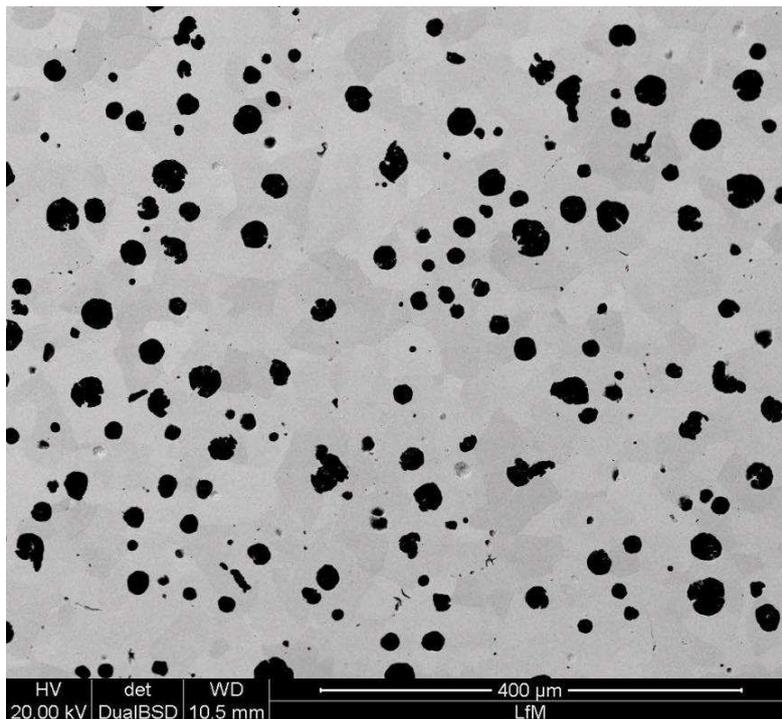


Abbildung 4.46: Molybdän- Einschluss, Spröbruch

Rasterelektronenmikroskop- Untersuchung einzelner Schiffe:**Nickel 1%, Probe 708**

Bei Betrachtung des Gesamtüberblickes (Abbildung 4.47) ergaben sich bestimmte Bereiche an den Korngrenzen, welche im Folgenden näher inspiziert und auch der Spektralanalyse zugeführt wurden. Diese ergab kein auffälliges Ergebnis. Es handelt sich um Einschlüsse (Abbildung 4.48). In Abbildung 4.49 ist die unvollständige Ausbildung der Graphitkugeln erkennbar.

