

*Diplomarbeit*

*Untersuchung der Wechselwirkung zwischen  
nichtmetallischen Einschlüssen und dynamischer  
Beanspruchung in Vergütungsstählen*

**Lehrstuhl für Gießereikunde  
Department Metallurgie**

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich versichere,

dass ich die Diplomarbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe und diese Diplomarbeit bisher weder im In- noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe. Die von mir eingereichte schriftliche Version stimmt mit der digitalen Version der Arbeit überein.

---

Datum

---

Unterschrift

## **Kurzfassung**

Den zuerst ermittelten mechanischen Eigenschaften (Härteprüfung, Zugversuch und Kerbschlagbiegeversuch) folgen Schwingversuche. Durch Umlaufbiegewechsel (UBW) und Zug/Druck-Wechsel (ZDW) Versuche werden Schwingbrüche im Zeitfestigkeitsbereich erzeugt. Die Bruchflächenanalyse erfolgt durch das Rasterelektronenmikroskop (REM). Die detektieren nichtmetallischen Einschlüsse (NME) werden nach chemischer Zusammensetzung, Größe und Oberflächenabstand katalogisiert.

## **Abstract**

The influence of non metallic inclusions (NMI) on the dynamic mechanical properties of steel were investigated. For different steel grades the NMIs were determined by scanning electron microscopy (SEM) and related to fatigue properties determined four point rotating bending and resonance frequency (tensile/compression) testing. The material response was evaluated for customer defined heat treatments, inclusion content, sizes and locations.

## **Danksagung**

Während meines gesamten Studiums haben mich viele Menschen begleitet und unterstützt ohne, die ich sicherlich nie bis zu diesem Punkt gekommen wäre. Dafür möchte ich mich von ganzem Herzen bedanken.

Allen voran möchte ich mich bei den Mitarbeitern voestalpine Stahl Donawitz GmbH Co & KG Abteilungen TF1 und TF3 bedanken, ohne die die Durchführung dieser Diplomarbeit nicht möglich gewesen wäre.

Besonderer Dank gilt meinem Betreuer DI Dr.mont. Gerald Klösch, der mich fachlich in diesem Jahr exzellent betreute. Wann immer Unklarheiten auftraten, stand er mir mit Rat und Tat in allen Belangen unverzüglich zur Seite.

Für die Unterstützung seitens der Universität bedanke ich mich bei Univ.-Prof. DI Dr.phil. Peter Schumacher.

# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
2. Literaturteil.....	2
2.1. Ursprung nichtmetallischer Einschlüsse (NME).....	2
2.1.1. Abscheidung von Keimen in der Schmelze (Desoxidation).....	3
2.1.2. Stahlentschwefelung.....	4
2.1.3. Typen von nichtmetallischen Einschlüssen.....	4
2.1.4. Auswertung bzw. Bewertung von Einschlüssen.....	6
2.1.5. Einfluss nichtmetallischer Einschlüsse auf die mechanischen Eigenschaften in Stählen.....	7
2.2. Grundlagen der Betriebsfestigkeit.....	7
2.2.1. Nennspannung und tatsächliche Spannung.....	8
2.2.2. Spannungskonzentration.....	9
2.2.3. Beanspruchungs-Zeit-Verläufe.....	10
2.2.4. Schwingfestigkeit.....	11
2.2.4.1. Wöhlerlinie.....	11
2.2.4.2. Makroskopische Ausbildungsformen von Dauerbrüchen.....	13
2.2.5. Einflussgrößen auf die Schwingfestigkeit.....	15
2.2.5.1. Mittelspannung.....	15
2.2.5.2. Beanspruchungsart.....	16
2.2.5.3. Oberfläche.....	17
2.2.5.3.1. Oberflächenrauheit.....	17
2.2.5.3.2. Kugelstrahlen der Oberfläche.....	19
2.2.5.3.3. Weiter Möglichkeiten der Oberflächenbehandlung.....	23
2.2.5.4. Größeneinfluss.....	23
2.2.5.5. Ermüdungsvorgang.....	24
2.3. Auswertung von Zeit- und Dauerfestigkeitsdaten.....	26
2.3.1. Wöhlerkurve.....	26
2.3.2. Statistische Auswertung von Treppenstufen-Versuchen nach Hück durch die IABG-Methode.....	28
2.3.3. Arcsin $\sqrt{P}$ -Verfahren.....	30

2.4. Auswahl theoretischer Verfahren zur Bestimmung der Lebensdauer unter Berücksichtigung von Kerben und nichtmetallischen Einschlüssen.....	32
3. Experimentelle Methoden.....	35
3.1. Herstellroute.....	35
3.2. Chargen und Stahlmarken.....	35
3.3. Chemische Analyse.....	36
3.3.1. Chargennummer 488472; 54SiCr6.....	36
3.3.2. Chargennummern 481999 bis 482001; 37CrS4.....	37
3.3.3. Chargennummer 488730; Cf53.....	37
3.4. Anlieferungszustand des Probenmaterials.....	38
3.5. Wärmebehandlung.....	38
3.6. Ermittlung der mechanische Eigenschaften.....	40
3.6.1. Probengeometrie.....	40
3.6.2. Oberflächenverfestigung durch Kugelstrahlen.....	41
3.6.3. Zugversuch.....	41
3.6.4. Härteprüfung.....	42
3.6.5. Kerbschlagbiegeversuch.....	43
3.7. Zug/Druck und Zug/Schwell-Versuche.....	44
3.8. Umlaufbiegewechsel-Versuche.....	44
3.9. Mikroskopie.....	45
3.9.1. Lichtmikroskopie.....	45
3.9.2. Rasterelektronenmikroskop (REM).....	46
3.9.3. Reinheitsgraduntersuchungen.....	46
4. Resultate.....	48
4.1. Chargennummer 488472 – 54SiCr6.....	48
4.1.1. Wärmebehandlung.....	48
4.1.2. Mechanische Eigenschaften.....	49
4.1.3. Auswertung der Umlaufbiegewechsel-Versuche.....	51
4.1.4. Gefügebilder.....	53
4.1.5. Reinheitsgraduntersuchungen.....	54
4.2. Chargennummern 481999 bis 482001 – 37CrS4.....	56
4.2.1. Wärmebehandlung.....	56
4.2.2. Mechanische Eigenschaften.....	57
4.2.3. Auswertung der Zug/Druck-Wechsel Versuche.....	59

4.2.3.1. Chargennummer 482000 – 37CrS4.....	59
4.2.3.2. Chargennummer 481999 – 37CrS4.....	61
4.2.4. Chargennummer 482001 – 37CrS4.....	64
4.2.5. Gefügebilder.....	66
4.2.6. Reinheitsgraduntersuchungen.....	70
4.3. REM und EDX Analysen.....	72
4.4. Chargennummer 488730 – Cf53.....	85
4.4.1. Mechanische Eigenschaften.....	85
4.4.2. Auswertung der Zug/Schwell-Versuche.....	86
4.4.3. Gefügebilder.....	90
4.4.4. Reinheitsgraduntersuchungen.....	90
5. Zusammenfassung, Diskussion der Ergebnisse und Ausblick.....	92
6. Abkürzungsverzeichnis.....	96
7. Literaturverzeichnis.....	97
8. Tabellenverzeichnis.....	100
9. Abbildungsverzeichnis.....	102





## 1. Einleitung

Ein Großteil der Forschungs- und Entwicklungsarbeit in der Stahlindustrie widmet sich der mikro- und makroskopischen Reinheit von Stahlprodukten, da nur durch konsequente Weiterentwicklung die Qualität der erzeugten Stähle verbessert werden kann und so den Ansprüchen des Marktes gerecht wird. Dabei wird idealerweise versucht nichtmetallische Einschlüsse bereits in der flüssigen Schmelze abzuscheiden oder verbleibende Einschlüsse derart zu modifizieren, dass für das Endprodukt keinerlei Qualitätseinbußen zu erwarten sind. Unter schwingender Beanspruchung wird das Verhalten von Werkstoffen hauptsächlich durch metallurgische und technologische Größen sowie durch den Beanspruchungsgrad bestimmt. Ein höherer Reinheitsgrad bewirkt mit steigender Festigkeit auch eine höhere Dauerfestigkeit von Stählen, da im gleichen Maß die Empfindlichkeit gegenüber äußeren und inneren Kerben steigt [1].

Die Versuchsdurchführung findet bei der voestalpine Stahl Donawitz GmbH & Co KG statt. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, aus insgesamt drei Stahlmarken – zwei Vergütungsstähle Cf53, 37CrS4 und ein Ventulfederstahl 54SiCr6 – die Ergebnisse von schwingenden Belastungen auszuwerten. Dabei werden die Lastfälle so gewählt, dass sie denen in der Praxis nahe kommen (Umlaufbiegewechsel, Zug/Druck oder Zug/Schwell). Um den Einfluss der Randzone auf die Versuchsergebnisse abzuschwächen, werden eine vorgegebene Anzahl Proben jeder Marke kugelgestrahlt.

## 2. Literaturteil

In diesem Abschnitt wird auf das für die Diplomarbeit notwendige Basiswissen kurz eingegangen

### 2.1. Ursprung nichtmetallischer Einschlüsse (NME)

NME weisen im Gegensatz zu der umgebenden Stahlmatrix eine gänzlich andere chemische Zusammensetzung auf. Die scharfen Phasengrenzen, die dieser Einschluss zu dieser Matrix bildet, sind das gravierendste Problem.

Eine mehr oder minder große Menge an NME oder Schlackenreste befinden sich in jedem Stahl. Ein Stahl mit geringer Einschlusszahl ist nur durch technisch anspruchsvolle und finanziell sehr aufwendige Verfahren herstellbar. Demgegenüber steht auch immer der Verwendungszweck einer Stahlmarke. Im Allgemeinen sollte die Anzahl an Einschlüssen im Stahl möglichst gering sein, da diese – mit Ausnahmefällen zum Beispiel Automatenstähle (MnS) – nachteilige Eigenschaften aufweisen.

In Stählen mit ausreichendem Mangangehalt wird der Schwefel, aufgrund der sehr hohen Affinität, als Mangansulfid abgebunden. Mangansulfide begünstigen die Risseinleitung und -ausbreitung und setzen die Scher- und Trennfestigkeit deutlich herab. Beim Zerspanen von Automatenstählen treten eben diese Kräfte auf und somit wird die Spanbildung positiv beeinflusst. Sulfidische Einschlüsse können darüber hinaus während des Bearbeitens erweichen und wirken so als Gleitmittel. Während die meisten Stähle entschwefelt werden, wird Automatenstählen aus diesem Grund Schwefel in hohem Anteil zugesetzt [2].

Grundvoraussetzung für eine niedrige Dichte von Einschlüssen ist eine abriebfeste, feuerfeste Ausmauerung der Öfen und Pfannen, da es während aller sekundärmetallurgischer Behandlungsschritten zu Reaktionen zwischen Schlacke und Stahl mit der Feuerfestauskleidung kommt. Welche Reaktionen stattfinden sind von der Schlacke, den Legierungselementen des Stahls und der Art der Ausmauerung abhängig. Um den thermischen, mechanischen und chemischen Beanspruchungen stand zuhalten, sind unterschiedliche Feuerfestmaterialien im Einsatz [3]. Weiters beeinflussen Schmelz-, Desoxidations- und Gießverfahren die Menge, Form, Art und Verteilung der NME im Stahl [4]. In diesem Zusammenhang spricht man auch von exogenen Einschlüssen, solche, die von außen in die Schmelze gelangen, und endogenen

Einschlüssen, die erst in der Schmelze durch metallurgische Behandlungen oder chemische Reaktionen zwischen Legierungselementen oder Eisen mit Sauerstoff, Schwefel oder Stickstoff gebildet werden und somit unvermeidbar sind. Das Auftreten von exogenen Einschlüssen ist im Vergleich seltener, da es sich dabei um Schlacken (Pfannen-, Verteiler- oder Kokillenschlacke), Feuerfestmaterial (Pfanne, Verteiler oder Auskleidung) oder Ausbrüche aus dem Gießsystem (Stopfen oder Gießrohr) handelt [5]. Die Einteilung erfolgt weiters in Makro- (über 20 Mikrometer), Mikro- (1 bis 20 Mikrometer) und Submikroskopische- Einschlüsse (kleiner 1 Mikrometer) [6]. Die Geschwindigkeit des Ablaufs metallurgischer Reaktionen wird vornehmlich von der Größe der gemeinsamen Grenzflächen zwischen Metallbad und Schlacke bestimmt. Der Ablauf der Reaktionen wird daher durch alle Maßnahmen beschleunigt, die eine intensive Badbewegung bzw. Vermischung der Reaktionspartner bewirken.

### **2.1.1. Abscheidung von Keimen in der Schmelze (Desoxidation)**

Die derzeitigen Anforderungen an den Werkstoff Stahl setzen niedrigste Sauerstoffgehalte und hohe oxidische Reinheitsgrade voraus. Bei der Fällungsdesoxidation wird der Schmelze ein Element meistens Aluminium, auf alle Fälle aber ein Element, das eine höhere Affinität zu Sauerstoff besitzt als Eisen, zugegeben. Sobald ein Oxidationsmittel der Schmelze zugegeben wird beginnt die oxidische Keimbildung.

Eine Fällungsdesoxidation setzt sich aus vier Teilschritten zusammen:

1. Auflösen und Reaktion des Desoxidationsmittels
2. Keimbildung der oxidische Phase: Hierbei muss man zwischen der homogenen und der heterogenen Keimbildung unterscheiden. An erste Stelle steht die heterogene Keimbildung, da sie durch Fremdkörper wie Feuerfestpartikel und Verunreinigungen begünstigt wird. Für die homogene Keimbildung ist eine starke Übersättigung notwendig, die nur durch starke Desoxidationsmittel wie Aluminium erreicht werden kann. [6]
3. Wachstum der Desoxidationsprodukte bis zum Erreichen der Gleichgewichtskonzentration. Neben der gezielten Übersättigung der Schmelze mit Desoxidationsmittel ist das Wachstum auch noch von der Zahl der gebildeten Teilchen abhängig und dauert umso kürzer, je mehr Teilchen gebildet werden können [7]. Da die

Teilchen noch zu klein sind um abgeschieden werden zu können, ist für das weitere Wachstum der Desoxidationsprodukte das Zusammenstoßen und Aneinanderhaften verantwortlich. Durch die geringer Dichte steigen die Oxidteilchen im Stahlbad auf.

4. Abscheidung der Desoxidationsprodukte in die Schlacke erfolgt nur dann, wenn es energetisch günstiger ist. In der Praxis wird die Abscheidung durch erzwungene Strömung unter Einsatz von inertem Spülgas begünstigt. Dabei ist die Spülgasmenge entscheidend, um Reoxidationsprozesse und Mitreißen von Schlacketröpfchen in die Schmelze zu verhindern. [6]

### **2.1.2. Stahlentschwefelung**

Der Schwefelgehalt muss auf den geforderten Prozentsatz der entsprechenden Stahlqualität fast immer gesenkt werden. Dazu stehen zwei prinzipielle sekundärmetallurgische Verfahren zur Verfügung, nämlich die Fällungs- und Topschlackenentschwefelung. Beim Fällungsentschwefeln wird CaO durch eine Tauchlanze tiefeingeblasen, das mit dem Schwefel reagiert, und sich als Reaktionsprodukte größtenteils durch die Pfannenbehandlung in die Schlacke abscheidet. Bei der Topschlackenentschwefelung bildet sich durch intensives Spülen mit Inertgas eine Schlacke/Stahlschmelze Emulsion. Die Schlackentröpfchen stehen somit in intensiven Kontakt mit der Schmelze und nehmen den Schwefel auf. [8]

### **2.1.3. Typen von nichtmetallischen Einschlüssen**

Im speziellen wird hier auf Einschlüsse Rücksicht genommen, die beim Stranggießen Probleme bereiten. Bei der Desoxidation der unberuhigten Stähle entsteht bei der Abbindung des Sauerstoffs mit Aluminium immer festes  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Ein Großteil der festen Tonerde kann aus der flüssigen Schmelze entfernt werden. Allerdings verbleiben Reste von Tonerde im Stahl, die sich störend auf die technologischen Eigenschaften des Endprodukts auswirken und durch den hohen Schmelzpunkt, der über  $2000^\circ\text{C}$  liegt, dazu neigen im Eintauchausguss anzuhafte und ihn zu verschließen. Man nennt diesen Vorgang „Nozzle Clogging“, der die Produktivität des Stranggiessens und ebenso die Produktqualität, da öfters agglomerierte Makroeinschlüsse von der durchströmenden Schmelze an der Engstelle mitgerissen werden und so unwiderruflich zu Fehlern im fertigen Produkt führen, herabsetzt [9]. Dies kann verhindert werden, indem man die

Tonerdeteilchen durch Zugabe von Ca-Legierungen oder durch Einblasen von CaO-reichem Schlackenpulver bei Gießtemperatur in flüssige Calciumaluminat umwandelt [10]. Die vorliegende Kugelschlacken können leichter koagulieren und lassen sich wesentlich schneller abscheiden. Die noch in der Schmelze bestehenden Einschlüsse liegen größtenteils als verfeinerte, runde Calciumaluminat und vereinzelt auch als Komplex mit Oxiden verbundene Kalziumsulfide vor. Diese Einschlussform, die auch bei einer Warmumformung nicht mehr verändert wird, erhöht die mechanischen Eigenschaften, insbesondere die Zähigkeit und verkleinert die ansonsten deutliche Anisotropie. Es gelingt durch die Calciumbehandlung sowohl den Mikereinheitsgrad, als auch die Form der verbleibenden Einschlüsse zu verbessern [11]. In Abb. 2.1 sind die Schmelzpunkte möglicher Zusammensetzungen von CaO und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ersichtlich

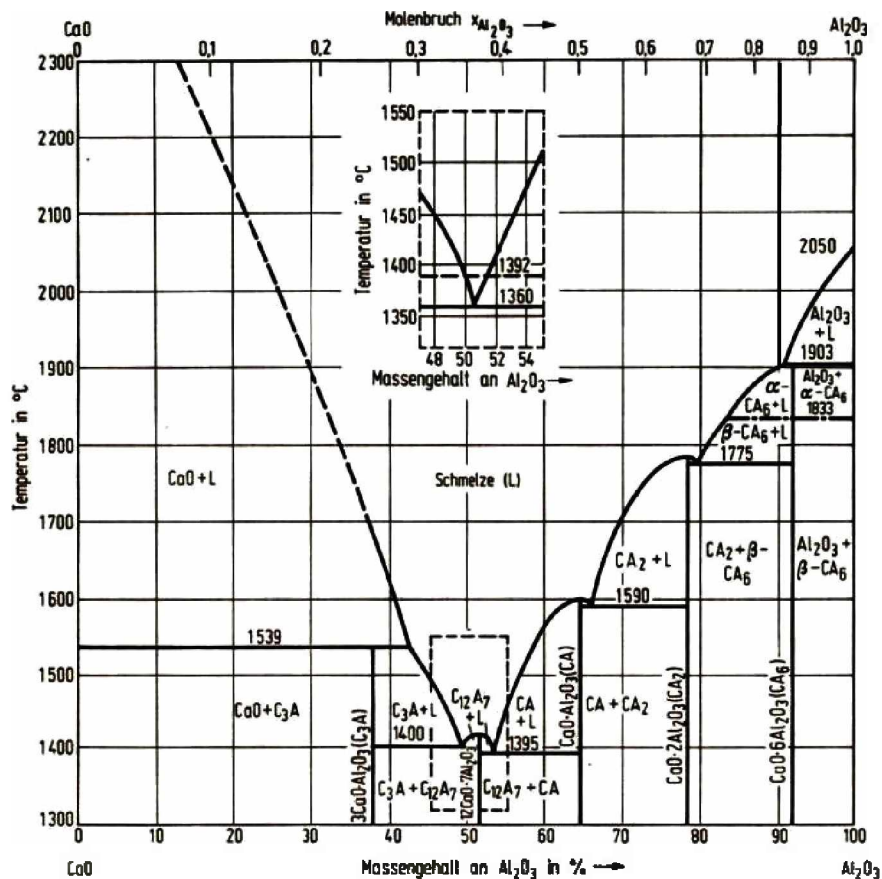


Abb. 2.1: Zustandsschaubild CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [10]

Die Zusammensetzung der im Stahl enthaltenen Einschlüsse ist meist sehr komplex und uneinheitlich. Nach der chemischen Zusammensetzung der Einschlüsse unterscheidet man im wesentlichen zwischen, oxidischen und sulfidischen Einschlüssen. Reine chemische

Verbindungen wie MnS, MnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und SiO<sub>2</sub> gibt es praktisch nicht. Fast immer handelt es sich um Mischkristalle (FeO-MnO), Eutektika [FeS + FeO; FeS + MnS; FeO + (FeO)<sub>2</sub>·SiO<sub>2</sub>] oder um kompliziertere Verbindungen der Kieselsäure SiO<sub>2</sub> (Silikate), der Tonerde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Spinelle), des Chromoxids Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Chromite) [12]. Bekannte Verursacher von Ermüdungsbrüchen sind in Tabelle 1 mit eingetragener chemischen Zusammensetzung dargestellt.





Typ		A <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>
Einschlüsse am Bruchausgang  ~ 20 µm					
Chemische Zusammensetzung (%)	MgO	0	23,1	1,3	0
	CaO	0,2	0,2	20,4	0,2
	A <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	96,7	68,4	29,6	8,9
	SiO <sub>2</sub>	2,9	5,3	44,8	86,5
	MnO	0,2	3,0	3,9	4,4

Tabelle 1: Typische Einschlüsse am Ausgang des Ermüdungsbruchs [13]

#### 2.1.4. Auswertung bzw. Bewertung von Einschlüssen

Zwei grundsätzliche Methoden zur Auswertung von Einschlüssen haben sich bewährt: Durch die lichtmikroskopische Methode ist eine qualitative und quantitative Bestimmung der NME im Stahl allein aber nicht möglich. Zu diesem Zweck muss man auf die rückstandsanalytischen Verfahren zurückgreifen. Dazu wird die zu untersuchende Stahlprobe durch geeignete Säuren, durch Chlor oder durch Elektrolyse aufgelöst. Die im Rückstand befindlichen Karbide werden durch Oxidation zerstört, und die zurückbleibenden NME werden nach Methoden der qualitativen und qualitativen Mikroanalyse untersucht [13]. Die rückstandsanalytischen Verfahren wurden aber nach und nach durch den Einsatz von Rasterelektronenmikroskopen ersetzt.

### **2.1.5. Einfluss nichtmetallischer Einschlüsse auf die mechanischen Eigenschaften in Stählen**

Die durch Desoxidation, Vergießen und Erstarren entstandenen Einschlüsse im Stahl werden bei der Weiterverarbeitung zusammen mit dem Grundwerkstoff mehr oder weniger stark und meist überwiegend in eine Richtung gestreckt. Durch diese Vorgehensweise wird oft eine eindeutige Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften hervorgerufen. In mehreren Arbeiten wurde dieses anisotrope Verhalten untersucht und im wesentlichen folgende übereinstimmende Ergebnisse gefunden:

- Die Anisotropie der mechanischen Eigenschaften ist eng mit dem Reinheitsgrad des Stahls verbunden.
- Statische Kennwerte wie die Zugfestigkeit und die Streckgrenze zeigen in Längs- und Querrichtung bei NME annähernd gleiche Werte, auch bei höherfesten Stählen wurde hier kein Einfluss festgestellt. Der Unterschied bei der Bruchdehnung ist zu vernachlässigen.
- Anders hingegen reagiert die Brucheinschnürung bei NME, die mit zunehmenden Einschlussgehalt abnimmt [14].

