



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



---

## **Masterarbeit**

Thema:

# ***Hochsiliziumhaltiges Gusseisen mit Kugelgraphit für Großmotoren- Zylinderkopfanwendungen***

Ersteller:

**Patrick Neuhauser**

Betreuer:

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

Leoben, 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.

Leoben, 2016

# Danksagung

Während der Verfassung dieser Arbeit konnte ich auf die Unterstützung und Geduld einer Vielzahl von Personen vertrauen. Dieses Umfeld machte es mir möglich in arbeitsintensiven Zeiten den Fokus auf diese Arbeit zu legen.

Besonderen Dank bin ich Herrn Univ.-Prof. Dr. Dipl.-Ing Peter Schumacher verpflichtet, der mir erst die Möglichkeit gab diese Arbeit am Lehrstuhl für Gießereikunde sowie am Österreichischen Gießerei Institut zu verfassen.

Auch meinen beiden Betreuern, Dipl.-Ing. Dr. Gert Gassner vom ÖGI Leoben sowie Dipl.-Ing. Matej Smolnikar seitens der AVL List GmbH in Graz, bin ich sehr dankbar für ihre konstruktiven Beiträge und das freundschaftliche Arbeitsklima während meiner Zeit in beiden Institutionen.

Nicht unerwähnt soll das Engagement von Herrn Dipl.-Ing. Dr. Johann Blaha bleiben, der mir die finanziellen Rahmenbedingungen für das Zustandekommen eines solchen Projektes schaffte.

Herrn Albert Jahn, Metallograph vom ÖGI Leoben, möchte ich auf diesem Weg Dank aussprechen für seine sehr lehrreichen Inhalte auf dem Gebiet der Metallographie, die er mit mir teilte.

Nicht zuletzt möchte ich meinen Eltern danken, die mich während des Studiums in allen Belangen unterstützten und mir so den nötigen Rückhalt schafften.

## Kurzfassung

Der Europäische Normenausschuss für Gießereiwesen hat eine neue Werkstoffgruppe, jene der hochfesten, mischkristallverfestigten Gusseisen mit Kugelgraphit in die Normung EN 1563:2011 aufgenommen. Diese Werkstoffe weisen ein überwiegend ferritisches Grundgefüge auf, welches durch Silizium mit Gehalten zwischen 3 und 4,3 % mischkristallverfestigt ist. Die Vorteile für den Anwender gegenüber den üblichen Sorten liegen in einer deutlich höheren Streckgrenze bei gleichzeitig ansteigender Bruchdehnung. Darüber hinaus resultieren eine gleichmäßigere Härteverteilung sowie eine bessere spanende Bearbeitbarkeit von Bauteilen. Die besseren Werkstoffeigenschaften der siliziumlegierten Sorten ermöglichen im Zuge der Gussteildimensionierung durch Wandstärkenreduktionen ein beachtliches Maß an Leichtbaupotential auszuschöpfen. Im Motorenbau ist seit einigen Jahrzehnten ein stetiger Anstieg von Zylinderspitzen- sowie Nutzmitteldrücken zu verzeichnen. Dieser Trend wirkt unter anderem beeinflussend auf den thermodynamischen Wirkungsgrad, Verbrauch und Emissionen. Gleichzeitig entstehen dadurch erhebliche Belastungen der Motorenkomponenten, denen es anhand werkstofftechnologischer Ansätze entgegenzuwirken gilt. Da es sich aktuell bei den mischkristallverfestigten Sorten um eher wenig verbreitete Werkstoffe handelt, ist es von großer Bedeutung Werkstoffkennwerte, insbesondere im Hochtemperaturbereich sowie unter zyklischer Belastung für betriebsfestigkeitsrelevante Dimensionierungen von Bauteilen bereitzustellen. So beschäftigt sich diese Arbeit im Wesentlichen mit der Werkstoffprüfung an im Schwerkraft-Sandgussverfahren hergestellten Proben. Die daraus gewonnenen Ergebnisse sollen Aussagen zur Anwendbarkeit der hochfesten, siliziumlegierten Sorten als Zylinderkopfwerkstoff für Großmotoren liefern.

## Abstract

The standards committee for founding extended the topical Ductile Cast Iron standard, EN 1563:2011, with high-strength, solid solution hardened materials. These nodular graphite castings show a ferritic matrix predominantly, solid solution hardening is carried out with silicon in the range between 3 to 4,3 weight-%. The main advantage for a foundry in comparison to conventional grades is the increase of yield strength as well as an increase of elongation at fracture. Furthermore these materials provide a more uniform hardness distribution and better machining properties. The better material properties of silicon-alloyed grades offer huge opportunities during cast part development in terms of light weight potential because of wall thickness reduction. Since several decades the peak-fire pressure as well as the mean effective pressure increases steadily in internal combustion engines. This trend effects among other things the thermodynamic degree of efficiency, emissions and fuel consumption. Simultaneously engine components are loaded with high stresses, which have to be encountered by modern material solutions. The solid solution hardened grades are not very widespread today. Thereby it is of major importance to provide material data sets, especially high temperature behaviour and fatigue data under cyclic loads. The aim of this thesis is the examination of silicon-alloyed samples which are produced by gravity sand casting. The results should declare the adaptability of the solid solution hardened, silicon-alloyed castings for heavy duty cylinder head applications.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung.....</b>	<b>- 4 -</b>
1.1 Ausgangssituation .....	- 4 -
1.2 Motivation für den Motorenbau .....	- 5 -
<b>2 Theoretische Grundlagen.....</b>	<b>- 9 -</b>
2.1 Einfluss des Silizium-Gehaltes.....	- 9 -
2.1.1 Grundlagen zur Matrixgefügeausbildung in Gusseisenwerkstoffen .....	- 9 -
2.1.2 Einfluss des Siliziums auf die mechanischen Eigenschaften in Gusseisenwerkstoffen .....	- 13 -
2.1.3 Einfluss des Siliziums auf die Matrixgefügeausbildung in Gusseisenwerkstoffen .....	- 20 -
2.2 Bestimmung von statistisch abgesicherten Wöhlerlinien.....	- 22 -
2.2.1 Prinzipielle Durchführung von Schwingfestigkeits- und Ermüdungsversuchen.....	- 22 -
2.2.1.1 Random Fatigue Limit Model (RFL).....	- 24 -
2.2.1.2 Fatigue Limit Model (FLM).....	- 24 -
2.2.1.3 Verteilungsfunktionen .....	- 26 -
2.2.1.4 Rechnerische Ermittlung der Parameter .....	- 29 -
<b>3 Experimentelle Methoden.....</b>	<b>- 31 -</b>
3.1 Herstellen der Gussformen .....	- 31 -
3.2 Abgüsse .....	- 32 -
3.2.1 Beschreibung der Einsatzmaterialien.....	- 32 -
3.2.1.1 Sorelmetal TF 10.....	- 33 -
3.2.1.2 ÖGI Kreislaufmaterial .....	- 33 -
3.2.1.3 Elektrodengraphitgrieß .....	- 33 -
3.2.1.4 Ferrolegierungen FeSi90 und FeSi75.....	- 33 -
3.2.1.5 Reinkupfer .....	- 34 -
3.2.2 Ablauf zur Herstellung von Sphärogussschmelzen .....	- 34 -
3.2.3 Einstellen des Kohlenstoffgehaltes bei erhöhtem Siliziumgehalt .....	- 37 -

3.3 Versuchsplan und Probenbezeichnung.....	- 38 -
3.4 Metallographische Untersuchungen.....	- 41 -
3.4.1 Herstellen der Prüflinge .....	- 41 -
3.5 Zugversuche bei Raumtemperatur nach DIN EN ISO 6892-1 .....	- 43 -
3.5.1 Probengeometrie .....	- 43 -
3.5.2 Ermittlung der mechanischen Kennwerte bei Raumtemperatur.....	- 44 -
3.6 Warmzugversuche nach DIN EN ISO 6892-2 .....	- 44 -
3.6.1 Probengeometrie .....	- 44 -
3.6.2 Ermittlung der mechanischen Kennwerte bei erhöhten Temperaturen-	45
-	-
3.7 Dauerfestigkeitsuntersuchungen (HCF).....	- 45 -
3.7.1 Umlaufbiegeprüfung nach DIN 50113 .....	- 46 -
3.7.1.1 Probengeometrie .....	- 46 -
3.7.1.2 Dauerfestigkeitsuntersuchungen an der Legierung GJS 500-14-	46 -
3.7.1.3 Dauerfestigkeitsuntersuchungen an der Legierung GJS 450-10-	46 -
3.7.2 Zug-Druck-Wechselprüfung nach DIN 50100.....	- 47 -
3.7.2.1 Probengeometrie .....	- 47 -
3.7.2.2 Dauerfestigkeitsuntersuchungen an der Legierung GJS 500-14-	47 -
3.7.2.3 Dauerfestigkeitsuntersuchungen an der Legierung GJS 450-10-	48 -
<b>4 Ergebnisse.....</b>	<b>- 49 -</b>
4.1 Metallographische Untersuchungen.....	- 49 -
4.2 Zugversuche bei Raumtemperatur nach DIN EN ISO 6892-1 .....	- 51 -
4.2.1 Ergebnisse der Y2-Zugversuchsproben.....	- 51 -
4.2.2 Prüfen der Probenhomogenität der Platten .....	- 52 -
4.3 Ergebnisse der Warmzugversuche nach DIN EN ISO 6892-2 .....	- 52 -
4.4 Dauerfestigkeitsuntersuchungen (HCF).....	- 56 -
4.4.1 Umlaufbiegeprüfung nach DIN 50113 der Sorte GJS 500-14.....	- 56 -
4.4.2 Umlaufbiegeprüfung nach DIN 50113 der Sorte GJS 450-10.....	- 58 -
4.4.3 Vergleich der Umlaufbiegeversuche .....	- 59 -



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

In die aktuell gültige europäische Norm für Gusseisen mit Kugelgraphit, EN 1563:2011, wurden gegenüber EN 1563:2005-10 neue Sorten von mischkristallverfestigten ferritischen Gusseisen mit Kugelgraphit aufgenommen. Dabei handelt es sich um Gusswerkstoffe mit einem überwiegend ferritischen Grundgefüge welches durch Silizium mischkristallverfestigt ist. Diese ferritische Matrix darf einen maximalen Perlitanteil von 5 % enthalten und die Menge des freien Zementits soll dabei 1 % nicht überschreiten [1].

Tabelle 1 stellt die genormten mechanischen Festigkeitskennwerte der EN 1563:2011 gegenüber. Schattierte Bereiche kennzeichnen die „neuen ferritischen Sorten“ EN-GJS-450-18, EN-GJS-500-14 sowie EN-GJS-600-10.

Tabelle 1: Vergleich der mechanischen Eigenschaften von Gusseisen mit Kugelgraphit lt. DIN EN 1563:2011 [1].

	GJS-450-10	GJS-450-18	GJS-500-7	GJS-500-14	GJS-600-3	GJS-600-10
Gefüge	Ferrit	Ferrit	Ferrit/ Perlit	Ferrit	Perlit /Ferrit	Ferrit
Zugfestigkeit [MPa]	450	450	500	500	600	600
Streckgrenze [MPa]	310	350	320	400	379	450
Dehnung [%]	10	18	7	14	3	10

In der folgenden Abbildung 1 sind die Streckgrenzen der Normsorten graphisch als vertikale Balken gegenübergestellt. Die neuen ferritischen GJS Werkstoffe zeichnen sich durch eine signifikante Erhöhung der  $R_{p0,2}$  Kennwerte gegenüber der vergleichbaren Standardsorte aus. So kann beispielsweise bei der GJS-500-14 Normsorte ein Anstieg von 25 % gegenüber der Vergleichslegierung 500-7 verzeichnet werden.

Abbildung 2 zeigt die Gegenüberstellung der Bruchdehnungen unterschiedlicher Sorten. Hier kommt es bei der mischkristallverfestigten GJS-500-14 Legierung zu einem 100 %-igen Anstieg gegenüber der ferritisch/perlitischen 500-7 Sorte.

Die neu aufgenommenen ferritischen Sphärogussorten zeigen dabei seitens der Normung schon einen maßgeblichen Anstieg der statischen Festigkeitskennwerte und stellen somit ein hohes Potential für zukünftige Motorenwerkstoffe dar.

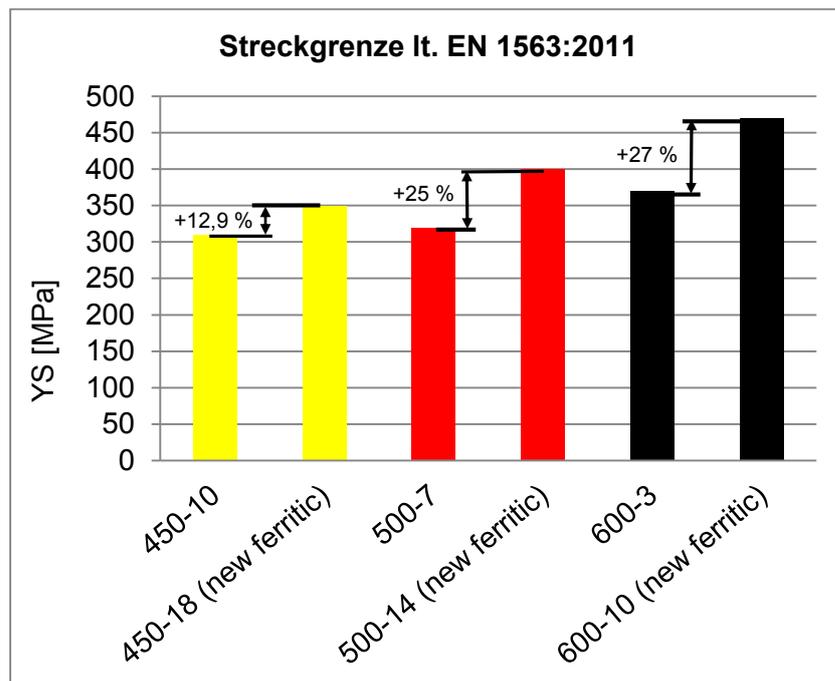


Abbildung 1: Gegenüberstellung der Streckgrenzen unterschiedlicher GJS Sorten [1].

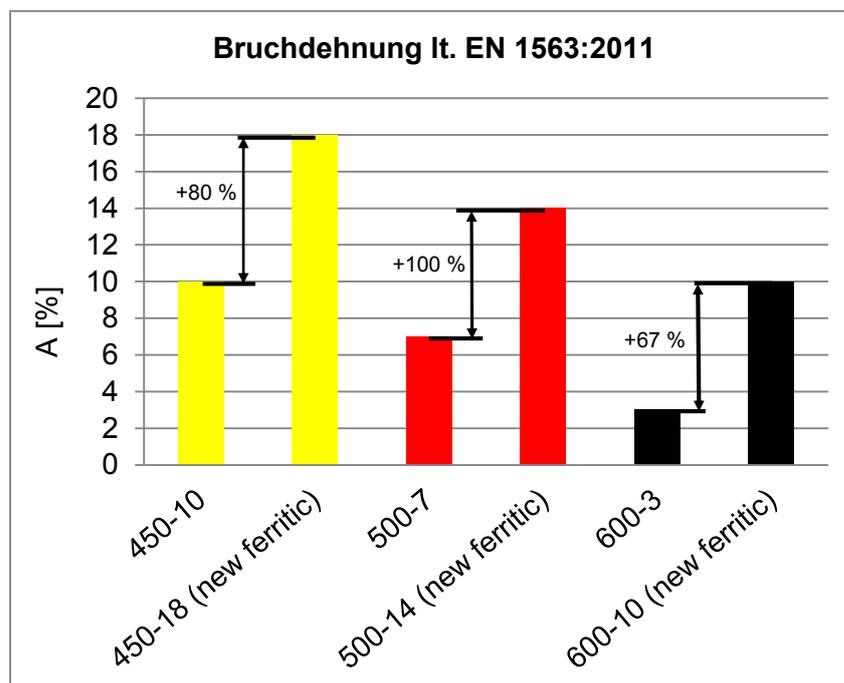


Abbildung 2: Gegenüberstellung der Bruchdehnungen unterschiedlicher GJS Sorten [1].

## 1.2 Motivation für den Motorenbau

Die Entwicklung von leistungsfähigen Materialien spielt eine Schlüsselrolle im modernen Motorenbau. Die Einhaltung strenger Emissionsvorschriften, die Umsetzung von Leichtbau-

und Downsizingkonzepten bei gleichzeitiger Leistungssteigerung und Kraftstoffersparnis – die treibenden Kräfte im Motorenentwicklungsprozess – sind nur durch permanente Weiterentwicklung der entsprechenden Werkstoffe realisierbar.

Der Trend Motoren-Zylinderköpfe aus Aluminium-Gusswerkstoffen zu realisieren ist im Sinne des Leichtbaugedanken eine sehr gute und bereits global bewährte Strategie, vor allem im PKW Motorensegment. Diesem Werkstoff sind bei hohen Leistungsdichten und damit verbundenen hohen periodisch wechselnden Belastungen der Motorbauteile allerdings festigkeitsmäßig Grenzen gesetzt. Gusseisenlegierungen mit vorteilhaften spezifischen Streckgrenzen bei erhöhten Temperaturen sowie erreichbare Höchstwerte an spezifischen Wechselfestigkeitswerten eignen sich hervorragend betriebsfestigkeitsrelevante Problemstellungen werkstofftechnologisch zu lösen. Dies gilt insbesondere bei stationären Motoren, bei denen prinzipiell nur die bewegten Teile dem Leichtbau unterworfen sind.

Die Anhebung des Spitzendrucks  $p_{\max}$  als auch die Steigerung des Verdichtungsverhältnisses  $\epsilon$  haben wesentlichen Einfluss auf den thermodynamischen und indizierten Wirkungsgrad. Aus dieser bekannten thermodynamischen Tatsache kann der Schluss abgeleitet werden, dass eine Erhöhung des Spitzendrucks bei konstantem  $\epsilon$  eine Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses bei konstantem  $p_{\max}$  und eine Kombination eines erhöhten  $\epsilon$  und  $p_{\max}$  einen positiven Einfluss auf den thermodynamischen Wirkungsgrad ausüben [2].

Abbildung 3 dokumentiert die historische Entwicklung des Verdichtungsverhältnisses und des maximalen Zylinderdruckes von Nutzfahrzeug (Nfz)- und Personenkraftwagen (Pkw)- Dieselmotoren verschiedener Hersteller. Beide motorischen Basiskennwerte nahmen bei Nfz-Applikationen während der letzten Jahrzehnte signifikant zu. Auffällig ist aber der gegenläufige Trend beim Verdichtungsverhältnis ausgeführter Pkw-Dieselmotoren mit Einführung der Direkteinspritzung. Höhere Aufladegrade und zunehmende Leistungsdichten bei gleichzeitiger Begrenzung der mechanischen Belastung des Triebwerkes erforderten hier in den letzten Jahren eine deutliche Zurücknahme des Kompressionsverhältnisses von ursprünglich etwa 21 bis 23 Einheiten auf heute etwa 17 bis 18 Einheiten. Eine weitere Reduktion auf Werte bis etwa  $\epsilon=15$  bis 16 verbessert zusätzlich den Zielkonflikt zwischen Stickoxid und Partikel. Gleichzeitig verschärft sich allerdings die Problematik hinsichtlich Kaltstart und Kaltlaufeigenschaften. Die verfahrensbedingt erforderliche Zurücknahme des Kompressionsverhältnisses  $\epsilon$  auf etwa 14-16 Einheiten lassen Verbrauchseinbußen von etwa 3 bis 4% erwarten. Darüber hinaus müssen geeignete Maßnahmen zur Sicherstellung akzeptabler Kaltstarteigenschaften gefunden werden [2].

Lag hingegen die Verdichtung bei Nfz-Motoren Mitte der achtziger Jahre im Mittel noch bei etwa 16 Einheiten, verzeichnete man bereits eine Dekade später bereits einen Wert von 17 Einheiten bei anhaltend progressiver Tendenz. Ein analoger Aufwärtstrend ist für den Zünddruck zu verzeichnen. Neben positiven Auswirkungen auf das Kaltstartverhalten lassen sich durch Anhebung beider Größen emissionsneutrale Verbesserungen des Wirkungsgrades beziehungsweise in einer Umkehrstrategie eine weitgehend verbrauchsneutrale Stickoxid-Reduktion darstellen [2].

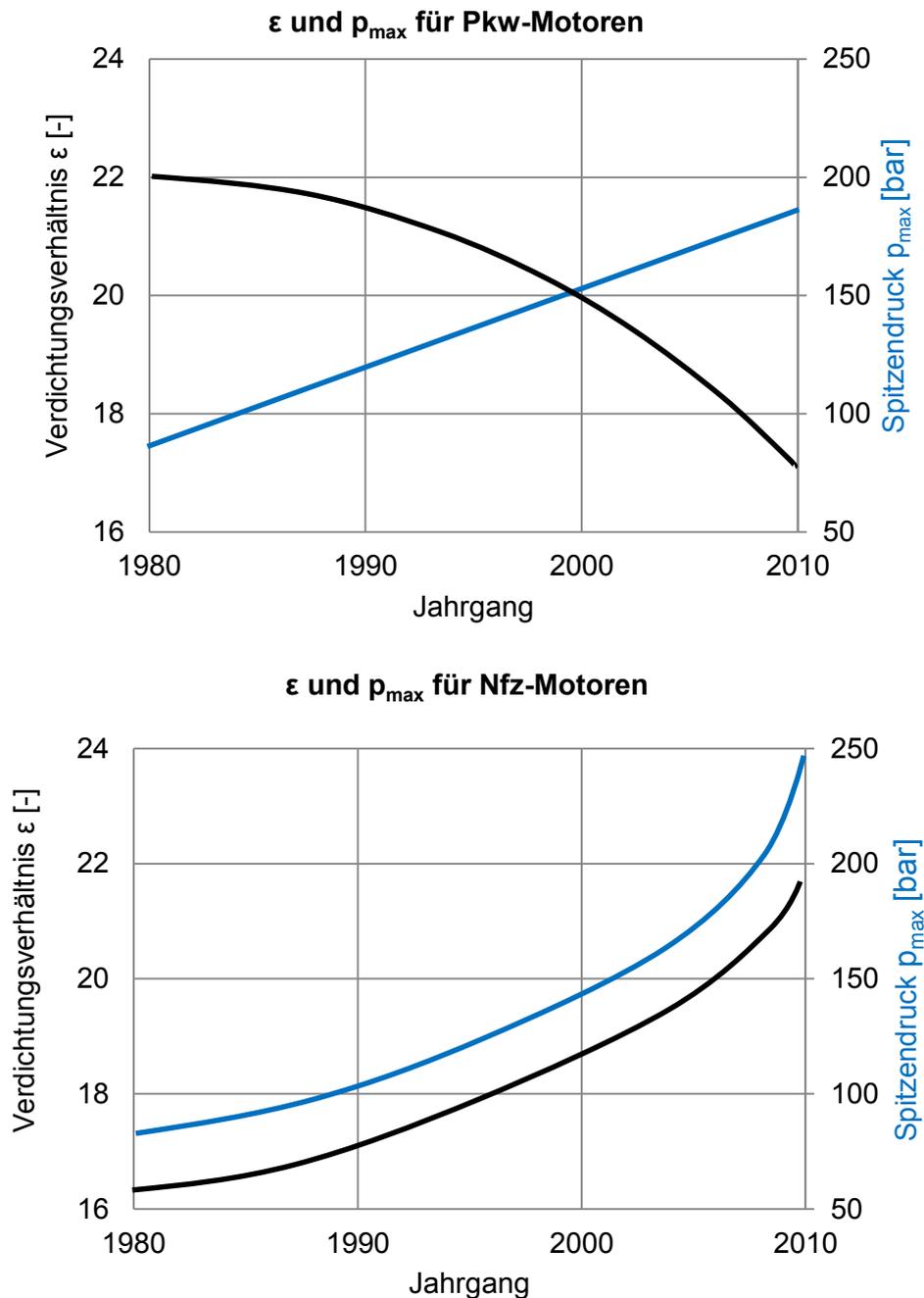


Abbildung 3: Entwicklung des Verdichtungsverhältnisses und der Spitzendrücke während der letzten Jahrzehnte [2].

Resultierend aus steigenden Spitzen- sowie Nutzmitteldrücken ergeben sich hohe Bauteilbelastungen welchen mittels geeigneter Werkstoffwahl sowie konstruktiven Maßnahmen entgegenzuwirken ist [3] Die Kombination aus hoher Streckgrenze und Dehnung bei gleichzeitig zu erwartender hoher Wechselfestigkeiten der mischkristallverfestigten Gussorten ermöglichen es die Werkstoffpalette im Motorenbau zu erweitern.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Einfluss des Silizium-Gehaltes

Im Folgenden sollen die theoretischen Grundlagen von Gusseisen-Zweistoffsystemen sowie der Einfluss des Siliziums auf Sphärogusslegierungen vorgestellt werden. Als Basis dient eine umfassende Literaturrecherche.

#### 2.1.1 Grundlagen zur Matrixgefügeausbildung in Gusseisenwerkstoffen

Gusseisenwerkstoffe sind Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit mehr als 2,0 Masse-% Kohlenstoff, deren Formgebung durch Gießen erfolgt. Obwohl die in der Praxis Verwendung findenden stabil erstarrenden Gusseisensorten durchwegs signifikante Gehalte an Silizium und Phosphor enthalten, stellt das in Abbildung 4 wiedergegebene stabile Zustandsdiagramm Eisen-Kohlenstoff mit gefügemäßiger Kennzeichnung die Basis für das prinzipielle Verständnis der bei diesen Werkstoffen auftretenden Phasen und Gefügezustände dar [4].

Man kann davon ausgehen, dass bei sehr kleinen Abkühlgeschwindigkeiten und/oder bei Anwesenheit von Silizium kein Eisenkarbid entsteht. Wie ein Vergleich des stabilen Fe-C mit dem metastabilen Fe-Fe<sub>3</sub>C Diagramm zeigt, sind die eutektische und die eutektoide Gerade im stabilen System gegenüber dem metastabilen System zu etwas höheren Temperaturen verschoben. Der eutektische Punkt tritt bei 4,25 Masse-% C, der eutektoide Punkt bei 0,7 Masse-% C auf. Die Löslichkeitsgrenze der  $\gamma$ -Mischkristalle für Kohlenstoff ist auf etwa 2,0 Masse-% verringert und die Liquiduslinie der übereutektischen Legierungen zu höheren Temperaturen verschoben [4,5].

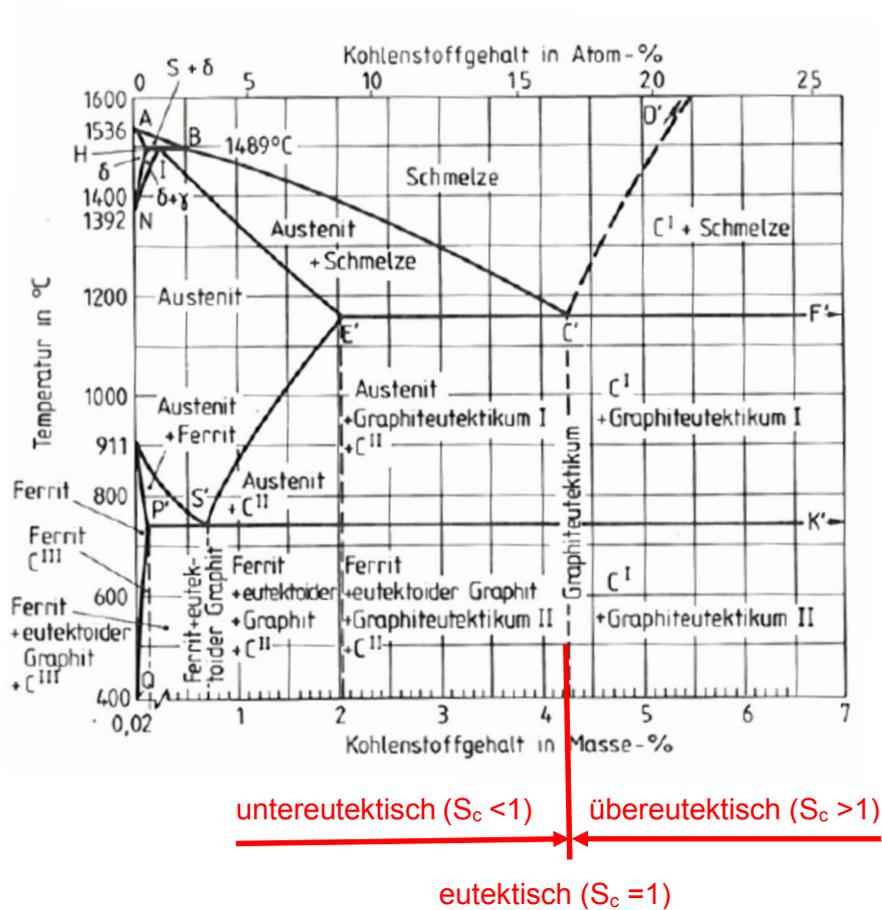


Abbildung 4: Das stabile Fe-C-Diagramm mit gefügemäßiger Kennzeichnung [4].

Das Zulegieren von Silizium führt zu einer Verschiebung der Punkte C', E' und S' zu kleineren Kohlenstoffgehalten und zu einer merklichen Anhebung der eutektoiden Geraden.

Die durch Silizium und auch durch Phosphor bewirkte Verschiebung der eutektischen Kohlenstoffkonzentration der Eisenlegierungen wird in der Gießereitechnik durch den sogenannten Sättigungsgrad beschrieben [4]:

$$S_c = \frac{\text{Masse} - \%C}{4,25 - 0,31 \text{ Masse} - \%Si - 0,27 \text{ Masse} - \%P}$$

$S_c=1$  bedeutet eine eutektische Legierung,  $S_c>1$  eine übereutektische Legierung und  $S_c<1$  eine untereutektische Legierung.

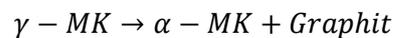
### Übereutektische Legierung

Bei einer übereutektischen Legierung bilden sich, gezeigt in Abbildung 4, aus der Schmelze bei Erreichen der Liquiduslinie C'D' primäre Graphitkristalle. Die Restschmelze

verarmt dadurch an Kohlenstoff. Bei 1153 °C enthält die Restschmelze 4,25 % C. Bei weiterer Temperaturabsenkung zerfällt die Restschmelze eutektisch gemäß der Reaktion [4]:



Dieses Gemenge wird Graphiteutektikum I genannt. Aus dem  $\gamma$ -MK entsteht bei sinkender Temperatur wegen der ihrer längs E´S´ abnehmenden Löslichkeit für Kohlenstoff weiterer Graphit C<sup>II</sup>, der sich an den primären und eutektisch entstandenen Graphitteilchen anlagert. Nach Unterschreiten der eutektoiden Temperatur von 738 °C zerfallen alle vorhandenen  $\gamma$ -MK mit 0,7 Masse-% C gemäß

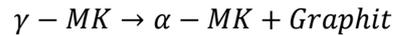


Dadurch geht das Graphiteutektikum I in das Graphiteutektikum II über. Bei weiterer Temperaturabsenkung nimmt dann lediglich noch der Kohlenstoffgehalt des Ferrits im Graphiteutektikum II ab, wodurch sich etwas C<sup>III</sup> bildet. Das Schliffbild bei Raumtemperatur lässt aber nur die groben primären Graphitlamellen und die eutektisch entstandenen feinen Graphitlamellen erkennen [4]. Die vom Autor [4] gewählte Bezeichnung Graphiteutektikum II für die eutektoide Umwandlung von Austenit in Ferrit und eutektoiden Graphit kann zu Verwechslungen führen. Da es sich bei der Darstellung des stabilen Eisen-Kohlenstoff-Schaubildes in Abbildung 4 um die Kennzeichnung von lichtmikroskopisch unterscheidbaren Gefügebestandteilen handelt, ist diese Bezeichnung „Eutektikum“ richtig. Eine eutektoide Umwandlung ist aus gefügemäßiger Betrachtung einer eutektischen gleichzusetzen obwohl die Umwandlung aus einer festen Phase hervorgeht.