**Abbildung 4.47: Überblick**

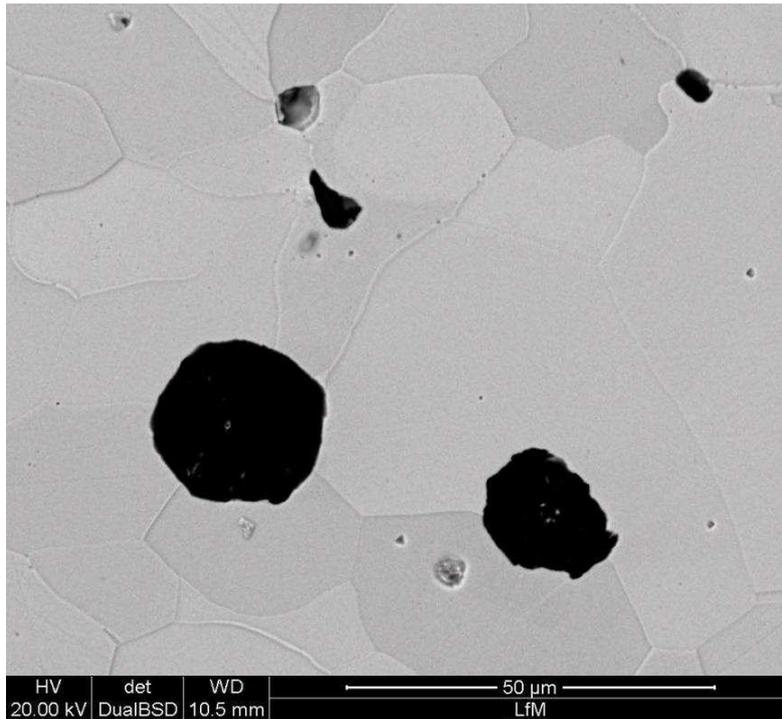


Abbildung 4.48: Kugelbetrachtung

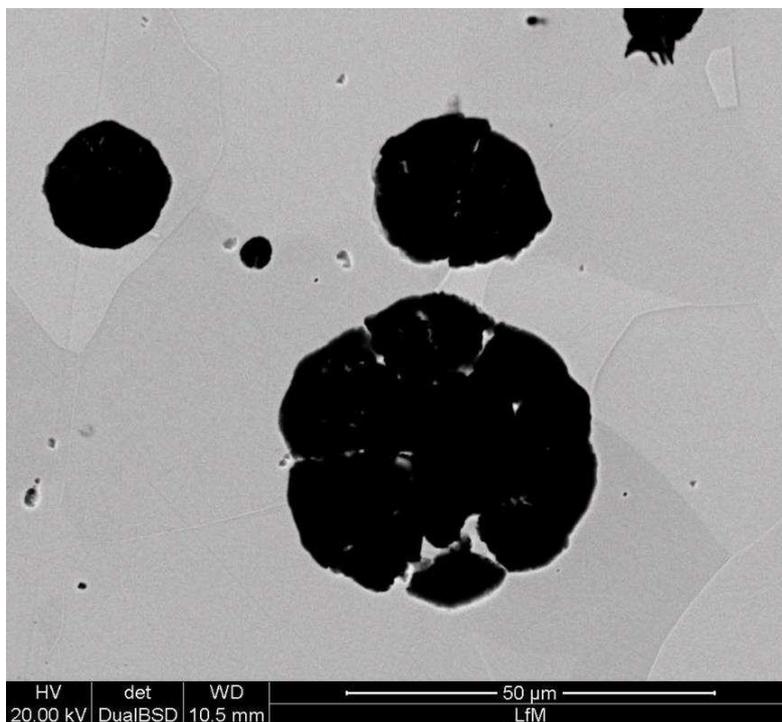
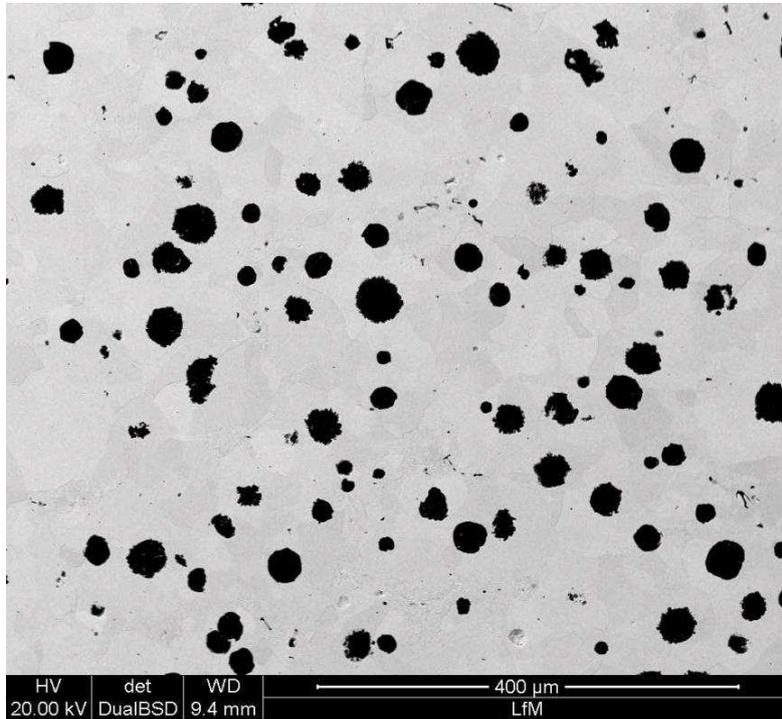
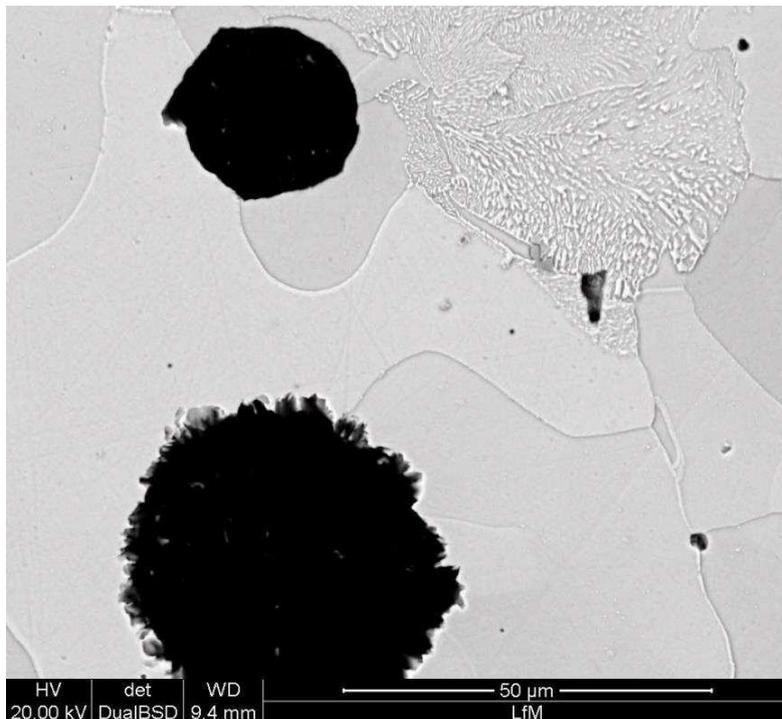