Durch steigende Festigkeit des Grundwerkstoffes werden diese Tendenzen noch verstärkt. Nichtmetallische Einschlüsse wirken sich prinzipiell negativ auf die Dauerfestigkeitseigenschaften aus. Bei höherfesten Stählen wird deren Auswirkung auf die Dauerfestigkeitseigenschaften noch zusätzlich verstärkt. Unterschiedliche Meinungen herrschen dagegen zum Teil darüber, welche Art oder Form eines Einschlusses als besonders schädlich anzusehen ist und vor allem, ab welcher Größe der Einschluss sich auf die Dauerfestigkeit negativ auswirkt.

## **2.2. Grundlagen der Betriebsfestigkeit**

Im Gegensatz zur Dauerfestigkeit beschäftigt sich die Betriebsfestigkeit mit Methoden, Bauteile auf die geforderte Mindestlebensdauer, mit ausreichender Zuverlässigkeit, zu dimensionieren. Durch diese Entwicklungen können neue Produkte in kürzerer Zeit, maßgeschneidert auf das

Einsatzgebiet, erprobt werden. Die folgenden Punkte beschreiben die aus meiner Sicht wichtigsten Grundlagen dafür, wie Prüfungen durchgeführt werden müssen und geben Auskunft darüber, wo Fehler auftreten können – sei es in der Vorbereitung der Proben oder in der Ausführung der Versuche – und wie sie vermieden werden können. Das Versagen von Bauteilen wird nur selten durch statische Überbeanspruchung ausgelöst. Weitaus häufiger tritt Bauteilversagen durch zyklische Kräfte ein [15].

### 2.2.1. Nennspannung und tatsächliche Spannung

Die Nennspannungen in einem Querschnitt sind jene Spannungen, die durch die Grundgleichungen der Festigkeitslehre ermittelt werden [16]. Während bei Zug/Druck Beanspruchung die Nennspannung über den Querschnitt konstant ist, muss man bei Beanspruchung auf Biegung die höchste Nennspannung in der äußeren Randfaser beachten. Natürlich sind die in Abb. 2.2 (Erklärung Tabelle 2) dargestellten Verläufe idealisiert und stark von äußeren und inneren Einflüssen abhängig. Unter äußeren Einflüssen versteht man Querschnittsänderungen, unter inneren Einflüssen versteht man Risse, Poren und NME.



Zug/Druck	$\sigma = \frac{F}{A}$		Normalspannung konstant über Querschnitt
Biegung	$\sigma = \frac{M_b}{W_{ax}}$	$M_b$ (  ) $M_b$	Normalspannung linear von Zug auf Druck

Abb. 2.2: Beanspruchungsarten [16]

In Abb. 2.3 sieht man die Erhöhung der Spannung zum einen durch eine Kerbe von außen, entweder bewusst eingebracht oder durch einen Bearbeitungsfehler, und zum anderen durch eine Kerbe von innen durch eine Pore oder NME.



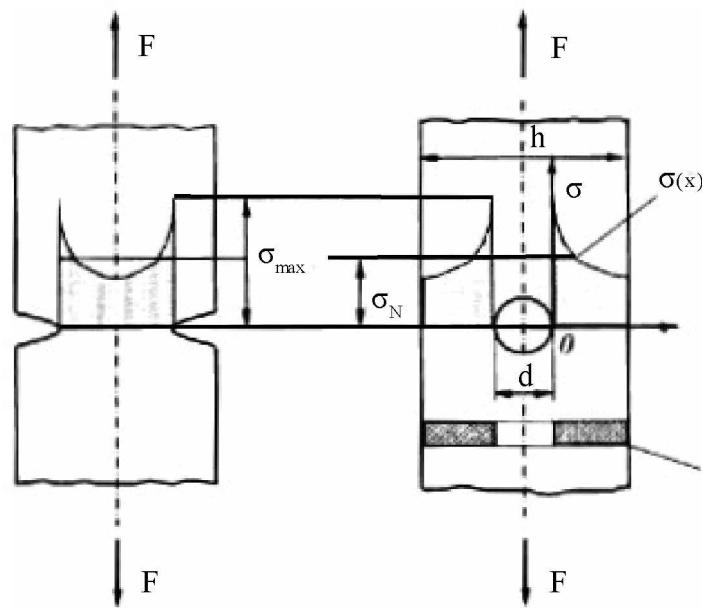


Abb. 2.3: Spannungsspitzen durch äußeren/inneren Einfluss [15]

Variable	Erklärung
$\sigma$ [N/m <sup>2</sup> ]	Spannung
F [N]	Kraft
A [m <sup>2</sup> ]	Fläche
$M_b$ [Nm]	Biegemoment
$W_{ax}$ [m <sup>3</sup> ]	Axiales Widerstandsmoment
d	Durchmesser
h	Höhe

Tabelle 2: Erklärung Abb. 2.2 und Abb. 2.3

### 2.2.2. Spannungskonzentration

Durch Kerben (Bohrungen, Gewinde usw.) kommt es in vielen Bauteilen zu Spannungskonzentrationen. Es gibt konstruktiv bedingte Kerben aber auch solche, die bei der Fertigung oder im laufenden Betrieb entstehen. Ziel der Konstruktion müssen kraftflussgerechte, sanfte Übergänge sein, da Kerben die wichtigste Einflussgröße auf die Schwingfestigkeit darstellen und sich grundsätzlich bauteilschwächend auswirken [17]. Die Verdichtung der Kraftlinien so wie in Abb. 2.4 sollte so gering wie möglich gehalten werden.

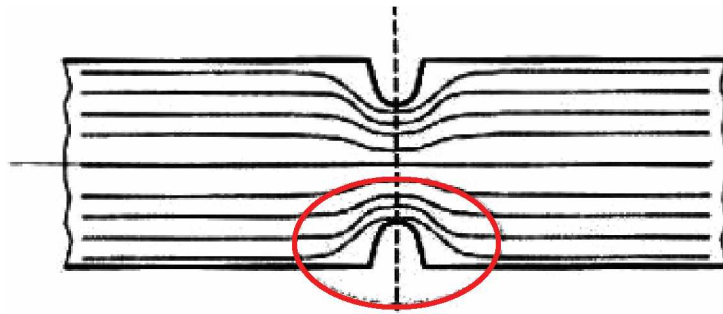


Abb. 2.4: Kraftlinienverdichtung durch eine Kerbe [15]

Es wird auch versucht konstruktiv unumgängliche Kerben durch sog. Entlastungskerben abzumildern. Infolge Kerbwirkung treten folgende Phänomene auf:

- Die Nennspannung wird erhöht,
- die Spannung im Kerbgrund wird erhöht
- und es stellt sich ein mehrachsiger Spannungszustand ein.

### 2.2.3. Beanspruchungs-Zeit-Verläufe

Bauteile sind in ihrem normalen Gebrauch unregelmäßigen Schwingen ausgesetzt. Diese Schwingungen haben unterschiedliche Ursachen. Sie können zum Beispiel durch das Heben von Lasten, durch Umwelteinflüsse aber auch durch Eigenfrequenzen entstehen. Da diese Größen in einem Labor nicht nachgestellt werden können, dient als Grundlage für alle Darstellungen von Beanspruchungs-Zeit-Verläufen ein einzelnes Schwingenspiel (Abb. 2.5).

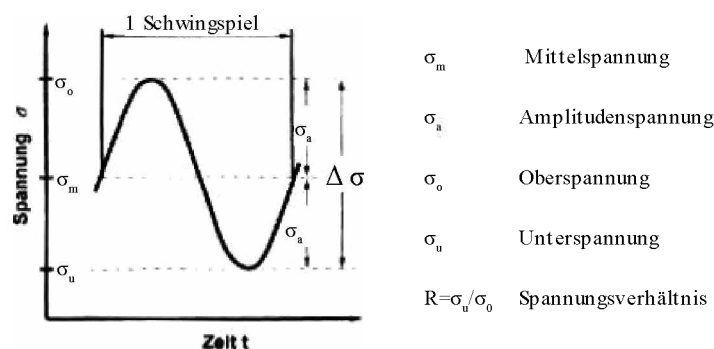


Abb. 2.5: Kennwerte eines Schwingenspiels [18]

Statt einer Normalspannung kann auch eine Schubspannung, eine Kraft, ein Moment oder die Dehnung als Maßzahl der Beanspruchungshöhe dienen. Wichtig ist auch die Lage der Schwingspiele bezüglich der Beanspruchungs-Nulllinie. Abhängig von der Mittelspannung oder dem Spannungsverhältnis ergeben sich drei Lastfälle (Abb. 2.6), die durch den so genannten R-Wert, der sich aus der Division Unter- zu Oberspannung ergibt, definiert werden.[18]

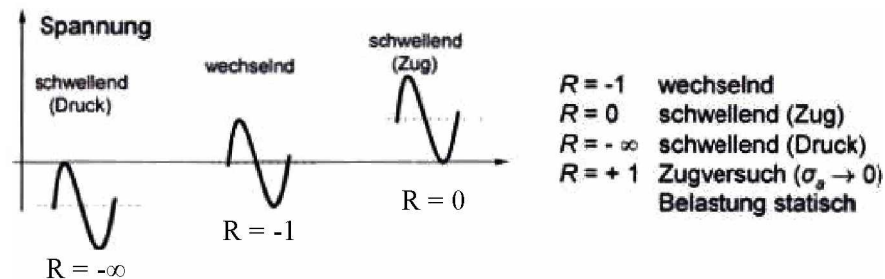


Abb. 2.6: Beanspruchungsverhältnisse und Spannungsverhältnisse [18]

## 2.2.4. Schwingfestigkeit

Schwingbelastungen gehen auf mechanische und thermische Belastungen zurück, welche sich meist mit einer statischen Grundbelastung überlagern. Man muss aber auch darauf Rücksicht nehmen, dass nicht nur Schwingbelastungen im hochfrequenten Bereich, sondern auch sehr langsame Lastwechsel zur Schädigung führen können.

Diese mehr oder weniger häufig wiederkehrenden Lastzyklen, können mitunter zur Werkstoffschädigung (= Ermüdung) und schließlich zum Anriss und Versagen des Bauteils führen. Bei der festigkeitsmäßigen Auslegung schwingend beanspruchter Bauteile ist von wesentlicher Bedeutung, dass bereits Spannungen, die keine plastische Verformung hervorrufen, einen Bruch (Dauerschwingbruch) auslösen können. Das heißt, dass die statische Berechnung für Bauteile bei schwingender Beanspruchung nicht ausreichend ist.

### 2.2.4.1. Wöhlerlinie

Der Wöhlerversuch, der entweder als Mehrstufen- oder Einstufenversuch durchgeführt wird, kann als die elementarste Form eines Betriebsfestigkeitsversuchs angesehen werden. Der Versuch bezieht sich auf den simpelsten Fall einer Schwingbeanspruchung, eine meist sinusförmige, zwischen zwei vorgegeben Grenzwerten schwingende, mit der Zeit veränderliche

Spannungs-Zeit-Funktion. Die Probe wird mit gleichbleibender Amplitude und konstantem Mittelwert beansprucht. Als Ergebnis zählt die bis zum Schwingbruch bzw. bis zur Grenzlastspielzahl erreichte Schwingspielzahl bei einem bestimmten Lastniveau. Um eine Wöhlerline zu ermitteln sind mindestens 15 Proben notwendig, die bei unterschiedlichen Belastungshöhen geprüft werden.[18]

Folgende Aussagen können durch den Wöhlerversuch getroffen werden:[15]

- Unterhalb der statischen Festigkeit tritt ein Bruch auf, wenn die Belastungen wiederholt auftreten.
- Kleinere Amplituden ermöglichen höhere ertragbare Schwingspielzahlen.
- Unterhalb der Dauerfestigkeit treten keine Brüche auf, sie werden als Durchläufer, der eine unendlich große Anzahl von Schwingspielen ertragen kann, gewertet.

Die Norm DIN 50 100, die Begriffe und Bezeichnungen für Schwingversuche vereinheitlicht, gibt für die Darstellung von Wöhlerlinien lediglich den Hinweis, dass sie im halblogarithmischen Netz erfolgen soll. Durch unterschiedliche Maßstäbe kann das halblogarithmische Netz die Wöhlerline recht unterschiedlich erscheinen lassen, was einen Vergleich auf den ersten Blick unmöglich macht. Verschiedene Gleichungen für eine formelmäßige Beschreibung und Versuchsauswertung von Wöhlerlinien wurden 1870 (von Wöhler selbst) bis 1963 vorgeschlagen (die notwendigen Formeln sind in Kapitel 2.3.1. ersichtlich)

Seit einiger Zeit wird bevorzugt das doppellogarithmische Netz verwendet, weil es praktische Vorteile mit sich bringt, da Wöhlerkurven, deren Spannungen weit auseinander liegen ebenso miteinander verglichen und in einem Diagramm dargestellt werden können. In Abb. 2.7 ist ein doppellogarithmisches Wöhlerdiagramm, in dem alle relevanten Kennwerte für einen kubisch raumzentrierten Werkstoff eingetragen sind, dargestellt (siehe Tabelle 3).

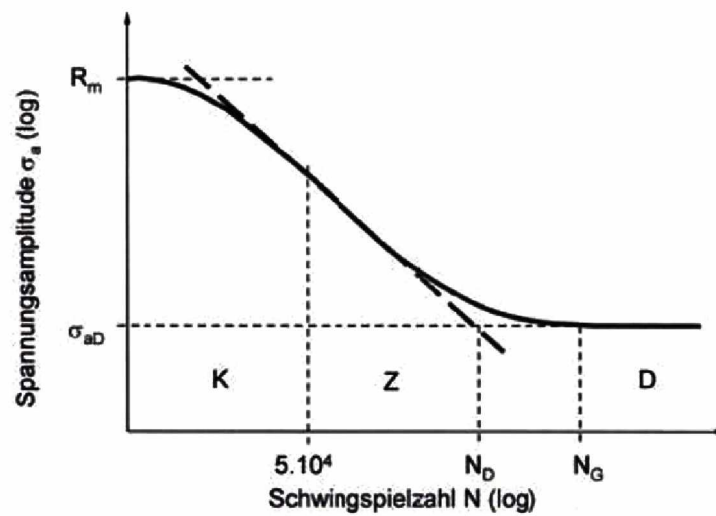


Abb. 2.7: Doppellogarithmische Wöhlerlinie [18]

Abkürzung	Erklärung
$R_m$	maximale Zugfestigkeit
$\sigma_a$	Nennspannungsamplitude
$\sigma_{aD}$	Dauerfestigkeit
$N$	Schwingspielzahl
$N_D$	Eckschwingspielzahl
$N_G$	Grenzwahlschwingspielzahl
K	Kurzzeitschwingfestigkeit $N < 5 \cdot 10^4$
Z	Zeitschwingfestigkeit $5 \cdot 10^4 < N < 2 \cdot 10^6$
D	Dauerschwingfestigkeit $> 2 \cdot 10^6$

Tabelle 3: Erklärung der doppellogarithmische Wöhlerlinie

Die genauen Formeln, die für die Berechnung einer Wöhlerlinie notwendig sind, befinden sich in Abschnitt 2.3. der Literaturlauswertung.

#### 2.2.4.2. Makroskopische Ausbildungsformen von Dauerbrüchen

Anhand des Aussehens des Dauerbruchs können eindeutig Art und Größe der Beanspruchung und ihr zeitlicher Verlauf charakterisiert werden. In Abb. 2.8 sind die wichtigsten

Ausbildungsformen von Dauerbrüchen dargestellt und in Tabelle 4 erklärt. Um solche Brüche zu erhalten, muss das verwendete Ausgangsmaterial äußerst rein sein und auch alle Randbedingungen ideal gehalten werden. Daher werden die Brüche bei den untersuchten Proben nur ansatzweise diese Ausbildungsformen vorweisen.

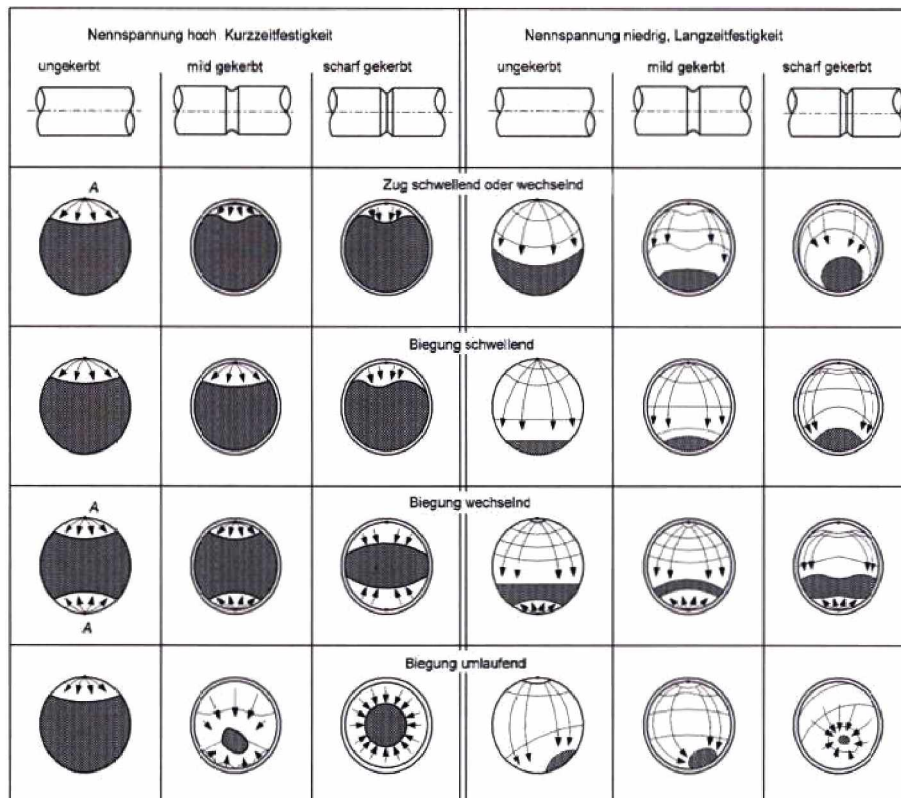


Abb. 2.8: Ausbildungsformen von Dauerbrüchen [16]

Weißer Zone	Graue Zone
Glatte Schwingbruchfläche mit Rastlinien. Die Pfeile geben die Richtung, in die sich die Risse ausbreiten, an. A steht für Anrissstelle;	Grobe Restbruchfläche; je größer diese Fläche ist, desto höher war die Nennspannung, die auf die Probe gewirkt hat. Bei einer hohen Nennspannung genügt schon eine geringe Schwächung der Querschnittsfläche und es kommt zum Versagen.

Tabelle 4: Erklärung der Bruchbereiche

### 2.2.5. Einflussgrößen auf die Schwingfestigkeit

Die Variationsbreite der Dauerfestigkeit einer Probe ist überaus groß. Prinzipiell ist sie abhängig von der Werkstoffart, dem Werkstoffzustand, der Oberflächengüte, Proben- und Bauteilgröße, der Belastungsart, der Temperatur, dem Korrosionseinfluss, der Mittel- und Eigenspannung sowie der Spannungskonzentration. Während eine stark gekerbte Probe aus hochfestem Stahl in einem korrosiven Medium nur wenige Prozente der Zugfestigkeit aushält, kann eine mild gekerbte Probe aus niedrigfestem Stahl in inerter Atmosphäre an die 70 % der Zugfestigkeit erreichen. Die Laborbedingungen für die Ermittlung der Dauerfestigkeit setzen kleine, ungekerbte und poliert (wenn nötig noch weiter oberflächenbehandelte) Proben voraus.

#### 2.2.5.1. Mittelspannung

Ausgehend von entsprechend ermittelten Wöhlerlinien lässt sich der Einfluss des Spannungsverhältnisses bzw. der Mittelspannung in einem Dauerfestigkeitsschaubild darstellen. Die Darstellung nach Smith wurde in der neuzeitlichen Schwingfestigkeitsforschung durch das Haigh Schaubild abgelöst. Die Erweiterung dieses Schaubilds auf ein Dauer- oder Zeitfestigkeitsdiagramm inklusive der Darstellung verschiedener Spannungsverhältnisse oder Mittelspannungen ist problemlos. Die Empfindlichkeit der Mittelspannung bezeichnet im Haigh Schaubild die Neigung der Zeit- oder Dauerfestigkeitslinie ( $N$  konstant) zwischen Wechsel- und Schwellfestigkeit,  $R = -1$  und  $R = 0$ ,  $M = \tan \alpha$  wobei der Neigungswinkel  $\alpha$  von der Horizontalen aus gemessen wird. Bei  $M = 0$  verläuft die Linie horizontal, wobei die ertragbare Spannungsamplitude von der Mittelspannung unabhängig ist. Bei  $M = 1$  ist die Linie unter  $45^\circ$  geneigt, Mittelspannung und Spannungsamplitude teilen sich eine konstant ertragbare Oberspannung [18]. Die rote Linie in Abb. 2.9 wird als Dauerfestigkeitslinie bezeichnet und bildet die Versagensgrenze. Alle Spannungen und Lastverhältnisse unterhalb dieser Linie führen nicht zum Versagen.

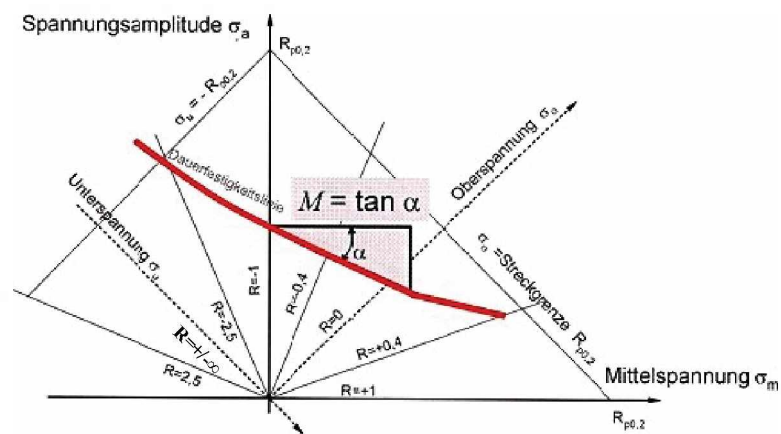


Abb. 2.9: Haigh Diagramm [18]

### 2.2.5.2. Beanspruchungsart

Wie durch Versuche bestätigt wird, ist die Schwingfestigkeit im Wesentlichen von der Beanspruchungsart Zug/Druck, Biegung oder Torsion abhängig. Die unterschiedlichen Festigkeitswerte haben ihren Ursprung in der unterschiedlichen Spannungsverteilung im Probenquerschnitt. Bei Umlaufbiegebelastung tritt eine völlig inhomogene Spannungsverteilung auf. Während die Spannungen in der Probenachse Null sind, haben jene in der äußersten Randfaser ein Maximum. Hingegen bei der Zug/Druck-Belastung ist von Anfang an der gesamte Querschnitt hoch beansprucht (siehe Abb. 2.2). Mit welchem Faktor die Zugfestigkeit bei verschiedenen Metallen und unterschiedlichen Beanspruchungsarten multipliziert werden muss, um einen ungefähren Richtwert für die Anfangsspannung eines Schwingversuchs zu erhalten, ist in Tabelle 5 dargestellt.