### **Eutektische Legierung**

Eine eutektische Legierung mit 4,25 Masse-% C geht dagegen unmittelbar aus dem schmelzflüssigen Zustand in das Graphiteutektikum I über. Die Erstarrung erfolgt in sogenannten eutektischen Zellen aus Austenit und Graphit, die sich ausgehend von Kristallisationskeimen, nebeneinander aus der Schmelze bilden. Die eutektischen Zellen wachsen bis ihre Grenzen aneinander stoßen. Ihre mittlere Größe hängt daher von der Anzahl der Kristallisationskeime ab.

Bei Unterschreiten von 738 °C wandeln sich die im Eutektikum enthaltenen  $\gamma$ -MK gemäß



in Ferrit und eutektoiden Graphit um [4].

### **Untereutektische Legierung**

Bei einer untereutektischen Legierung bilden sich bei Erreichen der Liquiduslinie BC' aus der Schmelze zunächst primäre  $\gamma$ -MK. Dadurch reichert sich die Restschmelze an Kohlenstoff an. Nach Temperaturabsenkung besitzt bei 1153 °C die Restschmelze 4,25 Masse-% und der  $\gamma$ -MK-Anteil 2,0 Masse-% Kohlenstoff. Nach Unterschreiten der eutektischen Temperatur zerfällt die Restschmelze nach  $S \rightarrow \gamma - MK + Graphit$  in das eutektische Gemenge aus Graphit und Austenit (Graphiteutektikum I). Bei weiterer Temperaturabsenkung scheidet sich aus dem primär entstandenen  $\gamma$ -MK Kohlenstoff in Form von Sekundärgraphit aus. Gleichzeitig verliert auch der eutektisch entstandene Austenit Kohlenstoff. Bei jeder Temperatur zwischen 1153 °C und 738 °C bestimmt die Löslichkeitsgrenzlinie S'E' den in den  $\gamma$ -MK vorliegenden Kohlenstoffgehalt. Bei 738 °C wandeln sich die primären  $\gamma$ -MK bei Unterschreiten der Linie P'S'K' eutektoid in  $\alpha$ -MK und Graphit um [4].

Die Umwandlung von Gusseisenwerkstoffen nach dem stabilen System wird durch hinreichend hohe Si-Zusätze zu den Eisen-Kohlenstoff-Legierungen begünstigt [4]. Silicium bewirkt die Entstehung eines eutektischen Erstarrungs- bzw. eutektoiden Umwandlungsbereiches (Temperaturintervalls), in welchem Austenit, Schmelze und Graphit bzw. Ferrit, Austenit und Graphit koexistieren. Silizium verschiebt und erweitert diese Bereiche mit steigender Konzentration zu höherer Temperatur, wie Abbildung 5 zeigt. Bei Anwesenheit von Silizium beginnt die  $\gamma \rightarrow \alpha$  Umwandlung somit bei höherer Temperatur als im reinen Fe-C-System, wodurch die Kohlenstoffdiffusion bzw. die Ferritbildung erleichtert werden [6].

Von großer praktischer Bedeutung ist, dass man bei Gusseisenlegierungen durch gezielte Beeinflussung der Abkühlbedingungen den bei Raumtemperatur auftretenden Gefügestand beeinflussen kann [4]. Langsame Abkühlung (dickwandig) und Silizium erhöhen die eutektoide Temperatur und begünstigen daher die Ferritbildung [6].

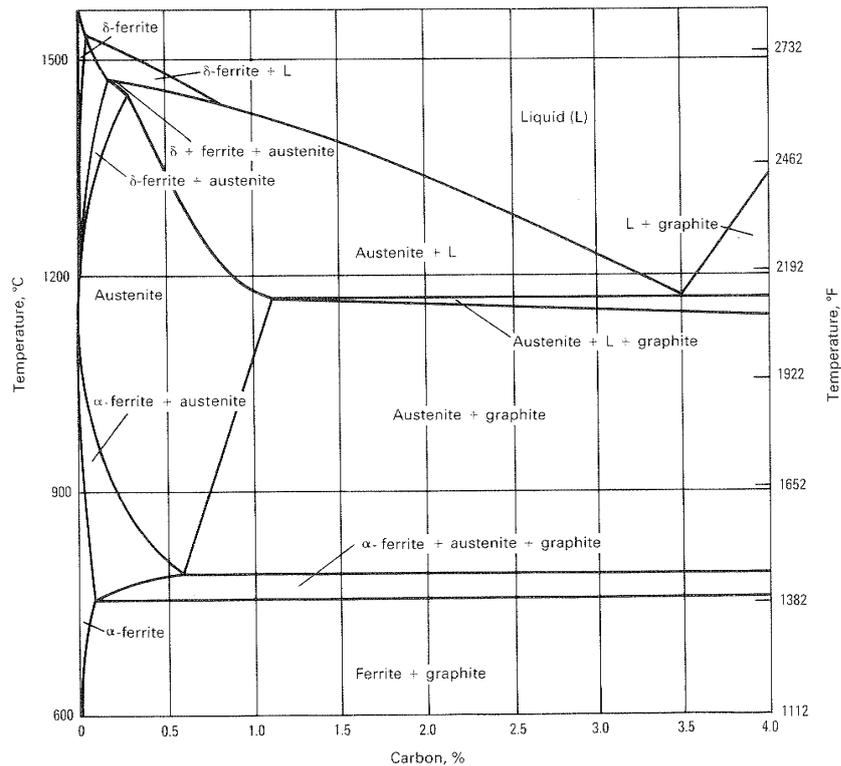


Abbildung 5: Das stabile Eisen-Kohlenstoff-Schaubild bei 2,5% Silizium [7].

### 2.1.2 Einfluss des Siliziums auf die mechanischen Eigenschaften in Gusseisenwerkstoffen

Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses von Silizium auf die mechanischen Eigenschaften im Gusszustand von siliziumhaltigen Sphärogusslegierungen wurden von W.H. White, L.P. Rice und A.R. Elsea [8] durchgeführt. Der Siliziumgehalt variiert dabei in einem Bereich von 2,5 bis etwa 6 % bei einem eingestellten Kohlenstoffäquivalent von ca. 4,3 %. Die Abbildung 6 zeigt eine graphische Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse, durchgeführt bei Raumtemperatur. Die Zugfestigkeit von siliziumhaltigen Sphärogusslegierungen erreichte demnach bei etwa 5 % ein Maximum. Die Bruchdehnung hingegen fällt von Beginn an (2,5 %) stark ab um ab einem Siliziumgehalt von 4 % abzuflachen. Einzig die Brinellhärte zeigte von Beginn an einen progressiven Trend mit zunehmendem Siliziumanteil.

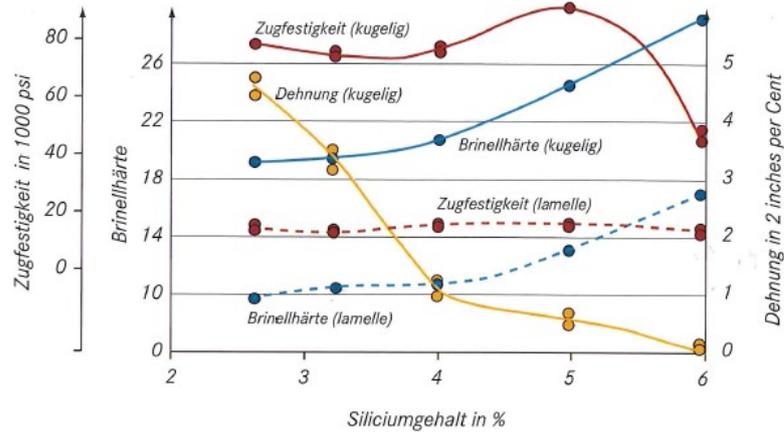


Abbildung 6: Verlauf der Zugfestigkeitswerte, der Dehnung und der Brinellhärte in Abhängigkeit vom Si-Gehalt [9].

Der Einfluss des Siliziumgehaltes auf die mechanischen Eigenschaften von Gusseisen mit Kugelgraphit wurde von C.F. Reynolds und H.F. Taylor [14] diskutiert. Versuchsschmelzen wurden dabei in der englischen Literatur als „Keel“-Blöcke bezeichnete Formen abgegossen und ein Siliziumgehalt im Bereich zwischen 1,39 und 4,38% eingestellt. Abbildung 7 stellt die Versuchsergebnisse der Zugfestigkeit, Streckgrenze, Brinellhärte sowie die Bruchdehnung über dem Siliziumgehalt dar. Demzufolge beobachteten die Autoren bei etwa 3 % Silizium ein Minimum der Streckgrenze, Zugfestigkeit sowie der Brinellhärte. Die Bruchdehnung war bei etwa 3,5 % Silizium am höchsten.

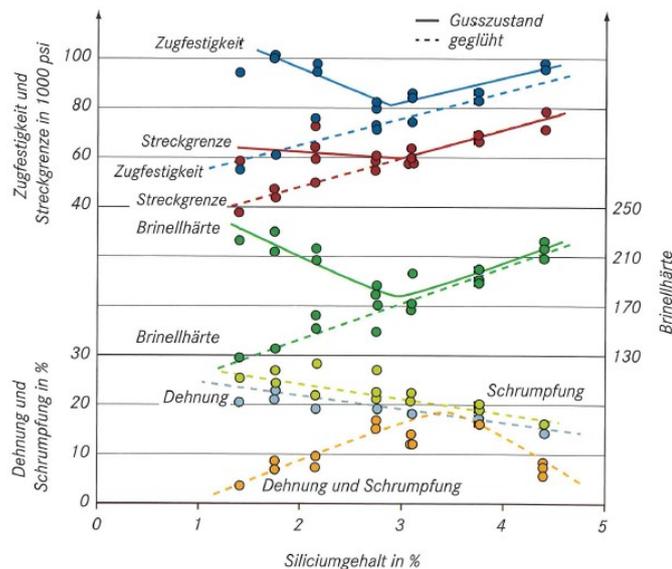


Abbildung 7: Mechanische Eigenschaften von Sphärogusslegierungen mit zunehmenden Si-Gehalt [9].

T.D. Yensen [10] studierte die Eigenschaften von kohlenstofffreien Eisen-Siliziumlegierungen im geglühten Zustand, dargestellt in Abbildung 8.

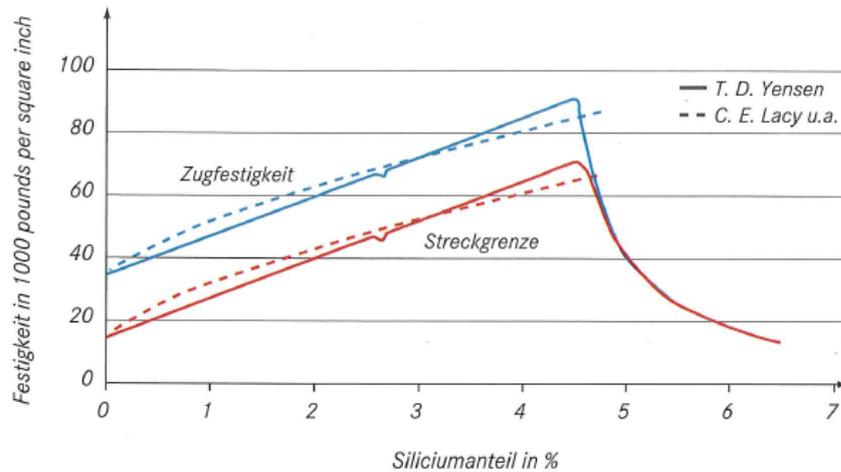


Abbildung 8: Einfluss von Silizium auf die Festigkeit von geglühten, kohlenstofffreien Eisen-Silizium-Legierungen [9].

Beobachtet wurde dabei ein Steilabfall der Zugfestigkeit und Streckgrenze bei einem Siliziumgehalt von etwa 4,5 %. Anhand dieser Untersuchungen konnte folgender Zusammenhang abgeleitet werden: Aufgrund des linearen Anstiegs der Festigkeitswerte bedingt eine Erhöhung des Siliziumanteils um 1 % eine Steigerung der Streckgrenze um 89,5 % sowie einen Anstieg der Zugfestigkeit von 34 % im geglühten Zustand [10].

C.E. Lacy und M. Gensamer [11] definierten einen formalen Zusammenhang zwischen der Festigkeitssteigerung von Ferriten und der Zugabe bestimmter Legierungselemente.

$$\Delta\sigma = K \cdot X^{0,71}$$

$\Delta\sigma$	Erhöhung der Festigkeit in 1000 psi
X	Menge des Legierungselements in Atom-%
K	Faktor ( Si=11; Mn= 7,0; Ni= 6,1)

Weiters zeigten die Autoren, dass die maximale Löslichkeit von Silizium in Ferriten bei 9 Atom-% lag, das etwa 4,72 Gew.-% gleichkam.

Ausführliche Untersuchungen zum Einfluss des Siliziumgehaltes auf die mechanischen Eigenschaften von Sphärogusslegierungen im Gusszustand wurden von J. Pelleg [12] durchgeführt. Ziel war es nicht nur den Einfluss des Siliziumgehaltes zu charakterisieren, sondern auch die beste Kombination aus Kohlenstoff und Silizium herauszufinden.

In Abbildung 9 sind die Zugfestigkeiten über dem Siliziumgehalt dargestellt. Jeder Kurvenzug soll dabei einem Kohlenstofflevel entsprechen.

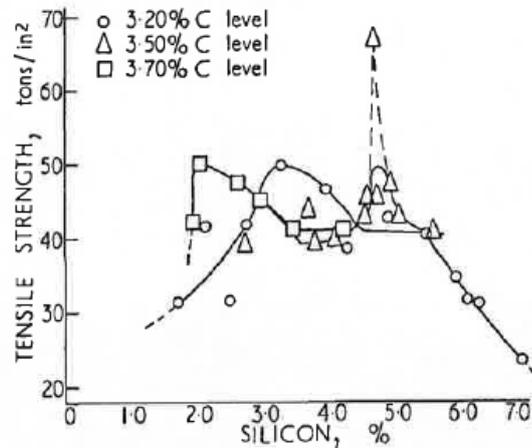


Abbildung 9: Zusammenhang zwischen der Zugfestigkeit und dem Siliziumgehalt für 3 unterschiedliche Kohlenstoffgehalte [12].

Die Kurven zeigen jeweils ein Maximum in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt bei unterschiedlichen Siliziumgehalten. Der Autor prognostizierte folgende Zusammenhänge zwischen den Zugfestigkeitswerten und steigendem Siliziumgehalt:

1. Maximalzugfestigkeit ist bei vollperlitischen Strukturen zu beobachten
2. Ein Abfall der Festigkeit ist auf die Zunahme des Ferritanteils zurückzuführen
3. Ein zweiter Festigkeitsanstieg entsteht durch die Mischkristallverfestigung. Die Festigkeit des zweiten Peaks ist vergleichbar mit jener bei vollperlitischer Matrix.
4. Ein nachfolgender Abfall der Festigkeit wird durch Versprödungseffekte verursacht. Der Autor [12] vermutete in diesem Zusammenhang, dass Siliziumkarbide eine wesentliche Rolle spielen, konnte deren Gegenwart jedoch nicht nachweisen.

Diese Phasenumwandlungen zeigten bei Untersuchungen hinsichtlich der Streckgrenze ein weniger sensibles Verhalten, sodass bei graphischer Darstellung nur jener Peak, welcher auf mischkristallverfestigende Vorgänge in der Ferritmatrix zurückzuführen ist, beobachtet werden konnte. Abbildung 10 stellt die Verläufe der Streckgrenzen von Proben unterschiedlicher Kohlenstoffgehalte dar.

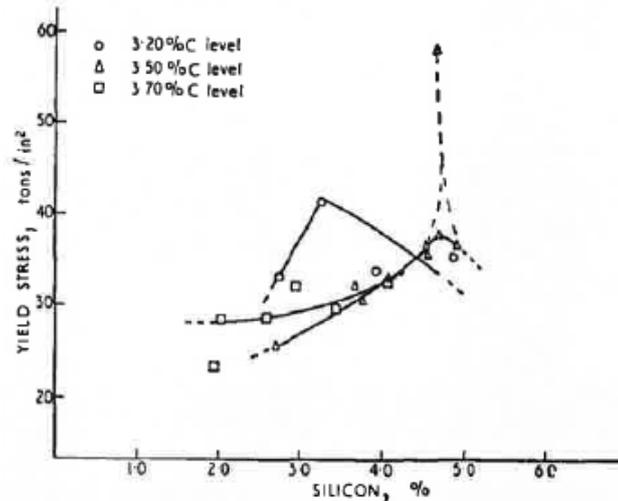


Abbildung 10: Einfluss des Siliziums auf die Streckgrenze [12].

Abbildung 11 illustriert den Einfluss des Siliziumgehaltes auf die Bruchdehnung unterschiedlicher Sphärogusslegierungen. Bekanntermaßen haben geringe Mengen einer spröden Phase einen maßgeblich größeren Effekt auf die Dehnung als auf die Festigkeit eines Materials. Gezeigt wurde dies anhand der Kurve für 3,2 % C. Sogar bei erheblichen Mengen an ferritischer Gefügebestandteile waren geringe Mengen freier Karbide in den Proben zu finden. Diese reduzierten die Bruchdehnungen drastisch. Bei höheren Kohlenstoffgehalten konnten Bruchdehnungen von 16 % bei einem Siliziumanteil von etwa 4% gemessen werden. Noch höhere Siliziumgehalte führten wiederum zu einem Versprödungseffekt und damit zu einem Steilabfall der Bruchdehnung.

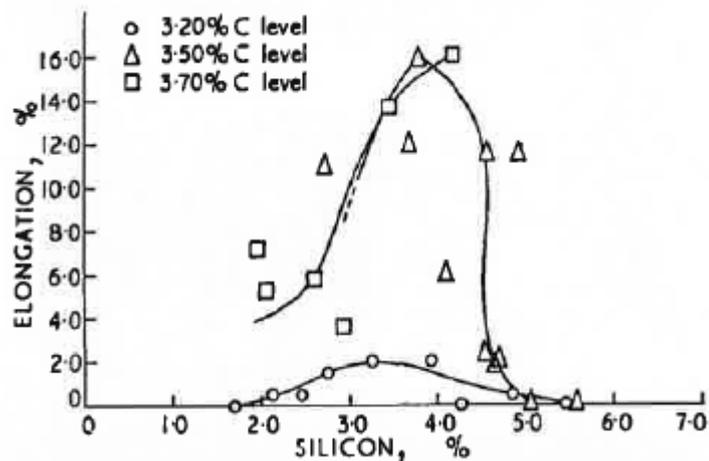


Abbildung 11: Einfluss des Siliziums auf die Dehnung [12]

Untersuchungen im Rahmen von [13] durch R. Schneidewind und H.H Wilder brachten weitere Erkenntnisse auf dem Gebiet der mechanischen Eigenschaften von

wärmebehandelten Gusseisen mit Kugelgraphit. In Abbildung 12 ist der Einfluss des Siliziumanteils auf die mechanischen Eigenschaften wärmebehandelter Gussproben dargestellt.

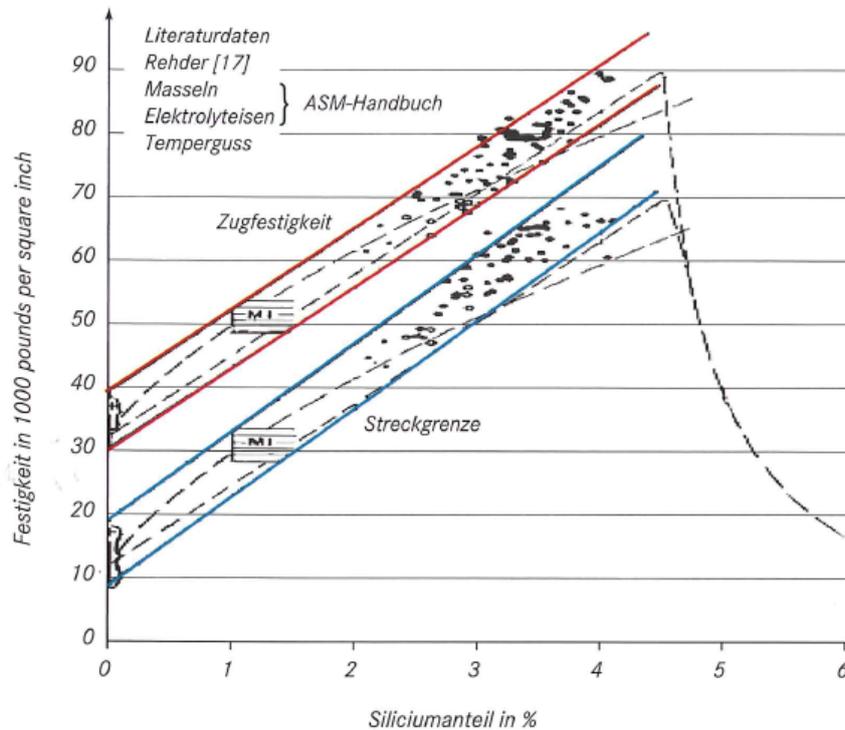


Abbildung 12: Einfluss des Siliziumgehaltes auf die Zugfestigkeit und Streckgrenze an wärmebehandelten Proben [9].

Es konnte ein annähernd linearer Anstieg der Zugfestigkeit und Streckgrenze bei steigendem Siliziumgehalt festgehalten werden. Die Autoren verglichen die Versuchsergebnisse mit den Erkenntnissen von T.D. Yensen [10] und C.E. Lacy, M. Gensamer [11], welche anhand strichlierter Kurvenverläufe im Diagramm sichtbar gemacht wurden.

H. Löblich und W. Stets [9] führten wissenschaftliche Untersuchungen von hochsiliziumhaltigen Sphärogusslegierungen hinsichtlich der Wirkung von Silizium auf die mechanischen Eigenschaften, Versprödungseffekte, Seigerungen uvm. durch. Dabei sollen die Versuchslegierungen einen Siliziumkonzentrationsbereich zwischen 2,4 bis 6 % aufspannen. Abbildung 13 stellt die Zugfestigkeit getrennt gegossener Y-Proben über dem Siliziumgehalt dar. Dabei mussten die fehlerhaften Werte der Ordinate der Originalbildquelle entsprechend den Versuchsergebnissen abgeändert werden, sodass die Auftragung der Zugfestigkeit mit 200 MPa anstelle von 100 MPa beginnt.

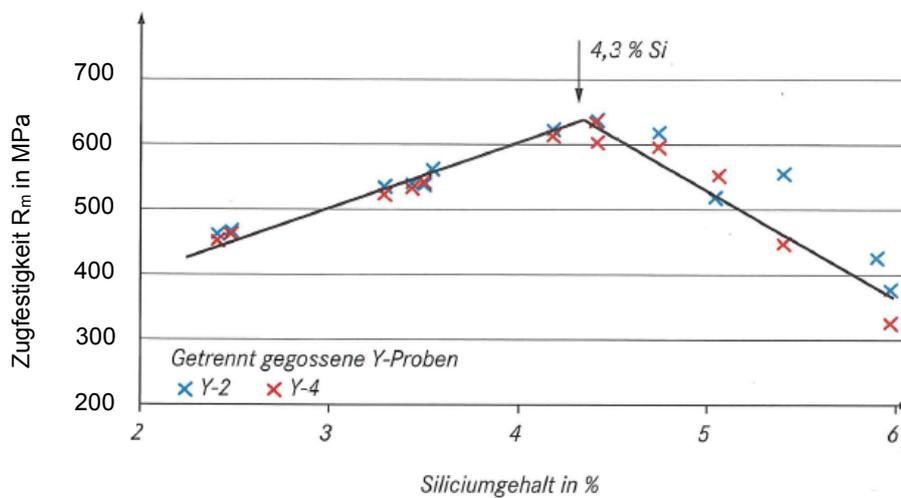


Abbildung 13: Zugfestigkeit in Abhängigkeit vom Siliziumgehalt [9] (Korrigierte y-Werte).

Die Zugfestigkeit strebt mit steigendem Siliziumgehalt einem Maximum bei 4,3 % Si zu, um danach wieder abzufallen. Es konnte eine Maximalzugfestigkeit von 620 MPa beobachtet werden.

Die Streckgrenze, dargestellt in Abbildung 14 erreicht ihren Maximalwert erst bei 4,6 % Silizium. Diese Erscheinung wurde bereits bei den duktilen EN-GJS-Werkstoffsorten, wie z.B. EN-GJS-400-18 beobachtet. Die Autoren [9] sprechen dabei von versprödet wirkenden Elementen oder Graphitentartungen, welche zunächst die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung vermindern, bevor die Streckgrenze abnimmt.

Außerdem konnte festgehalten werden, dass ab einem Siliziumgehalt von ca. 5 % die Zugfestigkeit und Streckgrenze in etwa zusammenfallen.

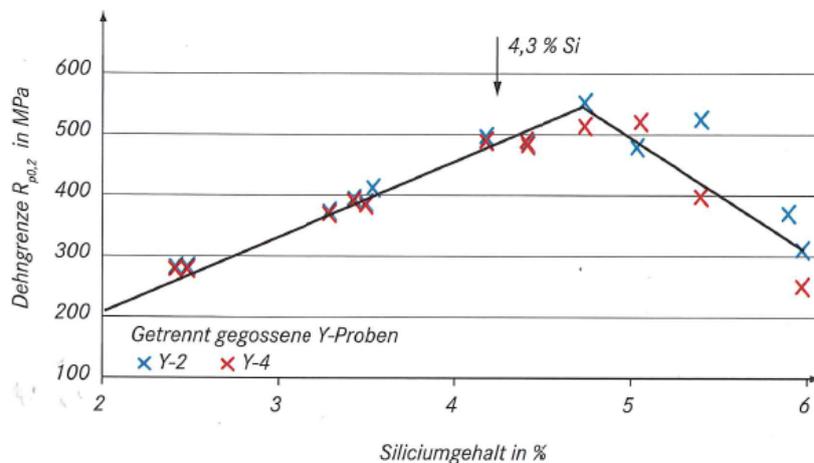


Abbildung 14: Streckgrenze in Abhängigkeit vom Siliziumgehalt [9].

Wie in Abbildung 15 dargelegt, kam es bei einem Siliziumgehalt von 4,3 % zu einem Abfall der Bruchdehnung. Bei Gehalten oberhalb von 5 % Si in den Y-Proben nähert sich der Verlauf der Abszisse an.

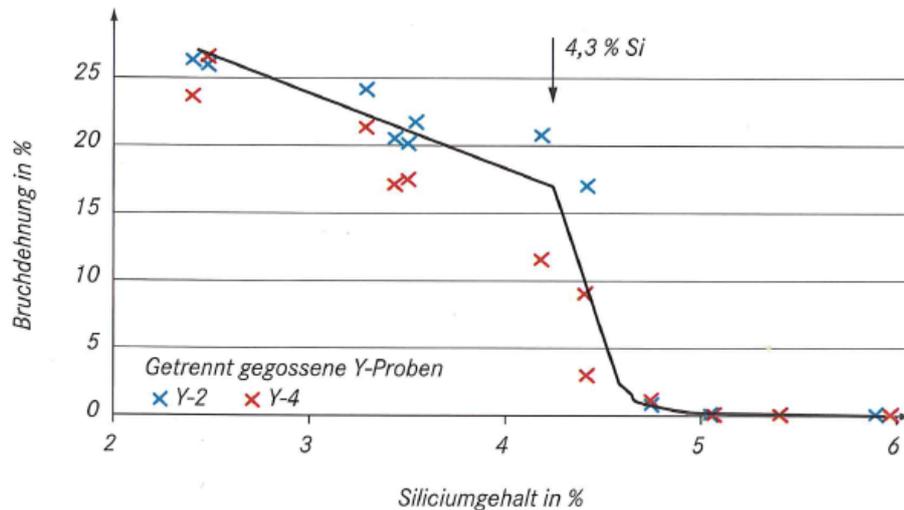


Abbildung 15: Bruchdehnung in Abhängigkeit vom Siliziumgehalt [9].

### 2.1.3 Einfluss des Siliziums auf die Matrixgefügeausbildung in Gusseisenwerkstoffen

Den Einfluss des Siliziumgehaltes auf die Gefügestruktur in Sphärogusslegierungen diskutierten W.H. White, L.P. Rice und E.R. Elsea [8]. Die Proben für Mikrostrukturuntersuchungen entnahmen sie dabei an Kielblöcken. Wie zu erwarten bildeten alle magnesiumbehandelten Schmelzen Sphärolite aus, hingegen unbehandelte lamellare Graphitbildungen aufwiesen.

Beobachtet wurde, dass die durchschnittliche Kugelgröße in magnesiumbehandelten Gusswerkstoffen mit zunehmenden Siliziumgehalt abnimmt. Dieser Effekt ist in diesen Untersuchungen teilweise auf das vergleichsweise niedrigere Kohlenstoffäquivalent in den hochsiliziumhaltigen Proben zurückzuführen.

Perlit konnte sowohl in kugel- als auch in lamellengraphithaltigen Gusseisenwerkstoffen mit niedrigen Siliziumgehalten nachgewiesen werden. Der Perlitanteil nahm dabei mit steigendem Siliziumgehalt bedeutend ab, so dass bei einem Siliziumanteil von über 5 % eine vollständig ferritische Matrix beobachtet wurde.

C.F. Reynolds und H.F. Taylor [14] führten wissenschaftliche Untersuchungen hinsichtlich der Wirkung unterschiedlicher Legierungselemente auf die Mikrostruktur von Kugelgraphitgusswerkstoffen durch.

Dabei wurde der Siliziumgehalt im Bereich von 1,39 % bis 4,38 % variiert. Es ließ sich feststellen, dass bei kleinen Siliziumgehalten große Mengen an Perlit im Matrixgefüge vorherrschend waren. Die Sphäroliten, sichtbar im Mikroschliff, wurden als relativ groß und gering in der Anzahl beschrieben. Ab einem Siliziumgehalt von 3 % konnte eine überwiegend ferritische Matrix beobachtet werden.

J. Pelleg [12] diskutierte den Einfluss des Siliziumgehaltes auf die Ferritbildung von Gusseisen mit Kugelgraphit. Er untersuchte gleichzeitig die Abhängigkeit des Kohlenstoffgehaltes, sodass in Abbildung 16 drei Kurvenzüge für unterschiedliche Kohlenstofflevels zu sehen sind.

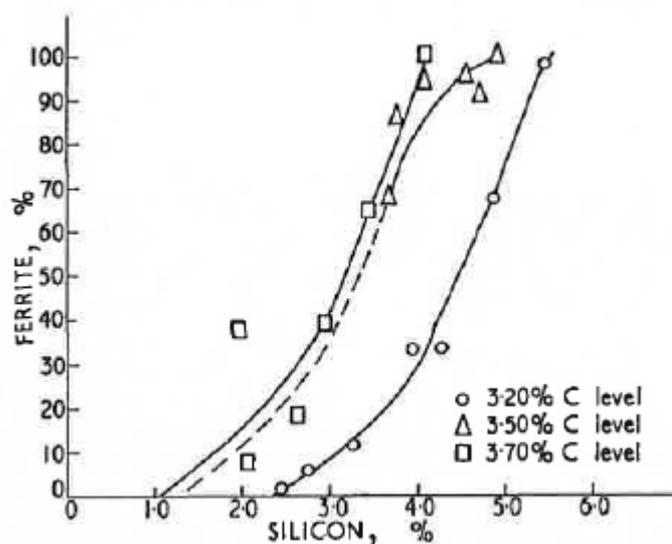


Abbildung 16: Einfluss des Siliziumgehaltes auf die Ferritbildung [12].

Der Autor stellte fest, dass in Versuchsschmelzen ein gewisser Inkubationsgehalt des Siliziums notwendig sei um nach dem stabilen Eisen-Kohlenstoff-System zu erstarren. Dieser Inkubationsgehalt ist für Schmelzen mit Kohlenstoffgehalte von 3,5 und 3,7 % praktisch gleich groß.