Abbildung 4.49: Keine vollständige Ausbildung

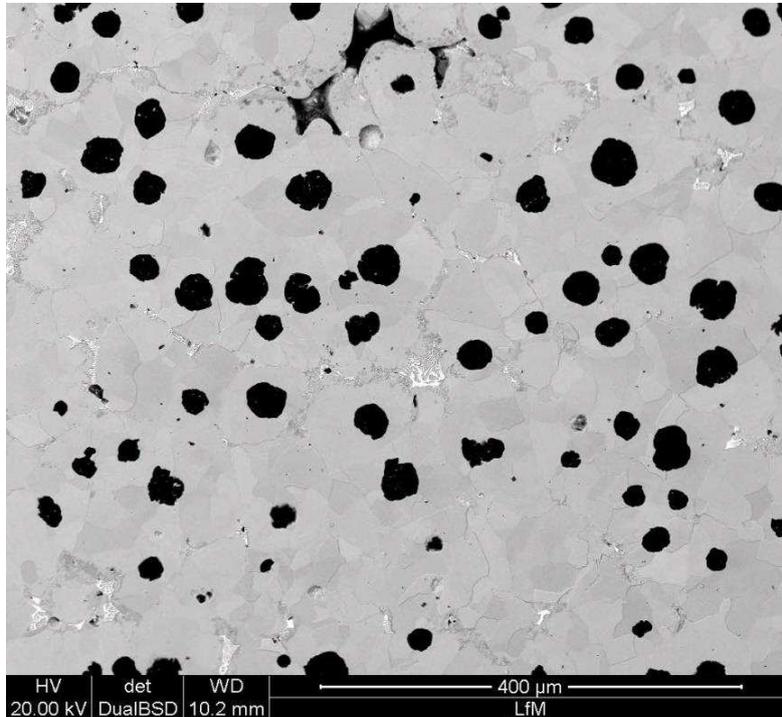
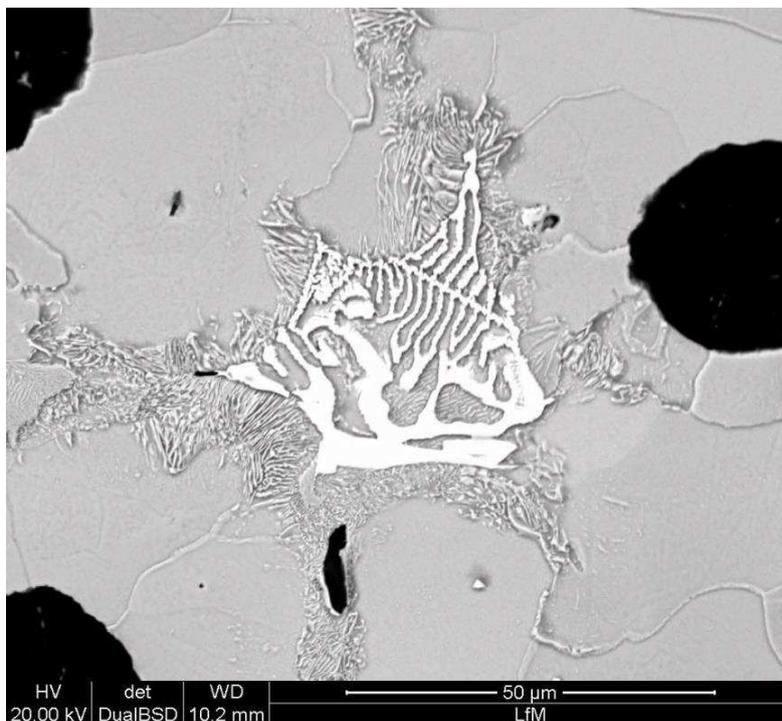
Kupfer 0,7%, Probe 726

In Abbildung 4.50 ist bereits die unvollständige Kugelausbildung erkennbar. Eine genauere Betrachtung und Auswertung mittels Spektralanalyse ergab, dass sich an den Kugelaußenrändern geringe Gehalte an Kupfer befinden, welche das Wachstum hemmen. Ebenso befindet sich Perlit im Gefüge (Abbildung 4.51).