Werkstoff	ZUG		BIEGUNG			TORSION		
	$\sigma_W$	$\sigma_{Sch}$	$\sigma_{bW}$	$\sigma_{bSch}$	$\sigma_{bT}$	$\tau_W$	$\tau_{Sch}$	$\tau_F$
Baustahl	$0,45 R_m$	$1,3 \sigma_W$	$0,49 R_m$	$1,5 \sigma_{bW}$	$1,5 R_{p0,2}$	$0,35 R_m$	$1,1 \tau_W$	$0,7 R_{p0,2}$
Vergütungsstahl	$0,41 R_m$	$1,7 \sigma_W$	$0,44 R_m$	$1,7 \sigma_{bW}$	$1,4 R_{p0,2}$	$0,30 R_m$	$1,6 \tau_W$	$0,7 R_{p0,2}$
Einsatzstahl	$0,40 R_m$	$1,6 \sigma_W$	$0,41 R_m$	$1,7 \sigma_{bW}$	$1,4 R_{p0,2}$	$0,30 R_m$	$1,4 \tau_W$	$0,7 R_{p0,2}$
Grauguß	$0,25 R_m$	$1,6 \sigma_W$	$0,37 R_m$	$1,8 \sigma_{bW}$		$0,36 R_m$	$1,6 \tau_W$	
Leichtmetall	$0,30 R_m$		$0,40 R_m$			$0,25 R_m$		

Tabelle 5: Dauerfestigkeitswerte bei unterschiedlichen Beanspruchungstendenziell [18]



### **2.2.5.3. Oberfläche**

Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, ist bei der Probenfertigung ganz besonders auf eine sauber ausgearbeitete Oberfläche zu achten. Nur so ist die Interpretation von Ergebnissen möglich.

#### **2.2.5.3.1. Oberflächenrauheit**

Geschliffene Proben haben bedingt durch die Herstellung auf einer Drehbank oder CNC gesteuerten Maschine unvermeidbare Drehriefen, die jedoch schon wesentlich milder sind als jene von nur geschruppten und geschlichteten Proben. Daher ist die Nachbearbeitung solcher Proben für den Erhalt reeller Prüfergebnisse von enormer Wichtigkeit. Man muss davon ausgehen, dass zwischen Beanspruchungsart, Festigkeit, Einschlussmorphologie, Probengeometrie und Oberflächenqualität der Probe verschiedene Beziehungen herrschen. Jede Riefe stellt eine Kerbe dar, die unweigerlich zum vorzeitigen Versagen führt!

Für die Beurteilung von Oberflächen werden heute überwiegend Oberflächenmaßzahlen verwendet. Anhand von Diagrammen werden damit Abminderungsfaktoren auf die ertragbare Schwingfestigkeitsamplitude ermittelt. Man greift dabei auf Diagramme zurück, die Mitte des vergangenen Jahrhunderts ermittelt wurden, obwohl sich im Bereich der Fertigungstechnik seitdem viel verbessert hat. Die Genauigkeit und Qualität der Maschinen im Bezug auf höhere Schnittgeschwindigkeiten und maximale Vorschübe hat sich stark erhöht. Darum ist man bemüht die Diagramme zum Erhalt der Oberflächenfaktoren an den Stand des heute Machbaren anzupassen [19]. Abb. 2.10 und Abb. 2.11 zeigen, auch wenn beide Diagramme nach dem Stand der Technik erstellt wurden, dass es durchaus Unstimmigkeiten darüber gibt, wie sich die Oberflächenqualität auf die entsprechenden Faktoren auswirken.

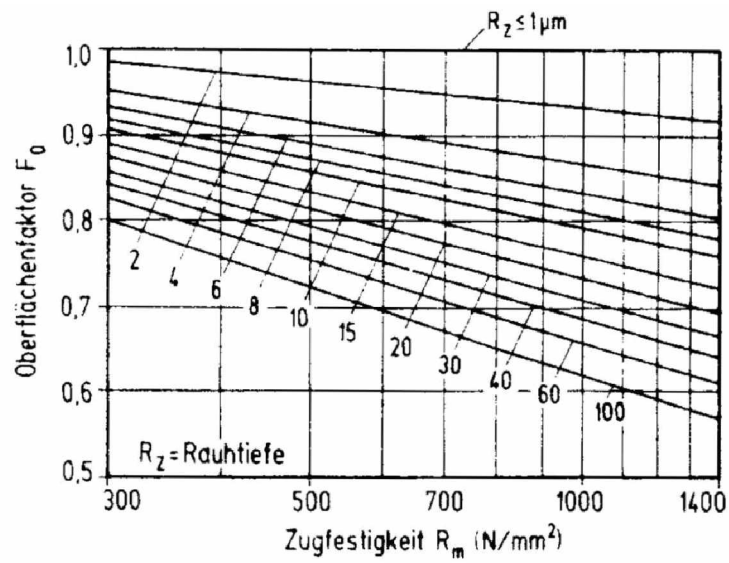


Abb. 2.10: Oberflächenfaktor nach Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung [19]

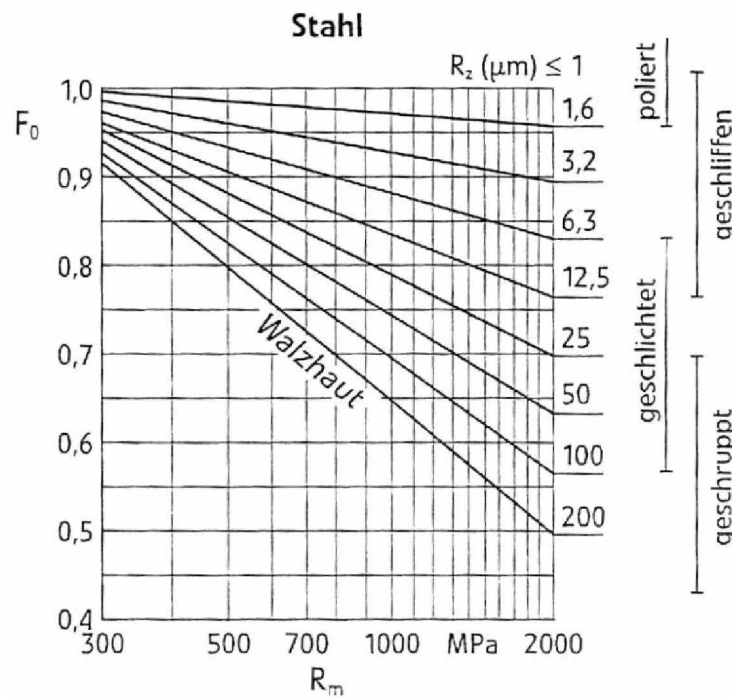


Abb. 2.11: Oberflächenfaktor nach FKM-Richtlinie [20]

### 2.2.5.3.2. Kugelstrahlen der Oberfläche

Kugelstrahlen ist ein besonders vielseitig einsetzbares Kaltverfestigungsverfahren, das bei den meisten Werkstoffen (Stahl, Aluminium, Magnesium, Gusseisen usw.) und bei beliebiger Oberflächenform eingesetzt werden kann. Beim Kugelstrahlen werden kugelige Strahlteilchen, die aus Metall, Keramik oder Glas bestehen können, mittels Druckluft oder durch Schleuderräder auf Geschwindigkeiten zwischen 10 und 100 Meter pro Sekunde beschleunigt und auf die Bauteiloberfläche geschossen [20]. Die Randschicht des Probe wird dabei plastisch verformt und der Zustand des Werkstoffs durch folgende Vorgänge (Mechanismen) verändert [21]:

- Kaltverfestigung
- Entstehen von Druckeigenstressungen im Bereich der plastischen Verformung
- Bildung von Verformungstexturen
- Aufrauhen der Oberfläche
- Transformation instabiler Phasen

Das Ausmaß der Veränderungen im oberflächennahen Werkstoffbereich wird durch die Parameter des Strahlprozesses, der Strahlteilchen und dem Probenmaterial bestimmt. Die Eigenschaften der Verfahren, Strahlteilchen und der Proben sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Verfahren	Strahlteilchen	Proben
Auftreffgeschwindigkeit	Formänderungsverhalten	Formänderungsverhalten
Auftreffwinkel	Größe	Härte
Strahldauer	Härte	Geometrie
Strahlmitteldurchsatz	Dichte	chem. Zusammensetzung
	Form	

**Tabelle 6: Parameter des Kugelstrahlens**

Der Strahlprozess wird durch die Angabe der Almen-Intensität und den Bedeckungsgrad charakterisiert.

Die Almenintensität dient als Maß für die eingebrachte Umformenergie, die vom Strahlendruck und dem Durchmesser der Strahlteilchen bestimmt wird. Zur Messung der Almen-Intensität wird die

Höhe der Aufbiegung von Plättchen mit vorgegebenen Abmessungen vom Typ A, C oder N unter dem Einfluss plastischer Streckung der Oberfläche ausgenutzt [22]. Die Bezeichnung Intensität erscheint verwirrend, da die Almenintensität in Millimeter angegeben wird. Dieser Begriff ist aber allgemein üblich und auch in der Literatur über das Kugelstrahlen verwendet.

Der Bedeckungsgrad gibt das prozentuale Verhältnis von plastisch verformter Oberfläche zur Gesamtoberfläche an, der sich aus der Strahldauer, dem Strahlmitteldurchfluss und der Größe der Strahlteilchen zusammensetzt. Die Veränderung der Oberfläche kann meistens schon mit freiem Auge erkannt werden. Um die genaue Rautiefe festzustellen, empfiehlt sich eine Untersuchung mittels Oberflächenabtastung. Durch ein öfteres oder langsames Überstrahlen der Probe können Bedeckungsgrade über 100 % erzielt werden. Der Ausgang von Ermüdungsrissen erfolgt meist direkt an der Oberfläche oder in oberflächennahen Randzonen eines Bauteils. Die mechanische Oberflächenbehandlung von metallischen Werkstoffen beeinflusst daher das Ermüdungsverhalten [23].

Leider wird nicht immer ein positives Ergebnis beim Kugelstrahlen erzielt, weshalb die oben genannten Parameter genau berücksichtigt werden müssen. Durch das Zusammenwirken aller Einflüsse sollte durch die eingebrachten Druckeigenspannungen und Kornfeinung die Rissausbreitung verzögert und somit eine Steigerung der Dauerfestigkeit erreicht werden. Bei kerbempfindlichen Werkstoffen und falschen Strahlparametern kann die Dauerfestigkeit auch herabgesetzt werden. Durch Kugelstrahlen mit unterschiedlichen Almenintensitäten können Veränderungen der Dauerfestigkeit von - 40 bis + 30 % erreicht werden, wobei die höchste Intensität zum größten Abfall der Dauerfestigkeit führt [24].

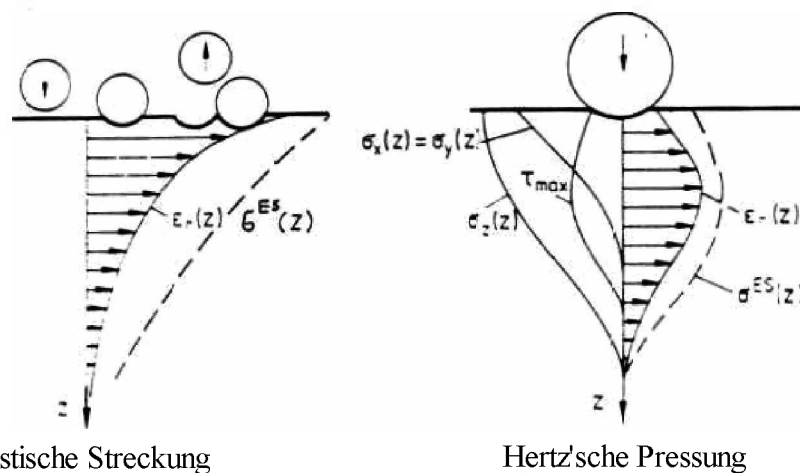
Die plastische Verformung der oberflächennahen Schicht während des Kugelstrahlens ist für das Entstehen von Druckeigenspannungen verantwortlich. Man kann zwei Prozesse des Plastifizierens unterscheiden [25]:

1. Die direkte Streckung der oberflächennahen Schicht, die zur Bildung des Eigenspannungsmaximums an der Oberfläche führt und
2. die durch Hertz'sche Pressung hervorgerufene Spannungsverteilung mit dem Schubspannungsmaximum und der maximalen Verformung in einer Tiefe von  $z$  unterhalb der Oberfläche des Werkstücks, die damit verbunden ist.

$$\text{Verformung in einer Tiefe von } z: z = 0,47 * a \quad (1)$$

Wobei  $a$  die halbe Breite der Druckzone zwischen Kugel und Ebene ist.

Die unterschiedlichen Plastifizierungsmodelle sind in Abb. 2.12 skizziert. Welcher der beiden Prozesse sich durchsetzt, das heißt wo sich das Druckeigenstressmaximum befindet, ist hauptsächlich von der Härte des Probenmaterials und der Strahlintensität abhängig. Allgemein gilt, dass mit zunehmender Probenmaterialhärte und höherer Strahlintensität die Hertz'sche Pressung an Einfluss gewinnt und somit das Druckeigenstressmaximum stärker unterhalb der Oberfläche ausgeprägt ist [26]. Die Tiefe der druckeigenstress-behafteten Zonen hängt einerseits vom Impuls, der durch den Aufprall der Strahlenteilchen auf die Probe verursacht wird ab und andererseits vom Umformverhalten der Probe.  $\sigma$  mit dem entsprechendem Index steht für die Druckspannung beziehungsweise  $\tau$  für die Schubspannung und  $\varepsilon$  für die Dehnung.



**Abb. 2.12: Modelle der Plastifizierung kugelgestrahlter Oberflächen [25]**

Je härter der Werkstoff ist, desto größer ist das Druckeigenstressmaximum nach dem Strahlen. Aufgrund der Kaltverfestigung während des Strahlens sind bei relativ weichen Werkstoffen Druckeigenstressspannungen, deren Betrag höher als die der Zugfestigkeit des unbeeinflussten Werkstoffs liegt, möglich [27]. In Abb. 2.13 sind charakteristische Werte für die Spannungsverteilung eingetragen, die in Tabelle 7 erklärt werden.

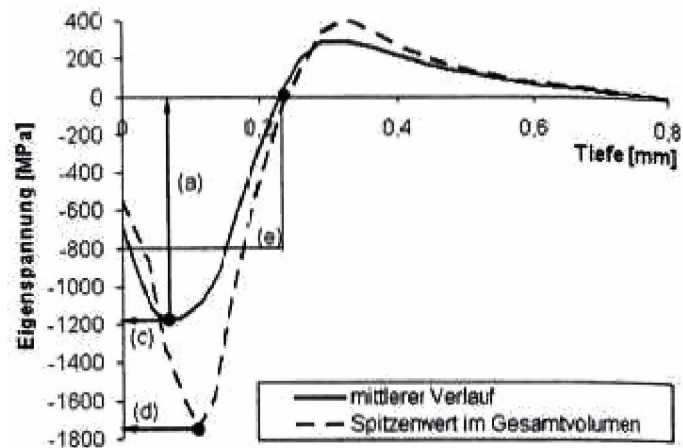
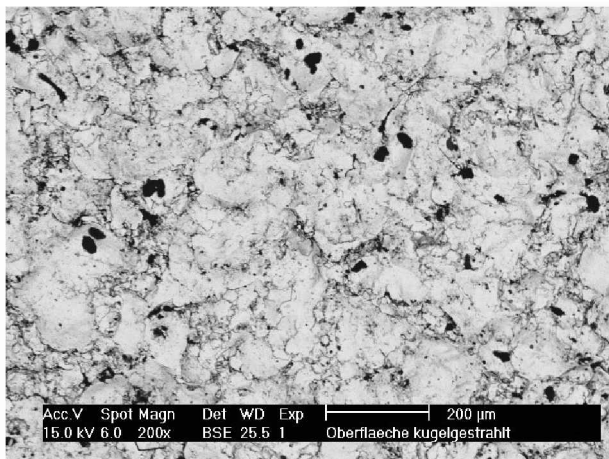


Abb. 2.13: Charakteristische Werte der Eigenspannungsverteilung [27]

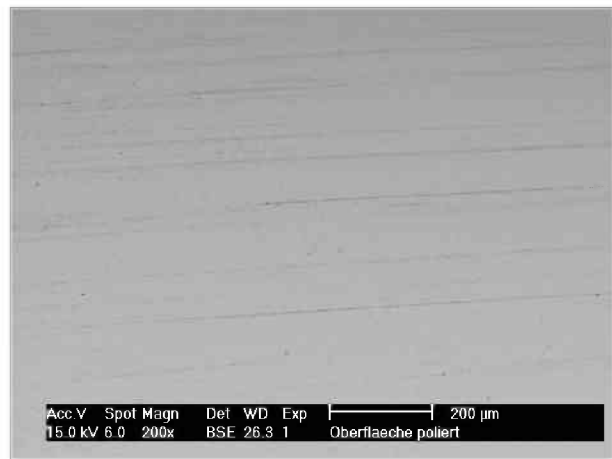
Linie	Spannung [MPa]	Tiefe [mm]
a		mittlere Tiefe der Druckeigenspannung
b	Nulldurchgang des Eigenspannungsverlaufs	
c	mittlere maximale Druckeigenspannung	
d	Maximaler Spitzenwert der Druckeigenspannung	

Tabelle 7: Erklärung der Werte von Abb. 2.13

Werden mit kugelgestrahlten Proben Schwingversuche durchgeführt, so wirkt sich das auch auf das Aussehen der resultierenden Wöhlerlinie aus. Geht man von der gleichen statischen Festigkeit aus, ändern sich je nach Eigenspannung die Neigung  $k$ , die Ecklastspielzahl  $N_D$  und die Schwingfestigkeit  $\sigma_a$ . In Abb. 2.14 sind die Oberflächen einer kugelgestrahlten und einer polierten Probe gegenübergestellt.



A) Kugelgestrahlte Oberfläche



B) Längspolierte Oberfläche

Abb. 2.14: Rasterelektronische Aufnahmen von Proben

### 2.2.5.3.3. Weiter Möglichkeiten der Oberflächenbehandlung

Um das Thema der Oberflächenbehandlung abzurunden sei kurz ein Überblick über weitere Möglichkeiten der Oberflächenbehandlung gegeben:

- hochenergetische Strahlverfahren: Mit diesen Verfahren (Plasma-, Elektronen-, Laser- und Ionenstrahl) wird eine Steigerung der Korrosions-, Verschleiß- und Schwingfestigkeit erreicht.
- Festwalzen der Oberfläche zum Erzielen von hohen Druckeigenstressungen bevorzugt bei rotierbaren Bauteilen, die aus einem hinreichend verformungsfähigen Werkstoff sind.
- Härten der Oberfläche (Induktions-, Flamm-, Einsatz- und Nitrierhärten) wurde ursprünglich zur Verschleißminderung angewandt, kann aber auch die Schwingfestigkeit wesentlich beeinflussen.

### 2.2.5.4. Größeneinfluss

Die Festigkeit und Schwingfestigkeit ist abhängig von der Größe der Bauteile. Auch wenn ein geometrisch ähnliches aber größeres Bauteil hergestellt wird, ist mit einem Festigkeitsabfall zu rechnen. Daher treten auch Probleme auf, wenn man die durch einen Probestab ermittelten Festigkeitseigenschaften auf ein Bauteil übertragen möchte. Daher wird in Normen für

bestimmte Legierungen immer ein Wert für die Bauteilfestigkeit und ein Wert für getrennt gegossen Probestäbe angegeben.

Es wird zwischen

- geometrischem,
- technologischem,
- oberflächentechnischem,
- und statistischem Größeneinfluss unterschieden.

#### **2.2.5.5. Ermüdungsvorgang**

Die Zeit bis zur Bildung eines technisch nachweisbaren Risses wird dann einen erheblichen Teil des Lebens beanspruchen, wenn keine größeren Inhomogenitäten im Material vorhanden sind. Die technische Rissbildungsphase beinhaltet die Bildung eines wachstumsfähigen Riskeimes und die Ausbreitung des Riskeimes bis zur technischen Nachweisgrenze [28]. Man kann den Ermüdungsvorgang in zwei Phasen unterteilen:

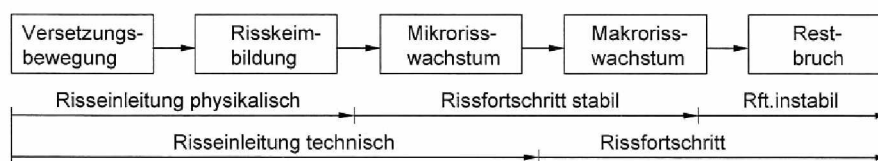
- die Risseinleitung des stabilen überwiegend zyklischen Rissfortschritt und
- den instabilen Restbruch (Abb. 2.15).

Die Risseinleitung umfasst die Versetzungsbewegung in den Gleitebenen mit folgender Werkstofftrennung auf den Gleitbändern in Bereichen, kleiner als die Korngrößen. Fehler resultieren in örtliche Spannungsüberhöhungen wie zum Beispiel

- Kerben,
- Einschlüsse,
- Hohlräume oder
- schon vorhandene Risse,



die das Entstehen von Gleitbändern begünstigen. Überschreitet die Risslänge in etwa die Korngröße so wird ein fortschrittsfähiger Mikro- oder Kurzriss erreicht. Durch die Schwingspielzahl und Verunreinigungen vergrößert sich dieser und verbindet sich mit benachbarten Mikrorissen, um zunächst einen Makro- oder Langriss mit einer Länge von ca. einem Millimeter zu bilden. Das Kurzrisstadium dauert erfahrungsgemäß deutlich länger als das darauf folgende Langrisstadium. Mit zunehmender Risslänge kommt es, durch statische Überlastung, zum duktilen Restbruch des Restquerschnitts. Ist der Werkstoff hingegen spröde kann der Restbruch bereits vom Kurzriss ausgehen.



**Abb. 2.15: Phasen des Ermüdungsvorganges [16]**

Der Anteil der Risseinleitungsphase an der Gesamtlebensdauer ist sehr unterschiedlich. Man unterscheidet die physikalische und technische Risseinleitung, welche Risslänge dem technischen Anriss zugeordnet wird und welche den Restbruch auslöst, ob die die Probe gekerbt oder ungekerbt ist, ob die Kurzzeit- oder Langzeitfestigkeit untersucht wird und ob Druck oder Zugmittelspannungen herrschen. Durch Wöhler- und Betriebsfestigkeitsversuche an ungekerbten Proben aus einem makroskopisch homogenen Werkstoff, deren Hauptaugenmerk auf der Untersuchung frühester Mikrorisse lag, ist nachgewiesen, dass 90 % der Zeitspanne bis zu einem technischen Anriss von einem Millimeter Länge dem Fortschritt des Mikrorisses zuzuordnen ist. Daraus folgt, dass nur 10 % der Zeit auf die eigentliche physikalische Anrissbildung entfallen. Bei der technischen Risseinleitung stellen sich die Verhältnisse ganz anders dar. Bei ungekerbten Proben nahe der Dauerfestigkeit entfällt der Großteil der Lebensdauer auf die technische Anrissbildung [16].

## 2.3. Auswertung von Zeit- und Dauerfestigkeitsdaten

Die bekannten Verfahren zur Auswertung von Dauerfestigkeitsdaten sind in Tabelle 8, jeweils mit den Besonderheiten des einzelnen Verfahrens, dargestellt [29].

Verfahren	Treppenstufen Verfahren	Arcsin $\sqrt{P}$ - Verfahren	Abgrenzungs Verfahren	Probit Verfahren
Verteilungsform	Nein	Ja	Nein	Ja
Mittelwert $m$	Ja	Ja	Ja	Ja
Streuung $s$	Ja	Ja	Ja	Ja
Probenanzahl $n$	15-20	$> 7$	30	$> 50$
Versuchsplanung	Einfach	Einfach	Schwierig	Einfach
Anmerkung	Gängiges Verfahren	Unempfindlich	Vorabschätzung von $m$ und $s$ nötig	Sehr aufwendig

**Tabelle 8: Vergleich der Verfahren [29]**

Da im Rahmen der Diplomarbeit nicht nur Schwingversuche durchzuführen sind, würde das Abgrenzungs- und auch das Probitverfahren zu viel Zeit beanspruchen. Die Angabe der Überlebenswahrscheinlichkeit erfolgt für 50 ( $P_{\bar{U}50\%}$ ), 10 ( $P_{\bar{U}10\%}$ ) und 90 ( $P_{\bar{U}90\%}$ ) Prozent. Dementsprechend wird auch die Wöhlerlinie mit diesen Überlebenswahrscheinlichkeiten dargestellt.