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass ein hoher Kohlenstoffgehalt geringere Mengen an Silizium erfordert um eine gewisse Menge an Ferrit zu produzieren.

## 2.2 Bestimmung von statistisch abgesicherten Wöhlerlinien

Wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit ist die Untersuchung unterschiedlicher statistischer Methoden zur Generierung von Wöhlerlinien aus einer gegebenen Punktwolke.

Im Folgenden sollen die Grundlagen der Fatigue Limit (FLM) sowie der Random Fatigue Limit (RFL)- Modelle vorgestellt werden. Beide Modelle dienen dazu, um an ermittelten Datenpunkten eine statistisch abgesicherte  $\sigma$ -N Kurve anzupassen. Dazu müssen die Parameter der jeweiligen Verteilungsfunktion mit Hilfe beispielsweise einer Maximum-Likelihood Funktion analytisch berechnet werden. Die Wahl der entsprechenden Verteilungsfunktion kann dadurch wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Die theoretischen Hintergründe bezüglich der statistischen Rechenmethoden sind Gegenstand der nachfolgenden Kapitel.

### 2.2.1 Prinzipielle Durchführung von Schwingfestigkeits- und Ermüdungsversuchen

Aufgrund von unterschiedlichen Streueinflüssen selbst gleichartiger Proben ist eine sinnvolle Ermittlung von Dauerfestigkeitskennwerten nur unter Zuhilfenahme statistischer Methoden gewährleistet. Das untenstehende Blockdiagramm in Abbildung 17 soll dafür einen Überblick über die Vorgehensweise der experimentellen Ermittlung von S-N-Wertepaaren sowie der nachfolgenden analytischen Bestimmung der Dauerfestigkeit geben.

Ausgehend von einer repräsentativen Probenahme, die aufgrund der geringen Probenanzahl (im Normalfall 15 bis 20 Proben) eine Stichprobe der Grundgesamtheit darstellt, werden je nach HCF-Messung genormte Probenkörper gefertigt. Um Oberflächenrauheiten, die Mikrokerben darstellen zu vermeiden, ist die Prüfoberfläche poliert ausgeführt. Das Aufbringen einer Lastfunktion entsprechend dem geforderten Lastverhältnis führt bei zyklischer Wiederholung zu einer Schwingbelastung der Probe. Im Normalfall werden die Proben unter zyklischer Zug-Druck bzw. Biegebelastung beansprucht. Der Versuch ist bei unterschiedlichen Lastniveaus solange durchzuführen bis es entweder zu einem Bruch der Probe kommt oder eine festgelegte Grenzlastspielzahl (z.B.  $10^7$  Lastwechsel) erreicht wird. Um die  $\sigma$ -N-Wertepaare anhand statistischer Methoden abzusichern ist die Wahl einer geeigneten Verteilungsfunktion unumgänglich. In der Betriebsfestigkeit kommen aufgrund der Einfachheit halber entweder eine Lognormal oder wegen der guten Anpassungsfähigkeit der Dichtefunktion die Weibull-Verteilung zur Anwendung.

Die Parameter der Verteilungsfunktion werden anhand entsprechender Schätzfunktionen, vorzugsweise der Maximum-Likelihood-Methode bestimmt. In diesem Prozessschritt kommt entweder das Random Fatigue Limit Modell (RFL) bzw. das Fatigue Limit Modell (FLM) zur Anwendung. Das Ergebnis ist eine statistisch abgesicherte S-N-Kurve auf Basis der Messdaten mit entsprechenden Streubandbreiten [16] [17] [19].

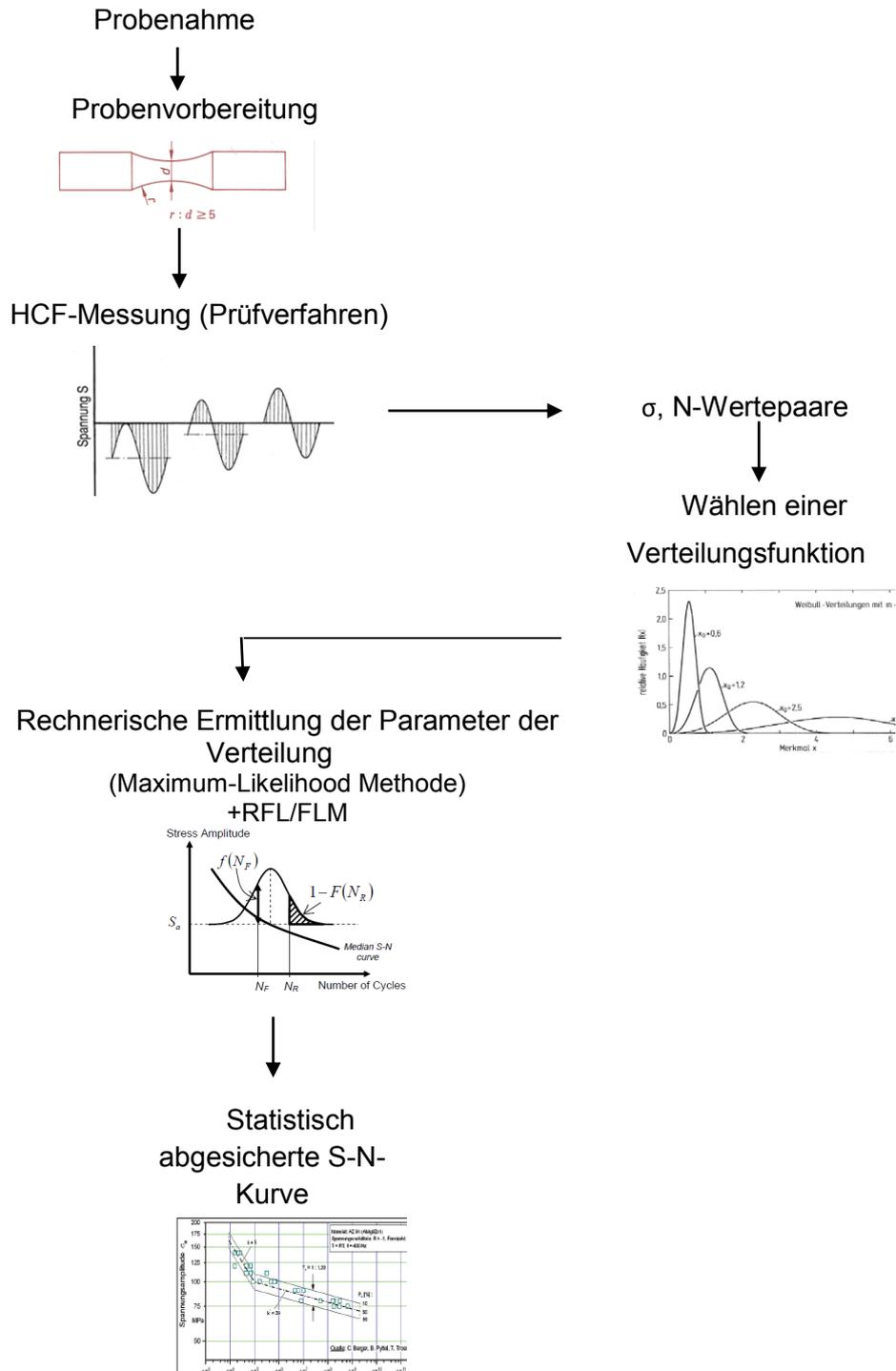


Abbildung 17: Durchführung von Schwingfestigkeits- und Ermüdungsversuchen [15,16,17,18].

### 2.2.1.1 Random Fatigue Limit Model (RFL)

Grundsätzlich bestehen zwei Überlegungen bei der Modellierung des Zusammenhangs zwischen der ertragbaren Spannungsamplitude und der Lebensdauer eines Probenkörpers: Als Erstes sinkt die Standardabweichung bei steigender Spannungsamplitude und zweitens ist die Wölbung der S-N Kurve ein Anzeichen für die Einbeziehung der Dauerfestigkeit in das statistische Modell. Das Random Fatigue Limit Modell ist in der Lage beide Eigenschaften zu verknüpfen [19].

Der Zusammenhang zwischen der Spannung S und der Lebensdauer N ist wie folgt beschrieben [20]:

$$\ln(N_f) = B_0 + B_1 \ln(S_a - S_L) + \xi$$

$S_a$  Spannungsamplitude

$N_f$  Anzahl der Lastzyklen bis zum Bruch

$\xi$  Streuung der Lastzyklen bis zum Bruch

$S_L$  Zeitfestigkeit der Probe (Zufallsvariable)

$B_0$  empirische Konstante

$B_1$  empirische Konstante

Die Variable  $S_L$  variiert von Probe zu Probe. Wird angenommen, dass die Dauerfestigkeit einer Weibull-Verteilung gehorcht, ergibt sich folgender Zusammenhang [20]:

$$S_L = e^{\ln(\eta) + \ln(-\ln(1-P)) / \beta}$$

P Ausfallwahrscheinlichkeit (im Zeitfestigkeitsbereich)

$\beta, \eta$  Parameter der Weibull Verteilung

### 2.2.1.2 Fatigue Limit Model (FLM)

Die Überlebensdauer N wird abhängig von der Spannung s wie folgt definiert[21]:

$$P(N \leq n) = F(n; \mu(s), \sigma(s)) = G\left(\frac{\log(n) - \mu(s)}{\sigma(s)}\right) \quad [21]$$

wobei die Verteilungsfunktion G von der Verteilung von N abhängt. Der Fokus liegt hierbei in der Weibull- sowie der Lognormalverteilung.

Verwendung findet hier zur Beschreibung der Lokation:

$$\mu(s) = \beta_0^{(\mu)} + \beta_1^{(\mu)} * \log(s - \gamma) \quad [21]$$

und zur Beschreibung der Skalierung:

$$\sigma(s) = \exp\left(\beta_0^{(\sigma)} + \beta_1^{(\sigma)} * \log(s)\right) \quad [21]$$

$\gamma$  bezeichnet hierin das Fatigue Limit, also die 100%-ige Überlebenswahrscheinlichkeit eines Bauteils. Die Parameter  $\beta_0^{(\mu)}, \beta_1^{(\mu)}, \beta_0^{(\sigma)}, \beta_1^{(\sigma)}$  sind unbekannt und werden anhand der Dauerfestigkeitsdaten im FLM-Programm geschätzt [21].

Falls  $s_{\min}$  das kleinste beobachtete Spannungsniveau definiert welches zum Versagen einer Probe führt, dann muss der Wert von  $\gamma$  im Intervall  $[0, s_{\min})$  liegen. Wenn der Wert für  $\beta_1^{(\sigma)} = 0$  ist, wird die Standardabweichung konstant. In den meisten Dauerfestigkeitsuntersuchungen verkleinert sich die Standardabweichung bei Erhöhung der Spannungsamplitude, was zu einem  $\beta_1^{(\sigma)}$  von kleiner 0 führt [21].

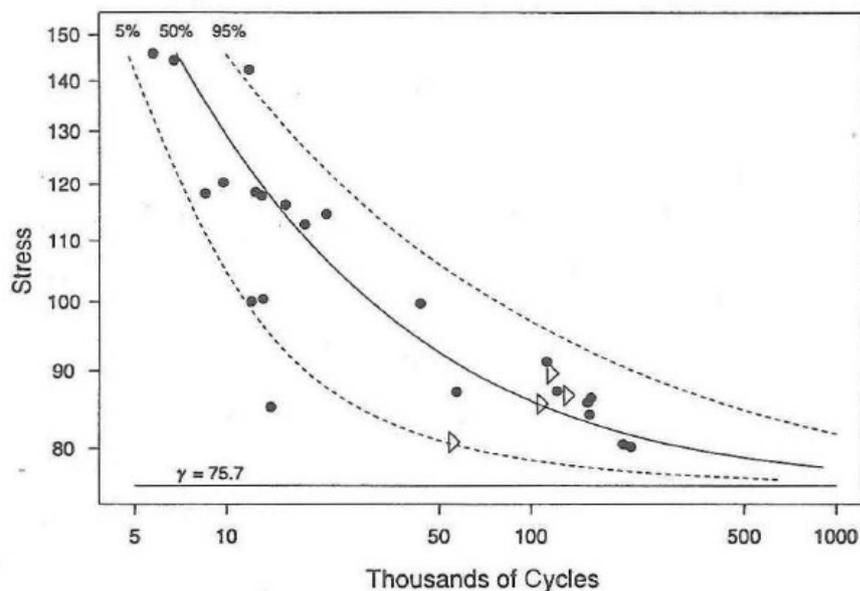


Abbildung 18: Schematische S-N Kurve nach dem FL-Modell [21].

Abbildung 18 zeigt eine S-N Darstellung von Lebensdauerdaten. Zusätzlich sind die Kurven für die 5% und 95% Ausfallwahrscheinlichkeiten eingetragen.

Der  $\gamma$ -Wert stellt ein Maß für die Krümmung der Kurven im S-N-Plot dar. Bei einem Wert von Null das wird das FLM Modell äquivalent einer Darstellung durch lineare Regression [21].

### 2.2.1.3 Verteilungsfunktionen

Zur statistischen Auswertung der Messdaten in dieser Arbeit wurden unterschiedliche Verteilungsfunktionen angewendet. Im Folgenden seien die wesentlichen Unterschiede sowie die mathematischen Charakteristika dieser Funktionen kurz erläutert.

#### Logarithmische Normalverteilung (Lognormalverteilung)

Viele Verteilungen in der Natur laufen als positiv schiefe, linkssteile Verteilungen rechts flach aus. Eine anschauliche Erklärung dafür, dass sich ein Merkmal nicht symmetrisch normalverteilt, ist oft dadurch gegeben, dass das Merkmal einen bestimmten Schrankenwert nicht unter- bzw. überschreiten kann und somit nach dieser Seite hin in seiner Variationsmöglichkeit gehemmt ist. Besonders dann, wenn die Verteilung links durch den Wert Null begrenzt ist, kommt man durch Logarithmieren zu annähernd normalverteilten Werten. Durch das Logarithmieren wird der Bereich zwischen 0 und 1 in den Bereich  $-\infty$  bis 0 überführt, der linke Teil der Verteilung stark gestreckt und der rechte stark gestaucht. Das gilt besonders dann, wenn die Standardabweichung groß im Vergleich zum Mittelwert ist [22,23].

Die Ausfallrate der Lognormal-Verteilung steigt mit zunehmender Lebensdauer zuerst an, um dann nach Erreichen seines Maximums abzufallen. Für sehr große Lebensdauern strebt die Ausfallrate schließlich gegen Null. Die monoton ansteigende Ausfallrate bei Ermüdungsausfällen kann deshalb mit der Lognormal-Verteilung nur bedingt beschrieben werden. Dagegen lässt sich sehr gut ein Ausfallverhalten darstellen, bei dem anfänglich die Ausfallrate schnell zunimmt [24]. Abbildung 19 zeigt die graphische Darstellung der Dichtefunktion, Ausfallwahrscheinlichkeit sowie Ausfallrate logarithmischer Normalverteilungen über der Lebensdauer  $t$  in Abhängigkeit vom Formparameter  $\sigma$ .

Formeln und Bezeichnungen der Lognormal-Verteilung lauten [24]:

$$\text{Dichtefunktion } f(x) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(t)-t_m)^2}{2\sigma^2}}$$

$$\text{Ausfallwahrscheinlichkeit } F(x) = \int_0^t \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(t)-t_m)^2}{2\sigma^2}} dt$$

$t$	statistische Variable (Lastwechsel)
$t_m$	Lageparameter
$\sigma$	„Formparameter“, Streumaß

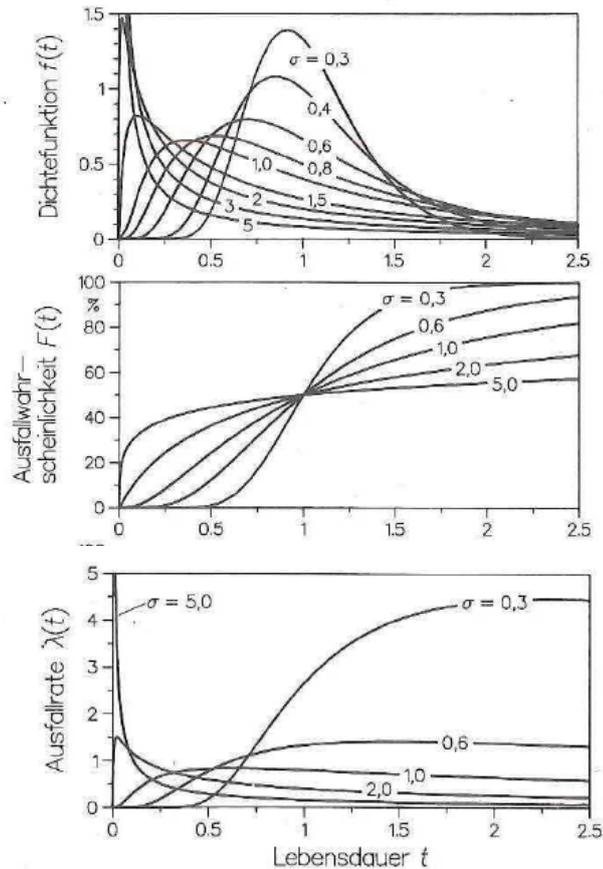


Abbildung 19: Dichtefunktionen, Ausfallwahrscheinlichkeiten und Ausfallraten ausgewählter logarithmische Normalverteilungen [24].

### Weibullverteilung

In Abhängigkeit von einem Formparameter  $b$  ändert sich die Dichtefunktion deutlich. Für kleine  $b$ -Werte ( $b < 1$ ) werden die Ausfälle ähnlich wie bei der Exponential-Verteilung beschrieben, d.h. man hat anfangs eine sehr hohe Ausfallhäufigkeit, die dann kontinuierlich abnimmt. Beim Formparameter  $b = 1$  ergibt sich exakt die Exponentialverteilung. Für Formparameter  $b > 1$  beginnt die Dichtefunktion stets bei  $f(t) = 0$ , erreicht dann mit zunehmender Lebensdauer ein Maximum und fällt schließlich flach ab. Das Maximum der Dichtefunktion verschiebt sich dabei immer mehr nach rechts für größer werdende  $b$ -Werte. Mit dem Formparameter  $b = 3,5$  kann näherungsweise eine Normal-Verteilung dargestellt werden [24].

Die zweiparametrische Weibull-Verteilung, dessen Funktionen in Abbildung 20 dargestellt sind, besitzt als Parameter die charakteristische Lebensdauer  $T$  (Lageparameter) und den Formparameter  $b$ . Die charakteristische Lebensdauer  $T$  ist eine Art Mittelwert und gibt damit die Mitte der Verteilung an. Der Formparameter  $b$  ist ein Maß für die Streuung der

Ausfallzeiten und repräsentiert somit die Form der Ausfalldichte. Die Ausfälle werden bei der zweiparametrischen Weibull-Verteilung stets ab dem Zeitpunkt  $t=0$  beschrieben [24].

Formeln und Bezeichnungen der Weibull-Verteilung lauten [24]:

$$\text{Ausfallwahrscheinlichkeit } F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$$

$$\text{Dichtefunktion } f(x) = \frac{b}{T} \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$$

- t statistische Variable (Lastwechsel)
- T charakteristische Lebensdauer, „Lageparameter“
- b Formparameter oder Ausfallsteilheit

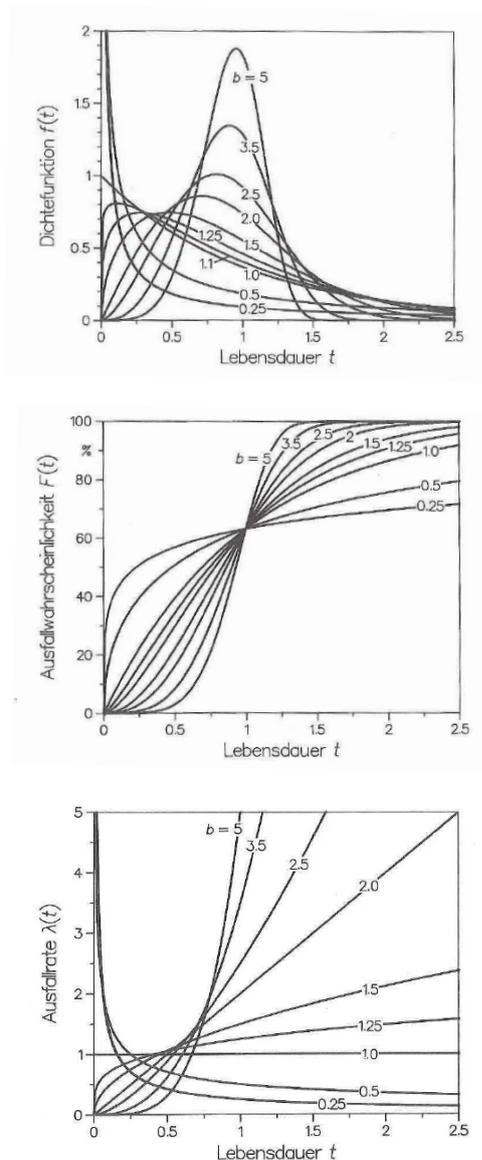


Abbildung 20: Dichtefunktionen, Ausfallwahrscheinlichkeiten und Ausfallraten ausgewählter Weibullverteilungen [24].

### 2.2.1.4 Rechnerische Ermittlung der Parameter

Anhand analytischer Auswertemethoden können die Parameter einer Verteilungsfunktion ermittelt werden. Die bekanntesten Methoden sind [24,25]:

- Methode der kleinsten Fehlerquadrate (Regressionsanalyse)
- Momenten-Methode
- Maximum-Likelihood-Methode

Eine sehr gute statistische Methode für die Bestimmung von unbekanntem Parametern einer Verteilung ist die Maximum-Likelihood-Methode von R.A. Fisher. Die Likelihood-Funktion ist folgendermaßen definiert [24]:

$$L = f(t_1) \cdot f(t_2) \dots \dots f(t_n)$$

Das Prinzip des Verfahrens besteht nun darin, eine Funktion  $f$  zu finden, bei der das Produkt  $L$  maximal wird. Dazu muss die Funktion  $f$  in Bereichen mit vielen Ausfallzeiten  $t_i$  entsprechend hohe Werte der Dichtefunktion besitzen, während sie in Bereichen mit wenigen Ausfallzeiten nur geringe Werte  $f(t_1)$  aufweisen darf [24].

Die zweiparametrische Weibull-Verteilung liefert demnach folgende Likelihood-Funktion:

$$L = f(t_1; T, b) \cdot f(t_2; T, b) \dots \dots f(t_n; T, b)$$

Üblicherweise wird diese Likelihood-Funktion  $L$  logarithmiert. Die Produktformel wird damit zu einer Summenformel, was die spätere Differentiation erheblich erleichtert. Das Maximum der Funktion und damit die optimalen Parameter  $T$  und  $b$  erhält man aus den Gleichungen [24]:

$$\frac{d \ln(L)}{dT} = 0, \frac{d \ln(L)}{db} = 0$$

Bei gegebener Spannungsamplitude  $S_a$  ist die Likelihood-Funktion folgendermaßen definiert [20]:

$$L = \prod_{i=1}^n f(N_F^i, \{p\}) \cdot \prod_{j=1}^m [1 - F(N_R^j, \{p\})]$$

$n$	Anzahl gebrochener Proben
$m$	Anzahl der Durchläufer
$f(N_F^i, \{p\})$	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
$F(N_R^j, \{p\})$	kumulative Dichtefunktion
$\{p\}$	Parameter der Dichtefunktion (Weibull, Lognormal,...)

Eine graphische Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion sowie der kumulativen Dichtefunktion in einem S-N Diagramm zeigt Abbildung 21. Die Form der gewählten Dichtefunktion, welche im formalen Zusammenhang durch den Parameter  $\{p\}$  berücksichtigt wird, hat somit einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis.

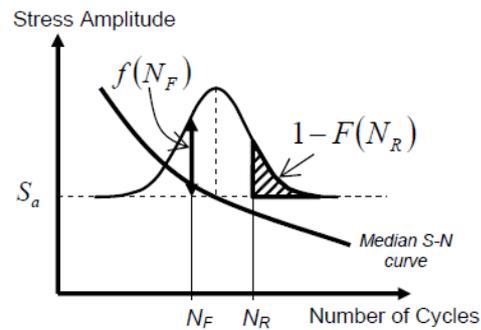


Abbildung 21: Definition der Likelihood-Funktionen von Lebensdauerberechnungen für Brüche ( $N_F$ ) und Durchläufer ( $N_R$ ) [20].

## 3 Experimentelle Methoden

### 3.1 Herstellen der Gussformen

Ziel war es, Probenplatten für die Werkstoffprüfungen im Schwerkraft-Sandgussverfahren herzustellen. Abbildung 22 zeigt zwei 25 mm dicke Platten mit einem Plattengewicht von jeweils 13 kg und den darauf gesetzten Speisern. Der V-förmige Kopfbereich dient dabei ähnlich wie bei der Y2-Normplatte ebenfalls als Speiser und wird bei der Herstellung der Probenkörper abgetrennt.



Abbildung 22: Probenplatten mit Speiser und Angussystem [26].

Die Herstellung der Gussformen erfolgte mit Nassgussand. Die Holzmodelle sind in der Abbildung 23 dargestellt. Jede Gussform beinhaltet somit zwei Probenplatten.



Abbildung 23: Holzmodell mit Laufsystem.

### 3.2 Abgüsse

Geschmolzen wurde im Mittelfrequenz-Induktionsofen mit den Einsatzmaterialien laut der nachstehenden Tabelle 2. Die Chargenherstellung im Induktionsofen bietet den großen Vorteil der guten Durchmischbarkeit des Bades durch induktiv erzeugte Wirbelströme. Die Schmelzblätter mit den detaillierten Angaben zur chemischen Zusammensetzung der vier Versuchslegierungen sind im Anhang dargestellt.

Tabelle 2: Einsatzmaterialien zum Erstellen der Gusseisenschmelzen (Angaben in Gew.-%).

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni
Sorelmetal TF 10 ÖGI	4,10	0,10	<0,01	0,005	0,006	0,023	0,027	0,072
Kreislaufmaterial								
FeSi90		91,40						
FeSi75		74,00						
FeMn	6,70	0,03	73,00					
Elektrodengraphit grieß	100							
Reinkupfer						100		
Elmag 6039, 4- 25mm		47,80						
VP216, 0,6-3mm		69,70						
VP216, GSK		70,20						

Tabelle 2: Fortsetzung

Material	Mo	Ti	V	Mg	SE	Al	Ca	Sr
Sorelmetal TF 10 ÖGI	<0,003	0,005	0,021					
Kreislaufmaterial								
FeSi90						0,11	0,08	
FeSi75						1,42	0,25	
FeMn								
Elektrodengraphit grieß								
Reinkupfer								
Elmag 6039, 4- 25mm				6,02	0,0	0,77	1,76	
VP216, 0,6-3mm						4,10	1,20	
VP216, GSK						4,00	1,03	

#### 3.2.1 Beschreibung der Einsatzmaterialien

Zum Chargieren des Ofens sind unterschiedliche Einsatzmaterialien notwendig. Die Qualität der Schmelzen ist damit direkt an jene der Einsatzmaterialien gekoppelt. Daher ist es von besonderer Bedeutung auf die chemische Zusammensetzung dieser zu achten, sowie den Gehalt an Störelementen (Bi, Sb, Pb,..) möglichst niedrig zu halten.

### 3.2.1.1 Sorelmetal TF 10

Sorelmetal ist eine Eisen-Kohlenstoff-Legierung mit viel Kohlenstoff, einem sehr niedrigen Mangangehalt, niedrigem Phosphor- und Schwefelgehalt sowie niedrig in den Spuren- und Störelementen [27].

### 3.2.1.2 ÖGI Kreislaufmaterial

Sphäroguss-Kreislaufmaterialien sind Eingusskanäle, Schlackenläufe, Speißen und fehlerhafte Gussstücke. Die Verwendung von perlitischen Kreislaufmaterial in einer Charge, die für ferritischen Guss vorbereitet wurde, erfordert eine zusätzliche Wärmebehandlung der Gussstücke um das geforderte Gefüge zu erhalten.

### 3.2.1.3 Elektrodengraphitgrieß

Gusseisenschmelzen sind im Normalfall aufzukohlen, weil die Einsatzmaterialien, primär der Stahlschrott und das Kreislaufmaterial, einen zu minderen Kohlenstoffgehalt aufweisen. Ein wesentliches Qualitätsmerkmal stellt dabei das Auflösungsvermögen dar, welches von folgenden Faktoren abhängig ist:

- Korngröße
- Temperatur
- Zeit
- Aschegehalt
- Kohlenstoffäquivalent
- Durchmischungsgrad

Beim Beschicken von Mittelfrequenzöfen ist darauf zu achten, dass Aufkohlungsmittel erst dann zugegeben werden, wenn im Tiegel schon eine gewisse Menge an Schmelze vorhanden ist. Werden die Zusätze zu früh zugegeben, kann es zu einer unerwünschten Reaktion des Kohlenstoffes mit dem Feuerfestmaterial des Schmelztiegels kommen [27].

### 3.2.1.4 Ferrolegierungen FeSi90 und FeSi75

Die meisten Eisen-Silizium-Legierungen enthalten hohe Konzentrationen an Aluminium, welches wiederum zu unerwünschten „Pinholes“ in Gussstücken führen kann. Dabei kann zwischen „impfenden“ und „nicht impfenden“ Sorten Ferrosilizium unterschieden werden. Impfendes Ferrosilizium enthalten üblicherweise zwischen 0,8 und 1,2% Ca, 0,8% Al oder mehr und können den Keimhaushalt des Eisens stark verändern [27].

### 3.2.1.5 Reinkupfer

Kupfer ist ein perlitstabilisierendes Element, man kann damit recht einfach den Perlitgehalt im Gussstück einstellen. Es wird deshalb gerne verwendet und als das Element zur sicheren Steuerung des Perlits in GJS empfohlen. Schon bei Kupfergehalten über 1,0 % wird das Graphitkugelwachstum gestört. Die Oberflächen der Sphärolithen fransen aus [27].

Dieses Einsatzmaterial wird deshalb zur Herstellung von perlitischen bzw. ferritisch/perlitischen Normsorten verwendet.

### 3.2.2 Ablauf zur Herstellung von Sphärogussschmelzen

Zu Beginn erfolgt das Einschmelzen des laut Schmelzblatt eingewogenen Kreislaufmaterials im Mittelfrequenz-Induktionsofen Junker MFT 150. Dieser Vorgang nimmt etwa 2-3 Stunden in Anspruch. Liegt eine flüssige Schmelze vor, wird der Ofen mit den Legierungselementen unter Rühren chargiert. Die Einwaagen sind in den Schmelzblättern jeweils für jede Charge im Anhang detailliert aufgelistet.

Eine anschließende thermische Analyse soll Aufschluss über das Erstarrungsverhalten der Schmelze, im Detail die eutektischen Temperaturen liefern. Dazu werden kleine Tiegel, ausgestattet mit Thermoelementen - sog. Quick cups, mit der Schmelze befüllt und Abkühlkurven anhand „Phase Lab Thermoanalyse“ aufgezeichnet. Diese Daten werden entsprechend Erfahrungswerte vom ÖGI ausgewertet um die Korrekturmengen der Legierungselemente zu ermitteln. Die chemische Zusammensetzung der Schmelze kann darauffolgend durch Zugabe der jeweils benötigten Elemente an die Vorgaben angepasst werden. Die Überprüfung der Schmelzequalität jeder Gusscharge hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung erfolgt anhand einer Talerprobe die mit einem Plasmaemissionsspektrometer (ICP-OES) analysiert wird. Ein darauffolgendes Überhitzen der Schmelze bis auf eine Temperatur von etwa 1500 °C dient zur besseren Homogenisierung.