**Abbildung 4.50: Allgemeine Aufnahme****Abbildung 4.51: Unvollständige Kugelausbildung, Perlit im oberen Bereich der Abbildung**

Molybdän 1%, Probe 729

In Abbildungen 4.52 und 4.53 sind erneut die fehlerhafte Kugelausbildung sowie Lunker erkennbar. Wie schon bei den Gefügebildern, ist auch hier der Perlit sichtbar. Bei erneuter Analyse mit der Spektralanalyse konnte bewiesen werden, dass es sich um die Bildung von Karbiden handelt, welche von Perlit umgeben sind.

**Abbildung 4.52: Überblick****Abbildung 4.53: Genauere Betrachtung, Karbide mit Perlitumrandung**

5 Zusammenfassung

Die in Kapitel 4 vorgestellten Ergebnisse werden ausgewertet und genauer betrachtet. Die Werte aus den Versuchen werden mit den von der Norm geforderten verglichen. In Tabelle 5.1 sind die Legierungselemente aufgeführt, welche allen Anforderungen genügen.

Tabelle 5.1: Auswertung der Ergebnisse aus Kapitel 4

Probe	Legierungselement [%]	Si-Gehalt	A	R _m	R _{p0,2}	Perlit	V+VI
Norm		ca. 4,30%	min. 10	min. 600	min. 470	< 5%	>90%
660	1,0 Co	4,37	15,1	630	498	0	93,3
663	2,0 Co	4,22	17,3	623	486	4,5	97,1
676	0,5 Cu	4,26	17,8	620	502	0	96,5
702	0,5 Mn	4,36	17,2	628	501	0	98,0
705	1,0 Mn	4,31	17,0	629	503	2,2	98,1
708	1,0 Ni	4,36	13,7	677	524	0,9	96,5
732	0,032 P	4,29	17,7	616	497	0,4	98,1

Die Elemente Aluminium und Molybdän zeigen sich als Legierungselement für diese Versuchszwecke als nicht geeignet.

Molybdän

Bei allen Molybdänproben ist der hohe Perlitanteil auffallend. Bei einer genaueren Betrachtung kann eine Karbidbildung festgestellt werden. Auch die mechanischen Eigenschaften sind nicht zufriedenstellend. Auffallend ist jedoch, dass in allen drei Fällen der Siliziumgehalt, in Bezug auf die Richtwerte von der Norm EN 1563, zu niedrig ist. [26] legt den Wert für ein ferritisches Grundgefüge auf eine Grenze von 1,0%, was sich mit den Ergebnissen dieser Arbeit nicht bestätigen lässt.

Aluminium

Aluminium verursacht als Störelement eine Hemmung der Graphitbildung zur Kugelform. Auch die schlechte Gießbarkeit des Aluminiums führt schon beim Abguss zu Problemen. Mit [2] und [3] decken sich die gefundenen Erkenntnisse bezüglich des Verhaltens von Aluminium.

Bei den anderen Elementen zeigen sich durchaus positive Entwicklungen oder Ansätze in der Variation des verwendeten Legierungsgehaltes.

Kupfer

Bezüglich der mechanischen Eigenschaften zeigt nur die Probe mit dem höchsten Gehalt eine zu geringe Bruchdehnung. Bei 0,5% Kupfer fällt zudem auf, dass sich, trotz eines erhöhten Magnesiumanteiles bilden sich immer noch lokal vereinzelt Lamellen und Graphitentartungen. Das Kupfer die Kugelbildung beeinträchtigt bestätigt auch [2], allerdings wird dort von einem Kupfergehalt > 1% ausgegangen. Was zudem einen Einfluss ausübt, ist die Kombination mit einem höheren Magnesiumgehalt. Diese Erkenntnisse zeigen, dass Schrott-/ oder Kreislaufmaterial, mit einem Kupfergehalt von bis zu 0,5%, verwendet werden können.

Nickel

Bei einem Versuch mit 1% können die Normvorgaben erreicht werden. Die vollständige Ferritbildung bestätigt auch [26], [27] beschränkt den maximalen Nickelgehalt sogar auf nur 0,5%. [28] legt den Nickelwert auf einen Gehalt zwischen 0,5 und 1% fest. Beide Aussagen decken sich mit den Ergebnissen dieser Arbeit.

Phosphor

Der Einfluss von einem erhöhten Gehalt an Phosphor, welcher sich oftmals im Schrott befindet, kann durchaus toleriert werden, da dieser eine Mischkristallverfestigung ausführt. In weiteren Versuchen muss noch genauer auf den Einfluss bzw. die Grenze des Phosphorgehaltes auch in Kombination mit anderen Elementen eingegangen werden.

Als wirksamste Elemente dieser Arbeit können Kobalt und Mangan ermittelt werden.

Kobalt

Ein höherer Gehalt an Kobalt begünstigt die Bruchdehnung sowie die Kugelausbildung, allerdings sind die Zugfestigkeit und Streckgrenze geringer. Ebenso bildet sich ein Perlitanteil, welcher gerade noch unter dem Normwert liegt. Die Ergebnisse führen zur Erkenntnis, dass ein niedrigerer Gehalt von 0,5% Kobalt ausreichend ist.