### 2.3.1. Wöhlerkurve

Wie im Literaturteil bereits erwähnt, dient die Wöhlerlinie als einziges Verfahren neben der Auswertung von Dauerfestigkeitsdaten auch zur Festlegung des Zeitfestigkeitsbereichs. Die Ziele des Wöhlerversuchs sind:

- Bemessung von Bauteile nach Dauer- und Zeitfestigkeitswerten
- Untersuchung der Schädigungsmechanismen bei Schwingbeanspruchung
- Vergleich werkstofflicher oder konstruktiver Bauteilvarianten
- Basis für Betriebsfestigkeitsversuche

- Ermittlung von Wöhlerlinien für Schadensakkumulationsrechnungen

Der Verlauf der Wöhlerlinie im Übergangsbereich zwischen Zeit- zur Dauerfestigkeit kann nicht so einfach ermittelt werden, denn während im Zeitfestigkeitsbereich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Spannungsstufe und Bruchlastspielzahl besteht, kommen im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit Proben vor, die nicht versagen und somit schon zur Dauerfestigkeit zählen. Bei jedem Spannungsniveau besteht mit abnehmender Beanspruchung eine größere Überlebenswahrscheinlichkeit, die einer bestimmten Verteilung folgt (Weibull- oder Normalverteilung) [30]. Die Festlegung der Dauerfestigkeit erfolgt durch das Arcsin  $\sqrt{P}$ -Verfahren.

Die wichtigsten Formeln für die Berechnung der Zeitfestigkeit lauten:

$$\text{Mittelwert: } \log N_{50\%} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log N_i \quad (2)$$

$$N_{50\%} = 10^{\log N_{50\%}} \quad (3)$$

$$\text{Standardabweichung: } s_{\log N} = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\log N_i - \log N_{50\%})^2 \right] \quad (4)$$

$$\log N_s = \log N_{50\%} \pm s_{\log N} \quad (5)$$

$$\log N_{x\%} = \log N_{50\%} \pm s_{\log N} * u_x \quad (6)$$

$$\text{Überlebenswahrscheinlichkeit: } P_u = \frac{3_i - 1}{3_n + 1} * 100\% \quad (7)$$

$$\text{Streuspanne: } T_N = 1 / \left( \frac{N_{50\%} + 1,28 * s}{N_{50\%} - 1,28 * s} \right) \quad (8)$$

$$\text{Steigung der Zeitfestigkeit: } k = \frac{\log\left(\frac{N_2}{N_1}\right)}{\log\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)} \quad (9)$$

Variable	Erklärung	Variable	Erklärung
PÜ	Überlebenswahrscheinlichkeit	j	Laufende Probennummer
TN	Streuspanne	s	Standardabweichung
K	Steigung der Zeit	u	Verteilungsfunktion der Normalverteilung
N	Schwingspielzahl	$\sigma_1$	Spannung
n	Probenanzahl		

Tabelle 9: Variablen der Wöhlerkurve

### 2.3.2. Statistische Auswertung von Treppenstufen-Versuchen nach Hück durch die IABG-Methode

Das Versuchsschema entspricht einem Folgeversuch, der wie ein verkettetes Experiment abläuft. Zunächst muss die Spannungsamplitude beispielsweise durch einen Zugversuch oder sonstige Literaturwerte geschätzt und das Übergangsgebiet in geeignete Intervalle, die sich einfach berechnen lassen, unterteilt werden. Auf jeder Spannungsstufe besteht eine bestimmte Übergangswahrscheinlichkeit zur nächst höheren oder niedrigeren Spannungsstufe. Tritt bei einem Spannungsniveau vor Erreichen der Schwingspielzahl, die für einen Durchläufer notwendig ist, das Ereignis Bruch ein, so wird die folgende Probe auf dem nächst niedrigerem Spannungsniveau geprüft. Erreicht die Probe hingegen die erforderliche Schwingspielzahl, zählt sie als Durchläufer und die Folgeprobe wird auf dem nächst höheren Spannungsniveau geprüft [31]. Dadurch, dass dieses Verfahren bei der Auswertung nur die Proben eines Spannungsniveaus aufsummiert aber keinen Unterschied macht, ob eine Probe bricht oder durchläuft, kann nach der letzten Probe noch eine Fiktive zur Gesamtsumme der Probe addiert werden. Man geht davon aus, dass sich das Verhältnis von Durchläufern und Brüchen bezogen auf die Spannungsstufen als Normalverteilung darstellen lässt [32]. Das Verfahren nach Dixon und Mood hat Hück durch das IBAG Verfahren verbessert. Der Vorteil dieses Versuchsschemas ist, dass sich der Versuch von selbst auf einen Mittelwert einpendelt. Die benötigte Probenanzahl ist überschaubar, Nachteile sind der zeitliche Aufwand und die Tatsache, dass jeder Versuch auf dem Ergebnis des vorangegangenen Versuchs aufbaut. Das Beispiel in Abb. 2.16 Bild A zeigt das Versuchs- und Auswerteschema. In Abb. 2.16 und Abb. 2.17 sind die Diagramme für die notwendigen Hilfswerte dargestellt.

Benötigte Formeln:

$$\text{Varianz: } k = \frac{F+B-A^2}{F^2} \tag{10}$$

$$\text{Mittelwert: } \bar{x} = S_{D0} + \frac{d \cdot A}{F} \tag{11}$$

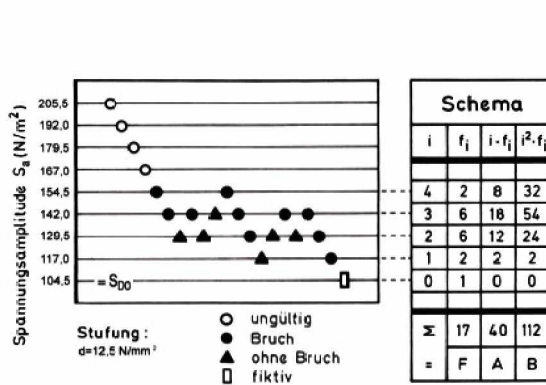
$$\text{Standardfehler des Mittelwerts: } s_m = C_m \cdot s \tag{12}$$

$$\text{Standardfehler der Standardabweichung: } S_s = C_s \cdot d \tag{13}$$

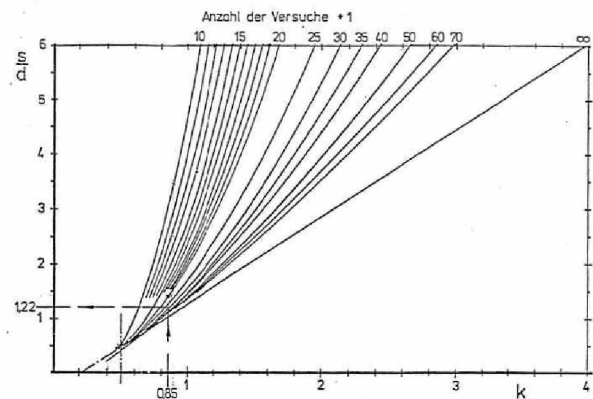
$$\text{Überlebenswahrscheinlichkeit: } P_u = \bar{x} - K_2 \cdot s - K_1 \cdot \sqrt{S_m^2 + (K_2 \cdot S_s)^2} \tag{14}$$

Variable	Erklärung
F, A, B	siehe Abb. 2.17
k	Varianz
S <sub>D0</sub>	Niedrigstes Spannungsniveau
d	Stufensprung
s	Schätzwert der Standardabweichung
C <sub>m</sub>	Hilfswert zur Ermittlung des Standardfehlers des Mittelwerts
C <sub>s</sub>	Hilfswert zur Ermittlung des Standardfehler der Standardabweichung
K <sub>1</sub>	Definierter Faktor aus der Normalverteilung
K <sub>2</sub>	Fraktile der gewünschten Überlebenswahrscheinlichkeit aus der Normalverteilung

Tabelle 10: Variablen des Treppenstufenversuchs

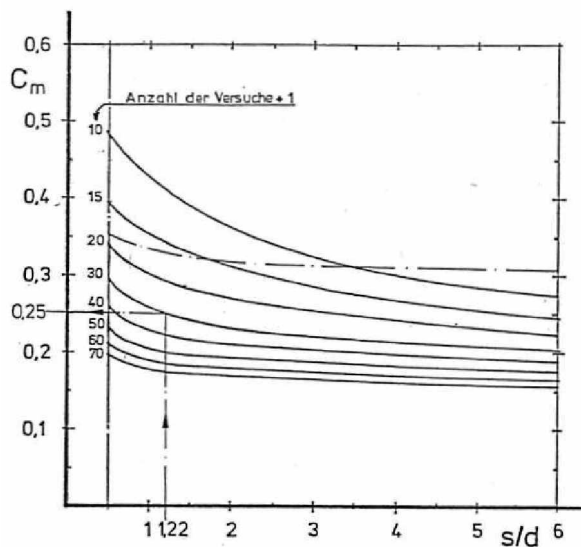


A) Darstellung der Treppen mit Schema [18]

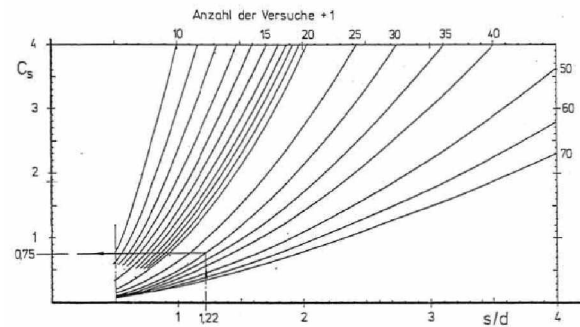


B) Schätzwert s/d der Standardabweichung s aus der Varianz k [32]

Abb. 2.16: Treppenstufenversuch und Diagramm für s/d



A) Hilfswert  $C_m$  zur Ermittlung des Standardfehlers des Mittelwerts



B) Hilfswert  $C_s$  zur Ermittlung des Standardfehlers der Standardabweichung

Abb. 2.17: Hilfswerte des Treppenstufenversuchs [32]

### 2.3.3. Arcsin $\sqrt{P}$ -Verfahren

Mit der Arcsin  $\sqrt{P}$  Transformation kann in einfachen Schritten eine Schätzfunktion zur Auswertung von Wöhlerversuchen dargestellt werden. Für dieses Verfahren benötigt man mit Abstand die wenigsten Proben, wodurch es ein sehr sparsames und auch schnell durchzuführendes Verfahren ist. Weitere Vorteile sind die Unempfindlichkeit gegenüber einer ungünstigen Verteilung der Proben an den Lasthorizonten, gute Schätzung des Mittelwerts und der Vertrauensgrenzen bei kleinem Stichprobenumfang [29]. Abb. 2.18 spiegelt die einfache Handhabung dieses Verfahrens wider.

Notwendige Formeln:

$$\text{Dauerfestigkeit: } \sigma_D = a + b * z \quad (15)$$

$$a = \frac{\sum_{g} \sigma - b * \sum_{g} z}{g} \quad (16)$$

$$b = \frac{\sum z * \sigma - \frac{\sum \sigma * \sum z}{g}}{\sum z^2 - \frac{(\sum z)^2}{g}} \quad (17)$$

$$z = \arcsin(\sqrt{P_i}) \quad (18)$$

$$P_i = \frac{r_i}{n_{(\sigma_i)}} \quad (19)$$

$$\text{für } r_i = 0 \text{ wird eingesetzt } P_i = \frac{1}{2 * n} \quad (20)$$

Variable	Erklärung
$\sigma_D$	Dauerfestigkeit
$z$	Transformationsgröße
$r_i$	Anzahl der Probenbrüche am Spannungsniveau $i$
$n_i$	Anzahl der Versuche am Spannungsniveau $i$
$a, b$	Koeffizienten der Regressionsgerade
$P_i$	Bruchwahrscheinlichkeit am Spannungsniveau $i$
$g$	Anzahl der Spannungsstufen

Tabelle 11: Variablen des Arcsin  $\sqrt{P}$ -Verfahrens

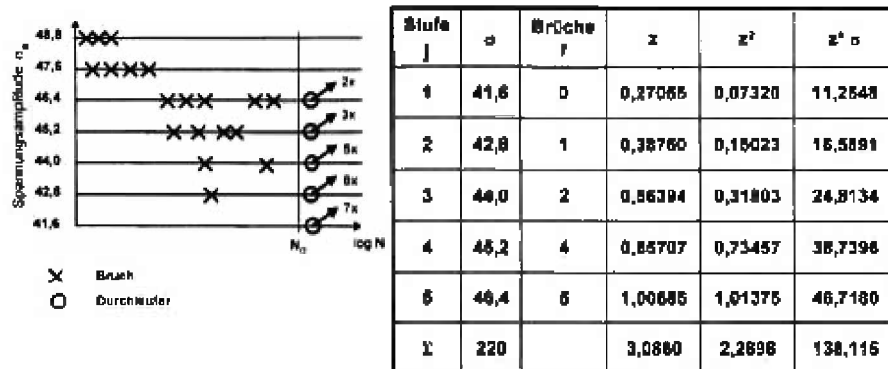


Abb. 2.18: Beispiel für Arcsin  $\sqrt{P}$ -Verfahren [29]

## **2.4. Auswahl theoretischer Verfahren zur Bestimmung der Lebensdauer unter Berücksichtigung von Kerben und nichtmetallischen Einschlüssen**

Die Modelle und Annäherungen die hier untersucht werden, sind auf diese beschränkt, die sich mit der Vorhersage der Dauerfestigkeit von Stählen, die kleine Mängel, Einschlüsse und Inhomogenitäten aufweisen, beschäftigen. Dieser Abschnitt definiert auch die notwendigen Daten für Anwender dieser Modelle, die Annahme, auf der die Modelle beruhen und ob die Verfahren sowohl auf dreidimensionale, als auch auf zweidimensionale Fehler anwendbar sind.

Dem Vorhandensein von kleinen Fehlern in Werkstoffen wurde große Aufmerksamkeit bei den ersten Dauerfestigkeitsversuchen geschenkt, als sich die Stahltechnologie in ihrer Anfangsphase befand. Zu dieser Zeit gab es unzählige Makroeinschlüsse oder Poren im Stahl, die nicht nur eine erhebliche Reduktion der Zugfestigkeit von hochfestem Stahl, sondern auch beachtliche Streuungen zur Folge hatten. Es gab viele detaillierte Studien über diese Fehler aber keine expliziten Lösungsansätze wurden vorgeschlagen.

Eine Reihe von Forschungsarbeiten von Frost [33], berücksichtigten nicht die Auswirkungen von NME oder Fehlern, die schon an sich im Stahl existierten, sondern vielmehr die Auswirkungen von Kerben als strukturelle Fehlstellen oder Ermüdungsrisse. Diese Vorgehensweise leuchtet ein, da Frost sich in seinen Arbeiten mit vergleichsweise niederfesten Stählen mit einer Zugfestigkeit zwischen 80 und 1000 MPa beschäftigte. Dennoch, die Annäherung war zu dieser Zeit innovativ, weil sie von der Anwesenheit von Fehlern ausging. Im Gegensatz dazu führte Isibasi, wie Murakami schreibt, zur gleichen Zeit in Japan eine Serie von bruchmechanischen Versuchen durch und ermutigte japanische Wissenschaftler die Dauerfestigkeit aus dem Blickwinkel des Risswachstums zu betrachten. Dies gilt als Geburtsstunde der Bruchmechanik [34].

In den letzten Jahren hat die Schwierigkeit der Auswertung von kleinen und kurzen Rissen die Aufmerksamkeit der Wissenschaftler auf sich gezogen, weshalb sich viele Artikel mit der Untersuchung eines Grenzwertes der Rissbildung für kleine und kurze Risse beschäftigen. Der Grund für die zunehmenden Tätigkeiten auf diesem Gebiet kann man wie folgt zusammenfassen [35]:

1. Kleine Risse und Mängel können in ihrem Aufbau nicht erkannt werden und die Inkubationszeit für die Ausbildung kleiner Risse ist lang.



2. Auch wenn diese Fehler erkannt werden und ihr Aussehen und Größe bekannt sind, sind konventionelle Annäherungen in der Bruchmechanik nicht anwendbar.
3. Wenn NME dieselbe Größe wie die Mikrostruktur des Metalls aufweisen, dann müssen statistische Faktoren der Mikrostruktur für das Anrissverhalten berücksichtigt werden.
4. Mit der Weiterentwicklung der Stahlerzeugungstechnologie wurden die Auswirkungen von NME auf die Dauerfestigkeit wichtig, sowohl vom Standpunkt der Materialbeurteilung, als auch von Seiten der Qualitätskontrolle.

Wenn man die bestehenden Modelle historisch betrachtet, kann man diese in die folgenden drei Gruppen gliedern:

1. Frosts und andere ähnliche Modelle: Frost [33] zeigt eine empirische Formel auf der Grundlage der Beziehung Dauerfestigkeit  $\sigma_w$  zu Risslänge  $l$  und der Materialkonstanten  $C$ .

$$\sigma_w^3 * l = C \quad (21)$$

Diese Formel wurde von Murakami [36] erweitert, der folgende Gleichung vorschlug:

$$\sigma_w^n * \sqrt{area} = C \quad (22)$$

Wobei der Exponent  $n$  in Abhängigkeit zur Größe des Fehlers steht. Für kleine Fehler zwischen  $\pm 10 \mu m < \sqrt{area} < 1000 \mu m$  ist  $n$  ungefähr 6, mit  $area$  ist die projizierte Fläche der Fehlstelle gemeint. Noch eine Weiterentwicklung lautet:

$$\sigma_w * = \frac{C * (H_v + 120)}{\sqrt{area}^{1/6}} * \left[ \frac{1-R}{2} \right]^\alpha \quad (23)$$

$H_v$  entspricht der Vickershärte,  $R$  steht für das Spannungsverhältnis und  $\alpha = 0,226 + H_v * 10^{-4}$

2. Annäherung basierend auf der Kerbwirkungszahl: Es gibt Studien, die besagen, dass man die Peterson-Gleichung, die für große Kerben ausgelegt ist, auch für kleine Risse und NME Gültigkeit besitzt.

3. Bruchmechanische Annäherungen: Diese Annäherung beschreibt man am einfachsten mit dem Faktor  $\Delta K_{th}$  (Schwellenwert der Spannungsintensitätsschwingbreite).

Die Modelle, die auf diesen Grundlagen basieren, decken fast ausschließlich den Bereich der zweidimensionalen Kerben ab. Für dreidimensionale Kerben gibt es nur einige wenige Verfahren, für deren Auswertung viele, aufwendig zu ermittelnde Werkstoffdaten notwendig sind. Interessant dabei ist auch, dass sehr komplexe Verfahren beinahe das gleiche Ergebnis liefern wie das klassische Verfahren von Isibasi. Das Modell drei ist ausschließlich für zweidimensionale große Fehler. Eine achtlose Aufsummierung der  $\Delta K_{th}$  Werte ergibt eine völlig falsche Abschätzung der Dauerfestigkeit.

### 3. Experimentelle Methoden

In diesem Abschnitt wird auf alle notwendigen Verfahrensschritte eingegangen, die für reproduzierbare Prüfungsergebnisse notwendig sind.

#### 3.1. Herstellroute

Die Herstellung aller verwendeten Stahlsorten erfolgt über die Hochofenroute (siehe Abb. 3.1). Die spezifischen Eigenschaften der Stahlsorten werden erst in der Sekundärmetallurgie erreicht.

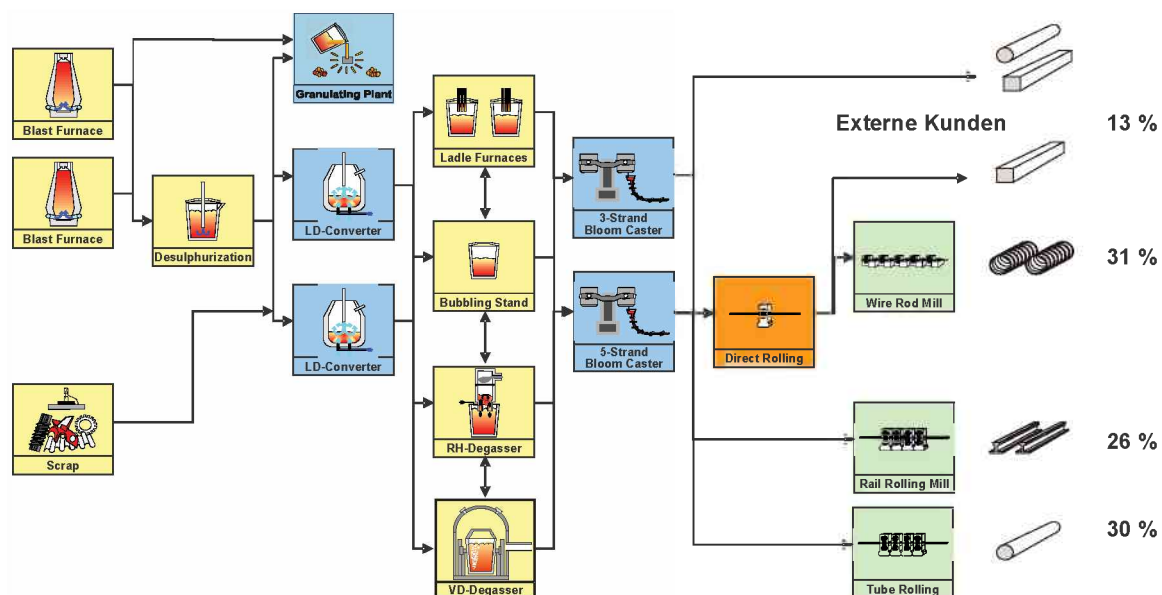


Abb. 3.1: Herstellroute (aus der voestalpine Datenbank)

#### 3.2. Chargen und Stahlmarken

Fünf Chargen stehen zur Verfügung:

- Chargennummer 488472; 54SiCr6
- Chargennummer 488730; Cf53

- Chargennummern 481999 bis 482001; 37CrS4; Diese drei Chargen haben zwar dieselbe Bezeichnung, wurden aber unterschiedlichen sekundärmetallurgischen Behandlungen unterzogen. Ein Vergleichen ist daher nur bedingt möglich.

Die Vorgaben zur Versuchsdurchführung sind für die drei Stähle unterschiedlich. So werden an der Charge 488472 Umlaufbiegewechsel-Prüfungen (UBW) und bei den anderen vier Chargen Zug/Druck-Wechselversuche (ZDW) durchgeführt. Es ist daher bei fast allen Versuchen notwendig, die Ergebnisse den unterschiedlichen Chargennummern zuzuordnen. Alle Versuche werden bei Raumtemperatur durchgeführt. Großer Wert wird auch auf die Reproduzierbarkeit aller Versuche gelegt. Von allen verwendeten Chargen wurden chemische Analysen, Zugversuche, Härteprüfungen und metallographische Untersuchungen durchgeführt, um Verwechslungen von Ausgangsmaterialien absolut auszuschließen. Gelagert werden die geprüften Proben ausschließlich in Exikatoren, damit die sensiblen Bruchflächen bis zur Untersuchung am REM nicht verschmutzen oder korrodieren und somit wertlos würden.