Eine Schmelzebehandlung mit Magnesium ist notwendig zur Herstellung von Sphärogusslegierungen. Behandelt wurde dabei nach der Tauchmethode mit Elmag 6039, dessen chemische Analyse in Tabelle 2 wiedergegeben ist. Abbildung 24 zeigt das Prinzip dieses Verfahrens: Am unteren Ende des Tauchstabs befindet sich die feuerfeste Glocke. In dieser befindet sich die Ferrolegierung die durch die Öffnungen in die Schmelze gelangt. Aufgrund der heftigen Reaktion des Magnesiums mit der Schmelze ist eine Abdeckung des Tiegels zwingend erforderlich. Das geschieht mit dem Pfannendeckel, welcher am Tauchstab befestigt ist.

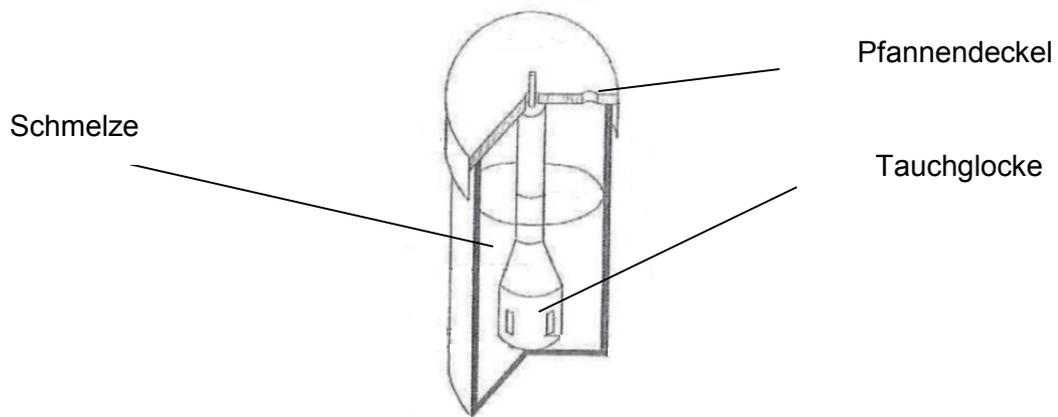


Abbildung 24: Prinzipskizze der Magnesiumbehandlung nach der Tauchmethode [28].

Ein Magnesiumabbrand von etwa 50% muss bei der Einwaage berücksichtigt werden. In Gusseisen mit Kugelgraphit erfolgt bekanntermaßen das Wachstum eines Sphärolithen ausgehend von einem Basiskeim ( $MgS$ ,  $CaS$ ) um dessen sich Forsterit oder Estantit bildet [29,30]. Der Impfvorgang mit dem Impfmittel VP216 (chemische Zusammensetzung laut Tabelle 2) ist dabei ein bedeutender Schritt zur Einstellung der Kugelform (Nodularität) sowie der Anzahl der Sphärolithen (Kugelzahl). Zudem verhindert das Impfen die Karbidbildung. Während dem Umleeren der Gusseisenschmelze vom Induktionsofen in die Gießpfanne wird in situ anhand der sogenannten Gießstrahlimpfung geimpft. Die zugegebene Masse des Impfmittels beträgt bei allen Sorten 0,48 kg.

Anschließend erfolgt der Abguss der Probplatten sowie der Y2-Normplatten mittels dem Schwerkraft-Sandgussverfahren. Dabei wird solange in den Einguss gegossen, bis die Schmelze in den beiden Speisern aufsteigen kann. Zum Schluss gilt es Einguss und Speiser mit Lunkerpulver abzudecken. Eine überblicksmäßige Darstellung der Schritte um vom Einsatzmaterial zum Gussstück zu gelangen zeigt die Abbildung 25.

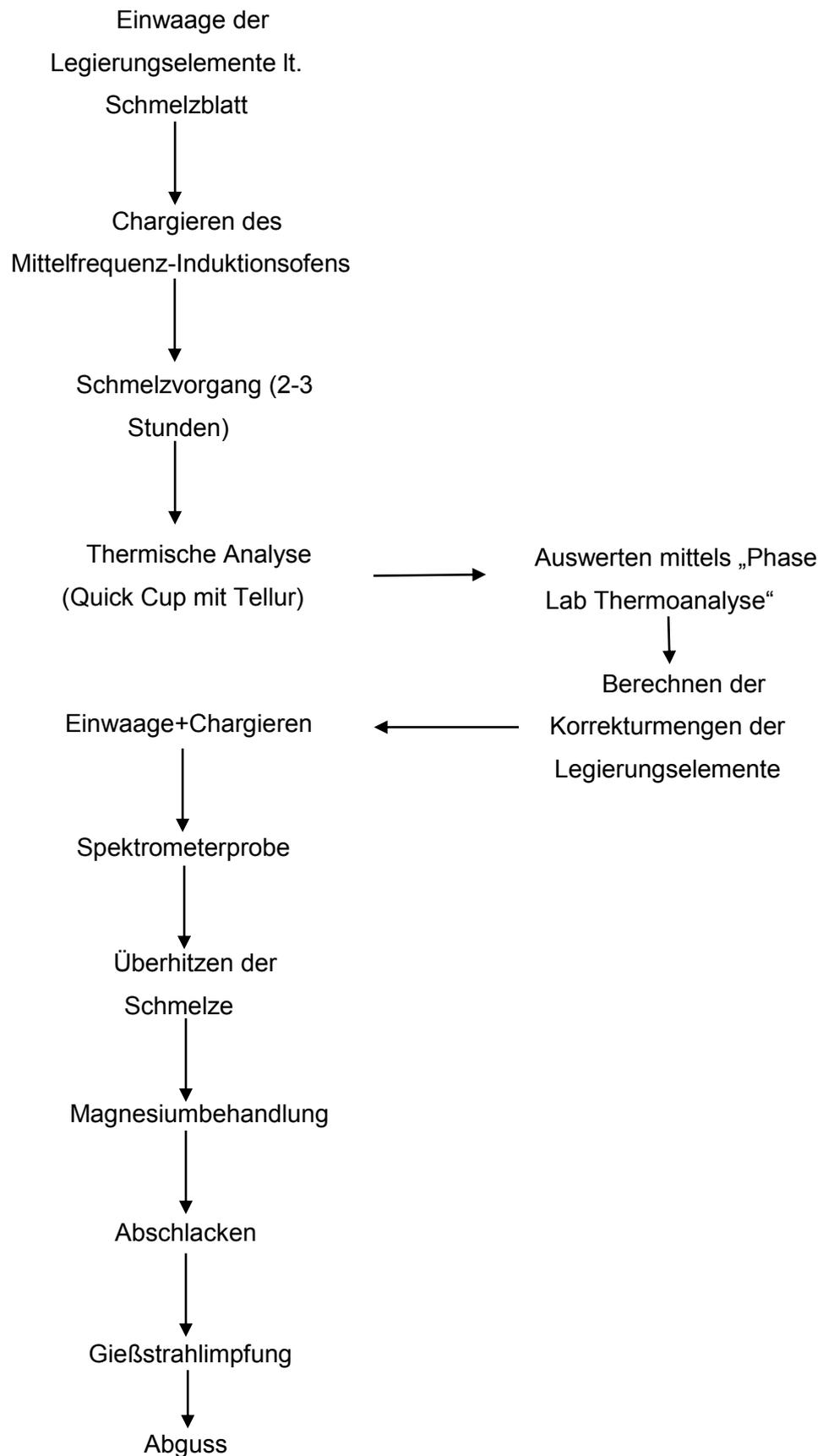


Abbildung 25: Chronologischer Ablauf zur Herstellung von Sphärogusschmelzen.

### 3.2.3 Einstellen des Kohlenstoffgehaltes bei erhöhtem Siliziumgehalt

Bei Betrachtung der in Abbildung 26 dargestellten Kohlenstoff- und Siliziumabhängigkeit fällt auf, dass der eutektische Kohlenstoffgehalt mit steigendem Siliziumgehalt absinkt. Deshalb muss bei Konstanzhaltung des Sättigungsgrades zur Vermeidung des Primärgraphites der Kohlenstoffgehalt entsprechend abgesenkt werden [26,31].

Vorwiegend bei schweren Gussstücken aus Gusseisen mit Kugelgraphit, bevorzugt im oberen Bereich des Teils (Oberkastenpartie) kann es vor allem bei übereutektischer Eisenzusammensetzung und Gussstücken mit großem Modul (Volumen/Oberflächenverhältnis) zu einer Graphitflotation kommen [31].

Das Aufschwimmen des Graphits wirkt sich auf die Expansion und Kontraktion des Gusseisens während der eutektischen Erstarrung aus und stört damit erheblich die Dichtspeisung [31].

Die Dichtedifferenz zwischen flüssigen Eisen und Graphit beträgt rund  $4,8 \text{ g/cm}^3$ . Das bedeutet, dass die in übereutektischen Eisen üblichen großen Sphäroliten einem merklichen Auftrieb ausgesetzt sind, der nach dem Stokeschen Gesetz zu berechnen ist. Die Flotationsgeschwindigkeit ist von der Kugelgröße abhängig und der Flotationweg von der Geschwindigkeit und von der zur Flotation verfügbaren Zeit- diese wiederum ist eine Funktion der Wanddicke [31].

Die qualitative Auswirkung des Siliziumgehaltes auf die Lunkerung sowie das Speisungsverhalten ist grundsätzlich mit der Beeinflussung der eutektischen Graphitmenge und des eutektischen Kohlenstoffgehaltes durch Silizium verknüpft [26].

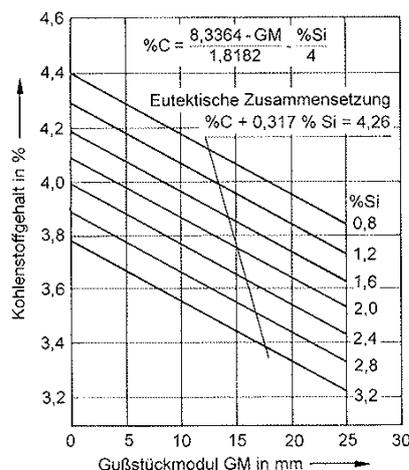


Abbildung 26: Kohlenstoff- und Siliziumgehalte in Abhängigkeit des Gussstückmoduls zur Vermeidung von Graphitflotation [31].

Tabelle 3 stellt Erfahrungswerte optimaler Kohlenstoff- sowie Siliziumgehalte für verschiedene Wandstärken dar. Tendenziell ist auch hier ersichtlich, dass mit steigendem Si-Gehalt entsprechend der Kohlenstoffgehalt abgesenkt wird.

Tabelle 3: Einstellung des Kohlenstoffgehaltes bei erhöhtem Siliziumgehalt [26].

Si [%]	C [%]	Wandstärke
3,7-3,8	3,3-3,4	< 50 mm
4,3-4,4	3,1-3,2	
3,7-3,8	3,2-3,3	50 – 100 mm
4,3-4,4	3,0-3,1	

### 3.3 Versuchsplan und Probenbezeichnung

Eine tabellarische Übersicht der vier Abgüsse der Versuchslegierungen ist Tabelle 4 wiedergegeben. Bei der Betrachtung der chemischen Zusammensetzungen fällt auf, dass der Kohlenstoffgehalt entsprechend von Legierung 3 nach 1 ansteigt. Umgekehrt verhält sich dabei der Siliziumgehalt in den Abgüssen.

Die Legierungen sind nach steigender Festigkeit und entsprechend zunehmendem Siliziumgehalt der Reihe nach von oben nach unten sortiert. Die Versuchslegierung 2 entspricht dabei einer GJS 500-14 Normsorte, die Legierung 1 hat mit einer Streckgrenze von 384 MPa die Norm nicht erreicht und der Versuchsabguss 3 liegt mit einer Streckgrenze von 444 MPa und einer Zugfestigkeit von 569 MPa deutlich über den geforderten Normwerten. Dementsprechend sinken die Bruchdehnungen mit zunehmender Festigkeit. Diese drei Abgüsse stellen dabei ein breites Qualitätsspektrum der Legierungen hinsichtlich Werkstoffkennwerte dar. Dieser Einfluss soll anhand metallographischer Bildauswertungen von Gefügeschaubildern Gegenstand der Untersuchung sein.

Die Sorte GJS 450-10, welche als Vergleichslegierung dient wurde nur einmal abgegossen und soll dabei vor allem hinsichtlich mechanischer Kennwerte einen Bezug zur „neuen“ mischkristallverfestigten Sphärogussvariante GJS 500-14 darstellen. In der EN 1563-2011 wird für die GJS 450-10 Legierung ein überwiegend ferritisches Grundgefüge gefordert. Der tatsächliche Perlitanteil liegt allerdings bei ca. 40%, sodass dieses Gefüge als ferritisch/perlitisches Mischgefüge anzusehen ist. Die erreichte Zugfestigkeit von 515 MPa liegt deutlich über der 450 MPa Grenze und ist somit im „schlechten“ GJS-500-14 Segment anzusiedeln. Trotz des relativ hohen Perlitanteils ist eine hohe Bruchdehnung von 16,6 % vorherrschend.

Tabelle 4: GJS-Abgüsse mit zugehörigen mechanischen Kennwerten sowie chemischer Zusammensetzung.

Leg.	ÖGI-Kennzahl	Sorte	Si [%]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A [%]	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cu [%]	Mg [%]
1	13-3-164 (297-301)	<b>500-14</b>	3,36	<b>384</b>	515	22	3,36	3,36	0,27	0,022	0,003	0,1	0,038
2	13-3-150 (281-287)	<b>500-14</b>	3,78	418	537	19,6	3,16	3,78	0,27	0,008	0,004	0,02	0,038
3	13-3-149 (273-279)	<b>500-14</b>	3,98	444	559	18,3	3,13	3,98	0,31	0,013	0,005	0,02	0,035
4	13-3-191 (326-332)	<b>450-10</b>	2,33	314	515	16,6	3,49	2,33	0,25	0,012	0,004	0,28	0,037

Die Versuchslegierungen 2,3 und 4 wurden anhand 6 Probenplatten sowie einer Y2-Normplatte, gemäß EN 1563:2011 realisiert. Für die Legierung 1, welche mit einer Streckgrenze von 384 MPa keine Normsorte darstellt, stehen vier Probenplatten zur Verfügung.

Die im Anhang dargestellte Abbildung 49 zeigt die Beschriftung der Probenplatten 281-283 der Legierung 2. Die Randbereiche sowie die Mitte (Verlängerung der Speiserachse) der Platten sind aufgrund möglicher Seigerungen und Lunkerbildung auszuschließen. An den Platten ist das anhand einer Schraffierung dargestellt. Die Kennzeichnung der Lage der Prüflinge erfolgt durch eine ca. 20 mm breite Markierung, die die Probenplatte mit einer fortlaufenden Nummer sowie die Art der Werkstoffprüfung (UBW, ZDW) oder die genormte Probengeometrie (B10x50) beinhalten. Die Markierungen für UBW-Prüflinge können aufgrund kleineren genormten Probendurchmessern entsprechend auf 15 mm reduziert werden, sodass 20 Proben je Platte zu entnehmen sind. Abbildung 27 stellt die Anordnung von Normprüflingen in den Probenplatten exemplarisch dar.

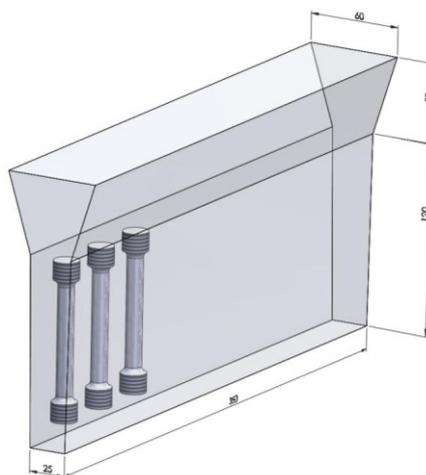


Abbildung 27: Anordnung und Lage der Proben in der GJS Versuchsplatte [mit freundlicher Genehmigung ÖGI].

Grundsätzlich definiert das Institut für Normung in der EN 1563-2011 vier unterschiedliche Methoden zur Probenahme an Gussstücken: Getrennt gegossene-, parallel gegossene-, angegossene Probestücke, sowie aus dem Gussstück entnommene Probestücke. Im Falle dieser Versuchsreihe handelt es sich um parallel gegossene Probestücke in geometrischer Y 2-Ausprägung, wie sie in der Abbildung 28 dargestellt ist. Rot markiert sind dabei die Positionen der Prüflinge für den Zugversuch bei Raumtemperatur. Der Abguss in die Y 2-Sandgussform erfolgte immer zuletzt am Ende einer Gusssequenz. Angemerkt sei, dass der Normzustand einer Gusslegierung ausschließlich an diesen Prüflingen zu ermitteln ist. Die dabei ermittelten Werkstoffkennwerte sowie die metallographischen Ergebnisse sind damit laut Norm repräsentativ für alle anderen Probenplatten.

In Tabelle 5 ist der gesamte Proben- und Versuchsplan aller Sphärogusslegierungen dargelegt.

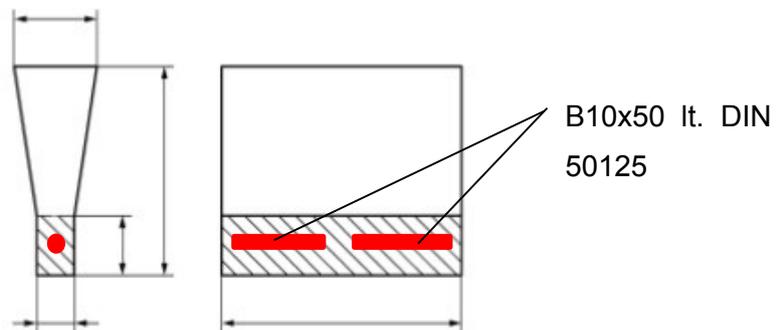


Abbildung 28: Geometrische Verhältnisse und Lage der Prüflinge an der Y2-Probenplatte [1].

Tabelle 5: Proben- und Versuchsplan der Sphärogusslegierungen.

Leg.	ÖGI-Kennzahl	Sorte	Zugversuch an Y2-Probenplatte	Zugversuch	Warmzugversuche	UBW-Versuche	ZDW-Versuche
1	13-3-164 (297-301)	<b>500-14</b>	301-ZV1 301-ZV2				
2	13-3-150 (281-287)	<b>500-14</b>	287-1 287-2	281 286	282-7 bis 282-15	283-1 bis 283-20	281-1 bis 281-15 282-1 bis 282-2 282-5 bis 282-6
3	13-3-149 (273-279)	<b>500-14</b>	279-1 279-2	273 278 276-1 276-8 278-16			
4	13-3-191 (326-332)	<b>450-10</b>	332-ZV1 332-ZV2		330-2 331-7 bis 331-12 331-14	329-1 bis 329-20	328-1 bis 328-14 331-1 bis 331-6

### 3.4 Metallographische Untersuchungen

#### 3.4.1 Herstellen der Prüflinge

Untersuchungen der Gefügeausbildungen, im Speziellen der Kugelzahl, der Nodularität, des Perlitanteils sowie der Graphitform erfolgen durch lichtmikroskopische Aufnahmen und nachfolgender computerunterstützter Auswertung (DHS) an dafür präparierten Proben. Der chronologische Ablauf zur Herstellung der Prüflinge sei in Abbildung 29 wiedergegeben.

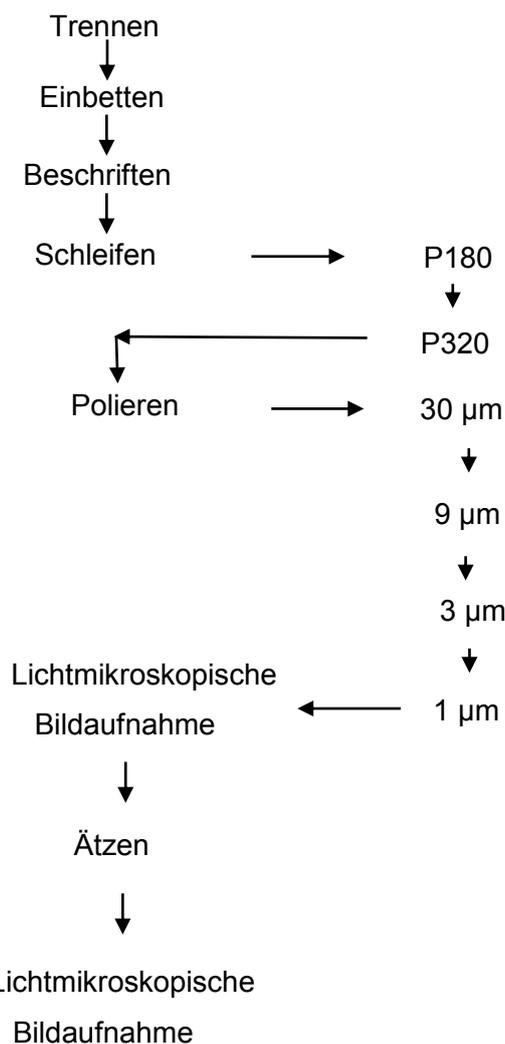


Abbildung 29: Herstellung eines Schlifffes für metallographische Untersuchungen.

Zu Beginn der metallographischen Untersuchung erfolgt die Probennahme an einer Zugversuchsprobe, wie sie in Abbildung 30 dargestellt ist. Dabei sind zwei Bereiche von Interesse. Der Schnitt A-A liegt quer zur Stabachse und einige Millimeter von der Bruchfläche entfernt. Der Schnitt B-B liegt dagegen in der Achse der Zugversuchsprobe. Dieser Bereich stellt den durch den vorangegangenen Zugversuch unbeeinflussten Bereich

der Probe dar, da hier im Wesentlichen nur die Einspannkräfte wirken. Anders ist das im Fall des Querschnittes in der Mitte der Probe. Hier können die Kugeln, sowie andere Gefügebestandteile unter mikroskopischer Betrachtung verzerrt erscheinen. Trotzdem kann dieser Bereich Aufschlüsse zur Porosität im Prüfquerschnitt liefern.

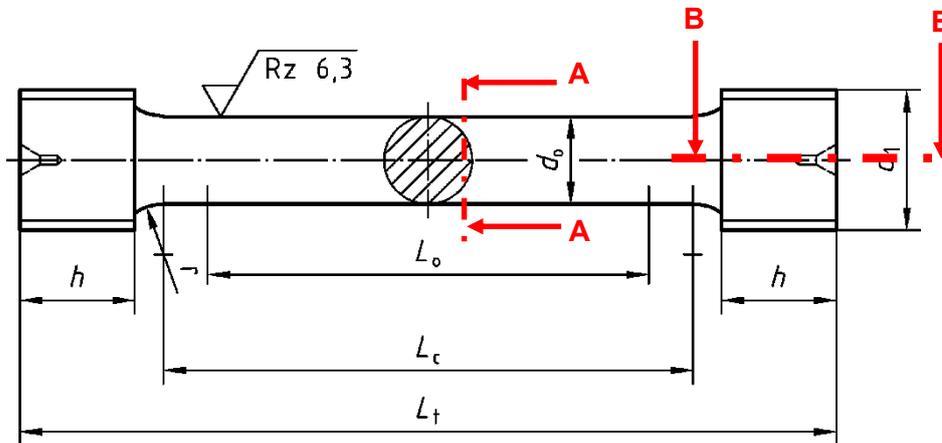


Abbildung 30: Probenahme an der Zugversuchsprobe [32].

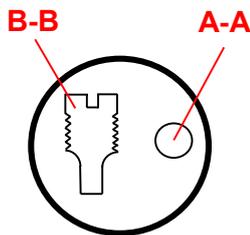


Abbildung 31: Einbetten der Probestücke.

Die Probenahme erfolgt durch Trennen mittels einer Hochgeschwindigkeitskreissäge mit einer Gusseisen-Korundtrennscheibe. Der Vorschub des Blattes erfolgt von Hand. Die abgetrennten Probestücke sind mit der Schnittfläche nach unten liegend in die Warmeinbettmaschine Citro-Press 20 einzulegen und mit einer Kunststoffgranulatomischung (20ml Duro-/ 20ml Multigranulat) zu beaufschlagen. Durch Temperatureinwirkung von etwa sieben Minuten, die aus einer Vorheiz-, Schmelz- sowie Kühlphase besteht kommt es zum Einbetten der Probestücke, sodass als Resultat ein Prüfkörper entsprechend Abbildung 31 entsteht.

Das Schleifen besteht aus zwei Teilschritten, wobei sich grundsätzlich nur die Körnungen der Schleifmittel unterscheiden. Die Prüflinge werden dabei unter Wasserzugabe von Hand an die sich drehende Schleifscheibe (P180 oder P320) gedrückt.

Geachtet wird dabei auf einen gleichmäßigen Abtrag der Prüflinge - zu erkennen an den unterschiedlichen Schattierungen des Einbettmaterials. Der Schleifvorgang ist abgeschlossen, wenn die feinen Kratzer in den Gusseisenstücken alle homogen gleichgerichtet sowie das Einbettmaterial gleichmäßig matt erscheinen.

Das Polieren besteht aus einer vierstufigen Prozesskette wobei mit einer Polierscheibe von 30 µm begonnen werden soll. In die Vorrichtung der Poliermaschine werden jeweils drei Prüflinge eingespannt und mit Diamantpolierpaste- und suspension beaufschlagt. Die Menge richtet sich nach Erfahrungswerten, sodass die Polierplatte einen matten Glanz aufweist. Sie darf weder zu trocken, noch zu nass sein. Weiters folgen Polierschritte mit 9 und 3 µm Polierplatten. Die Zeit in Bewegung liegt dabei zwischen 5 und 7 min. Als letzten Schritt bevor eine lichtmikroskopische Untersuchung durchgeführt werden kann erfolgt ein Polieren mit einer 1µm Scheibe und einer Dauer von 10 min. Bei diesem Vorgang muss die Polierplatte in Vergleich zu den vorherigen ziemlich trocken gehalten werden.

Anschließend kann der Prüfling lichtmikroskopisch untersucht werden, bevor eine Ätzung mit einer 2 %-igen HNO<sub>3</sub> Lösung durchzuführen ist. Dabei wird der Prüfling mit der polierten Oberfläche ca. 3 bis 5 Sekunden lang in die Lösung getaucht und anschließend mit Alkohol gereinigt. Durch diesen Vorgang können Korngrenzen sowie Perlitanteile sichtbar gemacht werden.

Die lichtmikroskopische Begutachtung erfolgt mit dem Auflichtmikroskop Olympus ColorView Bx51. Es stehen die Vergrößerungen 1,25; 5; 10; 20 und 50 zur Verfügung. Die analytische Bewertung der Gefügebilder sowie deren Untersuchung hinsichtlich Gussfehler (Poren, Einschlüsse) wird computerunterstützt mit Hilfe der Analysesoftware „analysis Auto“ durchgeführt.

### **3.5 Zugversuche bei Raumtemperatur nach DIN EN ISO 6892-1**

Der Zugversuch bei Raumtemperatur stellt ein gutes Werkzeug zur Ermittlung der Qualität eines Gusses dar. Zu niedrige Streckgrenzen, Zugfestigkeiten oder Bruchdehnungen lassen auf verschiedenste Arten von Gussfehlern schließen.

#### **3.5.1 Probengeometrie**

Die genormte Probengeometrie ist in Abbildung 32 dargestellt. Bei der Probenherstellung ist auf eine einwandfreie Oberflächenqualität in der Messstrecke zu achten.

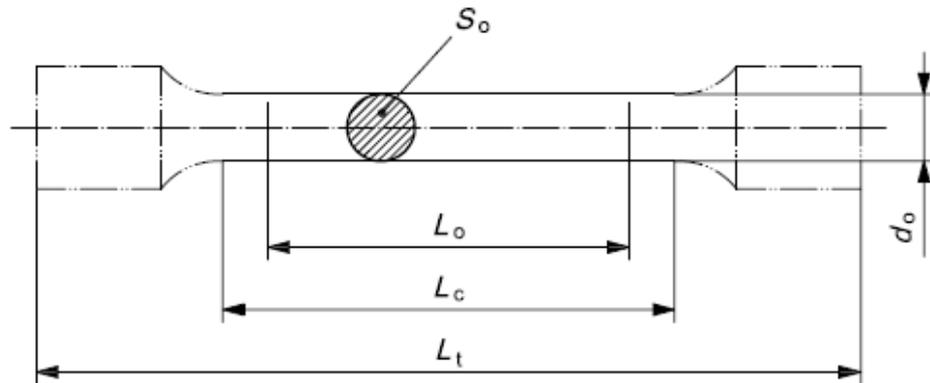


Abbildung 32: Probengeometrie für Zugversuche bei Raumtemperatur [33].

### 3.5.2 Ermittlung der mechanischen Kennwerte bei Raumtemperatur

Zugversuche werden an Prüflingen genormter Y2-Normplatten durchgeführt um den Normzustand eines Gusswerkstoffes zu prüfen. Dagegen dient die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften an Probenplatten zur Prüfung der Plattenhomogenität. Dabei sind an unterschiedlichen Positionen Proben zu entnehmen, Prüflinge herzustellen um letzten Endes einen genormten Zugversuch bei Raumtemperatur durchzuführen.

Die Legierung GJS 500-14 mit einem Siliziumgehalt von 3,98 % des Abgusses 13-3-164 (laut Proben- und Versuchsplan in Tabelle 5) wird hinsichtlich der Plattenhomogenität geprüft. An der Platte 273 und 278 werden die Proben mittig entnommen, hingegen haben die Ziffern 1 und 8 an der Platte 276 die Bedeutung „links“ und „mittig“. An der Platte 278 wird die Probe am rechten Rand entnommen (Blickrichtung entsprechend Abbildung 49).

## 3.6 Warmzugversuche nach DIN EN ISO 6892-2

### 3.6.1 Probengeometrie

Die Probengeometrie für die Warmzugversuche ist in DIN 50125 enthalten, d.h. identisch zu jener nach DIN EN 6892-1 die für Zugversuche bei Raumtemperatur gültig ist. Die Bezeichnung B10x50 hat dabei folgende Bedeutung:

B	Typ B lt. DIN 50125
10	Prüfdurchmesser in mm
50	Gesamtlänge ( $l_0$ )

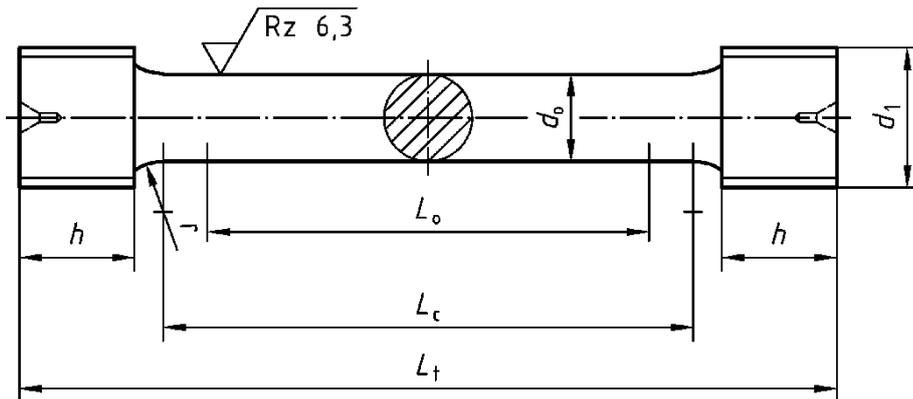


Abbildung 33: Probengeometrie der B10x50 Warmzugversuchsprobe nach DIN 50125 [32].

### 3.6.2 Ermittlung der mechanischen Kennwerte bei erhöhten Temperaturen

Entsprechend Tabelle 5 sind Warmzugversuche an den Legierungen GJS 500-14 mit 3,78 % Silizium sowie am Vergleichswerkstoff GJS 450-10 durchzuführen. Als Ergebnis genormter Warmzugversuche erhält man einen Verlauf der Zugfestigkeit, Streckgrenze sowie der Bruchdehnung über der Temperatur. Die Prüftemperaturen sind 200 °C, 300 °C, 400 °C sowie 450 °C.