Mangan

Bei einem erhöhten Mangangehalt findet eine Perlitbildung statt. Diese dürfte nicht allzu schnell ansteigen, da [26] den Gehalt für ein ferritisches Gefüge auf 1,6% begrenzt. Grundsätzlich reicht beim Mangan ein Gehalt von 0,5% aus.

Da der Gehalt an Legierungselementen, aufgrund steigender Kosten und Vermeidung von überflüssiger Verwendung, eher gering gehalten werden soll, lassen sich die erreichten Ergebnisse noch weiter eingrenzen, sodass die in Tabelle 5.2 sowie in Abbildung 5.1 dargestellten Proben, das bestmögliche Ergebnis darstellen.

Tabelle 5.2: Erzielte Ergebnisse der geeigneten Legierungselemente

Probe	Legierungselement [%]	Si-Gehalt [%]	A [%]	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	Perlit [%]	V+VI [%]
Norm		4,30	10	600	470	<5	>90
660	1,0 Cu	4,37	15,1	630	498	0	93,3
676	0,5 Cu	4,26	17,8	620	502	0	96,5
702	0,5 Mn	4,36	17,2	628	501	0	98,0
708	1,0 Ni	4,36	13,7	677	524	0,9	96,5
732	0,032 P	4,29	17,7	616	497	0,4	98,1