### 3.3. Chemische Analyse

Die Chemische Analyse erfolgt durch die Funkenspektroskopie.

#### 3.3.1. Chargennummer 488472; 54SiCr6

Tabelle 12 Zeigt eine typische Analyse des Federstahls 54SiCr6 (Auszug). Alle Angaben in Prozent:

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Sn
0,595	1,391	0,589	0,009	0,0082	0,642	0,022	0,0019

**Tabelle 12: Chemische Zusammensetzung Chargennummer 488472**

Minimal- und Maximalwerte der chemischen Analyse in Tabelle 13. Alle Angaben in Prozent:

Elemente	C	Si	Mn	P	S	Cr
min	0,51	1,20	0,50	max	max	0,50
max	0,59	1,60	0,80	0,025	0,025	0,80
andere	Cu + 10 Sn max 0,60					

**Tabelle 13: Grenzwerte 54SiCr6 [37]**

### 3.3.2. Chargennummern 481999 bis 482001; 37CrS4

Die folgende Tabelle 14 zeigt einen Auszug der chemischen Analyse aller drei verwendeten Chargen. Dabei stehen die Chargen in der Reihenfolge ihrer Prüfung (482000, 481999 und 482001, Grenzwerte in Tabelle 15).

Chargennummer	C	Si	Mn	P	S	Cr
482000	0,365	0,233	0,744	0,010	0,021	1,052
481999	0,372	0,228	0,748	0,012	0,028	1,044
482001	0,363	0,232	0,759	0,010	0,035	1,050

**Tabelle 14: Chemische Zusammensetzung Chargennummern 481999 bis 482001**

Elemente	C	Si	Mn	P	S	Cr
min	0,34	max	0,60	max	0,020	0,90
max	0,41	0,40	0,90	0,025	0,040	1,20

**Tabelle 15: Grenzwerte 37CrS4 [37]**

### 3.3.3. Chargennummer 488730; Cf53

Der Auszug der chemischen Zusammensetzung in Tabelle 16 zeigt eine typische Analyse der Stahlmarke Cf53, die innerhalb der Toleranzen liegt (siehe Tabelle 17).

C	Si	Mn	P	S
0,512	0,191	0,636	0,010	0,010

**Tabelle 16: Chemische Zusammensetzung Chargennummer 488730 (Auszug)**

Elemente	C	Si	Mn	P	S
min	0,50	0,15	0,40	Max.	Max.
max	0,57	0,35	0,70	0,025	0,035

**Tabelle 17: Grenzwerte Cf53 [37]**

### 3.4. Anlieferungszustand des Probenmaterials

Die Anlieferung erfolgt, wie für Draht üblich, in Coils oder in Form von Stangen (siehe Abb. 3.2). Da die Coils gebogen sind müssen diese Stahlsorten vor der Probenfertigung begradigt werden.



A) Drahtcoils



B) Stangenmaterial

Abb. 3.2: Anlieferungszustand des Probenmaterials

### 3.5. Wärmebehandlung

Die notwendigen Öfen und das Ölbad für den gesamten Vergütungsvorgang sind in Abb. 3.3 bis Abb. 3.5 dargestellt.



A) Ofen mit vorgedrehten Proben

Abb. 3.3: Wärmebehandlungsöfen



B) Ofensteuerung



A) Härten im Ölbad



B) Gehärtete Proben in Probenhalterung

Abb. 3.4: Härten



Abb. 3.5: Anlassofen

Die Temperaturmessung in den beiden Öfen erfolgt über verschiedene Thermoelemente, die sich im oberen Drittel befinden (siehe Tabelle 18).

Ofen	Typ	Element	T-Bereich	Genauigkeit	Auflösung
Wbh	R	Pt Rh-Pt 13%	0 - 1760°C	≤ 2K	0,2K
Anlass	J	Fe-Cu Ni	-100 - 1200°C	≤ 2K	0,1K

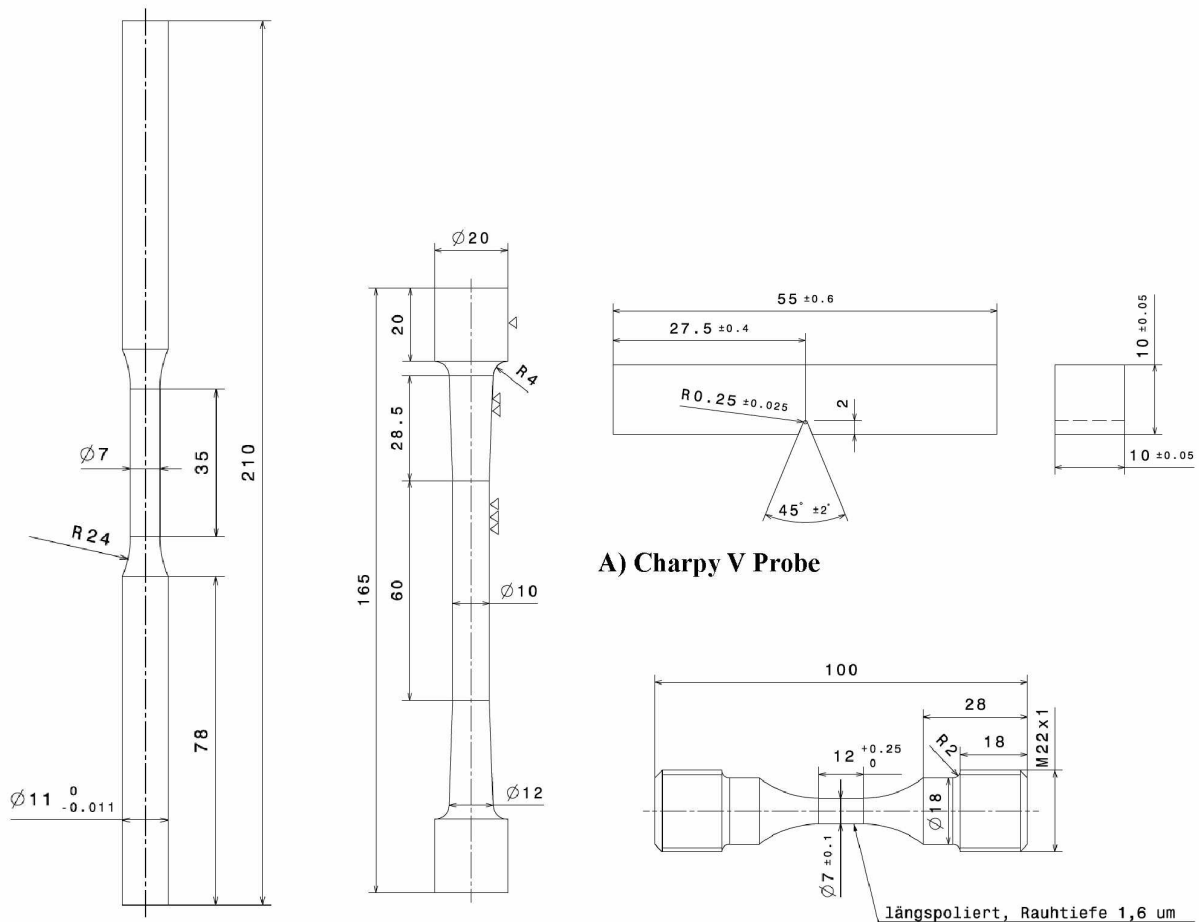
Tabelle 18: Thermoelemente

### 3.6. Ermittlung der mechanische Eigenschaften

Die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften ist notwendig, um Startwerte für die weiteren Prüfungen zu erhalten.

#### 3.6.1. Probengeometrie

Die Probengeometrie aller verwendeten Proben ist in Abb. 3.6 ersichtlich; alle Angaben in Millimeter.



B) UBW Probe

C) Rundzugprobe

D) Schwingprobe

Abb. 3.6: Probengeometrie



### 3.6.2. Oberflächenverfestigung durch Kugelstrahlen

Um die Randeinflüsse abzuschwächen, werden einige Proben bei einer externen Firma kugelgestrahlt. Aus den Strahlparametern von Tabelle 19 ergibt sich eine Almenintensität von 22,8 mm gemessen auf einem A Plättchen. Da eine Nachbearbeitung kugelgestrahlter Proben nicht möglich ist, muss das Gewinde wie in Abb. 3.7 durch ein Klebeband geschützt sein. Die Probe muss normal zur Bodenplatte der Strahlmaschine fixiert sein, da ansonsten eine korrekte Messung der Almenintensität nicht möglich ist.

Strahlenparameter	
Düsendurchmesser:	10 mm
Druck:	2,5 bar
Durchsatz:	4 kg/min
Strahlmittel:	StD-G3, arrondiertes Drahtkorn mit $\varnothing$ 0,35 mm

Tabelle 19: Strahlenparameter



Abb. 3.7: Probenhalterung beim Kugelstrahlen

### 3.6.3. Zugversuch

Die Zugversuche werden nach Norm DIN EN 10002-1 [38] auf der kalibrierten Prüfmaschine (Kalibrierschein Nr. T08-0503/5) BETA 600-2, Fabrikations-Nr. 159, der Firma Meßphysik durchgeführt. Der Dehnungsaufnehmer vom Fabrikat  $\mu$ -Strain der Firma SANDNER MINI MFA entspricht nach dem Kalibrierschein Nr. T06-0763/1/1 der Klasse I nach EN ISO 9513. In Tabelle 20 sind die Ergebnisse des Zugversuchs aufgelistet.

Abkürzung	Bedeutung
$R_{p0,2}$ [MPa]	Dehngrenze
$R_m$ [MPa]	Zugfestigkeit
$A_{50mm}$ [%]	Bruchdehnung
Z [%]	Brucheinschnürung

**Tabelle 20: Ergebnisse des Zugversuchs**

### 3.6.4. Härteprüfung

An den zuvor eingebetteten und polierten Probenabschnitten wird die Vickershärte HV10 nach DIN EN ISO 6507-2 [39] ermittelt. Die Prüfmaschine 3202, Fabrikations-Nr. 60690, der Firma Zwick & Co KG, die in Abb. 3.8 dargestellt ist, ist laut dem Kalibrierschein Nr. T08-0503/8 voll funktionsfähig. Wert 1 bis 3 bei der Härteprüfung haben immer folgende Bedeutung:

- Wert 1 immer in Randnähe (Randabstand immer laut Norm DIN EN ISO 6507-2)
- Wert 2 immer bei der Hälfte des Probenradius
- Wert 3 immer bei 90 % des Radius (nahe der Probenmitte)



Abb. 3.8: Vickers Härteprüfer

### 3.6.5. Kerbschlagbiegeversuch

Das Pendelschlagwerk (siehe Abb. 3.9) PS 30 Fabrikation Nr. 423/30 (Geräte Nr.: PH 3030) der Firma VEB Werkstoffprüfmaschinen ist mit dem Kalibrierschein Nr. T08-0503/6 für die Durchführung der Kerbschlagbiegeversuche kalibriert. Die Versuche unterliegen der DIN 50 115 [40]. Dieser Versuch liefert zwei Ergebnisse, die verbrauchte Schlagarbeit in Joule  $A_v$  und die Arbeit bezogen auf eine Fläche  $A_k$ .

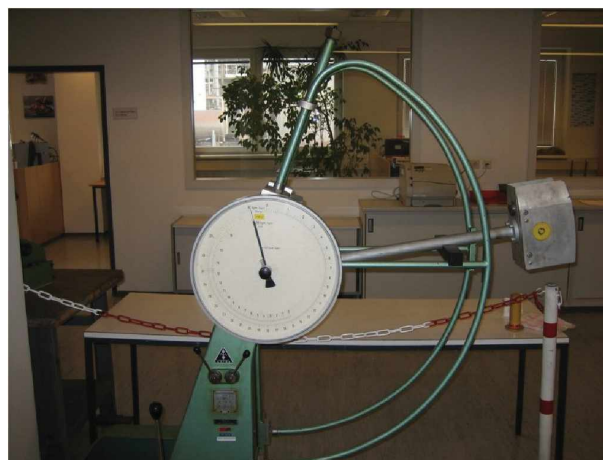


Abb. 3.9: Pendelschlagwerk

### 3.7. Zug/Druck und Zug/Schwell-Versuche

Der Pulsator Testronik 7001 (Kalibrierungs-Nr. T08-0503/3) der Firma Rumul (siehe Abb. 3.10) ist für Versuche mit unterschiedlichen R-Werten geeignet. Die Prüffrequenz liegt bei 115 Hertz.



Abb. 3.10: Hochfrequenz Pulsator

### 3.8. Umlaufbiegewechsel-Versuche

Für die Vier-Punkt-Biegewechsel-Versuche steht die Maschine H8 Nr. 2012 der Firma Meßphysik zur Verfügung (siehe Abb. 3.11). Die Prüffrequenz liegt bei 40 Hertz

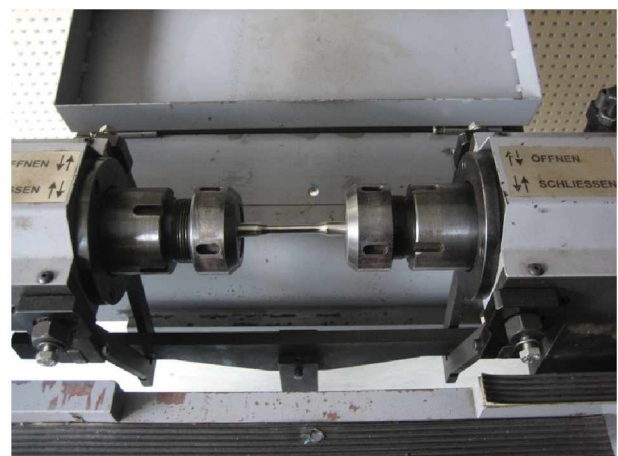


Abb. 3.11: UBW Maschine

### 3.9. Mikroskopie

Für effizientes und zielorientiertes mikroskopieren sind Grundlagen über Beleuchtungstechniken, Ätzung und Kontrastverfahren bei der Mikroskopie von großer Bedeutung.

#### 3.9.1. Lichtmikroskopie

Bei jeder metallurgischen Untersuchung ist der Gebrauch eines Lichtmikroskops unumgänglich (zum Beispiel für Gefügeaufnahmen). Zur Untersuchung der Proben wurde das Mikroskop ZEISS Observer.ZM1 mit einer bis zu 1000-fachen Vergrößerung. (siehe Abb. 3.12) verwendet.

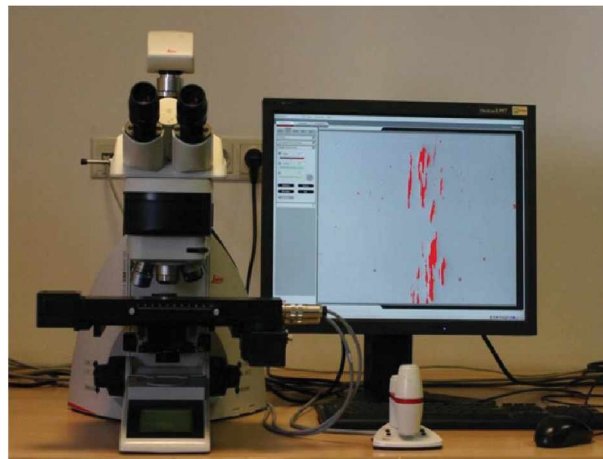


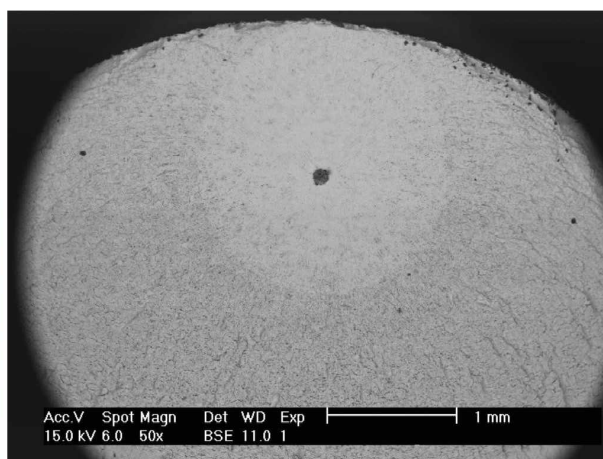
Abb. 3.12: Lichtmikroskop

#### 3.9.2. Rasterelektronenmikroskop (REM)

Das Serviceprotokoll bestätigt, dass das Mikroskop XL40 TMP D762 (siehe Abb. 3.13) eingesetzt werden darf. In Abb. 3.13 B) ist eine REM Aufnahme, mit den notwendigen Parametern, die in Tabelle 21 erklärt werden, dargestellt.



A) Bedienungseinheit mit Mikroskop



B) Beispielaufnahme eines NME

Abb. 3.13: REM

Abkürzung	Erklärung
Acc.V	Beschleunigungsspannung in [kV]
Spot	8 Spots stehen zur Verfügung, wobei 1 der kleinste und 8 der größte Spot ist
Magn	Vergrößerung
Det	Detektor, entweder BSE „Back Scatter Electron“ oder SE „Scondary Electron“. Bei BSE wird über die Helligkeit und bei SE über den Kontrast der Oberflächentopographie auf die Dichte der Elemente geschlossen
WD	Arbeitsabstand Elektrode Probe, meist 11 mm

Tabelle 21: Parameter eines Rasterbildes

### 3.9.3. Reinheitsgraduntersuchungen

Zur Reinheitsgradbestimmung nach DIN 50602 [41] können die geprüften Kerbschlagproben verwendet werden, da diese, wie es die Norm verlangt, ebenso exakt parallel zur Verformungsrichtung entnommen werden. Die Proben werden nicht zu lange poliert, um ein Ausbrechen der Einschlüsse zu vermeiden. Ansonsten könnte es zu Fehlbeurteilungen kommen. Die Ermittlung des Reinheitsgrades erfolgt durch ein automatisiertes Partikelanalyseverfahren mittels REM.

## 4. Resultate

Die Resultate werden den einzelnen Chargen zugeordnet.

### 4.1. Chargennummer 488472 – 54SiCr6

Bei dieser Legierung handelt es sich um einen siliziumlegierten Federstahl, der insbesondere zur Herstellung von hochbeanspruchten Fahrzeugtrag-, Kupplungs- und Ventildfedern dient. Ziel dieser Untersuchung ist es, bruchauslösende NME zu detektieren und nachfolgend zu identifizieren. In weiterer Folge werden die Proben und Ergebnisse mit der dazugehörigen Chargennummer gekennzeichnet.

#### 4.1.1. Wärmebehandlung

Die vorliegende Legierung steht als Drahtcoil zur Verfügung. Laut Kundenspezifikation beträgt die Zugfestigkeit im vergüteten Zustand 1850 bis 1950 MPa. Da keine Parameter für eine Wärmebehandlung vorliegen, muss ein Vergütungsschaubild zur Hilfe genommen werden. Für die geforderte Zugfestigkeit liegt die Anlasstemperatur zwischen 340 und 400°C, weshalb je ein Probestab bei 340, 370 und 400°C angelassen wird. Das Vergütungsschaubild in Abb. 4.1 für eine Anlasszeit von 120 Minuten zeigt, durch die rote vertikale Linie gekennzeichnet, die theoretische notwendige Anlasstemperatur von 400°C, um die geforderte Zugfestigkeit zu erreichen.

Vergütungsschaubild

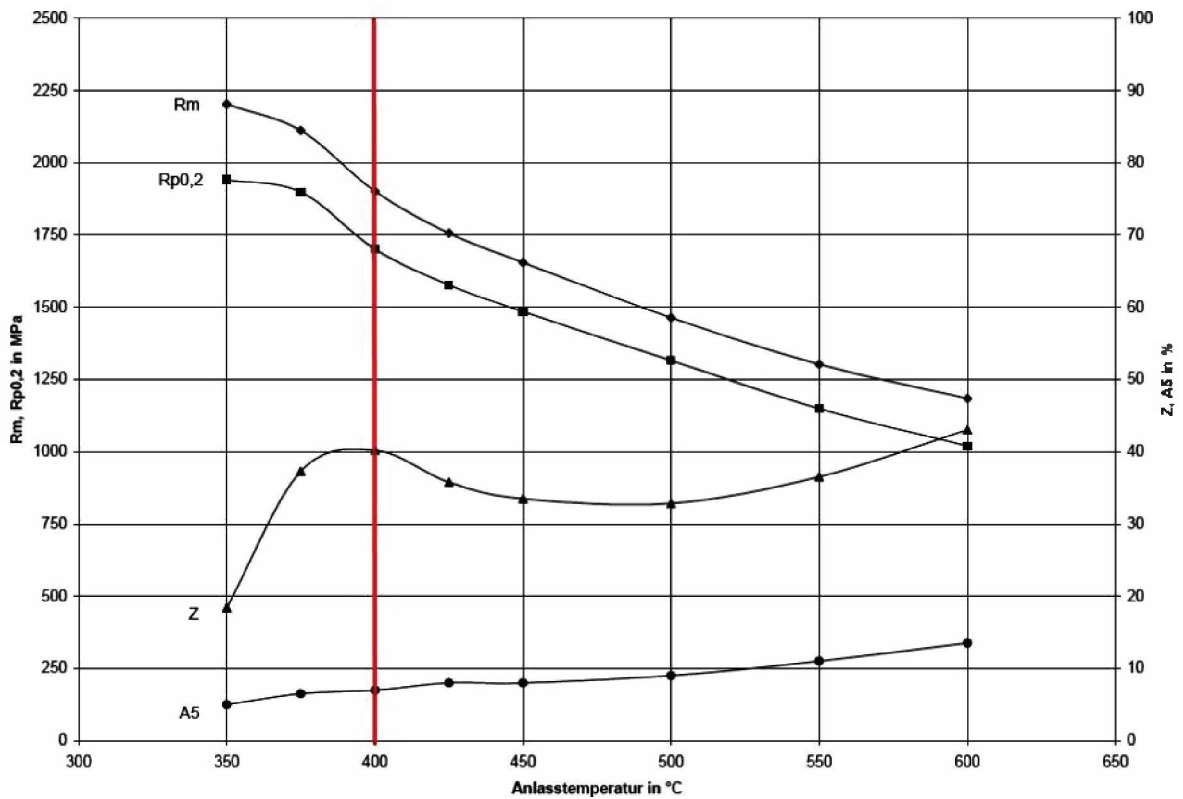


Abb. 4.1: Vergütungsschaubild 54SiCr6 [42]

Die notwendigen Haltezeiten und Temperaturen sind in Tabelle 22 zusammengefasst:

	Temperatur [°C]	Zeit [min]
Härten	850	13 Minuten aufheizen, 10 Minuten Haltezeit, abschrecken in Öl
Anlassen	Je eine Probe bei 340, 370 und 400	120

Tabelle 22: Vergütungsparameter 54SiCr6

Die Ergebnisse der mechanischen Eigenschaften der drei unterschiedlich vergüteten Proben befinden sich in Abschnitt 4.1.2.



#### 4.1.2. Mechanische Eigenschaften

Wie in Tabelle 23 ersichtlich, führen die beiden Anlasstemperaturen 340 und 370°C nicht zur geforderten Zugfestigkeit. Bei 400°C stellt sich hingegen eine Zugfestigkeit innerhalb der festgelegten Grenzen ein, weshalb zu Kontrollzwecken eine zweite Zugprobe bei einer Anlasstemperatur von 400°C hergestellt wird. Die Ergebnisse der begleitenden Härteprüfung HV10 an den drei Zugproben inklusive der Härte vor dem Anlassen sind in Tabelle 24 dargestellt.