### 3.7 Dauerfestigkeitsuntersuchungen (HCF)

Gegenstand der Untersuchung ist der Vergleich der beiden ferritischen Gusseisensorten GJS 500-14 und GJS 450-10 hinsichtlich ihrer Dauerfestigkeit. Von großem Interesse für Bauteilauslegungen ist dabei die ertragbare Spannung bei einem Dauerfestigkeitsniveau von  $10^7$  Lastwechsel, sowie die Streubreite der 90% und 10% Überlebenswahrscheinlichkeit.

Die Untersuchung der Dauerfestigkeit erfolgt an ungekerbten Proben bei einem Lastverhältnis  $R=-1$  und einem Prüfdurchmesser von 5,5 mm. Die Prüfung findet bei Raumtemperatur anhand von Zug-Druck-Wechsel sowie Umlaufbiegeversuchen statt. Der Mittelspannungseinfluss ist in beiden Fällen Null, ebenso die Kerbempfindlichkeit der Werkstoffe wird nicht untersucht.

Eine statistisch abgesicherte Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgt anhand computerunterstützter Rechenmethoden. Die Berechnungssoftware welche die dazu erforderlichen Lebensdauermodelle (FLM, RFL) abbildet, wird von der AVL List GmbH zur Verfügung gestellt. Vergleichend werden die Datenpunkte mit der kommerziell verfügbaren Statistiksoftware SAFD ausgewertet, welche als Ergebnis bilineare Wöhlerkurven liefert.

### 3.7.1 Umlaufbiegeprüfung nach DIN 50113

#### 3.7.1.1 Probengeometrie

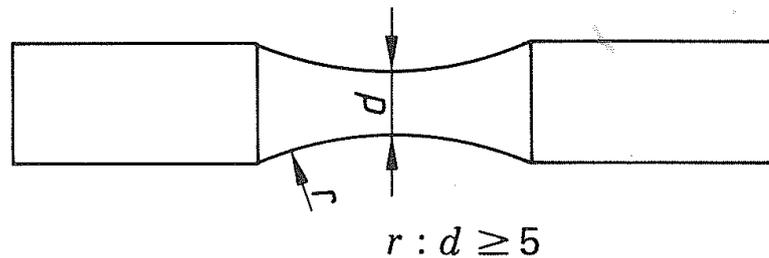


Abbildung 34: Umlaufbiegeprobe nach DIN 50113 [34].

Die nach DIN 50113 genormte Probengeometrie ist in Abbildung 34 dargestellt. Die Probe weist einen kreisförmigen Querschnitt vom Durchmesser 5,5 mm innerhalb der Messstrecke auf. Der Radius muss, um den Einfluss von Mikrokerben durch Oberflächenrauheiten zu vermeiden poliert ausgeführt sein.

#### 3.7.1.2 Dauerfestigkeitsuntersuchungen an der Legierung GJS 500-14

Zur Verfügung stehen 20 Proben, die nach folgender Probenverteilung auf 7 Lastniveaus aufgeteilt werden: (3) - 3(+1) - 3(+1) - 3(+2) - 4 - 4 - 3. Die Zahlenwerte in Klammern sollen dabei hochgesetzte Durchläufer andeuten. Um ein Hochtrainieren der Prüflinge auszuschließen ist es von großer Bedeutung diese mit einem ausreichenden „Sicherheitsabstand“ über dem Durchläuferniveau zu prüfen. Bei Dauerfestigkeitsuntersuchungen stellt sich ein Zeitfestigkeits-, Misch- sowie Dauerfestigkeitsniveau ein. Im Zeitfestigkeitsbereich werden die Proben in 20 MPa Intervallen beginnend bei einem Spannungsniveau von 360 MPa absteigend geprüft. Im Dauerfestigkeitsbereich und Mischfestigkeitsbereich wird in 10 MPa Intervallen geprüft. Die Anzahl der Durchläufer liegt bei 8: 3 bei 295 MPa, 2 bei 285 MPa und 3 bei 275 MPa. Die Durchläufer werden beginnend bei 320 MPa hochgesetzt. Aufgrund der hohen Anzahl der Durchläufer kann bei 380 MPa ein neues Spannungsniveau eingeführt werden.

#### 3.7.1.3 Dauerfestigkeitsuntersuchungen an der Legierung GJS 450-10

Die Vergleichslegierung GJS 450-10 wurde ebenfalls mittels Umlaufbiegeprüfung bei einem Lastverhältnis von -1 bei Raumtemperatur getestet. Zur Verfügung stehen 21 Proben die wie in Abbildung 50 (siehe Anhang) dargestellt auf 8 Spannungsniveaus aufgeteilt werden: 4 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 3 - 3

Bei dieser Aufteilung wird darauf geachtet, dass an den Rändern der Wöhlerkurve ausreichend viele Proben liegen, da das FLM Modell möglichst viele Durchläufer benötigt und ebenso am Beginn der Wöhlerlinie gut charakterisiert werden soll um die Lage der Kurve festzulegen. Der Bereich dazwischen ist bei diesem Modell von eher untergeordneter Bedeutung.

Im Zeitfestigkeitsbereich wird bei einem Spannungslevel von 370 MPa begonnen und in 20 MPa Intervallen geprüft. Im Mischbereich sowie dem Dauerfestigkeitsbereich ist beginnend bei 260 MPa in 10 MPa Intervallen zu testen. Diese Versuchsdurchführung führt zu 5 Durchläufern, 3 bei 250 MPa und 2 bei 260 MPa.

### 3.7.2 Zug-Druck-Wechselprüfung nach DIN 50100

#### 3.7.2.1 Probengeometrie

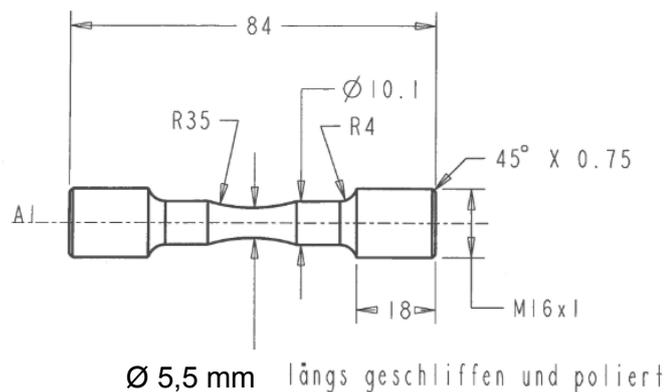


Abbildung 35: Geometrische Beziehungen an der ZDW-Probe

Da nach DIN 50100 keine Probengeometrie für Zug-Druck-Wechselprüfung genormt ist, stellt die in Abbildung 35 gezeigte Probe jene Form dar, wie sie unter anderem am Österreichischen Gießerei Institut Leoben verwendet wird. Der Prüfdurchmesser kann je nach Werkstoff variieren und weist bei den vorliegenden Untersuchungen einen Wert von 5,5 mm auf.

#### 3.7.2.2 Dauerfestigkeitsuntersuchungen an der Legierung GJS 500-14

Zur Verfügung stehen 18 Proben, die nach folgender Aufteilung auf verschiedenen Lastniveaus zu prüfen sind: 3 - 3 - 3 - 5 - 4. Aufgrund der starken Streuung der Messwerte im Dauerfestigkeits- und Mischniveau ist es nicht möglich mehr als 3 Spannungslevels im

Zeitfestigkeitsbereich zu untersuchen, wie Abbildung 53 zeigt. Bei einem Spannungsniveau von 260 MPa treten 5 Durchläufer auf, bei 250 MPa dagegen liegen 2 Durchläufer und 3 Brüche vor.

### **3.7.2.3 Dauerfestigkeitsuntersuchungen an der Legierung GJS 450-10**

Die Vergleichslegierung ist mittels 21 Proben die auf 7 Lastniveaus (4 - 2 - 2 - 3 - 3 - 3 - 3) aufgeteilt sind vollständig charakterisiert. Auch bei dieser Versuchsführung wird auf eine hohe Probenanzahl an den Rändern geachtet. Begonnen wird bei einem Spannungslevel von 320 MPa um anschließend in 20 MPa Intervallen Proben zu setzten. Um den Dauerfestigkeitsbereich präziser darzustellen wird das Intervall entsprechend auf 10 MPa reduziert, wie die Abbildung 55 zeigt.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Metallographische Untersuchungen

Mikrostrukturuntersuchungen wurden im Allgemeinen an zwei unterschiedlichen abgegossenen Platten durchgeführt. Zum einen an den Y2- Normplatten, an denen auch die mechanischen Kennwerte der untersuchten Normsorten ermittelt worden sind und zum anderen an den konventionellen Platten wie sie in Abbildung 49 zu sehen sind.

Ziel der Metallographie dieser Arbeit ist es einen Zusammenhang zwischen den mechanischen Kennwerten und den charakteristischen Gefügemerkmalen der vier Versuchslegierungen festzustellen. Besonders im Vordergrund steht dabei eine Verknüpfung zwischen den unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen und den lichtmikroskopischen Gefügen zu erkennen.

Wie in Tabelle 4 dargestellt unterscheiden sich die mickristallverfestigten GJS 500-14 Sorten in erster Linie im Siliziumgehalt. Die Legierung Nr. 1 (13-3-164) hat mit einem Siliziumgehalt von 3,36% eine geforderte Normstreckgrenze von 400 MPa nicht erreicht. Eine metallographische Begutachtung der jeweiligen Zugversuchsproben der Y2- Normplatten lässt bei einer gemessenen Kugeldichte von 287 und 278 Kugeln/mm<sup>2</sup> einen Höchstwert aller ermittelten Kugeldichten erkennen. In Tabelle 6 lässt sich tendenziell eine Abnahme der Kugeldichte bei zunehmendem Siliziumgehalt der Y2 Proben erkennen. Dieser Trend lässt sich allerdings bei stichprobenartigen metallographischen Untersuchungen „normaler“ Prüfkörper nicht reproduzieren.

Eine Auswertung des Gefüges der Probe 278-2 die eine auffällig niedrig Bruchdehnung von 11,9 % aufweist zeigt mit einer Kugeldichte von 240 Kugeln/mm<sup>2</sup> den niedrigsten Wert aller getesteten Zugversuchsproben der Platten. Weiters ist zu erkennen, dass abhängig von der Position der Probenahme die Kugeldichte zwischen 240 und 297 Kugeln/mm<sup>2</sup> schwankt.

Der Perlitanteil aller mischkristallverfestigten Versuchslegierungen ist mit maximal 1,0 % vernachlässigbar klein und damit normkonform. Auch die Nodularität und die Graphitform lassen auf keine besondere Auffälligkeiten schließen. Zusammenfassend lässt dies darauf schließen, dass die Impfung während des Herstellens der Probeplatten in ausreichendem Maße durchgeführt wurde.

Tabelle 6: Auswertung der metallographischen Untersuchungen der GJS Sorten.

Sorte	Probenbezeichnung		Chemische Zusammensetzung							Zugversuch bei RT					Gefügeuntersuchungen					
	Platte	Y2	C [Gew-%]	Si [Gew-%]	Mn [Gew-%]	Cu [Gew-%]	Mg [Gew-%]	S <sub>c</sub>	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A [%]	Kugeln/mm <sup>2</sup>	III	V	VI	V+VI	Nod.	Perlit		
<b>GJS 500-14</b>									<b>400</b>	<b>500</b>	<b>14</b>									
13-3-149		279-1	3,13	3,98	0,31	0,02	0,035		443	559	18,3	216	6	23,0	71,0	94,0	82	0,0		
13-3-149		279-2	3,13	3,98	0,31	0,02	0,035		444	561	18,5	213	4,0	23,0	73,0	96,0	85	0,0		
13-3-149	273-1		3,13	3,98	0,31	0,02	0,035		445	565	19,2	207	2,0	22	76	98	91	1,0		
13-3-149	278-2		3,13	3,98	0,31	0,02	0,035		443	553	11,9	240	3,0	25,0	72,0	97,0	86	0,0		
13-3-149	278-16		3,13	3,98	0,31	0,02	0,035		443	561	18,5	268	3,0	24	73	97	86	0,0		
13-3-149	276-8		3,13	3,98	0,31	0,02	0,035		441	557	18,1	264	3,0	21	76	97	89	0,0		
13-3-150		287-1	3,16	3,78	0,27	0,02	0,038		420	538	21,1	254	3,0	28,0	69,0	97,0	84	0		
13-3-150		287-2	3,16	3,78	0,27	0,02	0,038		418	537	19,6	249	2,0	26,0	72,0	96,0	85	0,0		
13-3-150	281-3		3,16	3,78	0,27	0,02	0,038		418	539	20,1	238	2,0	27	71	98	85	0		
13-3-150	286-4		3,16	3,78	0,27	0,02	0,038		416	534	20,1	223	1,0	26	73	99	88	0		
13-3-164		301-ZV1	3,36	3,36	0,27	0,1	0,038		384	515	22	287	2,0	22	76	98	91	1		
13-3-164		301-ZV2	3,36	3,36	0,27	0,1	0,038		389	515	22	278	1,0	19	80	99	92	0,0		
<b>GJS 450-10</b>									<b>310</b>	<b>450</b>	<b>10</b>									
13-3-191		332-ZV1	3,49	2,33	0,25	0,28	0,037		311	517	16,6	172	1,0	33,0	66,0	99,0	87	39,0		
13-3-191		332-ZV2	3,49	2,33	0,25	0,28	0,037		314	515	16,6	146	1,0	33,0	66,0	99,0	87	40,0		

## 4.2 Zugversuche bei Raumtemperatur nach DIN EN ISO 6892-1

### 4.2.1 Ergebnisse der Y2-Zugversuchsproben

Abbildung 36 stellt die Y2-Zugversuchsergebnisse der Versuchslegierungen graphisch gegenüber. Zu erkennen ist dabei der Anstieg der Zugfestigkeit sowie der Streckgrenze bei steigendem Siliziumgehalt. Gleichzeitig verringert sich die Dehnung. Der Gusswerkstoff GJS 450-10 mit einem Perlitanteil von 40 % erreicht gleiche Zugfestigkeitswerte wie eine GJS 500-14 Sorte mit 3,36 % Si. Aufgrund dieser Kurvenausprägungen ist auf eine einwandfreie Gussqualität der mischkristallverfestigten Legierungen zu schließen.

Da die GJS 450-10 Sorte sowohl die von der Norm geforderten Festigkeiten als auch die darin beschriebenen Erfahrungswerte für Gefügebestandteile deutlich übertroffen hat, ist sie als Legierung oberhalb der geforderten Kennwerte zu bewerten.

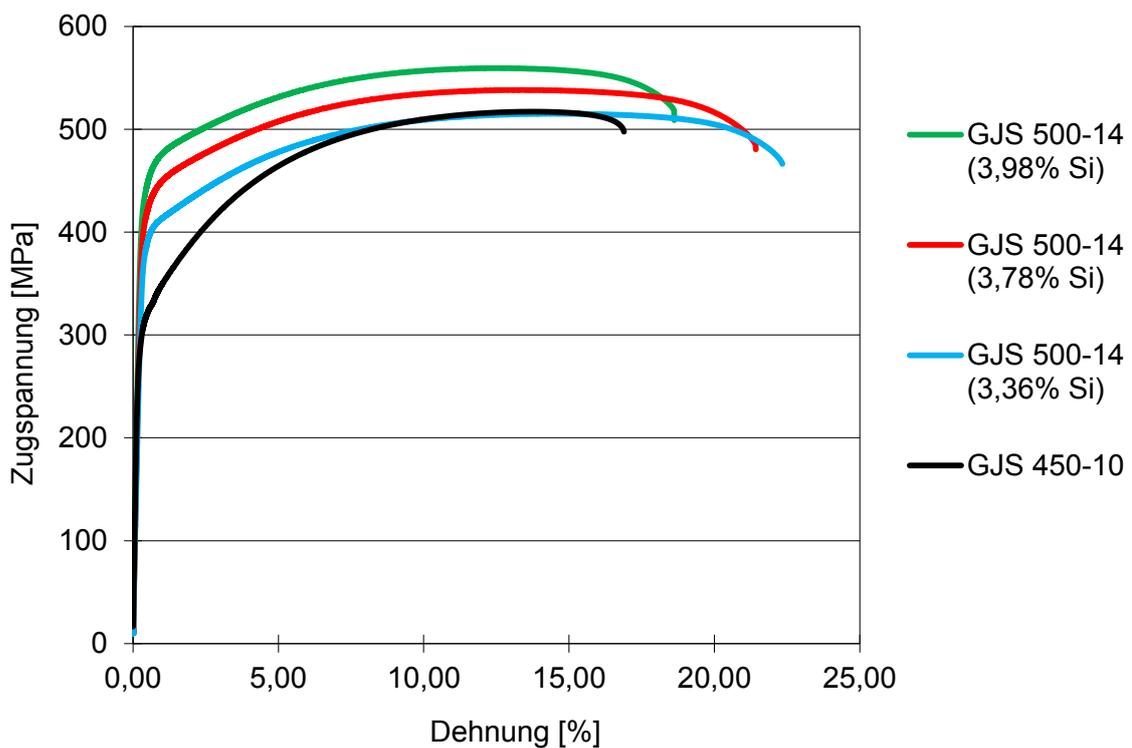


Abbildung 36: Zugversuch der Y2 Proben bei Raumtemperatur.

#### 4.2.2 Prüfen der Probenhomogenität der Platten

Abbildung 37 stellt die Zugversuchsauswertungen der Prüflinge an Probenplatten gegenüber. Auffallend ist dabei, dass die mittig entnommene Probe der Platte 278 eine deutlich reduzierte Bruchdehnung im Vergleich zu den übrigen Testergebnissen aufweist. Entsprechende Untersuchungen des Mikrogefüges führten zu keinen Hinweisen auf mögliche Inhomogenitäten bzw. Gefügeentartungen welche derart starke Einschränkungen in der Bruchdehnung üblicherweise zur Folge haben.

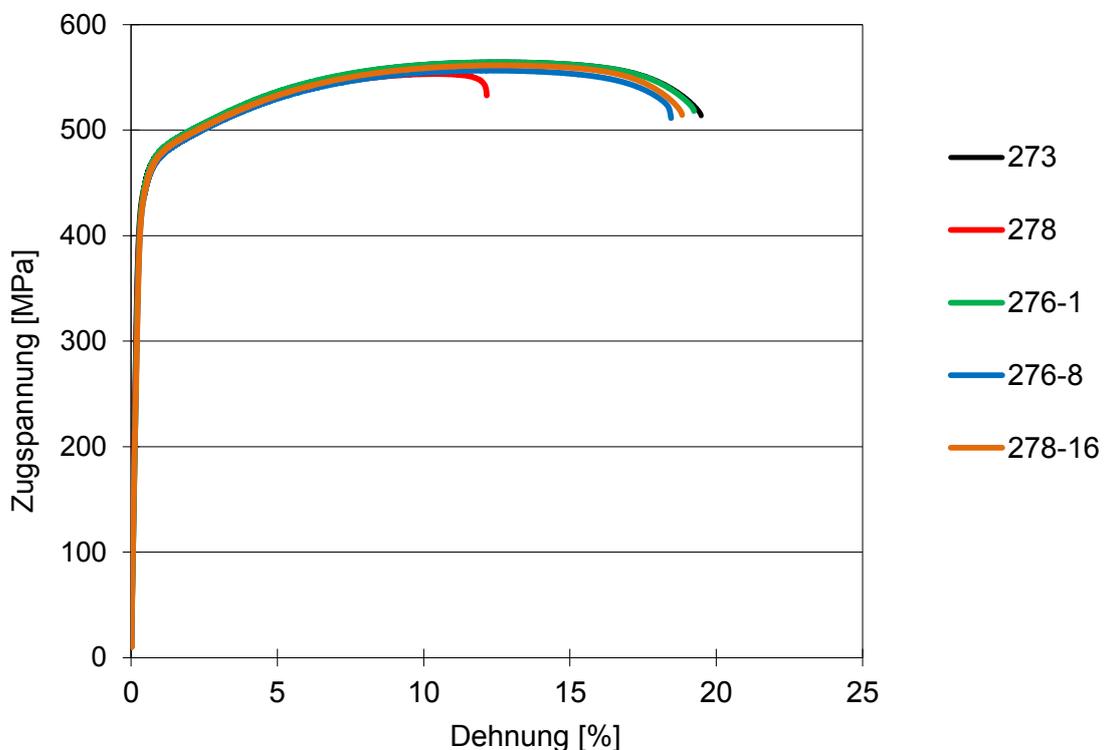


Abbildung 37: Zugversuch bei Raumtemperatur an der GJS 500-14 Platte mit 3,98% Si.

#### 4.3 Ergebnisse der Warmzugversuche nach DIN EN ISO 6892-2

Abbildung 38 stellt die Ergebnisse der mischkristallverfestigten Legierung graphisch dar. Die Linienzüge sind dabei die Ergebnisse der Versuchslegierung. Als Vergleich dazu sind einzelne Messergebnisse des SIRON 2012 Projektes vom Österreichischen Gießerei Institut dargestellt. Es handelt sich dabei um einen GJS 500-14 Werkstoff mit 3,90% Silizium. Hier wurden wie zu erwarten leicht erhöhte Messwerte für Zugfestigkeit und Streckgrenze bei leicht abgesenkten Bruchdehnungen ermittelt.

Grundsätzlich kann beim Warmzugversuch in Abbildung 38 ein kontinuierliches Absinken der Zugfestigkeit sowie der Streckgrenze verzeichnet werden. Bei 400°C kommt es offensichtlich zu einem Verfestigungsmechanismus, wodurch die Zugfestigkeit von dort an leicht ansteigt. Die Bruchdehnungen der mischkristallverfestigten Sorten zeigen ein auffälliges Verhalten ab einer Prüftemperatur von 200°C. Die Dehnungswerte fallen von etwa 18 % auf nahezu 2 % ab. Auch die Vergleichslegierung des SIRON Projektes mit einem Siliziumgehalt von 3,90 % weist gleiche Werte bei 400°C auf. Lediglich im Niedertemperaturbereich zwischen 25 °C bis 200 °C sind signifikant niedrigere Bruchdehnungen bei Legierungen mit leicht erhöhtem Siliziumgehalt erkennbar. Der neuerliche Anstieg der Bruchdehnung ab einer Temperatur von 400 °C ist auf den Verlust der Plastizität zurückzuführen.

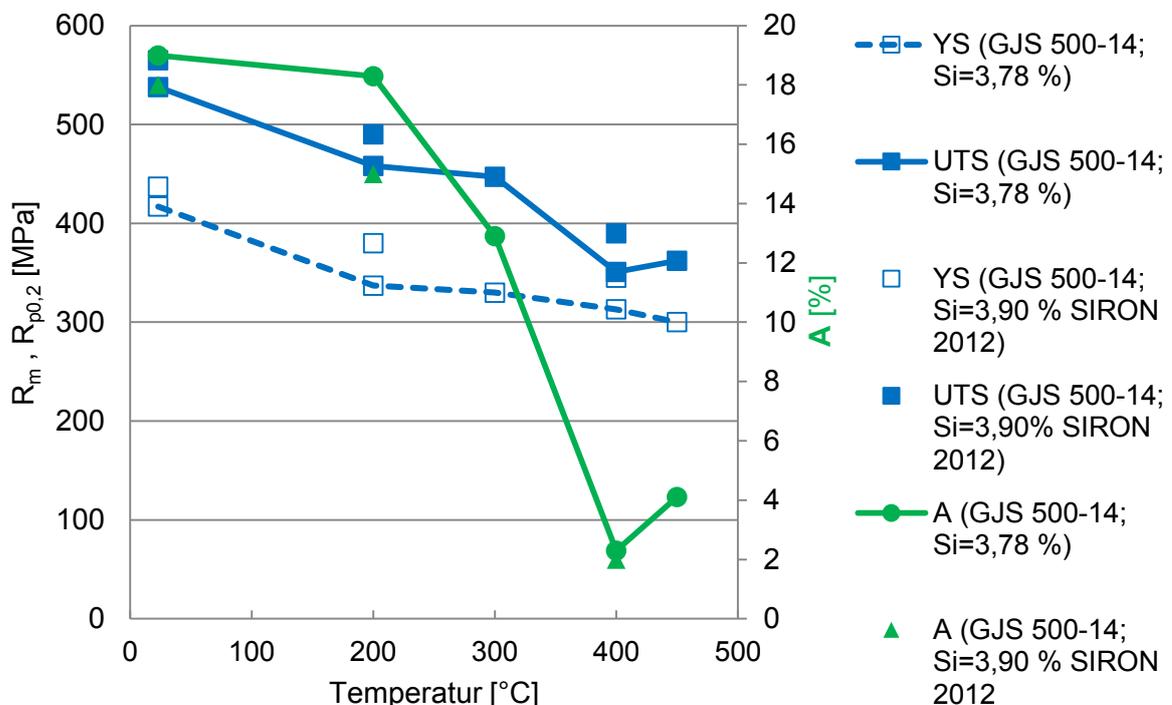


Abbildung 38: Ergebnisse der Warmzugversuche von GJS 500-14.

Die Ergebnisse der Warmzugversuche der Legierung GJS 450-10 sind in Abbildung 39 dargestellt. Anzumerken ist, dass die Messwerte bei Raumtemperatur aufgrund mangelnder Anzahl an Prüflingen anhand Y2-Proben ermittelt wurden. Gleichermäßen wie bei den mischkristallverfestigten Sorten kommt es auch bei dieser Legierung zu einem kontinuierlichen Abfall der Zugfestigkeit und Streckgrenze mit steigender Temperatur. Der Abfall der Bruchdehnungswerte mit steigender Temperatur ist bei dieser Legierung deutlich geringer als bei der mischkristallverfestigten Sphärogusslegierung.

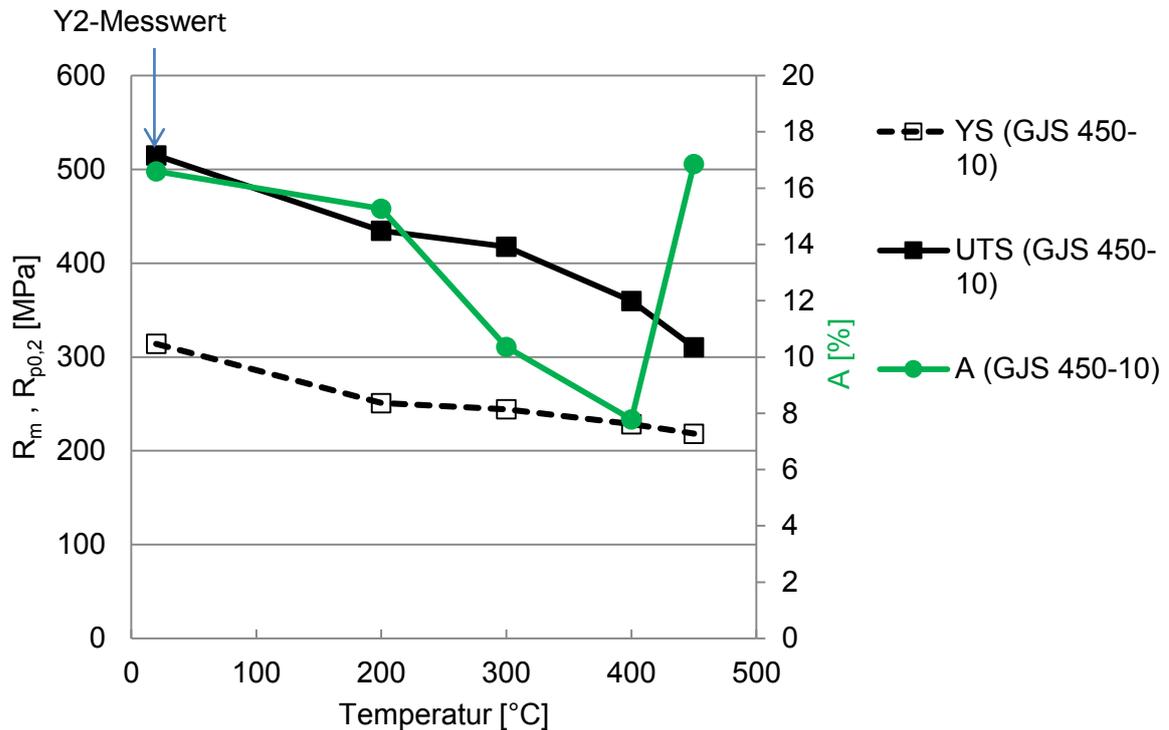


Abbildung 39: Ergebnisse der Warmzugversuche von GJS 450-10.

In Abbildung 40 sowie Abbildung 41 sind die Zugversuchsergebnisse beider Legierungen gegenübergestellt. Klar ersichtlich ist, dass die Streckgrenze der mischkristallverfestigten Sorte deutlich über jener der GJS 450 Sorte liegt. Der Unterschied in der temperaturabhängigen Zugfestigkeit ist nicht so stark ausgeprägt. Dieser Effekt ist auf den hohen Perlitanteil der GJS 450-10 Sorte zurückzuführen. Bei 400 °C zeigt die GJS 450-10 Sorte leicht höhere Zugfestigkeitswerte als die mischkristallverfestigte Legierung.

Der Vergleich der Bruchdehnungen zeigt den Steilabfall der mischkristallverfestigten Sorte sehr deutlich. Die Bruchdehnung liegt dabei bei 400 °C bei ca. 2 %, was im Vergleich zur 450-10 Sorte mit etwa 8% sehr niedrig ist.

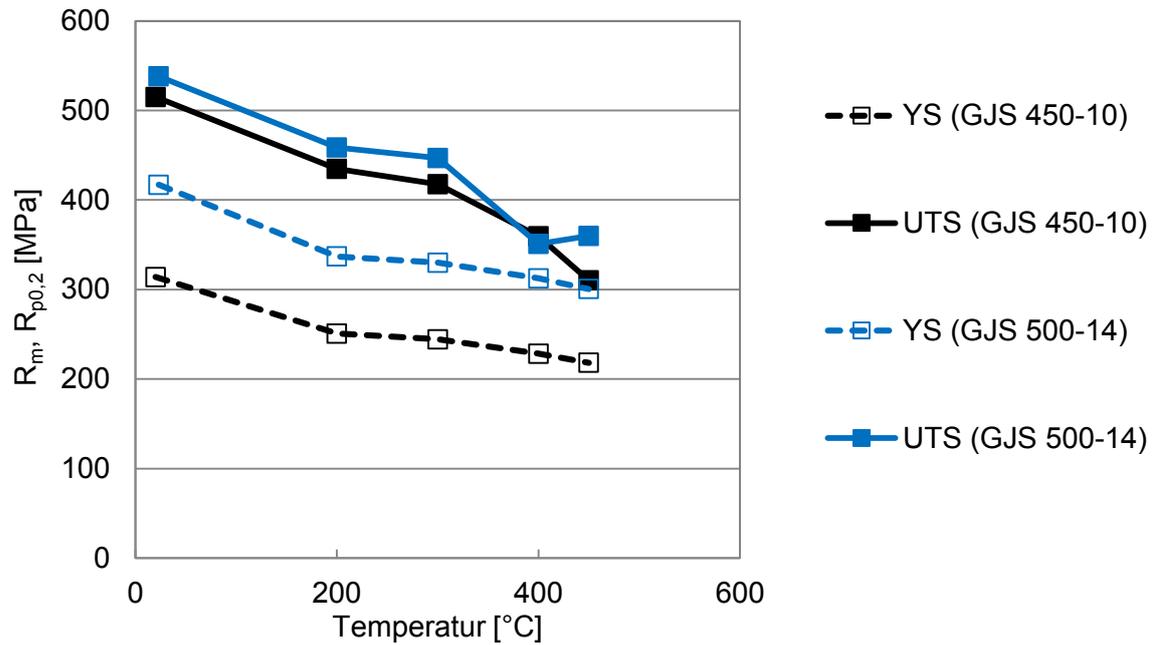


Abbildung 40: Vergleich der Zugfestigkeiten und Streckgrenzen von Sphärogusslegierungen.