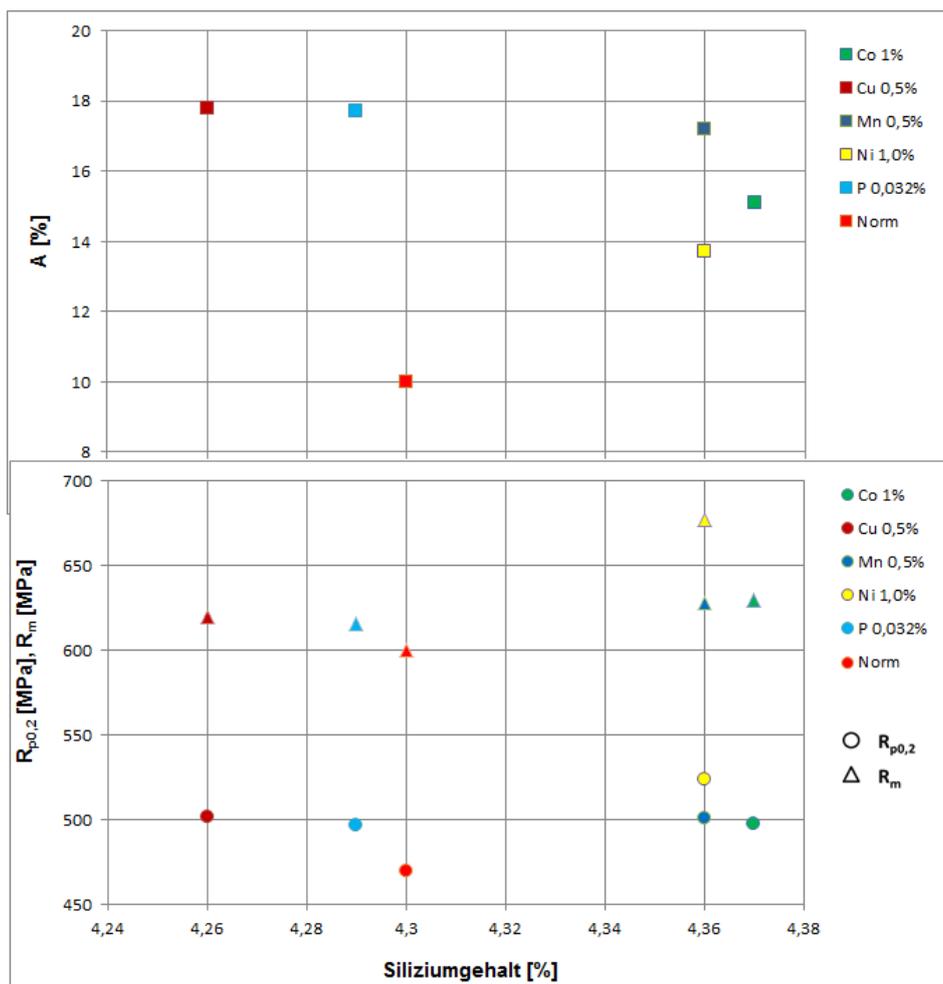


Abbildung 5.1: Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse

Es zeigen sich, trotz der Sprödigkeit des Siliziums, gute Tendenzen um die gewünschten mechanischen Eigenschaften bei einem höheren Siliziumgehalt zu erhalten. Auch die Ausbildung eines ferritischen Gefüges sowie die Bildung der Kugeln und deren hohe Anzahl lassen sich ohne Probleme durch gutes Impfen und eine ausreichende Magnesiumbehandlung einstellen. Die positiven Elemente bedürfen noch einer genaueren Betrachtung bezüglich des zu verwendenden Gehaltes, um das optimale Minimum zu finden, sodass auch eine Senkung des Siliziumgehaltes erfolgen kann und die von der Norm geforderten Werte dennoch eingehalten werden können. Dadurch lässt sich das Risiko eines möglichen spröden Bruchverhaltens noch weiter verringern. Ebenso sollten mögliche Kombinationen aus Legierungselementen ausprobiert werden, um die unterschiedlichen Einflüsse miteinander zu vereinen, was es auch ermöglicht, die Elemente nochmals zu untersuchen, welche im Einzelversuch einen negativen Einfluss zeigen.

Literaturverzeichnis

- [1] Bartels, Ch., u.a.: Gusseisen mit Kugelgraphit, Herstellung- Eigenschaften- Anwendung. Düsseldorf, ZGV- Zentrale für Gussverwendung, 2007. S. 2, 5, 22/23.
- [2] Hasse, S.: Duktiles Gusseisen. Berlin, Schiele & Schön, 1996. S. IX, 4, 9, 17, 18, 135/ 136, 150 - 152, 158.
- [3] Löblich, H. und Stets, W.: Werkstoff- und fertigungstechnische Grundlagen der Herstellung und Anwendung von hoch siliciumhaltigem Gusseisen mit Kugelgraphit, Teil 1, Giesserei 100, 07/2013. S. 30 - 47.
- [4] Schulze, H.-J. und Bargel G.: Werkstoffkunde. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 2008. S. 100/ 101,143 - 148, 168, 252, 257 - 264.
- [5] Weißbach, W.: Werkstoffkunde. Wiesbaden, VIEWEG und TEUBNER, 2012. S. 74, 77/ 78, 86, 94, 152, 176, 179, 374-378.
- [6] Jass, H. und Hanemann, H.: Gießerei 25,12/1938. S. 293-299.
- [7] Hasse, S.: Giesserei Lexikon. Berlin, Schiele & Schön, 19. Auflage, 2008. S. S. 233 - 238, 300, 674, 696/697, 833 - 835, 896/897, 1187/1188, 1200/ 1201.
- [8] Herfurth K., Ketscher N. und Köhler M.: Giessereitechnik kompakt. Düsseldorf, Giesserei- Verlag GmbH, 2005. S. 29, 39 - 42, 71/ 72.
- [9] RIO TINTO IRON & TITANIUM, INC.: Sorelmetal Gusseisen mit Kugelgraphit. Canada, 2004. S. 13,25 - 31, 79/ 80, 83.
- [10] ÖNORM EN 1560: Gießereiwesen- Bezeichnungssystem für Gusseisen- Werkstoffkurzzeichen und Werkstoffnummern. Wien, Österreichisches Normungsinstitut, 2011-05-01. S. 5 - 11.
- [11] ÖNORM EN 1561: Gießereiwesen- Gusseisen mit Lamellengraphit. Wien, Österreichisches Normungsinstitut, 2011-12-01. S. 5.
- [12] ÖNORM EN 1563: Gießereiwesen- Gusseisen mit Kugelgraphit. Wien, Österreichisches Normungsinstitut, 2012-03-01. S. 1 - 48.
- [13] Hasse, S.: www.giessereilexikon.com. Aufruf am 13.04.2016.
- [14] Univ. Prof. DI Dr. Schumacher, P.: Vorlesungsunterlagen zu Gussgefüge und Eigenschaften. Montanuniversität Leoben, 2015. Vorlesung 10.
- [15] Berns, H. und Theisen, W.: Eisenwerkstoffe. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 2008. S. 31, 144.
- [16] Piwowarsky, E.: Gußeisen. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 1961. S. 43/44, 52/ 53, 90, 91, 199, 251 - 267, 781 - 786.