Probe	Anlasstemp. [°C]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>50mm</sub> [%]	Z [%]
1	340	2062	2213	2,80	6,61
2	370	1864	2077	7,00	32,44
<b>3</b>	<b>400</b>	<b>1696</b>	<b>1870</b>	<b>9,00</b>	<b>37,78</b>
<b>4</b>	<b>400</b>	<b>1716</b>	<b>1904</b>	<b>8,30</b>	<b>36,13</b>

**Tabelle 23: Ergebnisse der Zugversuche bei unterschiedlichen Anlasstemperaturen**

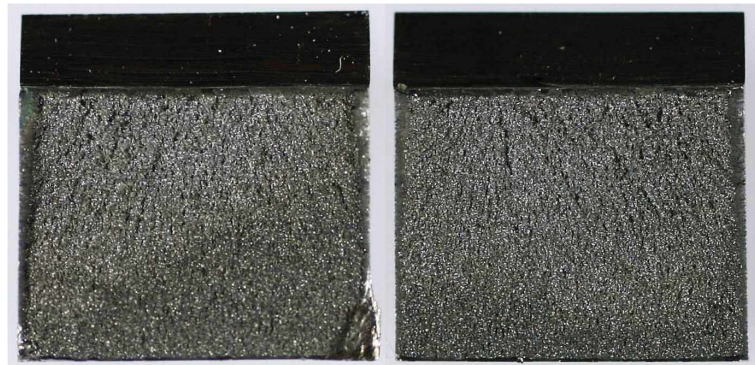
Probe	Härteprüfung HV10			
	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Mittelwert
vor Anlassen	734	724	724	<b>727</b>
340°C	592	599	566	<b>586</b>
370°C	642	642	620	<b>635</b>
400°C	548	536	554	<b>546</b>

**Tabelle 24: Ergebnisse der Härteprüfung HV10**

Der Kerbschlagbiegeversuch wird nur noch an den Proben mit der Anlasstemperatur von 400°C durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Prüfung sind in Tabelle 25, sowie Aufnahmen der Bruchflächen in Abb. 4.2 dargestellt. Achtung! Die Bezeichnung 1-3 bedeutet hier nicht mehr, wie bei den Zugversuchen unterschiedliche Anlasstemperaturen, sondern lediglich die Werte unterschiedlicher, mit den gleichen Parametern vergüteter Proben! Der beabsichtigte Vergleich Kerbschlagarbeit mit dem Reinheitsgrad der Stähle [43] wurde aufgrund der dafür notwendigen, hohen Probenanzahl (Streuung) nicht weiter verfolgt.

	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Mittelwert
$A_v$ [J]	13,0	14,0	14,8	<b>13,9</b>
$A_k$ [J/cm <sup>2</sup> ]	16,3	17,5	18,5	<b>17,4</b>

**Tabelle 25: Ergebnisse des Kerbschlagversuchs bei Raumtemperatur**



**Abb. 4.2: Bruchfläche der Kerbschlagprobe**

#### 4.1.3. Auswertung der Umlaufbiegewechsel-Versuche

Die Ergebnisse der UBW Versuche befinden sich in Tabelle 26. Dabei ist zu beachten, dass alle Proben, die eine Lastwechselzahl von 2000000, jener Wert ab dem die Probe als dauerhaft angenommen wird, erreichen als Durchläufer zählen (diese Proben sind nicht gebrochen). Für die Berechnung der Wöhlerlinie müssen die Schwingversuche aufgeteilt werden. Jene Lasthorizonte, bei denen mindestens einmal das Ereignis Durchläufer eingetreten ist, dienen zur Berechnung der Dauerfestigkeit. Die restlichen Horizonte, mindestens aber drei, wie in diesem Fall, werden der Zeitfestigkeit zugeschrieben. Mit Hilfe des Arcsin  $\sqrt{P}$ -Verfahren (siehe Abb. 4.3) wird die Dauerfestigkeit ermittelt. Der Zeitfestigkeitsbereich kann nicht gänzlich rechnerisch ermittelt werden, weshalb dieser Bereich graphisch dargestellt wird (die notwendigen Parameter, um die Wöhlerkurve zu zeichnen siehe Tabelle 27). Dabei steht  $k$  für die Steigung und  $T_N$  für die Streuspanne im Zeitfestigkeitsbereich. Die Dauerfestigkeit beruht auf der Gleichung:

$$\text{Dauerfestigkeit: } \sigma_D = a + b * z \quad (16)$$

Wie in der Literatur bereits angeführt, erfolgt die Darstellung der UBW Versuche in einem doppellogarithmischen Wöhlerdiagramm (Abb. 4.4). Die Überlebenswahrscheinlichkeit  $P_{\bar{U}}$  mit dem entsprechenden Indices 10, 50 und 90 Prozent sind Kennwerte der Dauerfestigkeit. Alle

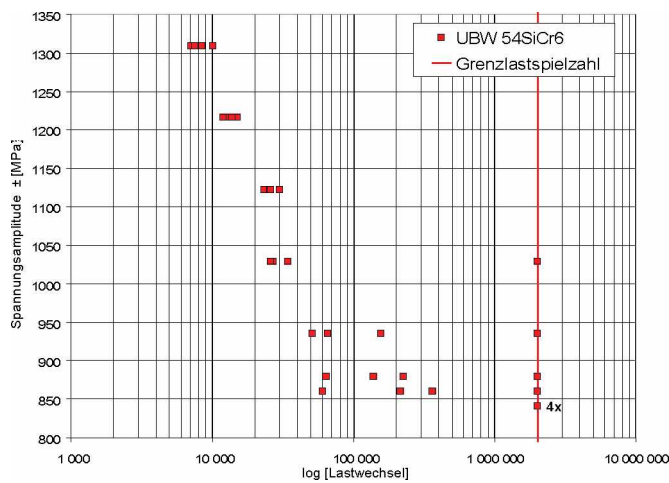
Bruchflächen werden mittels REM auf NME untersucht, jedoch ohne NME zu detektieren, weshalb dieser Unterpunkt entfällt.

UBW 54SiCr6								
Probe Nr.	MPa	Lastwechsel	Probe Nr.	MPa	Lastwechsel	Probe Nr.	MPa	Lastwechsel
UBW 3	1309	7100	UBW 13	1029	27000	UBW 19	860	60400
UBW 4		10200	UBW 15		2000000	UBW 23		365000
UBW 5		8500	UBW 24		26100	UBW 25		2000000
UBW 29		7500	UBW 31		347000	UBW 34		215000
UBW 6	1216	12500	UBW 12	935	2000000	UBW 17	842	2000000
UBW 7		12000	UBW 14		156400	UBW 20		2000000
UBW 8		15000	UBW 16		51200	UBW 22		2000000
UBW 30		13800	UBW 32		65700	UBW 27		2000000
UBW 2	1122	30000	UBW 18	879	63900			
UBW 10		23300	UBW 21		226900			
UBW 11		25600	UBW 26		2000000			
UBW 28		26000	UBW 33		139000			

Tabelle 26: Ergebnisse UBW Versuche Charge 488472

Zeitfestigkeitsbereich:		Dauerfestigkeitsbereich:					
K	7,5	a	899 MPa	$z_{10\%}$	1,25	$P_{\bar{U}10\%}$	950 MPa
$T_N$	1:1,34	b	11 MPa	$z_{50\%}$	0,78	$P_{\bar{U}50\%}$	894 MPa
Ecklastspielzahl	115000	z	1	$z_{90\%}$	0,32	$P_{\bar{U}90\%}$	837 MPa

Tabelle 27: Kennwerte der Wöhlerlinie



Stufe	$\sigma$	Brüche r	z	$z^2$	$z^* \sigma$
1	842	0	0,36	0,13	304,27
2	860	3	1,05	1,10	900,59
3	879	3	1,05	1,10	920,49
4	935	3	1,05	1,10	979,13
5	1029	3	1,05	1,10	1077,57
$\Sigma$	4545		4,55	4,52	4182,04

Abb. 4.3: Ergebnisse Arcsin  $\sqrt{P}$ -Verfahren

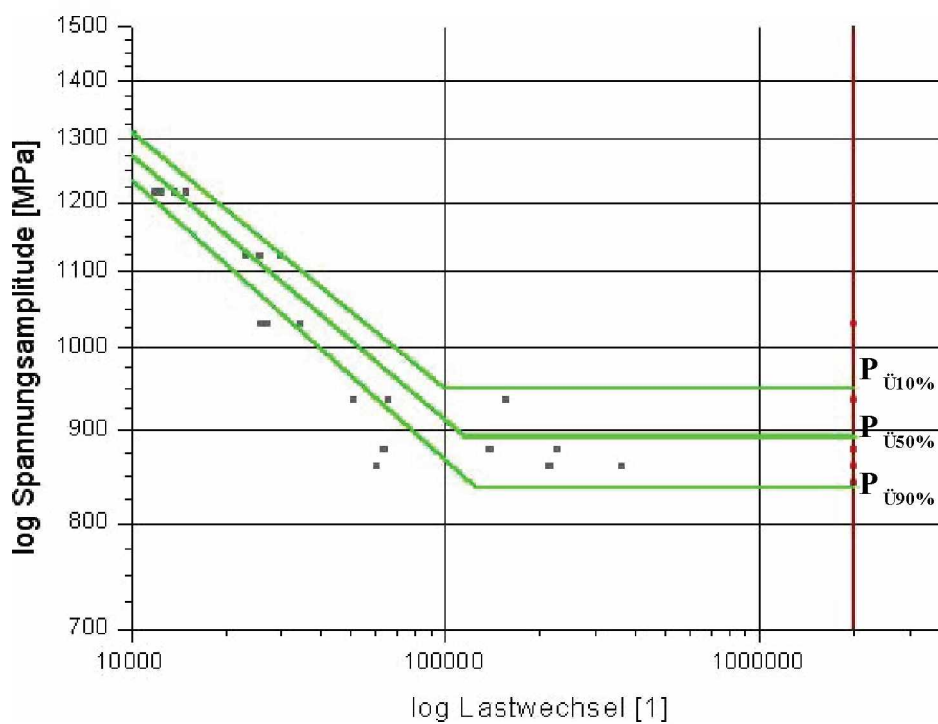


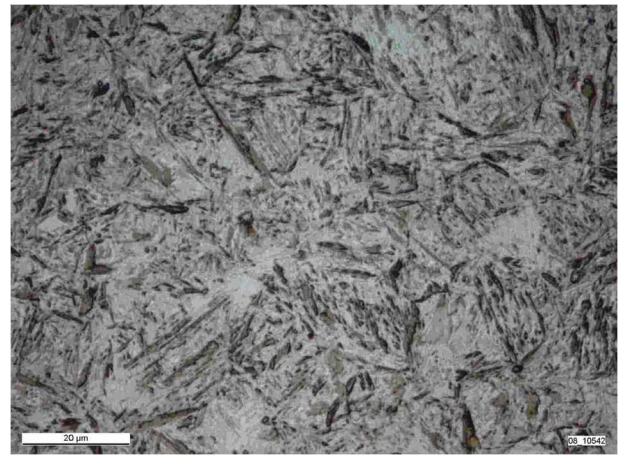
Abb. 4.4: Wöhlerkurve

#### 4.1.4. Gefügebilder

In Abb. 4.5 und Abb. 4.6 befinden sich die Gefügaufnahmen im gehärtetem und vergütetem Zustand.

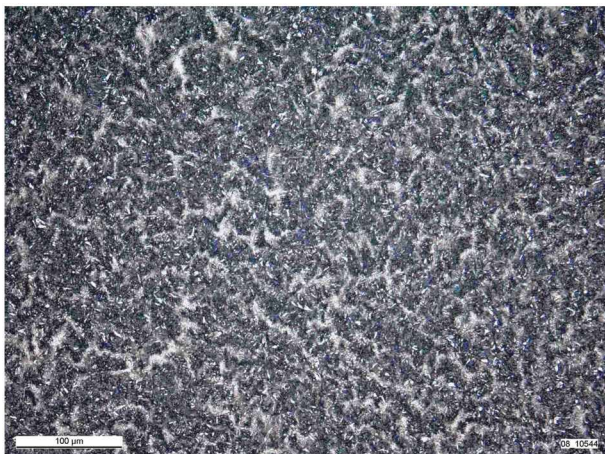


**A) Gehärtet 200-fache Vergrößerung**

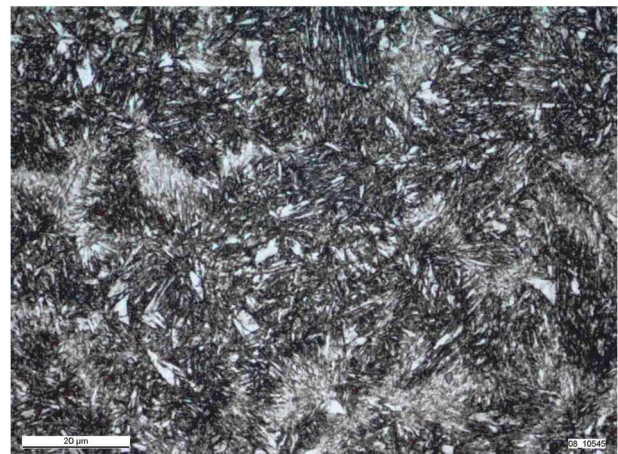


**B) Gehärtet 1000-fache Vergrößerung**

**Abb. 4.5: Gefügebilder**



**C) Angelassen bei 400°C 200-fache Vergrößerung**



**D) Angelassen bei 400°C 1000-fache Vergrößerung**

**Abb. 4.6: Gefügebilder**

#### **4.1.5. Reinheitsgraduntersuchungen**

In Tabelle 28 ist eine Übersicht über die detektierten Einschlüsse gegeben. In Tabelle 29 sind die größten sulfidischen und oxidischen Einschlüsse zusammengefasst. Die Ergebnisse dieser Untersuchung liegen innerhalb des Toleranzbereichs.

Charge: 488472		Anzahl der Einschlüsse nach Größenkennziffer										1. Zwischen- summe	
Probe Nr.	Schliff- fläche	Typ Faktor	0 0,05	1 0,10	2 0,20	3 0,5	4 1	5 2	6 5	7 10	8 20	Sulfid	Oxid
1	260	SS	18	9	2							2,2	
		OA											0
		OS	1										0,05
		OG	2										0,1
2	260	SS	19	11	3							2,65	
		OA	1										0,05
		OS											0
		OG	3										0,15
3	260	SS	20	7	1							1,9	
		OA	1		1								0,25
		OS											0
		OG	1										0,05
Σ	780	2. Zwischensumme										6,75	0,65
Bezogen auf 1000 mm <sup>2</sup>							Summenkennwert K0					9	0,8
							Gesamtsummenkennwert K0					10	

**Tabelle 28: Reinheitsgradbestimmung nach DIN 50602**

Standard DIN 50602			
Charge	Marke	Wert	Max. EG
488472	54SiCr6	K0: 0,8	OA 2
		K0: 9	SS 2

**Tabelle 29: Größte Einschlüsse oxidisch und sulfidisch**

## 4.2. Chargennummern 481999 bis 482001 – 37CrS4

Dieser Vergütungsstahl findet seine Anwendung für Antriebsteile wie zum Beispiel Kurbelwellen, Vorderachsen oder Achsschenkel.

### 4.2.1. Wärmebehandlung

Diese Legierung steht in Drahtcoils, die sich im Auslieferungszustand befinden und als Stangenmaterial, bereits vergütet, zur Verfügung. Da in diesem Fall die Vergütungsparameter des Kunden bekannt sind und ausreichend Rohmaterial vorhanden ist, kann man diesen Stahl ohne großen Aufwand vergüten. Die Zugfestigkeit des Endmaterials muss einen Wert zwischen 780 und 930 MPa erreichen. Das Vergütungsschaubild für zwei Stunden bei 600°C in Abb. 4.7 bestätigt die Ergebnisse der Zugversuche.

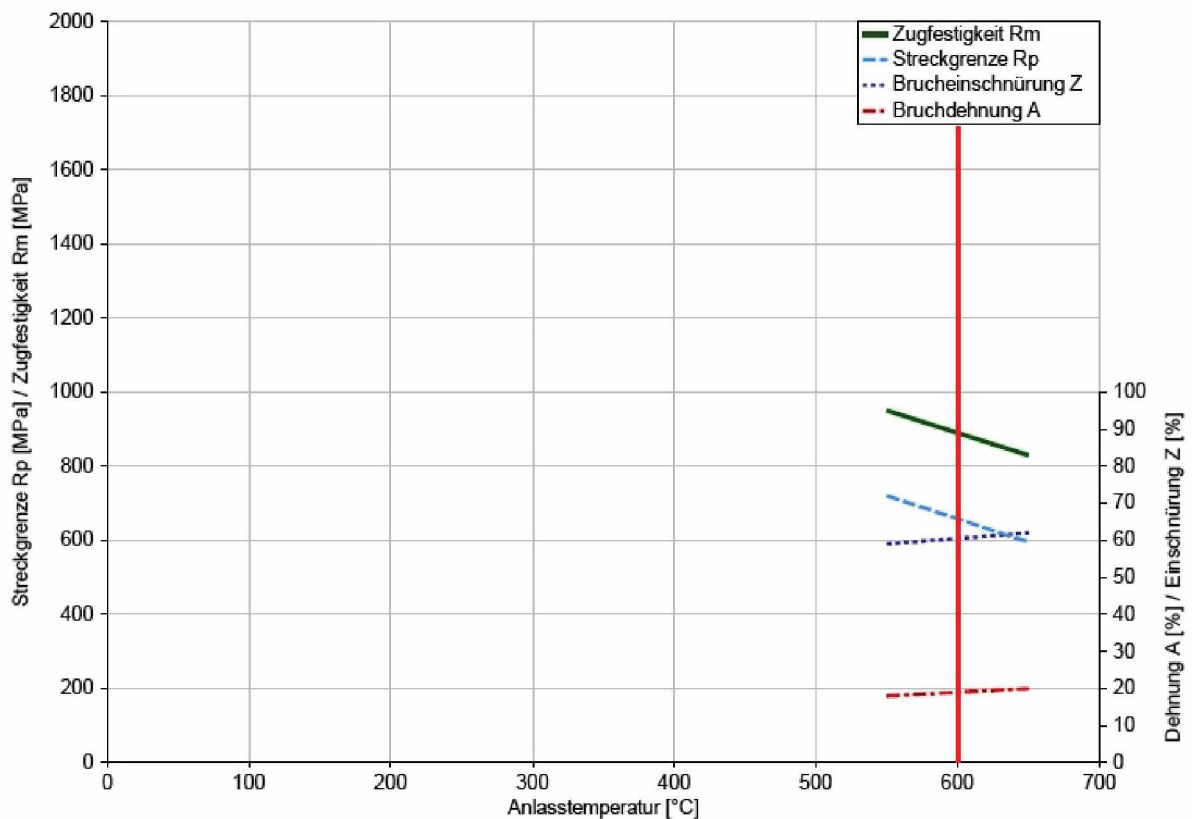


Abb. 4.7: Vergütungsschaubild 37CrS4 [37]

Die notwendigen Vergütungsparameter sind in Tabelle 30 zusammengefasst:

	Temperatur [°C]	Zeit [min]
Normalisieren	880	23 Minuten aufheizen, 10 Minuten Haltezeit
Härten	860	23 Minuten aufheizen, 10 Minuten Haltezeit, abschrecken in Öl
Anlassen	600	120

**Tabelle 30: Vergütungsparameter 37CrS4**

#### 4.2.2. Mechanische Eigenschaften

Die chemische Zusammensetzung aller drei Chargen befindet sich innerhalb der Toleranzen für den Stahl 37CrS4, weshalb es nicht notwendig ist an jeder der drei Chargen alle mechanischen Eigenschaften zu ermitteln. In Tabelle 31 sind die Ergebnisse der Zugversuche inklusive der Mittelwerte der vorvergüteten Stangen und der selbstvergüteten Coilabschnitte dargestellt. Auch wenn bei beiden Vergütungen die gleichen Parameter zur Anwendung kamen, ergeben sich doch leichte Unterschiede. Die begleitenden Härteprüfungen werden an allen drei Chargen durchgeführt (siehe Tabelle 32).

Charge	Probenmaterial	R <sub>p0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>50mm</sub>	Z
		[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
482000	Stange vorvergütet	778	873	17,78	63,96
	von	769	866	19,96	66,07
	Kunde	767	867	17,84	65,05
	Mittelwert	<b>771</b>	<b>869</b>	<b>18,53</b>	<b>65,05</b>
482000	Coilabschnitte	732	859	19,02	64,19
	vergütet im Betrieb	711	845	18,66	64,34
		725	853	18,80	64,84
	Mittelwert	<b>723</b>	<b>852</b>	<b>18,83</b>	<b>64,46</b>

**Tabelle 31: Ergebnisse des Zugversuchs bei Raumtemperatur**



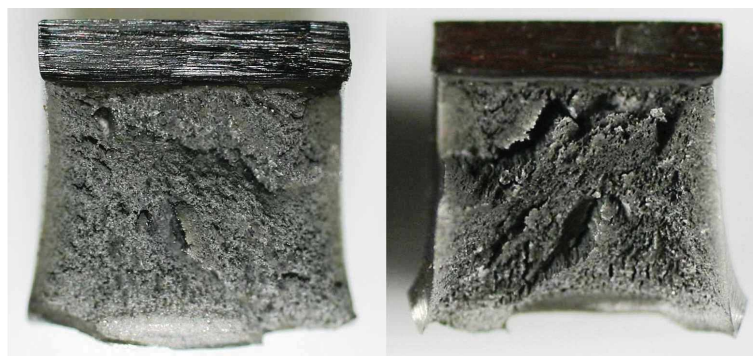
Charge	Probe	Härteprüfung HV10			
		Wert 1	Wert 2	Wert 3	Mittelwert
482000	Vorvergütet	268	270	270	<b>269</b>
	Vergütet	228	228	210	<b>222</b>
481999	Ausgangszustand	218	218	212	<b>216</b>
	Normalisiert	219	206	206	<b>210</b>
	Gehärtet	525	473	397	<b>465</b>
	Gehärtet und angelassen	243	245	247	<b>245</b>
482001	Ausgangszustand	198	201	219	<b>206</b>
	Normalisiert	205	209	196	<b>203</b>
	Gehärtet	357	357	390	<b>368</b>
	Gehärtet und angelassen	247	243	247	<b>246</b>

**Tabelle 32: Ergebnisse der Härteprüfung HV10**

Die Ergebnisse des Kerbschlagbiegeversuchs  $A_v$  und  $A_k$ , laut Tabelle 33 ergeben ebenfalls leichte Unterschiede. Anhand der Ausbildung der Bruchfläche in Abb. 4.8 erkennt man deutlich den Unterschied zwischen einem Vergütungs- und Federstahl (siehe Abb. 4.2).

	Chargen- nummer	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Mittelwert
		$A_v$ [J]	34,6	36,8	35,2	
$A_k$ [J/cm <sup>2</sup> ]	482000	43,3	46,0	44,0	43,4	<b>44,2</b>
$A_v$ [J]	481999	37,3	38,0	36,9	37,2	<b>37,4</b>
$A_k$ [J/cm <sup>2</sup> ]		46,6	47,5	46,1	46,5	<b>46,7</b>

**Tabelle 33: Ergebnisse des Kerbschlagversuchs bei Raumtemperatur**



**Abb. 4.8: Bruchfläche der Kerbschlagprobe**

### 4.2.3. Auswertung der Zug/Druck-Wechsel Versuche

An allen drei Chargen der Stahlmarke 37CrS4 werden Schwingversuche mit dem Wert  $R = -1$  durchgeführt. Das bedeutet, dass sich Ober- und Unterspannung jedes Versuchs nur durch das Vorzeichen unterscheiden. Das Auswerteschema verlangt mindestens 15 gültige Versuche, was nicht bei allen Versuchsreihen möglich war. Deshalb erfolgt die Auswertung in diesen Fällen nach dem Arcsin  $\sqrt{P}$ -Verfahren – sofern dies sinnvoll erscheint. Da wie bekannt drei Chargen 37CrS4 geprüft werden und diese auch teilweise kugelgestrahlt sind, erfolgt folgende Nomenklatur, die bei allen drei Chargennummern Gültigkeit besitzt, um Verwechslungen auszuschließen.