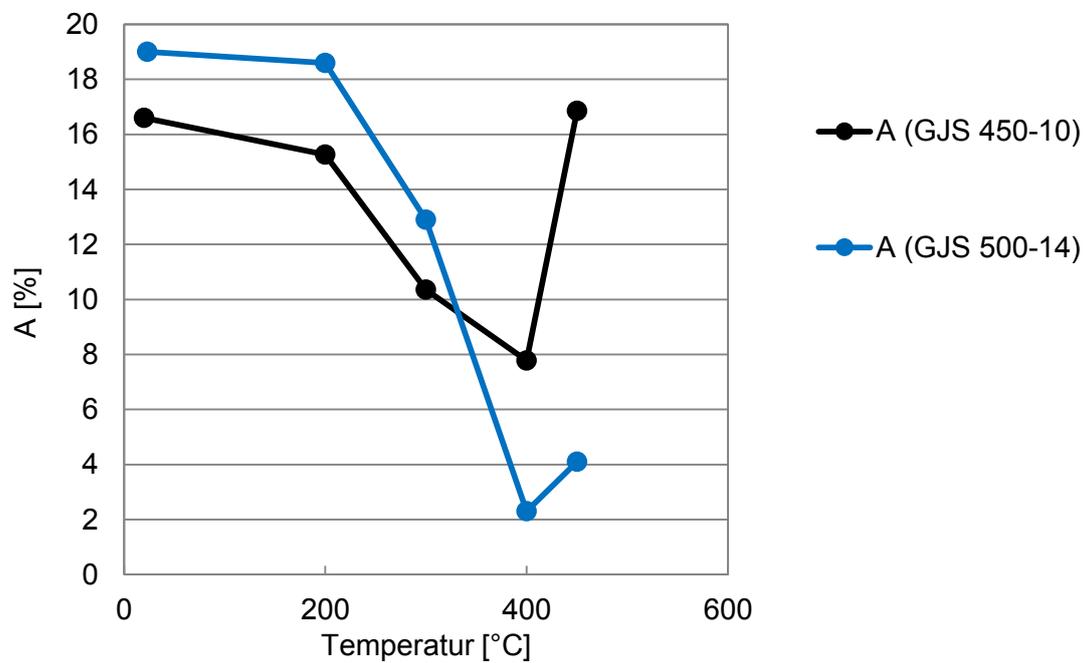


Abbildung 41: Vergleich der Bruchdehnungen von Sphärogusslegierungen.

#### 4.4 Dauerfestigkeitsuntersuchungen (HCF)

##### 4.4.1 Umlaufbiegeprüfung nach DIN 50113 der Sorte GJS 500-14

Abbildung 42 zeigt die Auswertung von 50%-Wöhlerlinien der mischkristallverfestigten Sorte GJS 500-14 mit einem Siliziumgehalt von 3,78%.

Auffällig bei dieser Darstellung ist, dass die Einführung eines neuen Spannungsniveaus bei 380 MPa die Auswertung nach dem Random Fatigue Limit Modell zu einer deutlichen Rechtsverschiebung der 50%-Ausfallwahrscheinlichkeitslinie führt. An dieser Stelle sei angemerkt, dass das zugrundeliegende Berechnungsmodell zur Ermittlung statistisch abgesicherter Wöhlerlinien im Fall des RFL-Modells hochgesetzte Durchläufer berücksichtigt, jedoch bei Anwendung des FLM-Modells nicht.

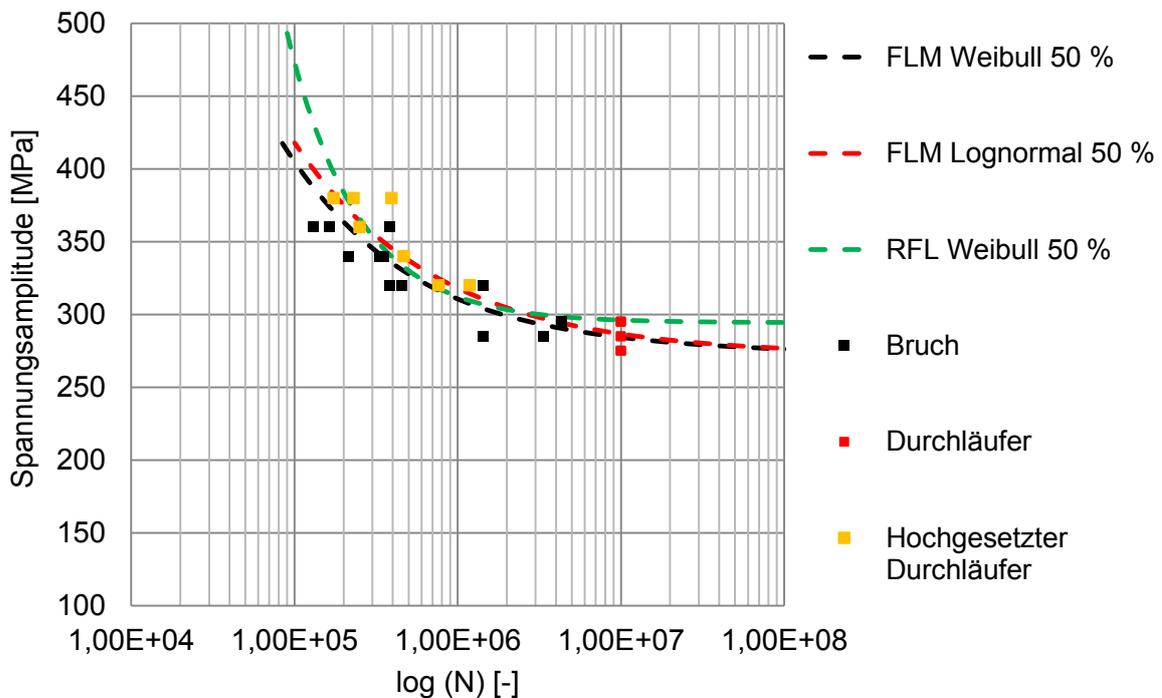


Abbildung 42: 50%-Wöhlerlinien der Legierung GJS 500-14 bei Umlaufbiegeprüfung.

Abbildung 43 zeigt die Streubänder der Wöhlerlinien. Die untere Begrenzung kennzeichnet die 90% Überlebenswahrscheinlichkeit, die obere definiert jene Grenze, bei der lediglich 10% der Proben überleben würden. Aus diesen Messdaten kann mithilfe der folgenden Definitionsformel das Streumaß berechnet werden [35]:

$$T_{\sigma a} = 1: \frac{\sigma_a(10\%)}{\sigma_a(90\%)}$$

Den Auswertungen in Abbildung 43 liegt eine Weibullverteilung zugrunde. Angewendet wurde sowohl die FLM als auch RFL Methode zur Lebensdauerberechnung. Das Streumaß im Dauerfestigkeitsbereich nimmt beim FLM Modell kontinuierlich ab, während jenes, berechnet nach dem RFL Modell, annähernd konstant bleibt. Auffallend ist auch, dass die Linie der 50% Überlebenswahrscheinlichkeit aufgrund der Weibullverteilung nicht mittig im Streuband liegt, wie das bei einer Lognormalverteilung der Fall wäre.

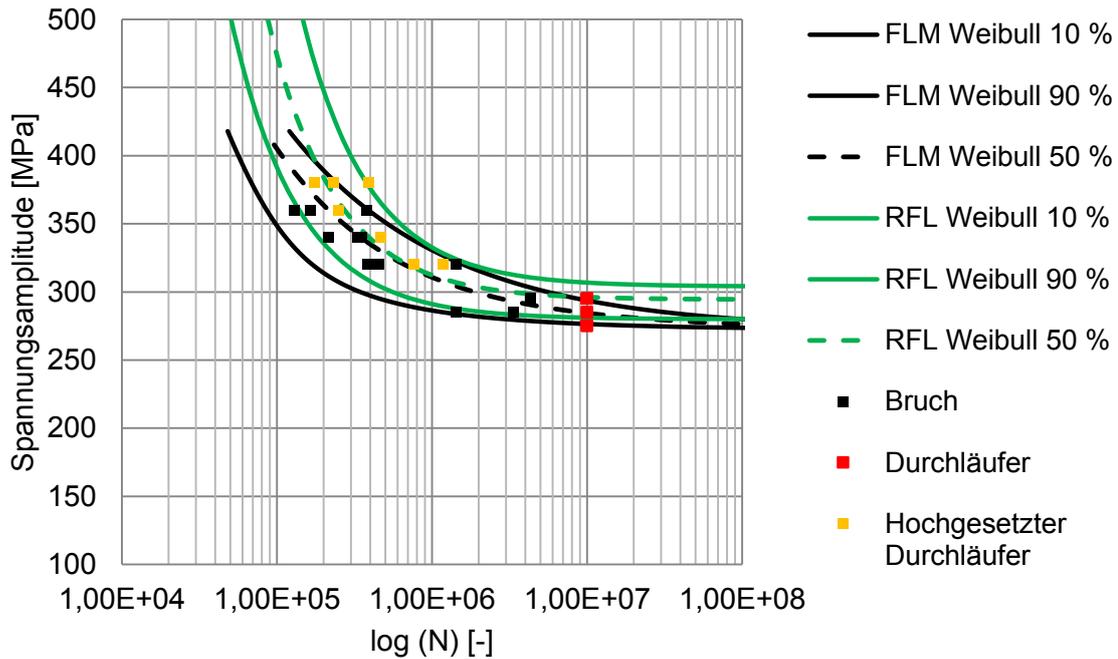


Abbildung 43: Streubänder der Wöhlerlinien der Legierung GJS 500-14 bei Umlaufbiegeprüfung.

Die bilineare Darstellung von Lebensdauerersuchen ist in Abbildung 44 gezeigt. Dieser Auswertung liegt eine Sinus-Verteilung zugrunde. Der horizontale Verlauf der Dauerfestigkeitslinie steht im Normalfall nicht im Einklang mit der Realität. Sonsino [36] beispielsweise schlägt für Eisengraphitwerkstoffe einen Abfall von 5% pro Dekade vor.

Die SAFD Auswertung führt demnach auf eine Dauerfestigkeit von 295 MPa und einem Knickpunkt der bei etwa  $10^6$  Lastwechsel liegt.

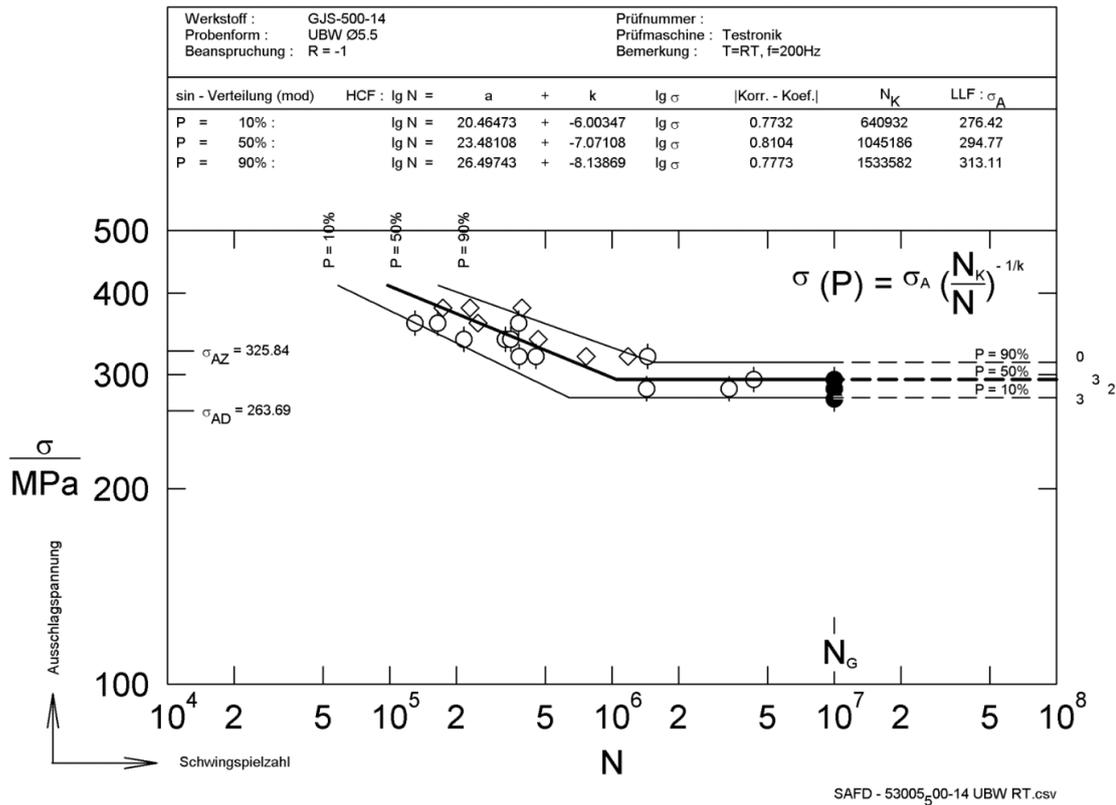


Abbildung 44: Bilineare Wöhlerkurve (SAFD Auswertung).

#### 4.4.2 Umlaufbiegeprüfung nach DIN 50113 der Sorte GJS 450-10

Im Folgenden befinden sich zwecks der Übersichtlichkeit die graphischen Wöhlerauswertungen im Anhang.

Bei der Darstellung der Streubänder mit zugrundeliegender Weibullverteilung und FLM Berechnung, gezeigt in Abbildung 51, fällt auf, dass im Übergangsbereich, also an der Stelle wo die Wöhlerkurven abflachen zu beginnen, das Streumaß zunimmt. Die Kurve der 10% Ausfallwahrscheinlichkeit ist nicht zur 90%-Kurve parallelverschoben, wie beim RFL-Modell, sondern baucht aus.

Die SAFD Auswertung (Abbildung 52) kann aufgrund der geringen Probenzahl von 2 geprüften Proben je Lastniveau zwischen den Rändern der Wöhlerlinie keine Streubänder darstellen. Der Knickpunkt liegt mit etwa  $4 \cdot 10^6$  Lastwechsel bei deutlich höheren Werten als die mischkristallverfestigte Sorte. Die Dauerfestigkeit erreicht 263 MPa.

#### 4.4.3 Vergleich der Umlaufbiegeversuche

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse verschiedener Rechenmodelle zeigt Abbildung 45. Die siliziumlegierte Sorte GJS 500-14 erreicht demnach um ca. 7% höhere Dauerfestigkeitswerte als GJS 450-10 bei Umlaufbiegung. Die Fatigue Limit Modelle mit zugrundeliegender Lognormal bzw. Weibullverteilung führend im Vergleich zum RFL-Modell zu leicht konservativeren Ergebnissen. Eine Auswertung mit der SAFD-Software zeigt, dass sich das Ergebnis der GJS 500-14 Legierung dem RFL-Ergebnis annähert, jedoch der Dauerfestigkeitswert der Legierung GJS 450-10 eher im Bereich der FLM-Modelle liegt.

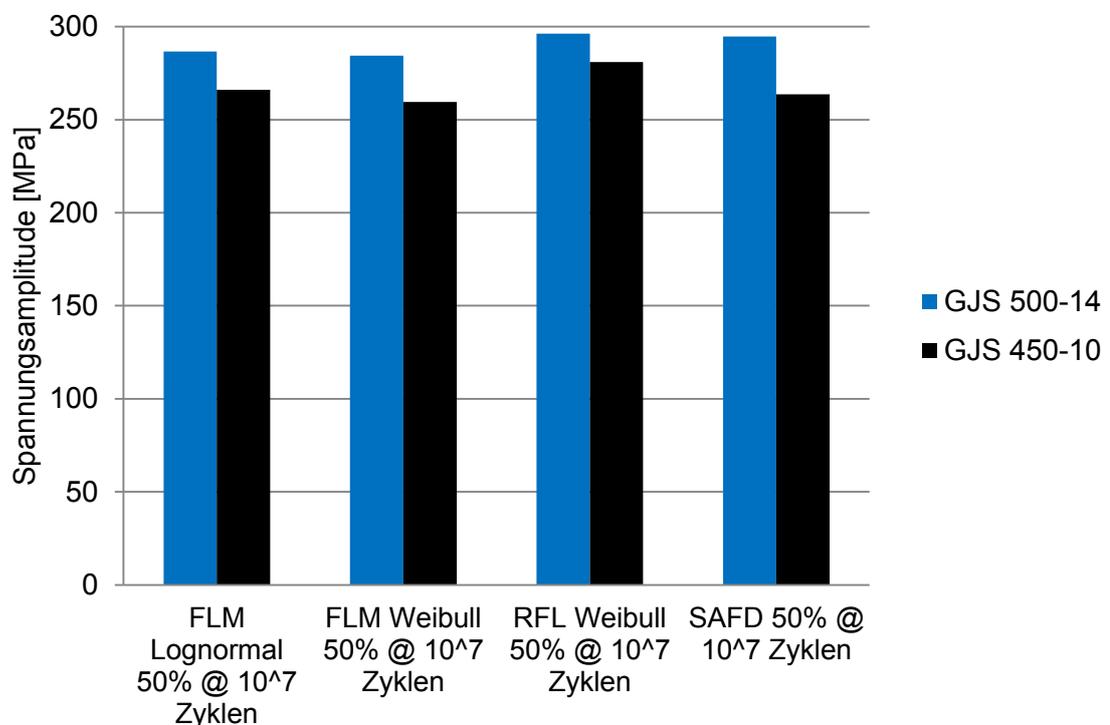


Abbildung 45: Dauerfestigkeitsergebnisse der Umlaufbiegeprüfung.

In Tabelle 7 und Tabelle 8 sind die Skalare der Spannungsamplitude sowie der Streuspanne bei einem Durchläuferniveau von  $10^7$  Lastwechsel gegenübergestellt. Die ermittelte Dauerfestigkeiten bei Umlaufbiegung für GJS 500-14 liegen demnach zwischen 284,4 und 296,2 MPa. Die Streumaße erreichen Werte zwischen 1,09 und 1,13, die für Gusswerkstoffe bemerkenswert niedrig sind. Sonsino [36] schlägt für Eisengraphitguss eine Streuspanne von 1,40 vor.

Die Vergleichslegierung GJS 450-10 weist Dauerfestigkeitskennwerte für Umlaufbiegung im Bereich von 259 bis 281 MPa auf. Die Streumaße liegen zwischen 1,10 und 1,17.

Tabelle 7: Dauerfestigkeit und Streuspanne bei Umlaufbiegung der Legierung GJS 500-14.

	$\sigma_D$ bei $10^7$ LW	$T_\sigma$ bei $10^7$ LW	$\sigma_D/R_m$
FLM Lognormal	286,7	1,09	0,532
FLM Weibull	284,4	1,06	0,529
RFL Weibull	296,2	1,09	0,551
SAFD	294,8	1,13	0,548

Tabelle 8: Dauerfestigkeit und Streuspanne bei Umlaufbiegung der Legierung GJS 450-10.

	$\sigma_D$ bei $10^7$ LW	$T_\sigma$ bei $10^7$ LW	$\sigma_D/R_m$
FLM Lognormal	266,1	1,10	0,517
FLM Weibull	259,6	1,17	0,504
RFL Weibull	281,0	1,13	0,546
SAFD	263,7	1,10	0,512

#### 4.4.4 Zug-Druck-Wechselprüfung nach DIN 50100 der Sorte GJS 500-14

Bei einem Spannungsniveau von 250 MPa streuen die Messwerte der Brüche im Bereich von  $4 \cdot 10^5$  und  $2 \cdot 10^6$  Lastwechsel, insgesamt liegt also eine Streuung von fast eineinhalb Dekaden vor. In Abbildung 53 sind die 50% Wöhlerlinien für die gegebene Punktelwolke abgebildet. Die Kurven zeigen trotz der starken Streuungen der Messwerte einen typischen Verlauf. Anders ist dies bei einer Darstellung der Streubänder, wie die Abbildung 54 zeigt. Eine Lebensdauerberechnung nach dem Fatigue Limit Modell führt aufgrund dieser Streuungen im Misch- und Dauerfestigkeitsbereich zu einer starken Verzerrung der 90%-Überlebenswahrscheinlichkeit. Berechnungen nach dem RFL Modell führen hingegen zu keiner Entartung der Streubänder.

Eine sinnvolle SAFD Auswertung ist im Fall zu großer Streuungen der Messwerte nicht möglich. Entweder erfolgt eine Erhöhung der Datenpunkte oder ein Ausschluss von einzelnen Messwerten. Untersuchungen hinsichtlich der Mikrostruktur um Gefüge- bzw. Gussfehler darzustellen blieben erfolglos um Datenpunkte kategorisch ausschließen zu können.

#### 4.4.5 Zug-Druck-Wechselprüfung nach DIN 50100 der Sorte GJS 450-10

Auch bei diesen Versuchen treten große Streuungen der Messwerte im Mischbereich von etwa 1 Dekade auf, wie die Abbildung 55 darlegt. Es liegen 3 Durchläuferniveaus vor: 230 MPa, 240 MPa und 250 MPa.

In Abbildung 56 sind die Streubänder für RFL und FLM Methoden bei zugrundeliegender Weibullverteilung dargestellt. Berechnungen nach dem FLM Modell führen demnach zu einer leichten Erweiterung des Streumaßes im Mischfestigkeitsbereich.

Eine SAFD mit einer Lognormalverteilung führt auf eine Dauerfestigkeit von 248 MPa bei einem Streumaß von 1,19.

#### 4.4.6 Vergleich der Zug-Druck-Wechselprüfungsversuche

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse verschiedener Rechenmodelle zeigt Abbildung 46. Die mischkristallverfestigte Sorte GJS 500-14 erreicht demnach abhängig vom zugrunde liegenden Modell um ca. 6-8% höhere Dauerfestigkeitswerte bei einem Durchläuferniveau von  $10^7$  Lastwechsel. Ebenso wie bei den Umlaufbiegeversuchen liefert das Fatigue Limit Model mit einer Weibullverteilung leicht konservative Rechenergebnisse, verglichen mit anderen Modellen. Bei Betrachtung der Vergleichslegierung GJS 450-10 fällt auf, dass eine Auswertung nach dem Random Fatigue Limit Modell exakt das gleiche Ergebnis liefert wie die SAFD Berechnung. Einzig die ermittelten Streuspannen differieren.

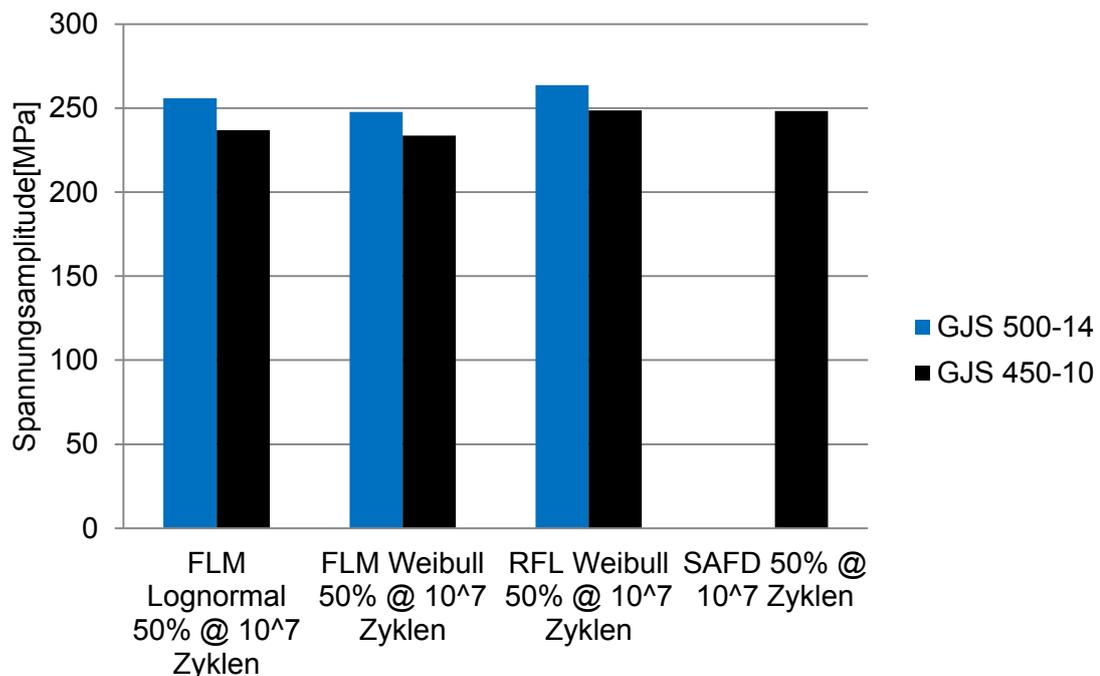


Abbildung 46: Dauerfestigkeitsergebnisse der Zug-Druck-Wechselprüfung.

In Tabelle 9 und Tabelle 10 sind die Skalare der Spannungsamplitude sowie der Streuspanne bei einem Durchläuferniveau von  $10^7$  Lastwechsel gegenübergestellt. Die Dauerfestigkeitswerte für GJS 500-14 liegen zwischen 256 und 263,6 MPa bei einer berechneten Streuspanne von 1,12 bis 1,15. Die Vergleichslegierung führt bei Zug-Druck-Wechselbelastungen auf Dauerfestigkeitswerte die zwischen 233,7 und 248,6 MPa liegen. Die Streumaße sind mit Ausnahme der SAFD Auswertung mit Werten zwischen 1,09 und 1,11 tendenziell niedriger als jeder der mischkristallverfestigten Sorte.

Tabelle 9: Dauerfestigkeit und Streuspanne bei Zug-Druck-Wechselbelastung der Legierung GJS 500-14.

	$\sigma_D$ bei $10^7$ LW	$T_\sigma$ bei $10^7$ LW	$\sigma_D/R_m$
FLM Lognormal	256	1,15	0,476
FLM Weibull	245,8	1,12	0,457
RFL Weibull	263,6	1,14	0,490
SAFD	-	-	

Tabelle 10: Dauerfestigkeit und Streuspanne bei Zug-Druck-Wechselbelastung der Legierung GJS 450-10.

	$\sigma_D$ bei $10^7$ LW	$T_\sigma$ bei $10^7$ LW	$\sigma_D/R_m$
FLM Lognormal	236,9	1,11	0,460
FLM Weibull	233,7	1,08	0,454
RFL Weibull	248,6	1,09	0,483
SAFD	248,4	1,19	0,482

#### 4.4.7 Zeitfestigkeitsauswertung nach ASTM E739

Die vorliegenden Auswertungen zeigen in bilinearer Darstellung des S-N-Verlaufes unterschiedliche Steigungen der Zeitfestigkeitsgeraden abhängig vom Werkstoff und der aufgebrachten Belastungsart. Da Bauteile Kerben besitzen kommt es werkstoffabhängig zu einem steileren Abfall der Zeitfestigkeitsgeraden. Die Unterscheidung zwischen Zeitfestigkeitsbereich und Dauerfestigkeitsbereich erfolgt in bilinearer Darstellung der Wöhlerlinien anhand des Abknickpunktes bei der Lastspielzahl  $N_k$ . Bei kontinuierlich abfallenden Wöhlerlinien sind Literaturdaten zur Ermittlung der Lastspielzahl am Abknickpunkt heranzuziehen. Sonsino [36] beispielsweise empfiehlt für hochfesten Eisengraphitguss  $5 \cdot 10^5$  Lastwechsel und für mittelfesten  $2 \cdot 10^6$  Lastwechsel.

Im vorliegenden Fall der Zeitfestigkeitsauswertung ist es möglich sich bezüglich der Lastspielzahl am Knickpunkt anhand der SAFD Auswertungen zu orientieren. Grundsätzlich werden bei den nachfolgenden Auswertungen im Zeitfestigkeitsbereich jene

Spannungsamplituden oberhalb der Mischniveaus als Messpunkte herangezogen. Als Mischniveaus definiert man jenes Spannungslevel auf dem sowohl Durchläufer als auch Brüche auftreten. Diese Vorgehensweise steht bei näherer Betrachtung im Einklang mit den Ergebnissen der SAFD-Wöhlerlinien.

#### 4.4.7.1 Statistisches Modell der ASTM E739 Auswertung

Der S-N-Zusammenhang wird durch folgendes lineare Modell beschrieben:

$$Y = A + BX \quad [37]$$

Die Variablen X und Y sind definiert als:

$$Y = \log(N) \quad X = \log(\sigma) \quad [37]$$

Daraus folgt:

$$\log(N) = A + B \cdot \log(\sigma) \quad [37]$$

Somit stellt der Parameter B die Steigung k der Zeitfestigkeitsgeraden dar. Bei der Voraussetzung einer Lognormalverteilung im Zeitfestigkeitsbereich sowie bei konstanter Varianz folgen die Maximum-Likelihood Schätzfunktionen von A und B:

$$\hat{A} = \bar{Y} - \hat{B} \bar{X} \quad [37]$$

$$\hat{B} = \frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \quad [37]$$

Das Symbol „Dach“ bedeutet Schätzwert, das Symbol „Querstrich“ bedeutet Durchschnitt.

#### 4.4.7.2 Zeitfestigkeitsauswertung der Umlaufbiegeversuche von GJS 500-14 und GJS 450-10

Die mischkristallverfestigte Sorte GJS 500-14 besitzt den Abknickpunkt bei ca.  $10^6$  Lastwechsel wie anhand Abbildung 44 gezeigt wird. Das bedeutet alle Lastniveaus oberhalb 320 MPa fallen in den Zeitfestigkeitsbereich und können zur Auswertung herangezogen werden. Die Vergleichslegierung GJS 450-10 unter zyklischer Umlaufbiegebelastung erreicht den Übergang vom Zeitfesten in den Mischbereich bei etwa  $4 \cdot 10^6$  Lastwechsel und somit sind alle Spannungslevels oberhalb 270 MPa zur Bestimmung der Steigung heranzuziehen. In Tabelle 11 sowie Tabelle 12 sind die Schritte zur Ermittlung der Steigung (Parameter B) ausgehend von  $\sigma$ -N Wertepaaren dargestellt. Demnach erreicht die Zeitfestigkeitsgerade der GJS 500-14 eine Steigung von -4,6 und jene der GJS-450 Sorte -12,8. Die Zeitfestigkeitsgerade der Vergleichslegierung ist also etwa um den Faktor 3 flacher als die der mischkristallverfestigten ferritischen Sorte.

Tabelle 11: Zeitfestigkeitsauswertung nach ASTM E739 für GJS 500-14.

$\sigma$	N	$X=\log(\sigma)$	$Y=\log(N)$	$X_{\text{mean}}$	$Y_{\text{mean}}$	$X_i-X_{\text{mean}}$	$Y_i-Y_{\text{mean}}$	$(X_i-X_{\text{mean}})^2$	$(X_i-X_{\text{mean}})(Y_i-Y_{\text{mean}})$	$\hat{B}$	$\hat{A}$
320	7,654E+05	2,50514998	5,88386349	2,54328046	5,47917746	-0,03813048	0,40468603	0,001453933	-0,015430872	-4,64620744	17,2957861
340	4,671E+05	2,53147892	5,66937546			-0,01180154	0,190198	0,000139276	-0,002244629		
320	4,551E+05	2,50514998	5,65808489			-0,03813048	0,17890742	0,001453933	-0,006821826		
380	3,941E+05	2,5797836	5,5956417			0,03650314	0,11646423	0,001332479	0,00425131		
320	3,833E+05	2,50514998	5,58353882			-0,03813048	0,10436136	0,001453933	-0,003979348		
360	3,819E+05	2,5563025	5,58199401			0,01302204	0,10281654	0,000169574	0,001338882		
340	3,518E+05	2,53147892	5,54626497			-0,01180154	0,06708751	0,000139276	-0,000791736		
340	3,319E+05	2,53147892	5,52095229			-0,01180154	0,04177483	0,000139276	-0,000493007		
360	2,509E+05	2,5563025	5,39941584			0,01302204	-0,07976163	0,000169574	-0,001038659		
380	2,303E+05	2,5797836	5,36231845			0,03650314	-0,11685901	0,001332479	-0,004265721		
340	2,154E+05	2,53147892	5,33315496			-0,01180154	-0,1460225	0,000139276	0,00172329		
380	1,744E+05	2,5797836	5,24154648			0,03650314	-0,23763098	0,001332479	-0,008674277		
360	1,646E+05	2,5563025	5,21650634			0,01302204	-0,26267112	0,000169574	-0,003420515		
360	1,306E+05	2,5563025	5,11582677			0,01302204	-0,36335069	0,000169574	-0,004731569		
								<b>0,009594638</b>	<b>-0,044578677</b>		

Tabelle 12: Zeitfestigkeitsauswertung nach ASTM E739 für GJS 450-10.