- [17] ÖNORM EN 16124: Gießereiwesen- Niedriglegiertes ferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit für Anwendungen bei höheren Temperaturen. Wien, Österreichische Normungsinstitut, 2012-02-01. S. 4 - 7.
- [18] Brechmann Guss: www.brechmann-guss.de/werkstoffe/simo. Aufruf am 13. 04 2016.
- [19] Menk, W.: Entwicklung von Eisengusswerkstoffen für Heianwendungen. Giesserei 102, 04/2015, S. 26-33.
- [20] Björkegren, L.-E., Hamberg, K. und Johannesson, B.: Mechanische Eigenschaften und Bearbeitbarkeit von mit Silicium verfestigten ferritischen Gußeisen mit Kugelgraphit. Gießerei- Praxis Nr. 1, 1999, S. 11 - 17.
- [21] Löblich, H. und Stets, W.: Werkstoff- und fertigungstechnische Grundlagen der Herstellung und Anwendung von hoch siliciumhaltigem Gusseisen mit Kugelgraphit, Teil 2., Giesserei 100, 08/2013, S. 42 - 53.
- [22] Zeipper, L.F.: EP 1 865 082 A1, Österreich, 2007.
- [23] Reimer, L. und Pfefferkorn, G.: Raster- Elektronenmikroskop. Berlin, Heidelberg, Springer- Verlag, 2. Auflage, 1977. S. 1 - 8.
- [24] cfn.physik.uni-saarland.de/Dokumente/.../Rasterelektronenmikroskop.pdf. Aufruf am 19.04.2016.
- [25] <http://www.icp-ms.de/wasist.html>. Aufruf am 19. 04 2016.
- [26] Suzuki et, al.: US 2004/0091383 A1, United States, 2004.
- [27] Weiß, P., Brachmann, J., Bührig-Polaczek, A. und Fischer S.: Influence of Nickel and Cobalt on the Microstructure of Silicon Solution- strengthened Ductile Iron. Aachen.
- [28] Steyr Powertrain AG & CO KG: AT 005 381 U1, Österreich, 2002.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Eisen-Kohlenstoff-Diagramm bei 2,5 Gew.-% Silizium [6]	11
Abbildung 2.2: Abkühlkurve des reinen Eisens und seine Kristallarten [5].....	12
Abbildung 2.3: Einteilung der Eisengusswerkstoffe [4].....	15
Abbildung 2.4: Einteilung des Grauen Gusseisens über die Graphitusbildung [13].....	17
Abbildung 2.5: Einfluss von Magnesium und Schwefel auf die Wachstumsgeschwindigkeit des Graphits [14].....	18
Abbildung 2.6: Gießkeilprobe am Gusseisen mit Lamellengraphit [8]	19
Abbildung 2.7: Schnitt im System bei 2,4 und 4,8% Silizium [16].....	20
Abbildung 2.8: Gusseisendiagramm nach MAURER [4]	21
Abbildung 2.9: Strukturdiagramm nach F. Greiner und Th. Klingenstein [16].....	22
Abbildung 3.1: Ablaufschema zur Erstellung des Probenstückes	28
Abbildung 3.2: Ausschnitt aus einem Schmelzblatt.....	29
Abbildung 3.3: Thermoelement zur Bestimmung des Silizium- und Kohlenstoffgehaltes	31
Abbildung 3.4: Abgegossene Proben für die Auswertung, inkl. Speiser, Lauf und Filter	32
Abbildung 3.5: Probenstab für den Zugversuch gemäß EN 1563	33
Abbildung 3.6: Erstellung von Norm-Zugstäben aus der Probe	33
Abbildung 3.7: Zugprüfmaschine am ÖGI Leoben	34
Abbildung 3.8: typisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm	34
Abbildung 3.9: Fertiger Schliff für die Untersuchung.....	35
Abbildung 3.10: Verfahrensschema zur Erstellung eines Schliffes	36
Abbildung 3.11: Lichtmikroskop am ÖGI Leoben.....	37
Abbildung 3.12: Rasterelektronenmikroskop am Lehrstuhl für Eisen-Stahl-Metallurgie.....	38
Abbildung 4.1: Bruchdehnung über den jeweiligen Siliziumgehalt	42
Abbildung 4.2: Zugfestigkeit über den jeweiligen Siliziumgehalt	43
Abbildung 4.3: Streckgrenze über den jeweiligen Siliziumgehalt	43
Abbildung 4.4: Ungeätzte Schlifffläche, gute Kugelausbildung	46
Abbildung 4.5: Geätzte Schlifffläche, ferritisches Gefüge, gute Kugelausbildung.....	46
Abbildung 4.6: Ungeätzte Schlifffläche, Graphitentartungen	47