Beispiel:

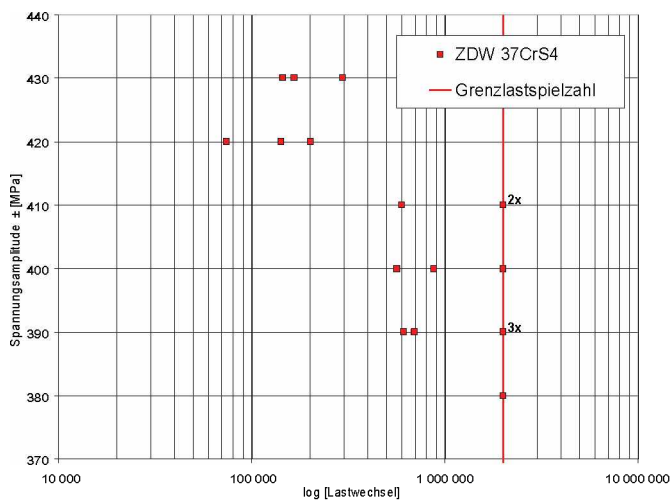
OP13:	0	steht für 482000 (9 für 481999 und 1 für 482001)
	P	steht für poliert (K steht für kugelgestrahlt)
	13	fortlaufende Nummer

#### 4.2.3.1. Chargennummer 482000 – 37CrS4

Diese Charge dient als Vorabschätzung für die anderen beiden Chargen, weshalb nur polierte Proben auf unterschiedlichen Spannungsniveaus geprüft werden. Durch die Ergebnisse der Schwingversuche (siehe Tabelle 34 und Grafik in Abb. 4.9) ist ersichtlich, dass weder das Treppenstufenverfahren, noch die Darstellung einer Wöhlerlinie Sinn macht. Einzig die Ermittlung der Dauerfestigkeit durch das Arcsin  $\sqrt{P}$ -Verfahren (siehe Abb. 4.9 und Tabelle 35) ist möglich. In Abb. 4.10 sind jene Proben, die einen bruchauslösenden NME beinhalten gelb gekennzeichnet.

Chargennummer 482000 – 37CrS4 poliert								
Probe Nr.	MPa	Lastwechsel	Probe Nr.	MPa	Lastwechsel	Probe Nr.	MPa	Lastwechsel
0P13	430	165300	0P02	400	874400	0P03	380	2000000
0P01		294600	0P04		565900	0P05		2000000
0P18		145300	0P06		2000000	0P19		2000000
0P07	420	201800	0P08	390	2000000			
0P09		141200	0P10		693000			
0P20		73900	0P12		2000000			
0P17	410	2000000	0P14		614000			
0P21		2000000	0P16		2000000			
0P11		596200						

Tabelle 34: Ergebnisse Schwingversuch Charge 482000



Stufe	$\sigma$	Brüche r	z	$z^2$	$z^* \sigma$
1	380	0	0,42	0,17	159,80
2	390	2	0,68	0,46	267,04
3	400	2	0,95	0,91	382,12
4	410	1	0,61	0,37	252,34
$\Sigma$	1580		2,67	1,93	1061,31

Abb. 4.9: Ergebnisse Arcsin  $\sqrt{P}$ -Verfahren

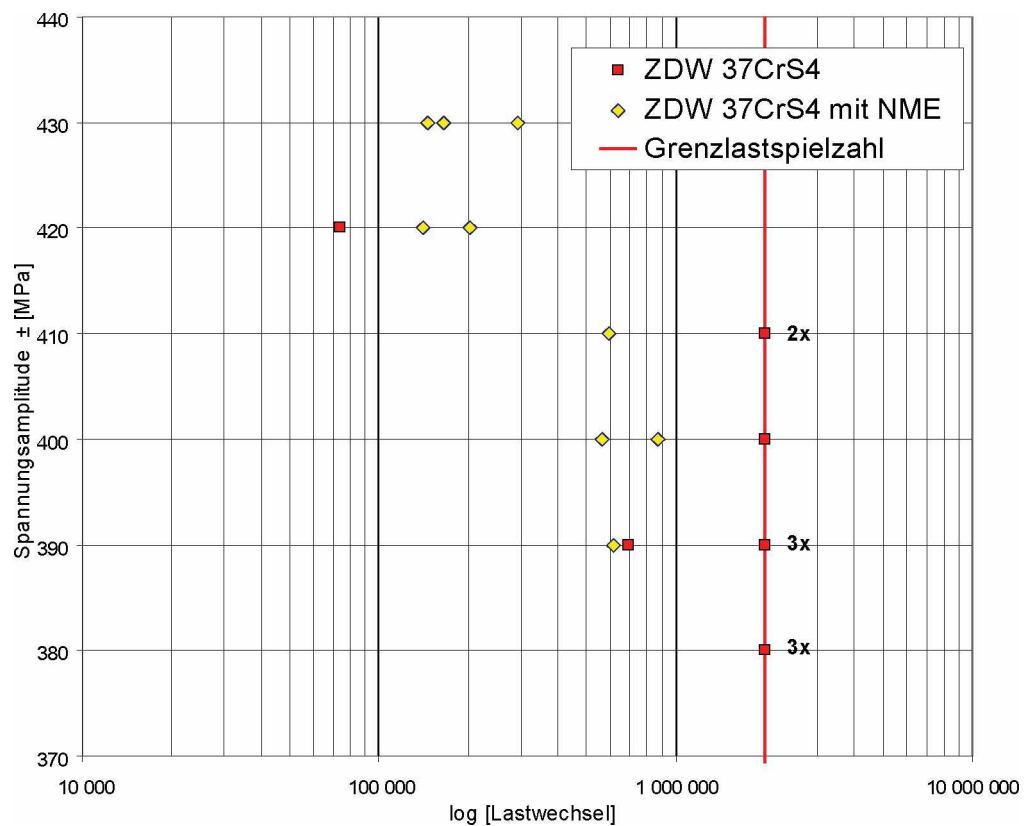


Abb. 4.10: Ergebnisse geordnet nach Spannungsniveaus

Dauerfestigkeitsbereich:					
a	394 MPa	$z_{10\%}$	1,25	$P_{\bar{U}10\%}$	412 MPa
b	1,3 MPa	$z_{50\%}$	0,79	$P_{\bar{U}50\%}$	398 MPa
		$z_{90\%}$	0,32	$P_{\bar{U}90\%}$	385 MPa

Tabelle 35: Kennwerte Arcsin  $\sqrt{P}$ -Verfahren

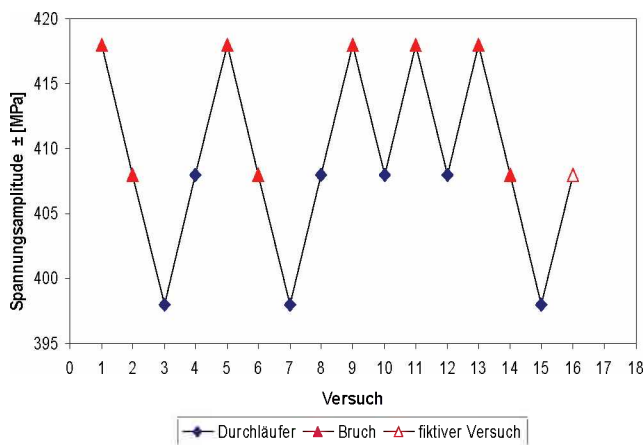
#### 4.2.3.2. Chargennummer 481999 – 37CrS4

Die durchgeführten Schwingversuche an polierten Proben brachten keine auswertbaren Ergebnisse im Bezug auf die Dauerfestigkeit. Die Auswertung der Proben durch das REM ist aber dennoch sinnvoll, da diese Untersuchung Ergebnisse im Bezug auf die Zusammensetzung und Größe von NME bei dieser Stahlsorte liefert. Die Auswertung der kugelgestrahlten Proben durch das Treppenstufenverfahren ist möglich. Charakteristisch für das Treppenstufenverfahren

ist, dass das höchste Spannungsniveau nur Brüche und das Niedrigste nur Durchläufer aufweist (siehe Abb. 4.11 und Tabelle 36). Die notwendigen Parameter des Treppenstufenverfahrens werden zur einen Hälfte rechnerisch und zur anderen durch Diagramme ermittelt.  $C_m$  und  $C_S$  sind beides graphisch ermittelte Werte. Die drei Proben dieser Charge, die durch die Wechselwirkung mit einem NME gebrochen sind, werden in Abb. 4.12 wiederum gelb gekennzeichnet.

Chargennummer 481999 – 37CrS4 kugelgestrahlt								
Probe Nr.	MPa	Lastwechsel	Probe Nr.	MPa	Lastwechsel	Probe Nr.	MPa	Lastwechsel
9K01	418	145300	9K03	408	1161500	9K04	398	2000000
9K07		175500	9K05		2000000	9K09		2000000
9K11		141200	9K08		808700	9K17		2000000
9K13		163600	9K10		2000000			
9K15		409500	9K12		2000000			
					9K14	2000000		
			9K16	475000				

Tabelle 36: Ergebnisse Schwingversuch Charge 481999



i	$f_i$	$i \cdot f_i$	$i^2 \cdot f_i$
2	5	10	20
1	8	8	8
0	3	0	0
$\Sigma$	16	18	28
	F	A	B

Abb. 4.11: Treppenstufenversuch Chargennummer 481999

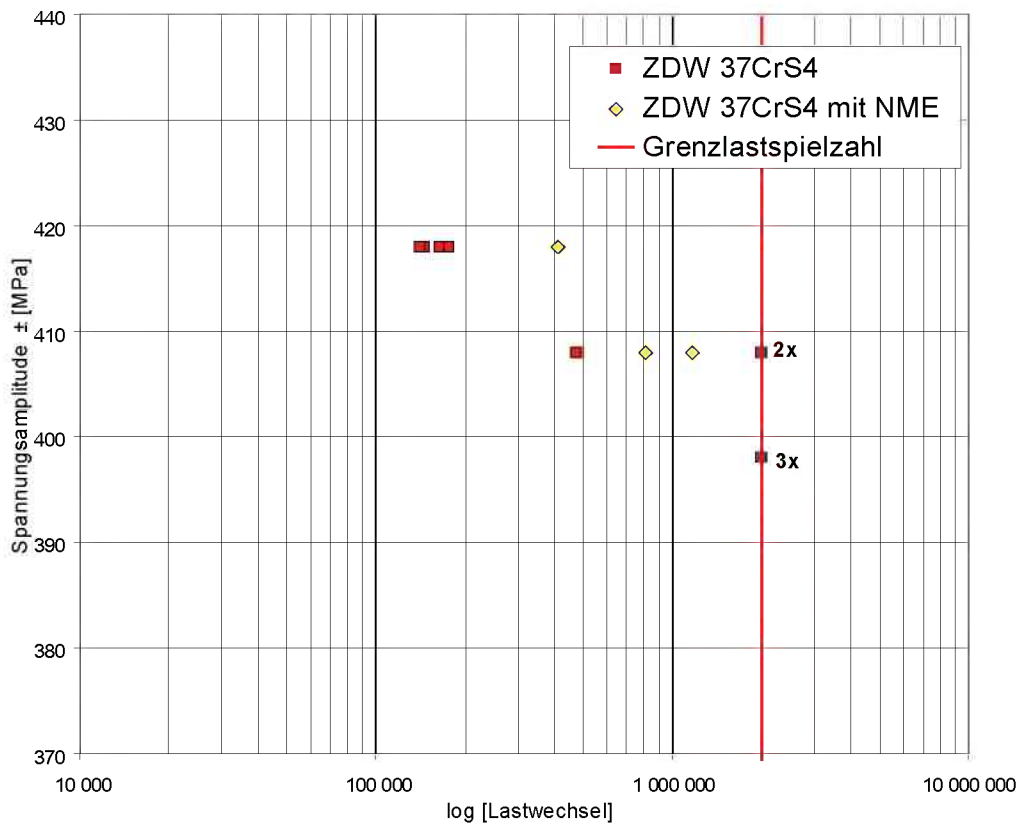


Abb. 4.12: Ergebnisse geordnet nach Spannungsniveaus

Dauerfestigkeitsbereich:			
F	16	s	4,5 MPa
A	18	C <sub>m</sub>	0,39
B	28	C <sub>s</sub>	0,6
k	0,48	P <sub>Ü10%</sub>	423 MPa
S <sub>D0</sub>	398 MPa	P <sub>Ü50%</sub>	406 MPa
d	9 MPa	P <sub>Ü90%</sub>	393 MPa

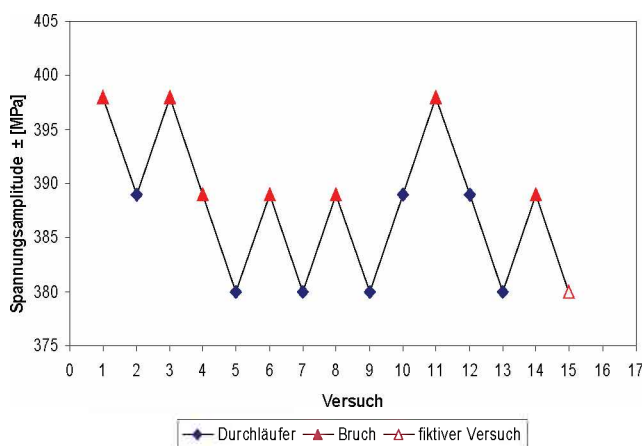
Tabelle 37: Parameter des Treppenstufenversuchs

#### 4.2.4. Chargennummer 482001 – 37CrS4

Auch bei dieser Charge ist die Auswertung der polierten Proben im Bezug auf die Dauerfestigkeit nicht sinnvoll, weshalb sie nicht weiter behandelt wird. Die Ergebnisse der Schwingversuche mit der Auswertung des Treppenstufenversuchs sind in Tabelle 38 und Tabelle 39 sowie in Abb. 4.13 dargestellt. Durch das REM wurden keinerlei NME detektiert, daher sind in Abb. 4.14 alle Proben rot gekennzeichnet.

Chargennummer 482001 – 37CrS4 kugelgestrahlt								
Probe Nr.	MPa	Lastwechsel	Probe Nr.	MPa	Lastwechsel	Probe Nr.	MPa	Lastwechsel
1K03	398	420900	1K04	389	2000000	1K08	380	2000000
1K05		177000	1K07		696700	1K10		2000000
1K14		192500	1K09		727700	1K12		2000000
			1K11		227800			
			1K13		2000000			
			1K15		648200			
		1K17	253300					

Tabelle 38: Ergebnisse Schwingversuch Charge 482001



i	f <sub>i</sub>	i*f <sub>i</sub>	i <sup>2</sup> *f <sub>i</sub>
2	3	6	12
1	7	7	7
0	5	0	0
Σ	15	13	19
	F	A	B

Abb. 4.13: Treppenstufenversuch Chargennummer 482001

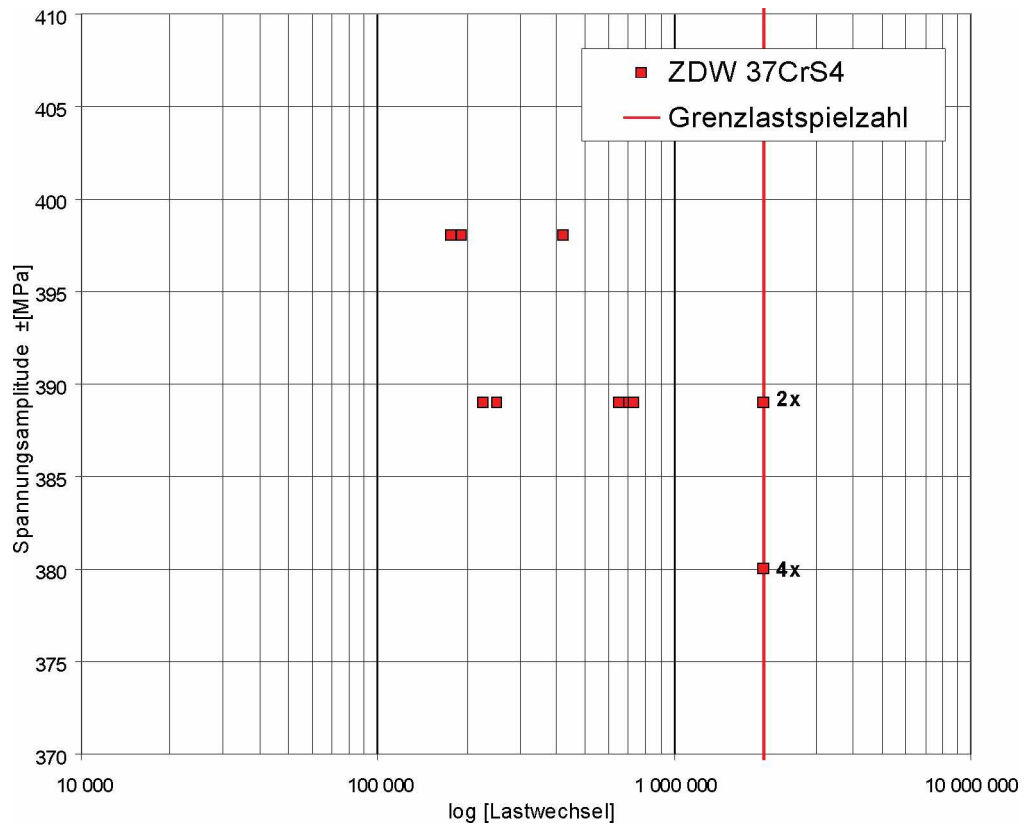


Abb. 4.14: Ergebnisse geordnet nach Spannungsniveaus

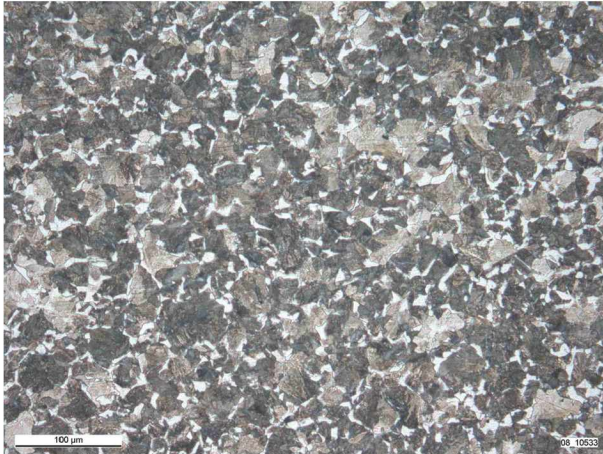
Dauerfestigkeitsbereich:			
F	15	s	4,5 MPa
A	13	$C_m$	0,29
B	19	$C_s$	0,4
k	0,52	$P_{\dot{U}10\%}$	400 MPa
$S_{D0}$	380 MPa	$P_{\dot{U}50\%}$	386 MPa
d	9 MPa	$P_{\dot{U}90\%}$	376 MPa

Tabelle 39: Parameter des Treppenstufenversuchs

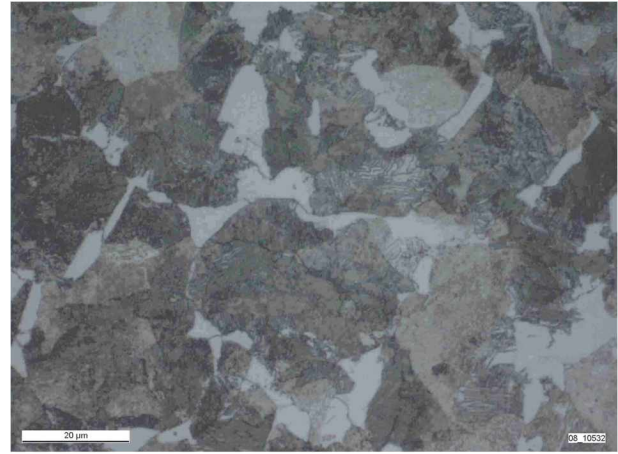


### 4.2.5. Gefügebilder

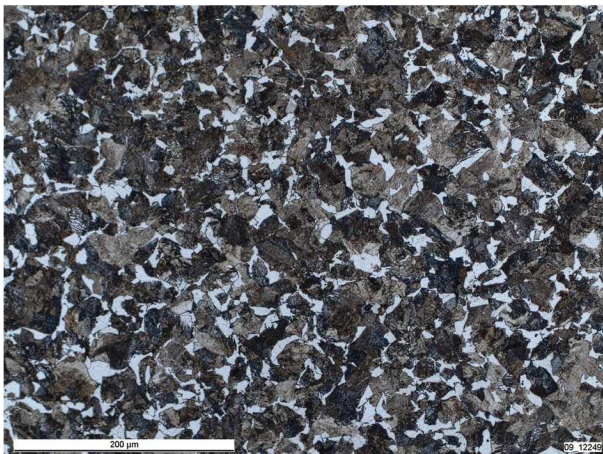
Leichte Gefügeunterschiede lassen sich in den Abb. 4.15 bis Abb. 4.18 erkennen. Um einen Vergleich leichter zu gestalten, sind die Bilder nicht nach Chargen sondern nach Zustand (Ausgangszustand, normalisierter Zustand usw.) geordnet.