$\sigma$	N	$X=\log(\sigma)$	$Y=\log(N)$	$X_{\text{mean}}$	$Y_{\text{mean}}$	$X_i-X_{\text{mean}}$	$Y_i-Y_{\text{mean}}$	$(X_i-X_{\text{mean}})^2$	$(X_i-X_{\text{mean}})(Y_i-Y_{\text{mean}})$	$\hat{B}$	$\hat{A}$
270	3,91E+06	2,431363764	6,592121217	2,51201556	5,4335367	-0,080651791	1,158584518	0,006504711	-0,093441917	-12,8657836	37,7525853
270	2,80E+06	2,431363764	6,447189051			-0,080651791	1,013652352	0,006504711	-0,081752878		
290	1,89E+06	2,462397998	6,275997619			-0,049617558	0,84246092	0,002461902	-0,041800853		
310	1,35E+06	2,491361694	6,129906341			-0,020653862	0,696369642	0,000426582	-0,014382722		
290	5,65E+05	2,462397998	5,752355804			-0,049617558	0,318819105	0,002461902	-0,015819025		
310	3,10E+05	2,491361694	5,491337877			-0,020653862	0,057801178	0,000426582	-0,001193818		
330	1,47E+05	2,51851394	5,168205695			0,006498384	-0,265331004	4,2229E-05	-0,001724223		
330	1,43E+05	2,51851394	5,155414993			0,006498384	-0,278121706	4,2229E-05	-0,001807342		
350	1,24E+05	2,544068044	5,093771781			0,032052489	-0,339764918	0,001027362	-0,010890311		
350	9,35E+04	2,544068044	4,970579306			0,032052489	-0,462957394	0,001027362	-0,014838937		
370	6,48E+04	2,568201724	4,811541494			0,056186169	-0,621995205	0,003156886	-0,034947527		
370	5,43E+04	2,568201724	4,735023717			0,056186169	-0,698512982	0,003156886	-0,039246768		
370	5,30E+04	2,568201724	4,724456105			0,056186169	-0,709080594	0,003156886	-0,039840522		
370	5,27E+04	2,568201724	4,721612789			0,056186169	-0,71192391	0,003156886	-0,040000277		
								<b>0,033553115</b>	<b>-0,43168712</b>		

Die graphische Auswertung in doppellogarithmischer Auftragung der Spannungsamplitude und Lastzyklenzahl ist in Abbildung 47 wiedergegeben. Diese in der Betriebsfestigkeit Yübliche Auftragung erlaubt es durch eine lineare Regression die Parameter der Zeitfestigkeitsauswertung zu verifizieren.

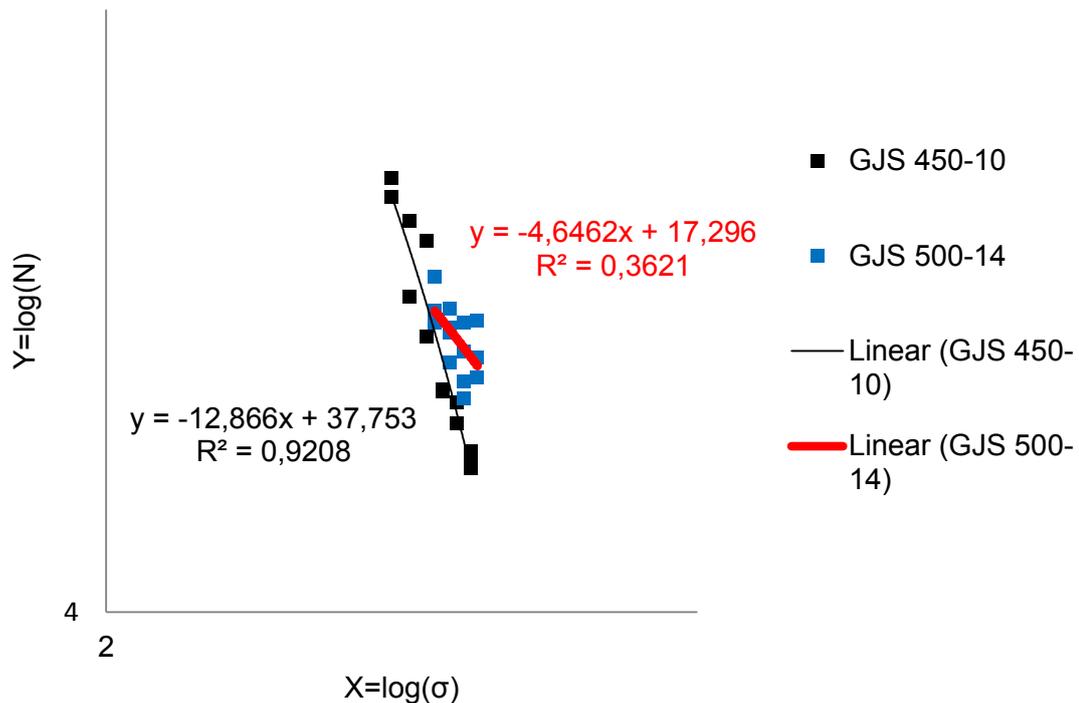


Abbildung 47: Zeitfestigkeitsauswertung der Umlaufbiegeversuche für GJS 500-14 und GJS 450-10.

Für die Legierung GJS 450-10 stimmt der Wert für die Steigung mit jener der SAFD ( $k=-13$ ) Auswertung sehr gut überein. Die neue ferritische Sorte erreicht nach SAFD eine Steigung von ca. -7. Wie das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression zeigt ist dieser Unterschied wahrscheinlich auf die größere Streuung der  $\sigma$ -N-Wertepaare zurückzuführen.

#### 4.4.7.3 Zeitfestigkeitsauswertung der Zug-Druck-Wechselfestigkeitsversuche von GJS 500-14 und GJS 450-10

In diesem Fall steht aufgrund der großen Streuung der Zug-Druck-Wechselfestigkeitsmesswerte der mischkristallverfestigten Sorte GJS 500-14 nur die SAFD-Auswertung der Vergleichslegierung zur Verfügung. Der Übergang vom zeitfesten in den dauerfesten Bereich liegt bei  $1 \cdot 10^6$  Lastwechsel, wie in Abbildung 57 klar ersichtlich ist. Alle Messpunkte die oberhalb von 260 MPa liegen sind dem zeitfesten Bereich zuzuordnen. Diese Datenpunkte werden zur Ermittlung der Steigung (Parameter B) herangezogen. Tabelle 13 stellt die Vorgehensweise nach ASTM E739 tabellarisch dar. Als Ergebnis liefert diese Auswertung eine Steigung der Zeitfestigkeitsgeraden von -10,3.

Tabelle 13: Zeitfestigkeitsauswertung nach ASTM E739 für GJS 450-10.

$\sigma$	N	X=log( $\sigma$ )	Y=log(N)	$X_{\text{mean}}$	$Y_{\text{mean}}$	$X_i - X_{\text{mean}}$	$Y_i - Y_{\text{mean}}$	$(X_i - X_{\text{mean}})^2$	$(X_i - X_{\text{mean}})(Y_i - Y_{\text{mean}})$	$\hat{B}$	$\hat{A}$
260	1,26E+06	2,4149733	6,100163689	2,4532484	5,4218806	-0,0382751	0,6782831	0,001464983	-0,02596135	-10,379063	30,884301
240	1,13E+06	2,3802112	6,053654558			-0,0730372	0,6317739	0,005334433	-0,046143002		
250	9,87E+05	2,39794	5,994405147			-0,0553084	0,5725245	0,003059023	-0,031665436		
260	8,34E+05	2,4149733	5,920905604			-0,0382751	0,499025	0,001464983	-0,01910023		
260	5,34E+05	2,4149733	5,727622578			-0,0382751	0,305742	0,001464983	-0,011702303		
280	2,44E+05	2,447158	5,386855529			-0,0060904	-0,0350251	3,70931E-05	0,000213317		
280	2,25E+05	2,447158	5,352761192			-0,0060904	-0,0691194	3,70931E-05	0,000420966		
300	2,12E+05	2,4771213	5,325925956			0,0238728	-0,0959547	0,000569911	-0,002290707		
300	1,35E+05	2,4771213	5,130976692			0,0238728	-0,2909039	0,000569911	-0,006944694		
320	1,07E+05	2,50515	5,030599722			0,0519015	-0,3912809	0,002693769	-0,020308078		
320	7,18E+04	2,50515	4,856124444			0,0519015	-0,5657562	0,002693769	-0,029363613		
320	6,54E+04	2,50515	4,815577748			0,0519015	-0,6063029	0,002693769	-0,031468049		
320	6,15E+04	2,50515	4,788875116			0,0519015	-0,6330055	0,002693769	-0,032853956		
0,02477749									-0,257167136		

Die graphische Auswertung in doppellogarithmischer Auftragung der Spannungsamplitude und Lastzyklenzahl ist in Abbildung 48 wiedergegeben. Der Vergleich mit den Ergebnissen der SAFD-Auswertung ( $k=-11,6$ ) lässt auch hier eine gute Übereinstimmung erkennen.

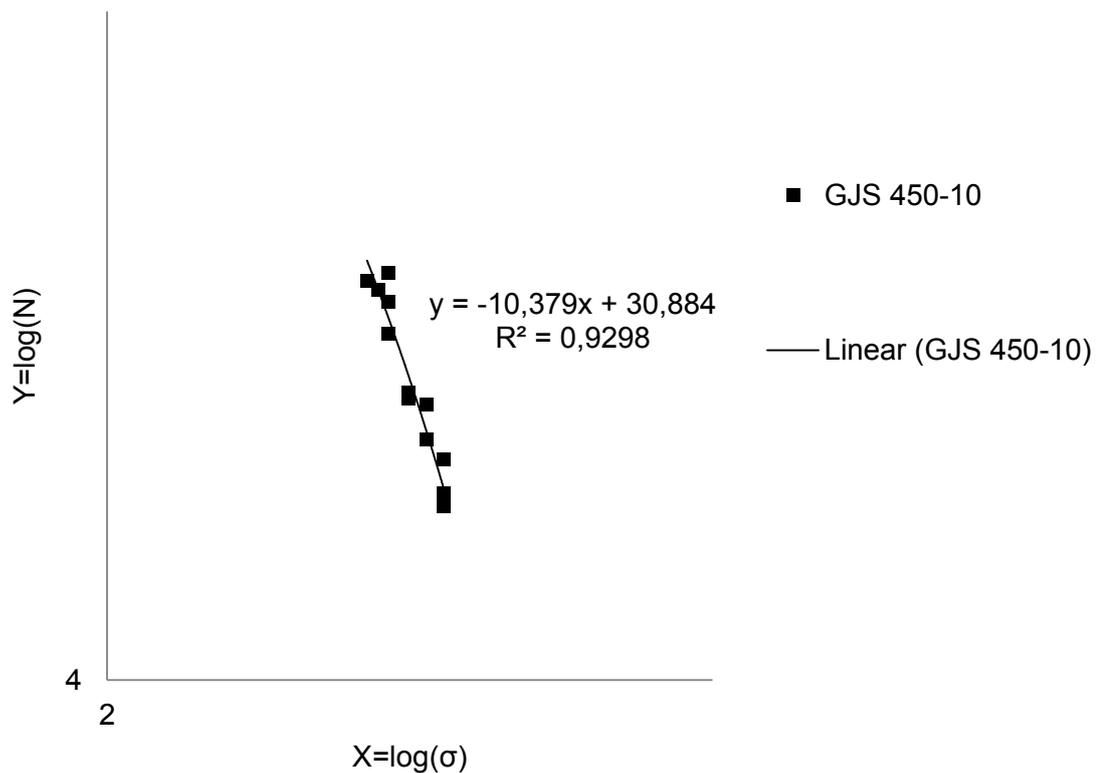


Abbildung 48: Zeitfestigkeitsauswertung der Zug-Druck-Wechselfestigkeitsversuche GJS 450-10.

## 5 Zusammenfassung

Durch eine Neufassung der EN 1563:2011 wurden drei neue GJS Sorten aufgenommen. Die mischkristallverfestigte Sphärogusslegierung GJS 500-14 stellt mit einer vollferritischen Matrix und einer Bruchdehnungssteigerung von beispielweise 100% gegenüber der ferritisch/perlitischen Sorte GJS 500-7 eine gute Alternative dar.

Hinsichtlich gießtechnologischer Eigenschaften sind keine bemerkenswerten Nachteile festzustellen, so ist die Einstellung eines ferritischen Grundgefüges bei der GJS 500-14 Sorte deutlich einfacher als bei der Vergleichslegierung GJS 450-10.

Die Gusslegierung GJS 450-10 hat die mechanischen Normkennwerte übertroffen und weist einen Perlitanteil von ca. 40 % auf. Bei den 500-14 Sorten wurden 3 unterschiedliche chemische Zusammensetzungen eingestellt, wodurch sich auch die mechanischen Kennwerte entsprechend Siliziumanteil verändern. Dadurch ist es möglich ein in der industriellen Praxis übliches Qualitätsspektrum abzubilden, wovon eine Sorte deutlich über den Anforderungen der Norm, eine die Norm nicht erreicht und eine Versuchslegierung als normkonform anzusehen ist.

Metallographische Untersuchungen als Qualitätsmerkmal der Legierungen lassen keine eindeutige Aussage zu, d.h. allein aus der Kugeldichte, Nodularität und Matrixgefügeausbildung kann die Qualität der mischkristallverfestigten Sorten nicht eindeutig bewertet werden. Die Auswertungen haben gezeigt, dass ein gegenläufiger Trend hinsichtlich der Kugeldichte vorliegt, abhängig davon, ob man Y2-Proben oder Bereiche der Probenplatten untersucht. Der Perlitanteil liegt bei allen mischkristallverfestigten GJS Sorten unter 1 %. Die Wirkung des Impfmittels ist in Bezug auf die hohe Kugeldichte aller Legierungen als gut anzusehen.

Durch Zugversuche bei Raumtemperatur stellt man fest, dass erwartungsgemäß mit steigendem Siliziumgehalt die Zugfestigkeit sowie die Streckgrenze ansteigen. Warmzugversuche bis 400 °C führen zu einem Abfall der Streckgrenze und Zugfestigkeit. Auffallend bei der mischkristallverfestigten Sorte GJS 500-14 ist, dass es aufgrund eines Verfestigungsmechanismus ab 400 °C zu einem Anstieg der Zugfestigkeit kommt. Ab 200°C tritt ein Abfall der Bruchdehnung auf Werte bis 2% ein. Höhere Siliziumgehalte führen auch bei Zugversuchen unter erhöhten Temperaturen zu höheren Messergebnissen bei Zugfestigkeit und Streckgrenze. Einzig die Bruchdehnung bei 400°C weist auch hier einen Wert von 2 % auf. Die Bruchdehnungswerte der Vergleichslegierung liegen mit 8% bei 400°C deutlich über dem Niveau der mischkristallverfestigten Sorten. Ein neuerliches Ansteigen der Zugfestigkeit bei 400 °C kann hier nicht festgestellt werden. Die niedrigen Dehnungskennwerte bei erhöhten Temperaturen der GJS 500-14 Sorte kann im

Motorenbau vor allem bei Einsatz als Zylinderkopfwerkstoff zu Problemen führen. Vergleichend zu den quasi-statischen Zugversuchsuntersuchungen ist es daher empfehlenswert zusätzlich TMF (Thermo-mechanic Fatigue) Messungen durchzuführen. Mit Hilfe der Dauerfestigkeitsuntersuchungen bei Raumtemperatur an ungekerbten Proben wird sowohl der Einfluss des Rechenmodells als auch die Sortenabhängigkeit untersucht. Sehr eindeutig lässt sich die Abhängigkeit der zugrunde liegenden statistischen Verteilungen und Rechenmodelle auf das Auswertergebnis darstellen. So schwanken beispielsweise bei Umlaufbiegeprüfungen der GJS 500-14 Sorte, trotz homogenen Wöhlerlinienverlaufes die Dauerfestigkeitskennwerte zwischen 10 MPa.

Im Allgemeinen führen die Fatigue Limit Modelle zu eher konservativen Ergebnissen im Vergleich zu Auswertungen nach dem Random Fatigue Limit Modell. Außerdem ist beim FLM Modell darauf zu achten verhältnismäßig mehr Proben an den „Rändern“ der Wöhlerlinie zu setzen, d.h. den Beginn der Kurzzeitfestigkeit sowie den Bereich der Dauerfestigkeit gut zu charakterisieren. Das RFL Modell berücksichtigt im Gegensatz zum FLM Modell hochgesetzte Prüflinge. Dadurch kann es wie im Fall der Umlaufbiegeprüfung der mischkristallverfestigten Sorte zu einer Verschiebung des Verlaufes kommen.

Die siliziumlegierte Sorte GJS 500-14 erreicht sowohl bei Umlaufbiege- als auch bei Zug-Druck-Wechselprüfung um ca. 7% höhere Dauerfestigkeitskennwerte als die Vergleichslegierung mit einem Perlitanteil von 40%. Positiv anzumerken ist, dass die vollferritische Sorte GJS 500-14 mit einem ermittelten Dauerfestigkeitswert von 295 MPa bei Raumtemperatur den vom Normenausschuss (EN 1563:2011) geforderten Mindestwert von 225 MPa deutlich übersteigen kann.

## Literaturverzeichnis

- [1] Europäisches Komitee für Normung (Hrsg.). (2011). *EN 1563:2011: Gießereiwesen-Gusseisen mit Kugelgraphit (Deutsche Fassung)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [2] Gärtner U., Koch T., König G. (2005). *Verdichtungsverhältnis und Zylinderspitzenruck-Einfluss auf das thermodynamische Verhalten von Nfz-Dieselmotoren*. In *MTZ-Motortechnische Zeitschrift 1/2005*. (Jahrgang 66). (pp. 36-42). Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [3] Merker G., Schwarz C., Teichmann R. (Hrsg.). (2011) *Grundlagen Verbrennungsmotoren-Funktionsweise, Simulation, Messtechnik*. (5). Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- [4] Macherauch E. (1992). *Praktikum in Werkstoffkunde-Skriptum für Ingenieure, Metall- und Werkstoffkundler, Werkstoffwissenschaftler, Eisenhüttenleute, Fertigungs- und Umformtechniker*. (10). Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg & Sohn.
- [5] Schatt W. (1996). *Werkstoffwissenschaft*. (8). Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.
- [6] Bauer W., Österreichisches Gießerei Institut (Hrsg.). (2013) *Gusseisen mit Lamellengraphit-Metallurgie, Gefüge- und Werkstoffkunde von Grauguss für Anwender*. Leoben.
- [7] ASM International (Hrsg.). (1996). *Metallurgy and Properties of Gray Irons*. In *ASM Speciality Handbook: Cast Irons*. ASM International. (p. 33).
- [8] White W., Rice L., Eisea A. (1951). *Influence of Silicon Content on Mechanical and High-Temperature Properties of Nodular Cast Iron*. In *Transactions, A.F.S.* (vol. 59). (pp. 337-347).
- [9] Löblich H., Stets W. (2013). *Werkstoff- und fertigungstechnische Grundlagen der Herstellung und Anwendung von hoch siliziumhaltigem Gusseisen mit Kugelgraphit Teil 1*. In *Gießerei-Die Zeitschrift für Technik, Innovation und Management*. Gießerei 100, (Jahrgang 07/2013). (pp. 30-47).

- [10] Yensen T. (1915). (o.T.). In *University of Illinois Experiment Station*. (Bulletin 83).
- [11] Lacy G., Gensamer M. (1944). *Properties of Alloyed Ferrites*, In *Trans., A.S.M.* (vol. 32). (pp.85-115).
- [12] Pelleg J. (1964). *The Influence of Silicon on the As-Cast Properties on Nodular Graphite Iron*. In *The British Foundryman*. (pp. 436-442).
- [13] Scheidewind R., Wilder H. (1952). *Commercial Experience with Higher Silicon Nodular Irons*. In *Trans., A.F.S.* (pp. 322-329).
- [14] Reynolds C., Taylor H. (1952). *Mechanical Properties of Spherulitic Graphite Cast Iron*. In *Transactions, A.F.S.* (pp.687-702).
- [15] Heine B. (2003). *Werkstoffprüfung-Ermittlung von Werkstoffeigenschaften*. Leipzig: Carl Hanser Verlag.
- [16] Radaj D., Vormwald M. (2007). *Ermüdungsfestigkeit-Grundlagen für Ingenieure*. (3). Springer Verlag Berlin-Heidelberg-New York.
- [17] Haibach E. (2006). *Betriebsfestigkeit-Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. (3) Springer Verlag Berlin-Heidelberg.
- [18] Guddehus H., Zenner H. (1999). Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsberechnung. Düsseldorf: Verlag Stahleisen.
- [19] Pascual F., Meeker W. (1999). *Estimating Fatigue Curves With The Random Fatigue-Limit Model*. In *Technometrics*. (vol. 41, Issue 4). (pp. 277-289).
- [20] Engler Pinto C., Lasecki J. (2005). *Statistical Approaches Applied to Fatigue Test Data Analysis*. In *SAE International*. (2005-01-0802).
- [21] Meeker W.Q., Escobar L.A. (1998). *Statistical Methods for Reliability Data*. Kanada: John Wiley & Sons, Inc.
- [22] Sachs L. (2002). *Angewandte Statistik-Anwendung statistischer Methoden*. (10). Springer Verlag Berlin-Heidelberg-New York.

- [23] Bohley P. (2000). *Statistik: einführendes Lehrbuch für Wirtschafts- und Sozialwissenschaftler*. (7). München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- [24] Bertsche B., Lechner G. (1990). *Zuverlässigkeit im Maschinenbau – Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten*. Berlin: Springer.
- [25] Mühlbach G. (2000). *Repetitorium der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik*. (2). Springe: Binomi Verlag.
- [26] Österreichisches Gießerei Institut (Hrsg.). (2012). *Siron-High Silicon Ductile Iron-Gesamt-Ergebnisdarstellung der am ÖGI erarbeiteten Projektergebnisse für die beteiligten österr. Projektpartner zur internen Verwendung*. Leoben.
- [27] Rio Tinto Iron & Titanium Inc. (Hrsg.). (o.J.). *Sorelmetal Gusseisen mit Kugelgraphit*. Montreal.
- [28] Österreichisches Gießerei Institut (Hrsg.). (2005). *Gusseisenschulung für Anwender*. Leoben.
- [29] Lampic M., Walz M. (2013). *Impfen zur Anregung der Graphitkristallisation in Gusseisenschmelzen Teil 2*. In *Gießerei- Die Zeitschrift für Technik, Innovation und Management*. Gießerei 100, (Jahrgang 4/2013). (pp. 85-97).
- [30] Skaland T. (1992). *Model for the graphite formation in ductile cast iron*. Diss. NTNU Trondheim, Norwegen.
- [31] Hasse S. (1999). *Guss-und Gefügefehler: Erkennung, Deutung und Vermeidung von Guss-und Gefügefehlern bei der Erzeugung von gegossenen Komponenten*. Berlin: Schiele und Schön.
- [32] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.) (2009). *DIN 50125: Prüfung metallischer Werkstoffe-Zugproben*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [33] Europäisches Komitee für Normung (Hrsg.). (2009). *ISO 6892-1:2009: Metallische Werkstoffe – Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [34] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.). (1982). *DIN 50113: Prüfung metallischer Werkstoffe - Umlaufbiegeversuch*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

[35] Sonsino C.M. (o.J.). *Betriebsfestigkeit-Eine Einführung*. In Vorlesung „Werkstoff- und Betriebsfestigkeit“ an der TU Darmstadt.

[36] Sonsino C.M. (2005). *Dauerfestigkeit-Eine Fiktion*. In *Konstruktion-Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe* (4-2005). (pp.87-92). Springer-VDI-Verlag.

[37 ] ASTM International (Hrsg). (o.J). *Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life Fatigue Data*. ASTM E739-10.

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gegenüberstellung der Streckgrenzen unterschiedlicher GJS Sorten [1].	5 -
Abbildung 2: Gegenüberstellung der Bruchdehnungen unterschiedlicher GJS Sorten [1].	5 -
Abbildung 3: Entwicklung des Verdichtungsverhältnisses und der Spitzendrücke während der letzten Jahrzehnte [2].	7 -
Abbildung 4: Das stabile Fe-C-Diagramm mit gefügemäßiger Kennzeichnung [4].	10 -
Abbildung 5: Das stabile Eisen-Kohlenstoff-Schaubild bei 2,5% Silizium [7].	13 -
Abbildung 6: Verlauf der Zugfestigkeitswerte, der Dehnung und der Brinellhärte in Abhängigkeit vom Si-Gehalt [9].	14 -
Abbildung 7: Mechanische Eigenschaften von Sphärogusslegierungen mit zunehmenden Si-Gehalt [9].	14 -
Abbildung 8: Einfluss von Silizium auf die Festigkeit von geglühten, kohlenstofffreien Eisen-Silizium-Legierungen [9].	15 -
Abbildung 9: Zusammenhang zwischen der Zugfestigkeit und dem Siliziumgehalt für 3 unterschiedliche Kohlenstoffgehalte [12].	16 -
Abbildung 10: Einfluss des Siliziums auf die Streckgrenze [12].	17 -
Abbildung 11: Einfluss des Siliziums auf die Dehnung [12].	17 -
Abbildung 12: Einfluss des Siliziumgehaltes auf die Zugfestigkeit und Streckgrenze an wärmebehandelten Proben [9].	18 -
Abbildung 13: Zugfestigkeit in Abhängigkeit vom Siliziumgehalt [9] (Korrigierte $\sigma$ -Werte).	19 -
Abbildung 14: Streckgrenze in Abhängigkeit vom Siliziumgehalt [9].	19 -
Abbildung 15: Bruchdehnung in Abhängigkeit vom Siliziumgehalt [9].	20 -
Abbildung 16: Einfluss des Siliziumgehaltes auf die Ferritbildung [12].	21 -
Abbildung 17: Durchführung von Schwingfestigkeits- und Ermüdungsversuchen [15,16,17,18].	23 -
Abbildung 18: Schematische S-N Kurve nach dem FL-Modell [21].	25 -
Abbildung 19: Dichtefunktionen, Ausfallwahrscheinlichkeiten und Ausfallraten ausgewählter logarithmische Normalverteilungen [24].	27 -
Abbildung 20: Dichtefunktionen, Ausfallwahrscheinlichkeiten und Ausfallraten ausgewählter Weibullverteilungen [24].	28 -
Abbildung 21: Definition der Likelihood-Funktionen von Lebensdauerberechnungen für Brüche ( $N_F$ ) und Durchläufer ( $N_R$ ) [20].	30 -
Abbildung 22: Probenplatten mit Speiser und Angussystem [26].	31 -
Abbildung 23: Holzmodell mit Laufsystem.	31 -

---

Abbildung 24: Prinzipskizze der Magnesiumbehandlung nach der Tauchmethode [28]. ....	- 35 -
Abbildung 25: Chronologischer Ablauf zur Herstellung von Sphärogusschmelzen. ....	- 36 -
Abbildung 26: Kohlenstoff- und Siliziumgehalte in Abhängigkeit des Gussstückmoduls zur Vermeidung von Graphitflotation [31]. ....	- 37 -
Abbildung 27: Anordnung und Lage der Proben in der GJS Versuchsplatte [mit freundlicher Genehmigung ÖGI]. ....	- 39 -
Abbildung 28: Geometrische Verhältnisse und Lage der Prüflinge an der Y2-Probenplatte [1]. ....	- 40 -
Abbildung 29: Herstellung eines Schliffes für metallographische Untersuchungen. ....	- 41 -
Abbildung 30: Probenahme an der Zugversuchsprobe [32]. ....	- 42 -
Abbildung 31: Einbetten der Probestücke. ....	- 42 -
Abbildung 32: Probengeometrie für Zugversuche bei Raumtemperatur [33]. ....	- 44 -
Abbildung 33: Probengeometrie der B10x50 Warmzugversuchsprobe nach DIN 50125 [32]. ....	- 45 -
Abbildung 34: Umlaufbiegeprobe nach DIN 50113 [34]. ....	- 46 -
Abbildung 35: Geometrische Beziehungen an der ZDW-Probe ....	- 47 -
Abbildung 36: Zugversuch der Y2 Proben bei Raumtemperatur. ....	- 51 -
Abbildung 37: Zugversuch bei Raumtemperatur an der GJS 500-14 Platte mit 3,98% Si. .	- 52 -
Abbildung 38: Ergebnisse der Warmzugversuche von GJS 500-14. ....	- 53 -
Abbildung 39: Ergebnisse der Warmzugversuche von GJS 450-10. ....	- 54 -
Abbildung 40: Vergleich der Zugfestigkeiten und Streckgrenzen von Sphärogusslegierungen. ....	- 55 -
Abbildung 41: Vergleich der Bruchdehnungen von Sphärogusslegierungen. ....	- 55 -
Abbildung 42: 50%-Wöhlerlinien der Legierung GJS 500-14 bei Umlaufbiegeprüfung. ....	- 56 -
Abbildung 43: Streubänder der Wöhlerlinien der Legierung GJS 500-14 bei Umlaufbiegeprüfung. ....	- 57 -
Abbildung 44: Bilineare Wöhlerkurve (SAFD Auswertung). ....	- 58 -
Abbildung 45: Dauerfestigkeitsergebnisse der Umlaufbiegeprüfung. ....	- 59 -
Abbildung 46: Dauerfestigkeitsergebnisse der Zug-Druck-Wechselprüfung. ....	- 61 -
Abbildung 47: Zeitfestigkeitsauswertung der Umlaufbiegeversuche für GJS 500-14 und GJS 450-10. ....	- 65 -
Abbildung 48: Zeitfestigkeitsauswertung der Zug-Druck-Wechselfestigkeitsversuche GJS 450-10. ....	- 66 -
Abbildung 49: Kennzeichnung der Positionen der Prüflinge auf den Probenplatten (GJS 500-14). ....	- 77 -

---

Abbildung 50: 50% Wöhlerlinien der Legierung GJS 450-10 bei Umlaufbiegebelastung....	- 77 -
Abbildung 51: Streubänder der Wöhlerlinien der Legierung GJS 450-10 bei Umlaufbiegebelastung. ....	- 78 -
Abbildung 52: Bilineare Wöhlerlinie (SAFD Auswertung) der Legierung GJS 450-10 bei Umlaufbiegebelastung. ....	- 78 -
Abbildung 53: 50% Wöhlerlinien der Legierung GJS 500-14 bei Zug-Druck- Wechselbelastung. ....	- 79 -
Abbildung 54: Streubänder der Wöhlerlinien der Legierung GJS 500-14 bei Zug-Druck- Wechselbelastung. ....	- 79 -
Abbildung 55: 50% Wöhlerlinien der Legierung GJS 450-10 bei Zug-Druck- Wechselbelastung. ....	- 80 -
Abbildung 56: Streubänder der Wöhlerlinien der Legierung GJS 450-10 bei Zug-Druck- Wechselbelastung. ....	- 80 -
Abbildung 57: Bilineare Wöhlerlinie (SAFD Auswertung) der Legierung GJS 450-10 bei Zug- Druck-Wechselbelastung. ....	- 81 -

---

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der mechanischen Eigenschaften von Gusseisen mit Kugelgraphit lt. DIN EN 1563:2011 [1].....	- 4 -
Tabelle 2: Einsatzmaterialien zum Erstellen der Gusseisenschmelzen (Angaben in Gew.-%).....	- 32 -
Tabelle 3: Einstellung des Kohlenstoffgehaltes bei erhöhtem Siliziumgehalt [26].....	- 38 -
Tabelle 4: GJS-Abgüsse mit zugehörigen mechanischen Kennwerten sowie chemischer Zusammensetzung. ....	- 39 -
Tabelle 5: Proben- und Versuchsplan der Sphärogusslegierungen.....	- 40 -
Tabelle 6: Auswertung der metallographischen Untersuchungen der GJS Sorten. ....	- 50 -
Tabelle 7:Dauerfestigkeit und Streuspanne bei Umlaufbiegung der Legierung GJS 500-14. ....	- 60 -
Tabelle 8:Dauerfestigkeit und Streuspanne bei Umlaufbiegung der Legierung GJS 450-10. ....	- 60 -
Tabelle 9:Dauerfestigkeit und Streuspanne bei Zug-Druck-Wechselbelastung der Legierung GJS 500-14.....	- 62 -
Tabelle 10:Dauerfestigkeit und Streuspanne bei Zug-Druck-Wechselbelastung der Legierung GJS 450-10.....	- 62 -
Tabelle 11: Zeitfestigkeitsauswertung nach ASTM E739 für GJS 500-14. ....	- 64 -
Tabelle 12: Zeitfestigkeitsauswertung nach ASTM E739 für GJS 450-10. ....	- 64 -
Tabelle 13: Zeitfestigkeitsauswertung nach ASTM E739 für GJS 450-10. ....	- 66 -
Tabelle 14: Schmelzblatt der Versuchslegierung GJS 450-10 (13-3-191).....	- 82 -
Tabelle 15: Schmelzblatt der Versuchslegierung GJS 500-14 (13-3-164). ....	- 83 -
Tabelle 16: Schmelzblatt der Versuchslegierung GJS 500-14 (13-3-150).....	- 84 -
Tabelle 17: Schmelzblatt der Versuchslegierung GJS 500-14 (13-3-149).....	- 85 -

# Anhang



Abbildung 49: Kennzeichnung der Positionen der Prüflinge auf den Probenplatten (GJS 500-14).