Abbildung 4.7: Ungeätzte Schliifffläche, Entartung des Graphits	47
Abbildung 4.8: Geätzte Schliifffläche, ferritisches Gefüge, unvollständige Ausbildung der Kugeln	48
Abbildung 4.9: Kugelbildung im Inneren	49
Abbildung 4.10: Geätzte Schliifffläche, ferritisches Gefüge, Chunkygraphit	49
Abbildung 4.11: Lamellenbildung am Rand	50
Abbildung 4.12: Kugelbildung im Inneren	50
Abbildung 4.13: Geätzte Schliifffläche, Perlitbildung	51
Abbildung 4.14: Ungeätzte Schliifffläche, Kugelbildung	52
Abbildung 4.15: Geätzte Schliifffläche, teilweise Perlitbildung	52
Abbildung 4.16: Genauere Betrachtung des Perlites, Karbidanteile	53
Abbildung 4.17: Ungeätzte Schliifffläche, Kugelbildung	54
Abbildung 4.18: Geätzte Schliifffläche, Perlitbildung	54
Abbildung 4.19: Genauere Betrachtung des Perlits	55
Abbildung 4.20: Genauere Betrachtung des Perlits, Karbidbildung	55
Abbildung 4.21: Ungeätzte Schliifffläche, Kugelbildung	56
Abbildung 4.22: Geätzte Schliifffläche, Graphitentartungen	56
Abbildung 4.23: Geätzte Schliifffläche, Ferritbildung	57
Abbildung 4.24: Ungeätzte Schliifffläche, Störung der Kugelbildung	58
Abbildung 4.25: Geätzte Schliifffläche, Hemmung der Kugelbildung, ferritisches Gefüge	58
Abbildung 4.26: Ungeätzte Schliifffläche, mangelnde Kugelbildung aufgrund von Al-Anteilen	59
Abbildung 4.27: Ungeätzte Schliifffläche, schlechte Kugelbildung	59
Abbildung 4.28: Ungeätzte Schliifffläche, schlechte Kugelausbildung	60
Abbildung 4.29: Ungeätzte Schliifffläche, Ferritbildung, unvollständige Kugelausbildung	60
Abbildung 4.30: Ungeätzte Schliifffläche, Kugelbildung	61
Abbildung 4.31: Geätzte Schliifffläche, Ferrit-/ Perlitbildung	61
Abbildung 4.32: Ungeätzte Schliifffläche, Kugelbildung	62
Abbildung 4.33: Lamellenbildung in der Mitte	62
Abbildung 4.34: Geätzte Schliifffläche, Ferrit-/ Perlitbildung	63

Abbildung 4.35: Geätzte Schlieffläche, Perlitbildung, Karbidbildung	63
Abbildung 4.36: Allgemeine Betrachtung	64
Abbildung 4.37: Genauere Betrachtung, Sprödbruch	65
Abbildung 4.38: Allgemeine Betrachtung	66
Abbildung 4.39: Kugelausbildung und Korngrenzen	66
Abbildung 4.40: Allgemeiner Überblick	67
Abbildung 4.41: Genauere Betrachtung der Graphitansammlungen	68
Abbildung 4.42: Sprödbruch außerhalb der Ansammlung des Graphits.....	68
Abbildung 4.43: Allgemeiner Überblick	69
Abbildung 4.44: Genauere Betrachtung, Sprödbruch	69
Abbildung 4.45: Allgemeine Betrachtung	70
Abbildung 4.46: Molybdän- Einschluss, Sprödbruch	70
Abbildung 4.47: Überblick.....	71
Abbildung 4.48: Kugelbetrachtung.....	72
Abbildung 4.49: Keine vollständige Ausbildung	72
Abbildung 4.50: Allgemeine Aufnahme	73
Abbildung 4.51: Unvollständige Kugelausbildung, Perlit im oberen Bereich der Abbildung...73	
Abbildung 4.52: Überblick.....	74
Abbildung 4.53: Genauere Betrachtung, Karbide mit Perlitumrandung	74
Abbildung 5.1: Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse	77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Ursprüngliche Normsorten und neu in die DIN EN 1563 aufgenommene Werkstoffe, bezogen auf eine Wandstärke von bis zu 30 mm [1] [3].....	10
Tabelle 2.2: Aufbau von Kurznamen für Gusseisen [10]	16
Tabelle 2.3: Bezeichnungen für die Graphitstruktur [10]	16
Tabelle 2.4: Beispiele für die Mikro- oder Makrostruktur [10]	16
Tabelle 3.1: Einsatz- und Zuschlagsstoffe für die Versuchsreihen	30
Tabelle 3.2: Betriebswerte des Multifrequenzinduktionsofens.....	31
Tabelle 4.1: Probennummer und dazugehöriges Legierungselement	40
Tabelle 4.2: Geforderte Zusammensetzung der Schmelze laut Norm (Richtwerte) [12]	41
Tabelle 4.3: Chemische Analysen der Schmelze und Sättigungsgrad	41
Tabelle 4.4: Mechanische Kennwerte; Zugfestigkeit [MPa], Streckgrenze $R_{p0,2}$ [MPa], Bruchdehnung A [%], für Bauteile mit einer Wandstärke von < 30mm	42
Tabelle 4.5: Perlitanteil der einzelnen Proben	44
Tabelle 4.6: Auswertung der Kugelform und -dichte	45
Tabelle 5.1: Auswertung der Ergebnisse aus Kapitel 4	75
Tabelle 5.2: Erzielte Ergebnisse der geeigneten Legierungselemente.....	77