## Auswertung der Umlaufbiegeversuche der Sorte GJS 450-10

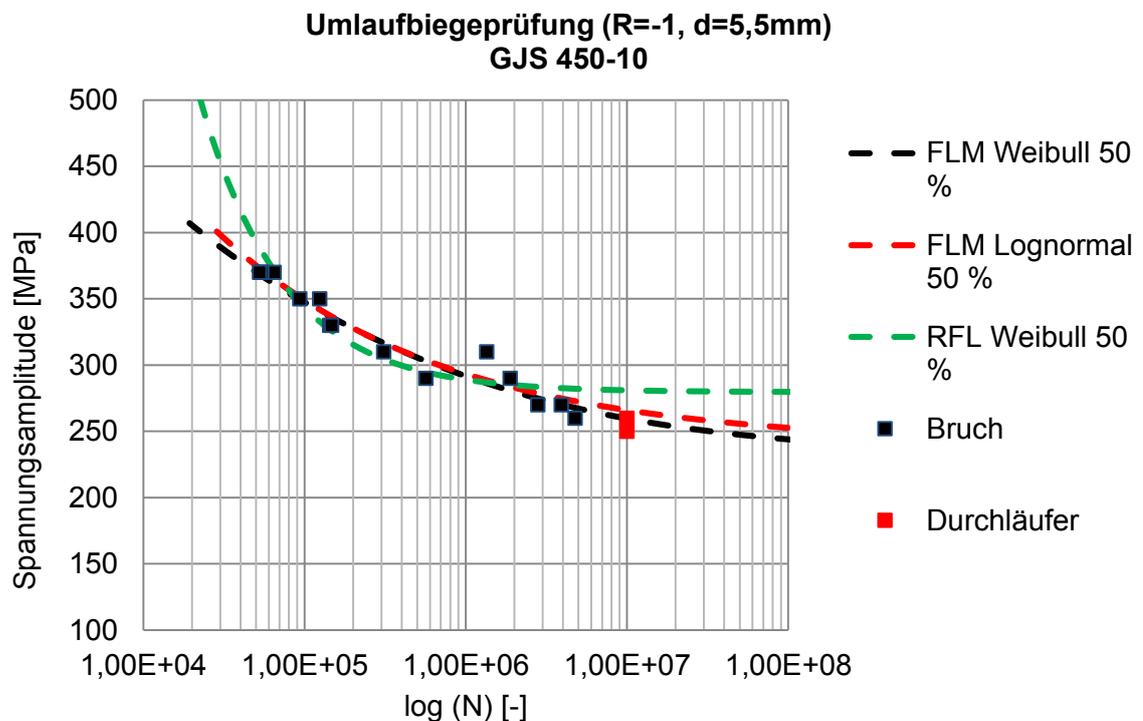


Abbildung 50: 50% Wöhlerlinien der Legierung GJS 450-10 bei Umlaufbiegebelastung.

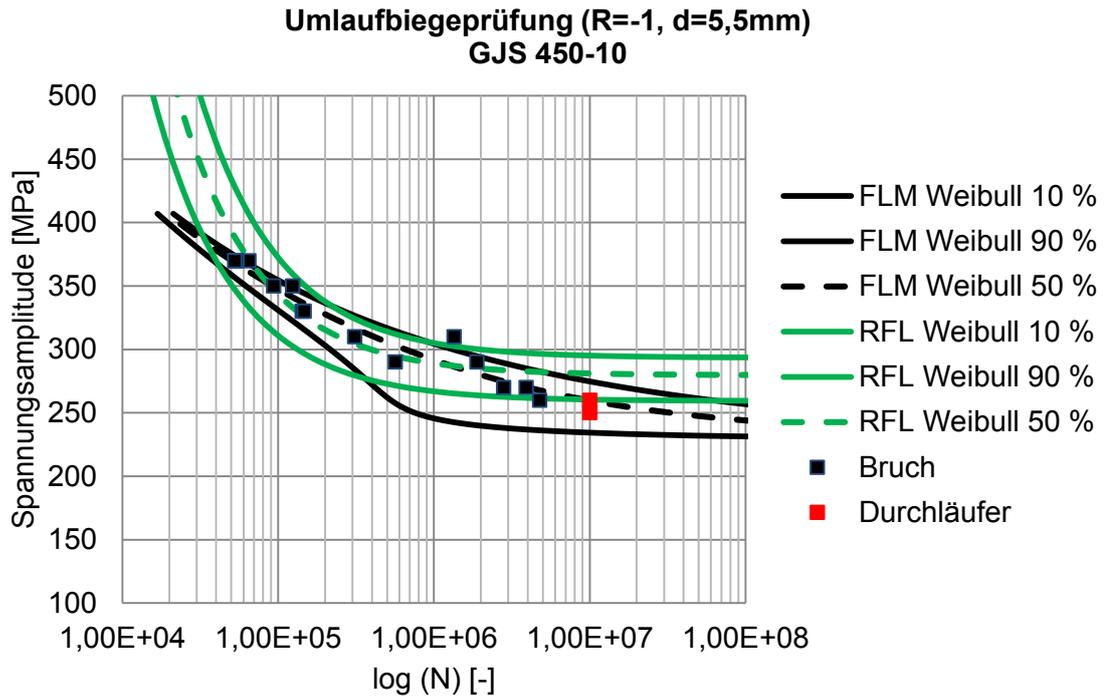


Abbildung 51: Streubänder der Wöhlerlinien der Legierung GJS 450-10 bei Umlaufbiegebelastung.

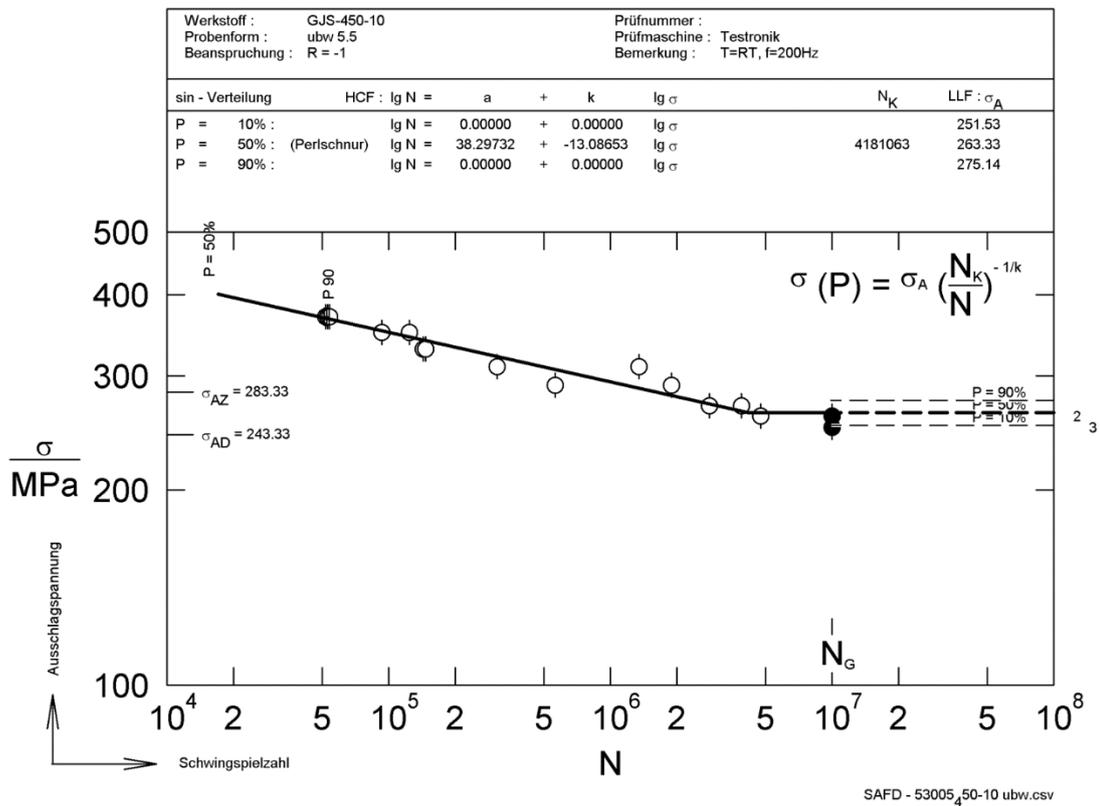


Abbildung 52: Bilineare Wöhlerlinie (SAFD Auswertung) der Legierung GJS 450-10 bei Umlaufbiegebelastung.

### Auswertung der Zug-Druck-Wechselfestigkeitsversuche der Sorte GJS 500-14

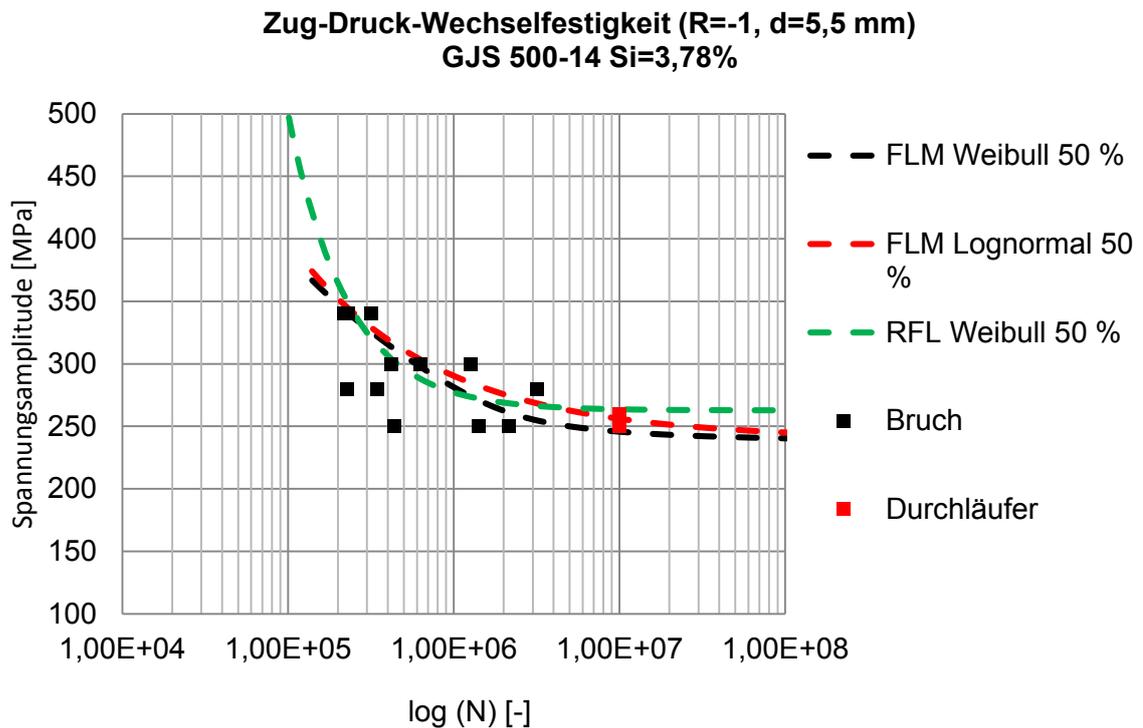


Abbildung 53: 50% Wöhlerlinien der Legierung GJS 500-14 bei Zug-Druck-Wechselbelastung.

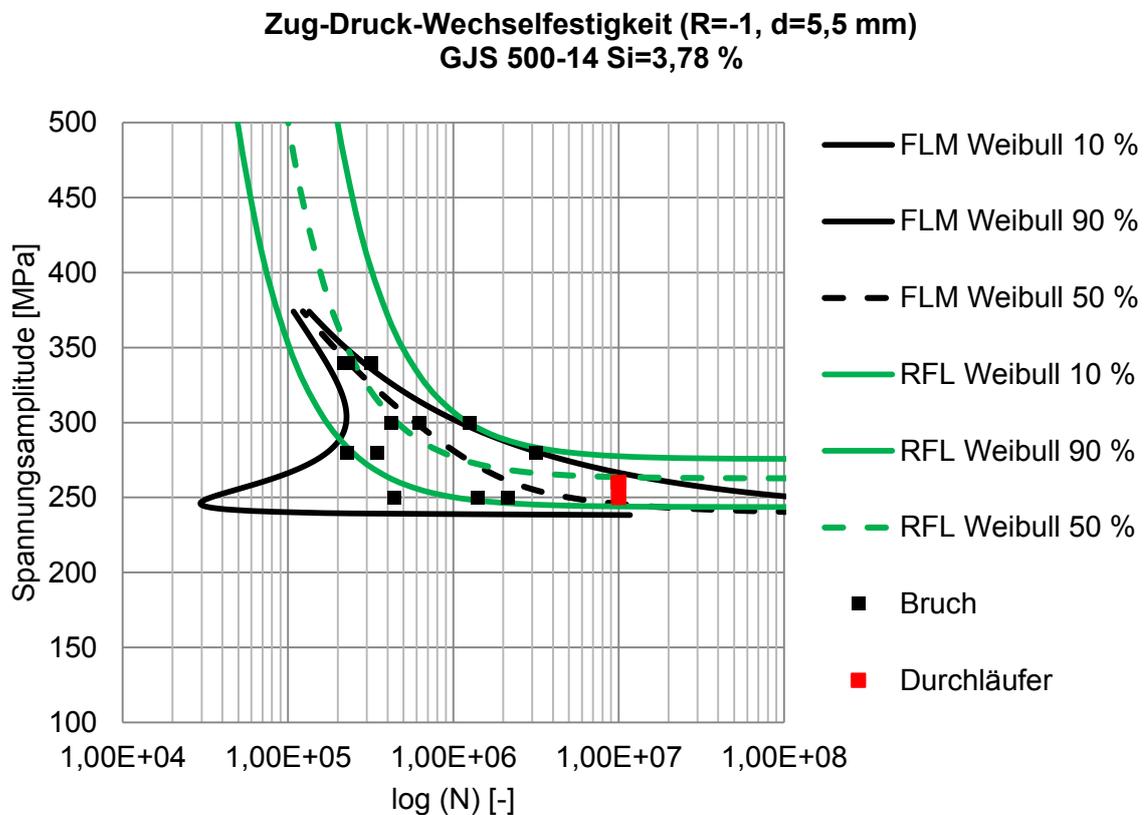


Abbildung 54: Streubänder der Wöhlerlinien der Legierung GJS 500-14 bei Zug-Druck-Wechselbelastung.

## Auswertung der Zug-Druck-Wechselfestigkeitsversuche der Sorte GJS 450-10

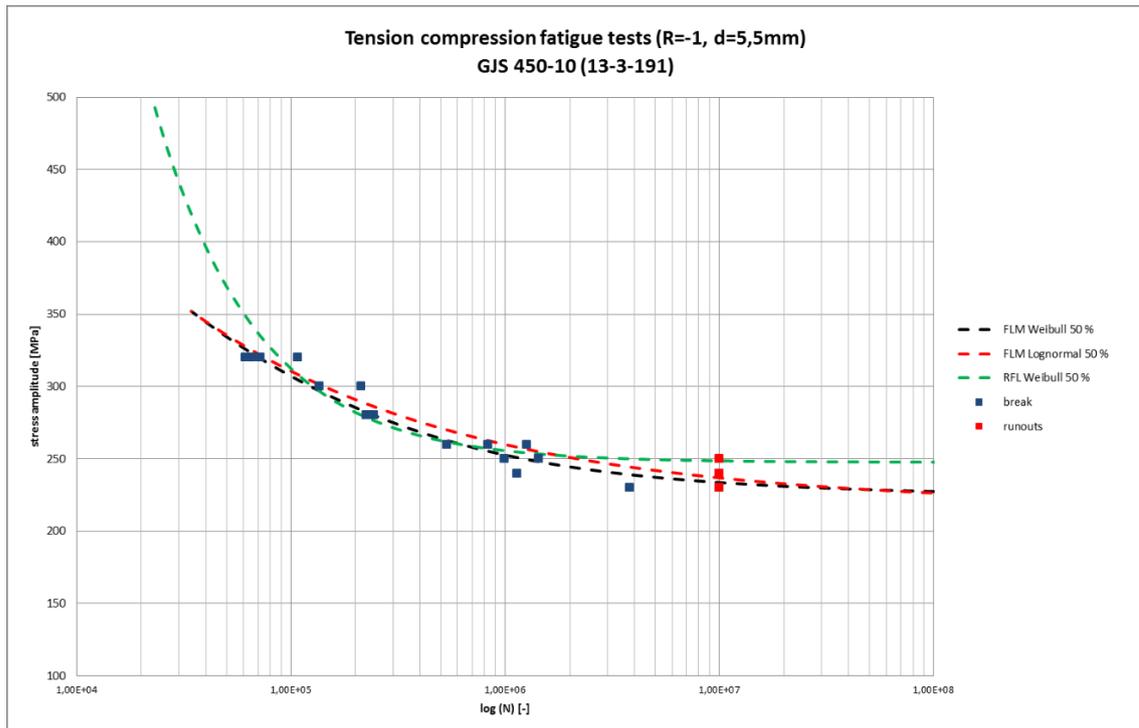


Abbildung 55: 50% Wöhlerlinien der Legierung GJS 450-10 bei Zug-Druck-Wechselbelastung.

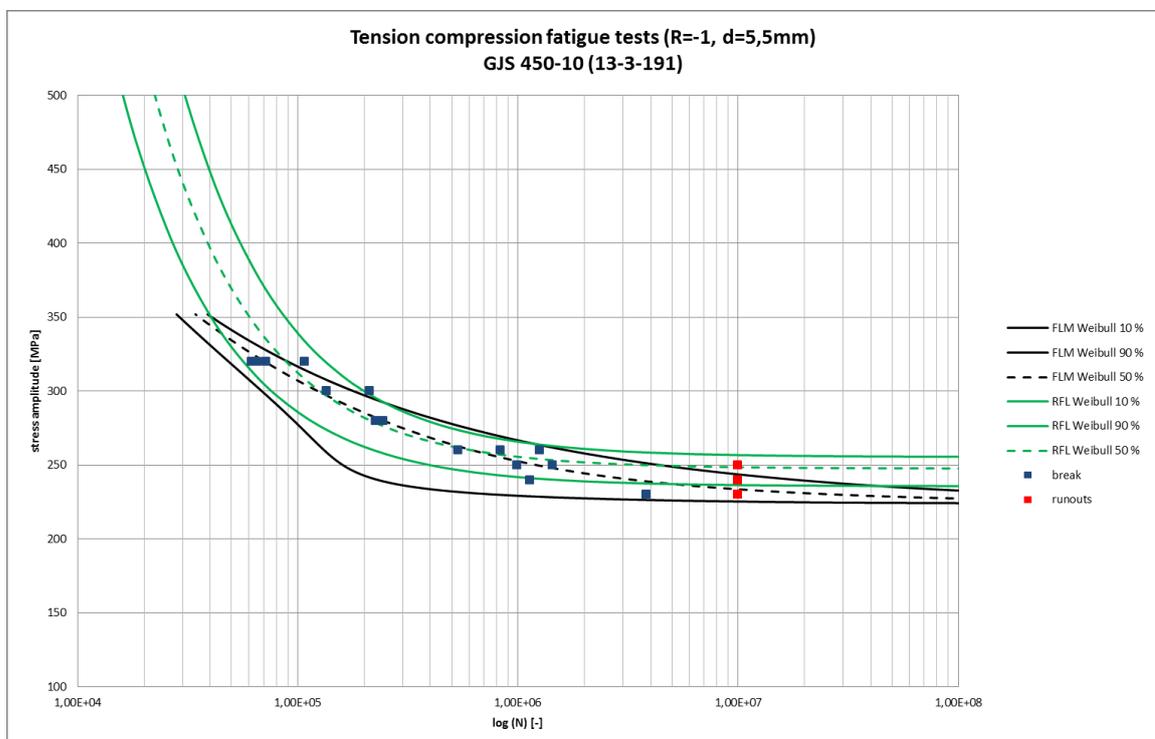


Abbildung 56: Streubänder der Wöhlerlinien der Legierung GJS 450-10 bei Zug-Druck-Wechselbelastung.

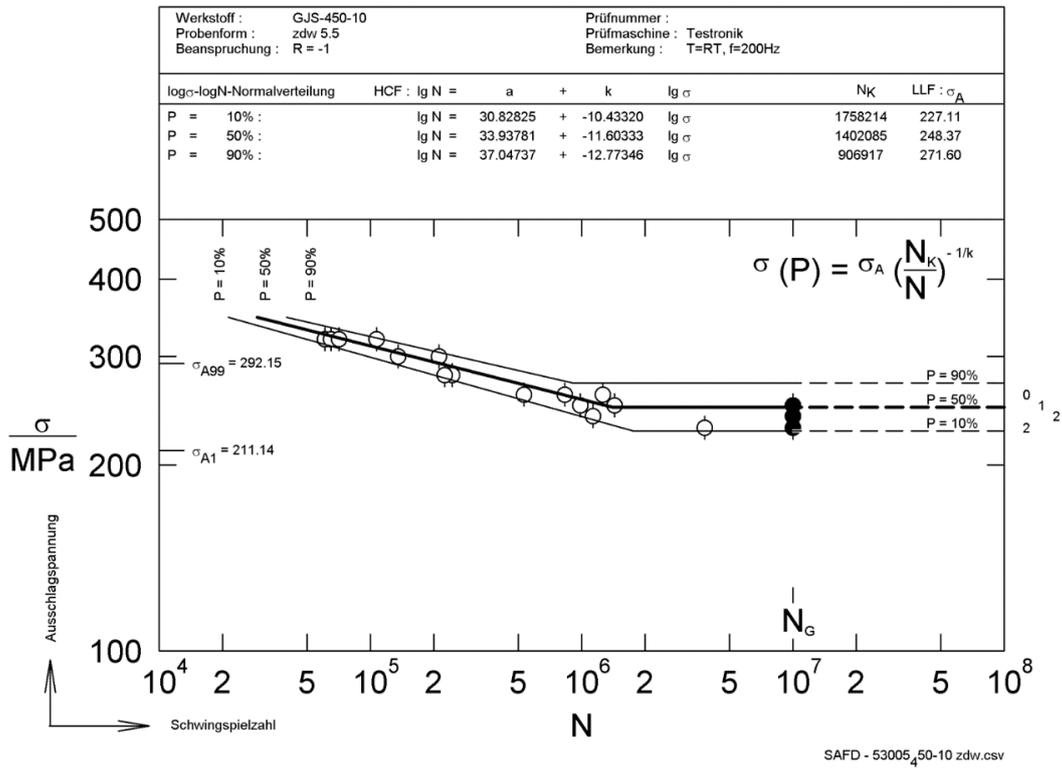


Abbildung 57: Bilineare Wöhlerlinie (SAFD Auswertung) der Legierung GJS 450-10 bei Zug-Druck-Wechselbelastung.

## Schmelzblätter der Sphärogusslegierungen

Tabelle 14: Schmelzblatt der Versuchslegierung GJS 450-10 (13-3-191).

GJS-450-10	Schmelze Nr.:		13-3-191		14.08.2013		120		kg:	Chemische Zusammensetzung, Materialen [%]		Chemische Zusammensetzung, Schmelze [%]		Sc	Zeit	Temp. °C	
	Material/Nr.	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg		%	kg	Min	Max				S
Kreidaur Schm. 733-189	3,52	2,41	0,24	0,021	0,005	0,25			43,48	1,53	1,05	0,10	0,002	0,109	0,000		
Soreimetal T7-10	4,06	0,10	0,01	0,005	0,006	0,02			15,00	0,61	0,02	0,00	0,001	0,003	0,000		
Stahl von IG	0,01	0,05	0,23	0,008	0,007	0,01			38,09	0,00	0,02	0,09	0,003	0,004	0,000		
ES 173	6,70	75,00							0,69	0,00	0,52	0,00	0,000	0,000	0,000		
Keilm		0,03	73,00						0,17	0,00	0,00	0,05	0,000	0,000	0,000		
Kupfer						100,00			0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000		
Graphit	100								1,52	0,00	0,00	0,00	0,000	0,100	0,000		
Vorprobe QCTe									100,00	3,67	1,80	0,25	0,013	0,265	0,000	0,979	
Spektrometerprobe																	
Konfigur. Probe																	
Konstanz Schmit	100									3,70	1,59						
Übersicht auf 1500 °C										0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000		
Tauchen Einsatz 6039										0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000		
B. Absicht Impfen mit VP216 und Einlöten									1,1	0,00	0,53	0,00	0,000	0,000	0,000	0,066	
									0,4	0,00	0,28	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	
Sollzusammensetzung										3,50	2,35	0,25	0,008	0,24	0,000	1,012	
Istzusammensetzung										3,55	2,40	0,25	0,012	0,30	0,000	0,989	
Gießtemperatur messen										3,49	2,33	0,25	0,012	0,28	0,000	0,989	
Gießbeginn																	
1 x Spektrometerprobe																	
ClickCup ohne Te																	
OCC p/p																	
Keilprobe																	
1 Kasten mit 25 mm Platten	326																
1 Kasten mit 25 mm Platten	329																
1 Kasten mit 25 mm Platten	330																
1 x Y2 offen	332																
Gießende																	
Bemerkungen																	

Tabelle 15: Schmelzblatt der Versuchslegierung GJS 500-14 (13-3-164).

Material/Nr.	Schmelze Nr.: 13-3-164										vom: 13.05.2013										kg: 100										Zeit	Temp. °C
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	%	Einsatz	kg	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	%	Einsatz	kg	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	%	Einsatz	kg		
Kreilauf Schm. 13-3-148	3,35	3,21	0,22	0,014	0,003	0,15					3,46	2,72	0,27	0,009	0,005	0,09	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,72	0,27	0,009	0,005	0,09	0,000	0,000	0,000	0,000		
Kreilauf Schm. 13-3-150 (281+286)	3,16	3,78	0,27	0,008	0,004	0,02					3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
Sortenmetall TF740	4,06	0,10	0,01	0,005	0,006	0,02					3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
Stahl von IG	0,01	0,05	0,23	0,008	0,007	0,01					3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
FeSi75	75,00										3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
Fe-Mn	6,70	0,03	73,00								3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
Kupfer						100,00					3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
Graphit	100										3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
Vorprobe OCTe											3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
Spektrometrieprobe											3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
Korrigierter Stahl											3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
Korrektur Graphit	100										3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
Überschmelzen auf 1500 °C	75,00										3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
Tauchen Einsatz 8039	47,80										3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
B. Absicht Impfen mit VP216 und Einrühren	69,70										3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
Sollzusammensetzung											3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
Istzusammensetzung											3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
Gießtemperatur messen											3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
Gießbeginn											3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
1 x Spätkrometrieprobe											3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
OCC p/p											3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
1 x Kasten mit 2x 25 mm Platten	296										3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
1 x Kasten mit 2x 25 mm Platten	297										3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
1 x Kasten mit 2x 25 mm Platten	299										3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
1 x Y2 offen	301										3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
Gießende											3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000	3,46	2,75	0,27	0,009	0,005	0,10	0,000	0,000	0,000	0,000		
Bemerkungen	Ziel: "schlechte" Sorte mit Rp/Rm knapp unterhalb 500-14																															

Tabelle 16: Schmelzblatt der Versuchslegierung GJS 500-14 (13-3-150).

Material/Nr.	Schmelze Nr.: 13-3-150						vom: 28.02.2013						kg: 120		Temp. °C	
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	%	kg	C	Si	Mn	P	S		Cu
Kreisl. u. Schm. 12-3-133	3,28	4,09	0,27	0,006	0,005	0,01		33,51	0,00	1,10	1,37	0,09	0,002	0,002	0,00	0,000
Kreisl. u. Schm. 12-3-077	3,48	2,60	0,22	0,006	0,006	0,02		9,13	0,00	0,32	0,24	0,02	0,001	0,001	0,00	0,000
Stahl von IF-10	4,06	0,10	0,01	0,005	0,006	0,02		13,80	0,00	0,95	0,01	0,00	0,001	0,001	0,00	0,000
Fein	6,70	75,00	0,01	0,008	0,007	0,01		40,96	0,00	0,00	0,02	0,09	0,003	0,003	0,00	0,000
Graphit	100	0,03	73,00					1,75	0,00	0,00	1,31	0,00	0,000	0,000	0,00	0,000
								0,10	0,00	0,01	0,00	0,07	0,000	0,000	0,00	0,000
								7,15	0,00	1,15	0,00	0,30	0,000	0,000	0,00	0,000
Vorprobe OCTe								<b>100,00</b>	<b>0,00</b>	<b>3,14</b>	<b>2,95</b>	<b>0,28</b>	<b>0,006</b>	<b>0,006</b>	<b>0,01</b>	<b>0,000</b>
										3,03	2,90					
											2,87					
Spektrometerprobe																
Korrektur Graphit	100									3,35	2,95					
Korrektur Spekt										0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,00	0,000
Überheizen auf 1500 °C		75,00								0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,00	0,000
Tauchen Einsatz 6039		47,80								0,00	0,53	0,00	0,000	0,000	0,00	0,000
B. Absich Impfen mit VP216		69,70						6,020	1,1	0,00	0,28	0,00	0,000	0,000	0,00	0,000
und Eindrehen								0,4	0,4	0,00	0,28	0,00	0,000	0,000	0,00	0,000
Solzusammensetzung										<b>3,20</b>	<b>3,75</b>	<b>0,20</b>	<b>0,008</b>	<b>0,004</b>	<b>0,02</b>	<b>1,031</b>
Iszusammensetzung										<b>3,16</b>	<b>3,75</b>	<b>0,27</b>	<b>0,008</b>	<b>0,004</b>	<b>0,038</b>	<b>1,021</b>
Gießtemperatur messen																<b>Y2, 287</b>
Gießbeginn																
1 x Spektrometerprobe																
ClickCup ohne Te																
OCC P/P																
Keilprobe	280															
1 Kasten mit 25 mm Platten	281															
1 Kasten mit 25 mm Platten	283															
1 Kasten mit 25 mm Platten	285															
1 x Y2 offen	287															
Gießende																
Bemerkungen																