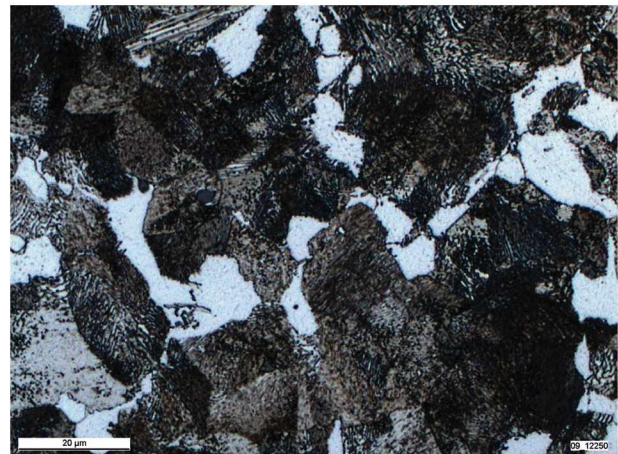
**A) Charge 481999 200-fache Vergrößerung**



**B) Charge 481999 1000-fache Vergrößerung**

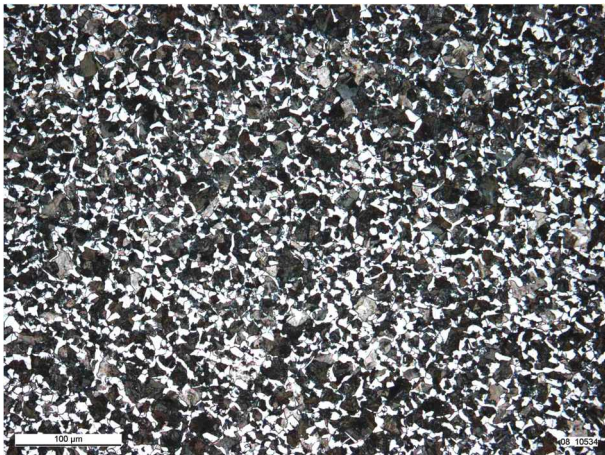


**C) Charge 482001 200-fache Vergrößerung**

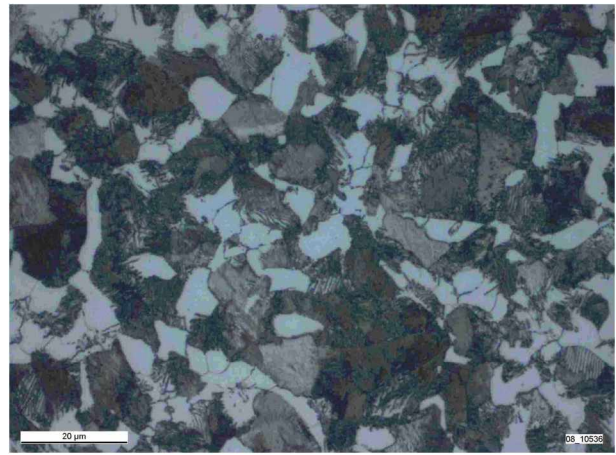


**D) Charge 482001 1000-fache Vergrößerung**

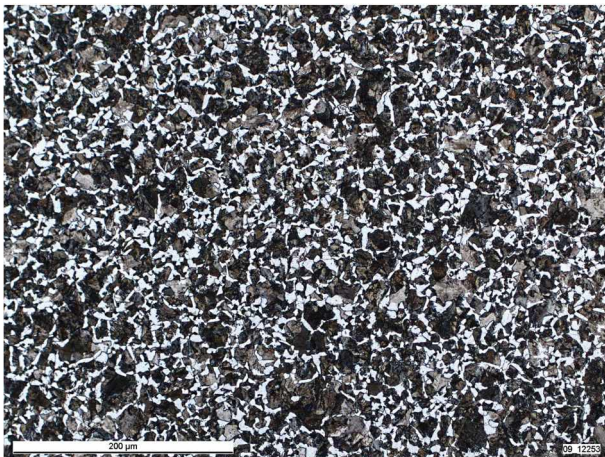
**Abb. 4.15: Gefügebilder Ausgangszustand**



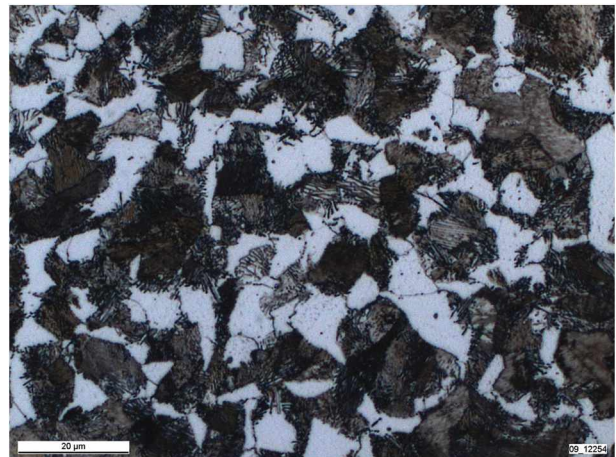
**A) Charge 481999 200-fache Vergrößerung**



**B) Charge 481999 1000-fache Vergrößerung**

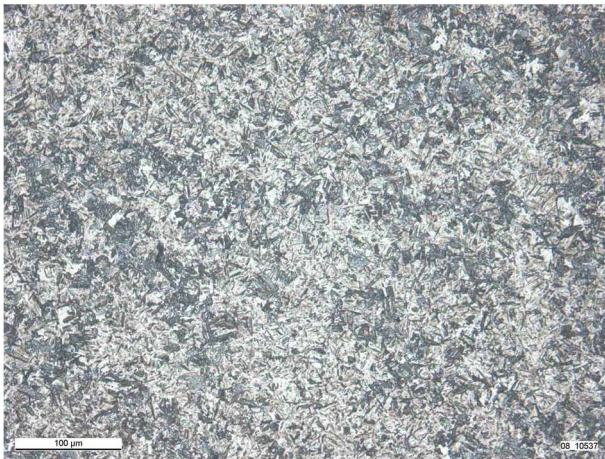


**C) Charge 482001 200-fache Vergrößerung**

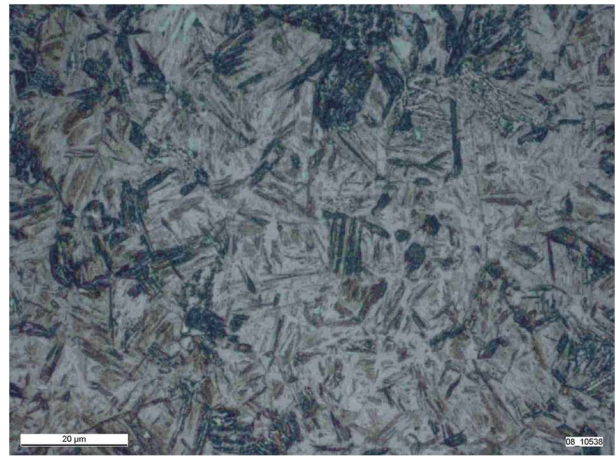


**D) Charge 482001 1000-fache Vergrößerung**

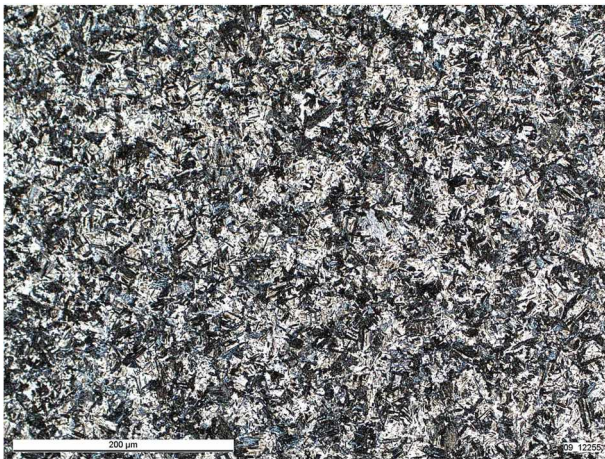
**Abb. 4.16: Gefügebilder nach dem Normalisieren**



**A) Charge 481999 200-fache Vergrößerung**



**B) Charge 48199 1000-fache Vergrößerung**



**C) Charge 482001 200-fache Vergrößerung**

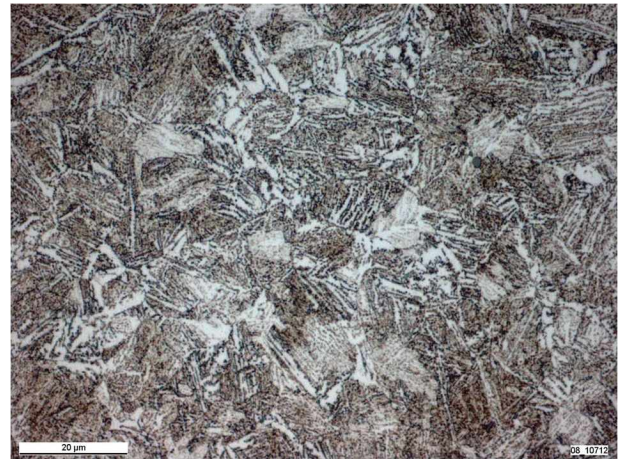


**D) Charge 482001 1000-fache Vergrößerung**

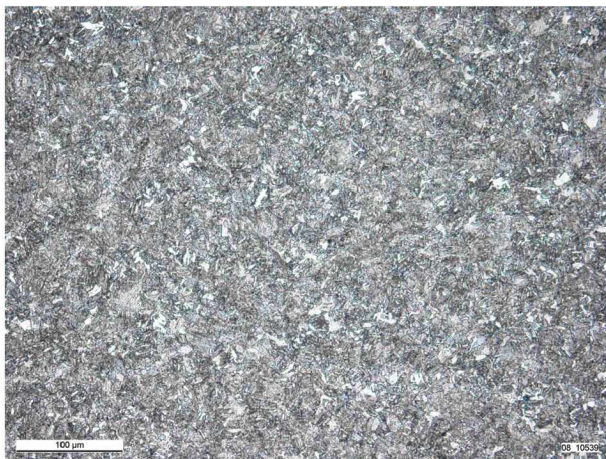
**Abb. 4.17: Gefügebilder nach dem Härten**



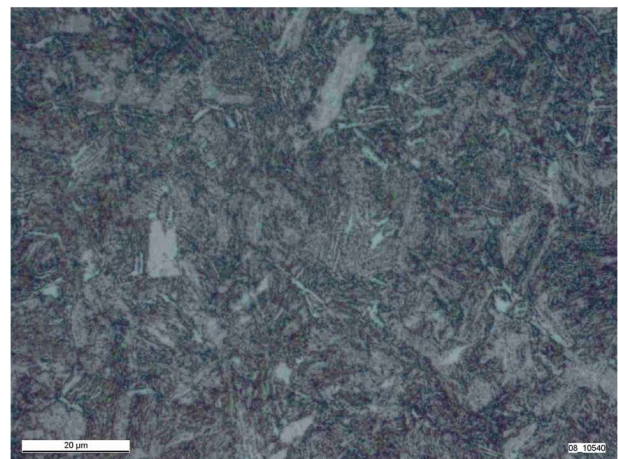
**A) Charge 482000 200-fache Vergrößerung**



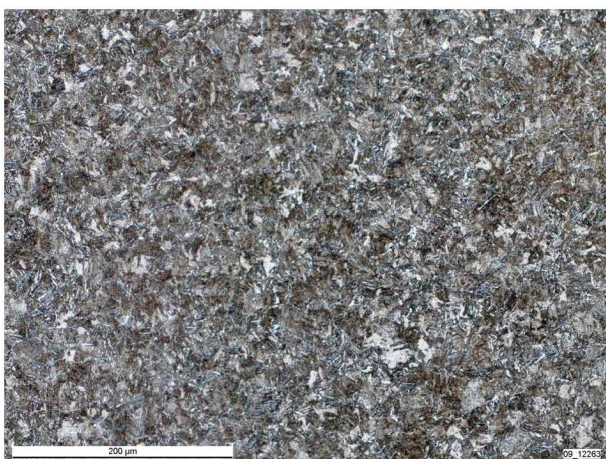
**B) Charge 482000 1000-fache Vergrößerung**



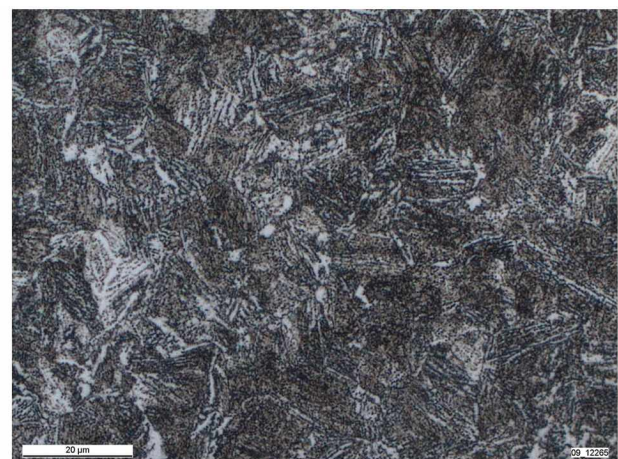
**C) Charge 481999 200-fache Vergrößerung**



**D) Charge 481999 1000-fache Vergrößerung**



**E) Charge 482001 200-fache Vergrößerung**



**F) Charge 482001 1000-fache Vergrößerung**

**Abb. 4.18: Gefügebilder nach dem Vergüten (gehärtet und angelassen)**

### 4.2.6. Reinheitsgraduntersuchungen

An den Chargen 482000 und 481999 wird die Reinheitsgraduntersuchung durchgeführt (siehe Tabelle 40 bis Tabelle 43). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen liegen innerhalb des Toleranzbereichs.

Charge: 482000		Anzahl der Einschlüsse nach Größenkennziffer											1. Zwischen- summe	
Probe Nr.	Schliff- fläche	Typ Faktor	0 0,05	1 0,10	2 0,20	3 0,5	4 1	5 2	6 5	7 10	8 20	Sulfid	Oxid	
1	260	SS		31	14	7						9,4		
		OA												
		OS												
		OG	12	2									0,8	
2	260	SS		29	17	4						8,3		
		OA												
		OS												
		OG	14	3	1								1,2	
3	260	SS	33	15	4							8,3		
		OA												
		OS												
		OG	18	5									1,4	
Σ	780	2. Zwischensumme											26	3,4
Bezogen auf 1000 mm <sup>2</sup>						Summenkennwert K0 oxidisch							4	
						Summenkennwert K1 sulfidisch						33		

**Tabelle 40: Reinheitsgradbestimmung nach DIN 50602 Charge 482000**

Standard DIN 50602			
Charge	Marke	Wert	Max. EG
482000	37CrS4	K0: 4	OG 2
		K1: 33	SS 3

**Tabelle 41: Größte Einschlüsse oxidisch und sulfidisch Charge 482000**

Charge: 481999		Anzahl der Einschlüsse nach Größenkennziffer										1. Zwischen- summe	
Probe Nr.	Schliff- fläche	Typ Faktor	0 0,05	1 0,10	2 0,20	3 0,5	4 1	5 2	6 5	7 10	8 20	Sulfid	Oxid
1	270	SS		90	17	11	2					13,9	
		OA											
		OS											
		OG	25	7	5								2,95
2	270	SS		29	12	3						6,8	
		OA					1						1
		OS											
		OG	21	4	3	1							2,55
3	270	SS		34	9	4						7,2	
		OA						1					2
		OS											
		OG	24	2	1								1,6
4	270	SS		35	15	5						9	
		OA											
		OS											
		OG	18	4									1,3
Σ	1800	2. Zwischensumme										36,9	11,4
Bezogen auf 1000 mm <sup>2</sup>						Summenkennwert K0 oxidisch							<b>11</b>
						Summenkennwert K1 sulfidisch						<b>34</b>	

**Tabelle 42: Reinheitsgradbestimmung nach DIN 50602 Charge 481999**

Standard DIN 50602			
Charge	Marke	Wert	Max. EG
481999	37CrS4	K0: 11	OA 5
		K1: 34	SS 4

**Tabelle 43: Größte Einschlüsse oxidisch und sulfidisch Charge 481999**

### 4.3. REM und EDX Analysen

Auf den nachfolgenden Seiten soll ein Überblick über detektierte NME gegeben werden. Die Auswahl fiel auf jene NME, die in Form, Zusammensetzung, Größe und Lage repräsentativ für die Übrigen sind. In Abb. 4.19 bis Abb. 4.22 sind jeweils eine Übersicht des Bruchausgangs, ein Detailbild des bruchauslösenden NME, die Elementenanalyse mittels EDX Detektor und weitere Details gegeben. Unter Details fallen die chemische Zusammensetzung des Einschlusses, seine Größe, nötigenfalls der Oberflächenabstand, der Spannungshorizont, bei dem geprüft wurde und die erreichten Lastwechsel.

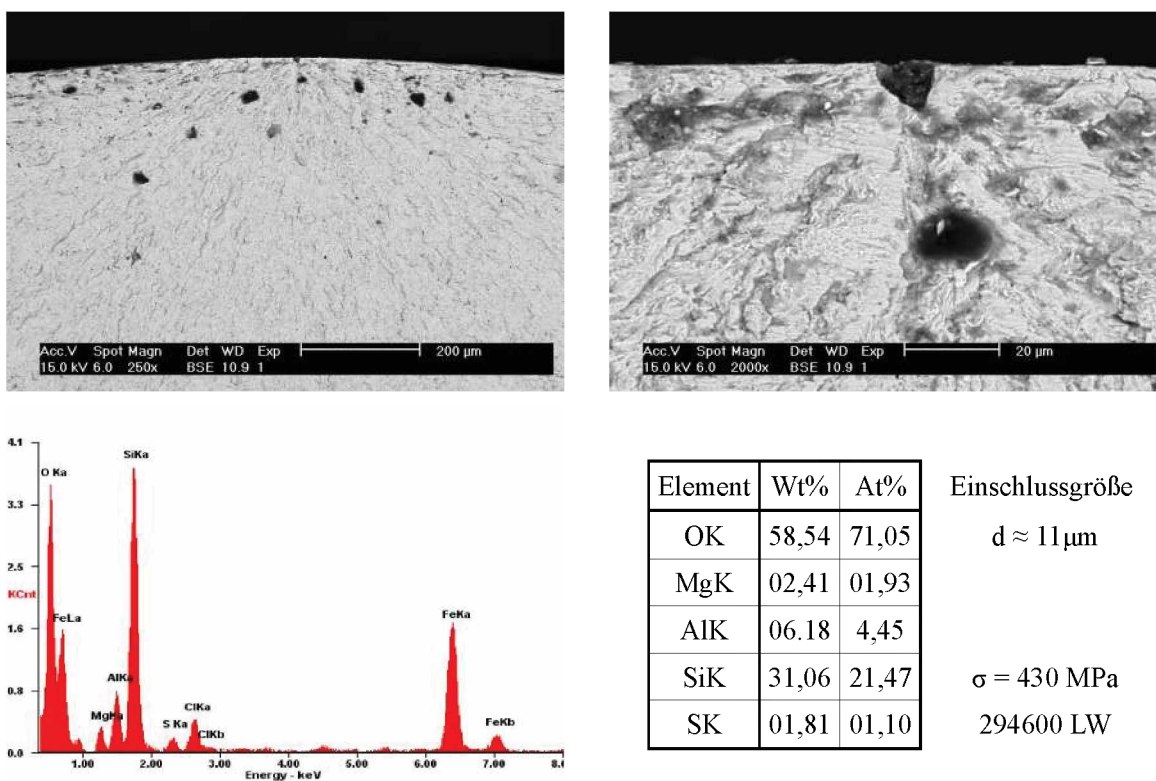


Abb. 4.19: Übersicht- und Detailaufnahme vom Probe 0P01 mit EDX Analyse

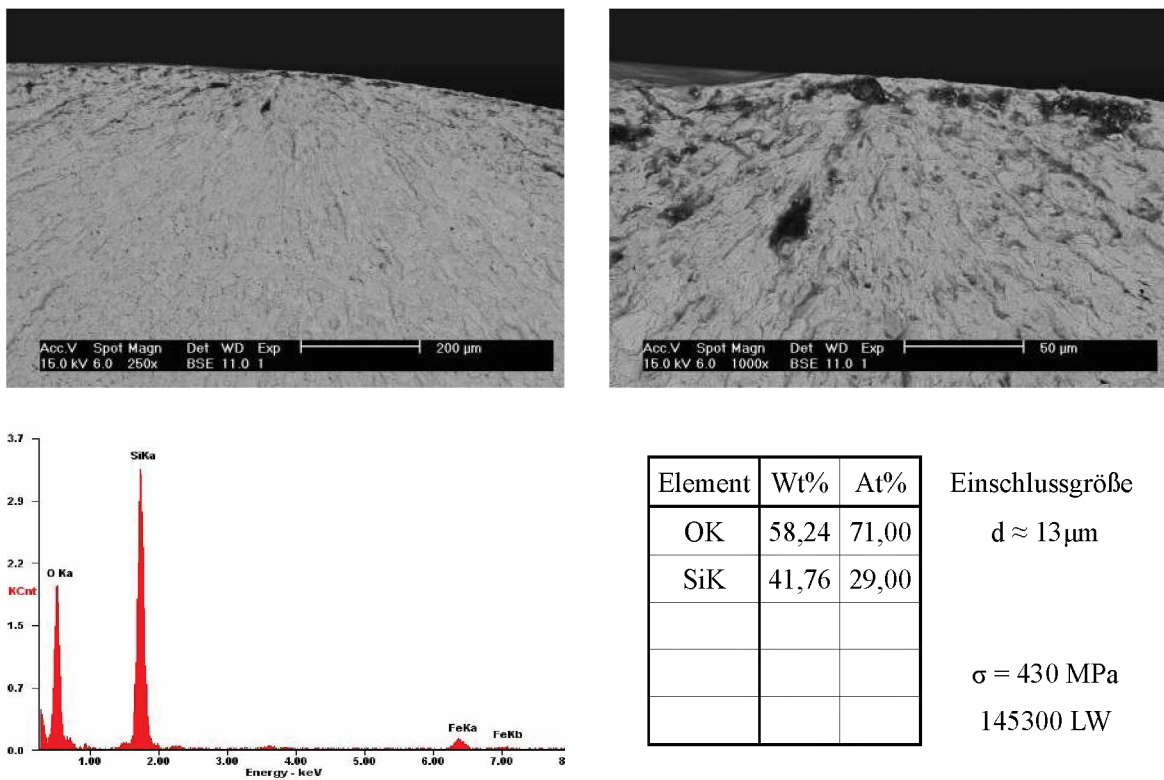


Abb. 4.20: Übersicht- und Detailaufnahme vom 0P18 mit EDX Analyse

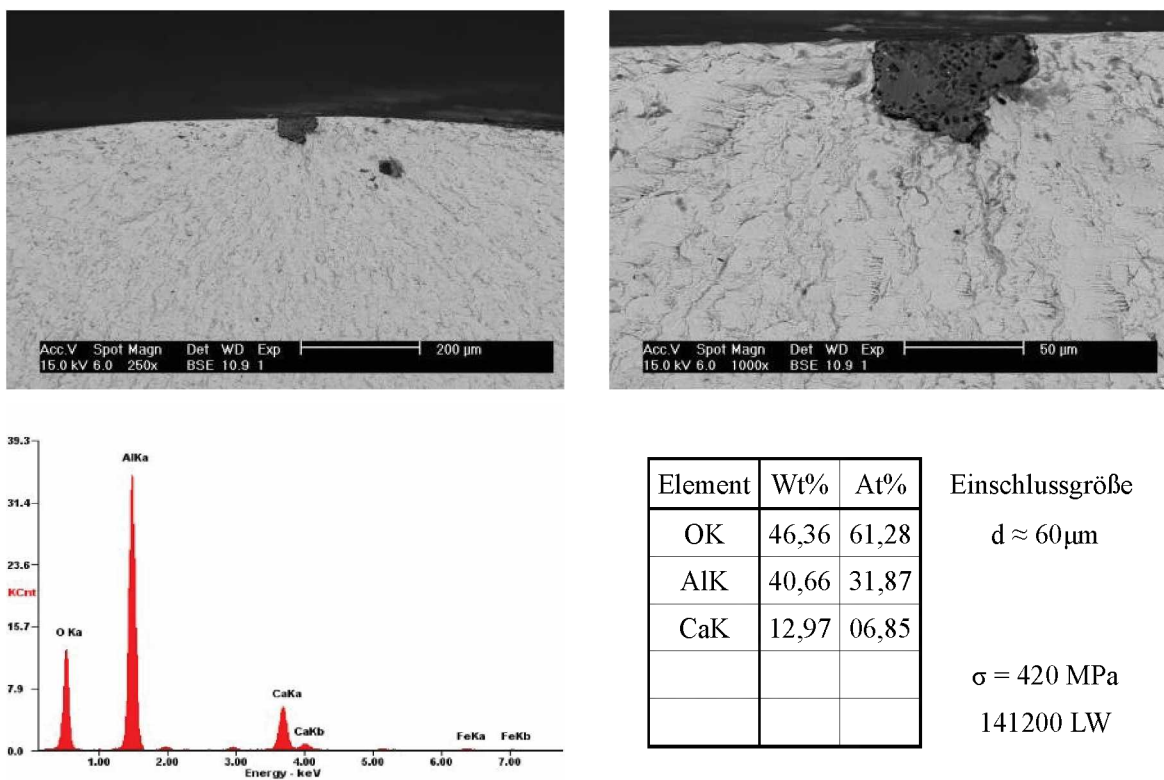


Abb. 4.21: Übersicht- und Detailaufnahme vom 0P09 mit EDX Analyse



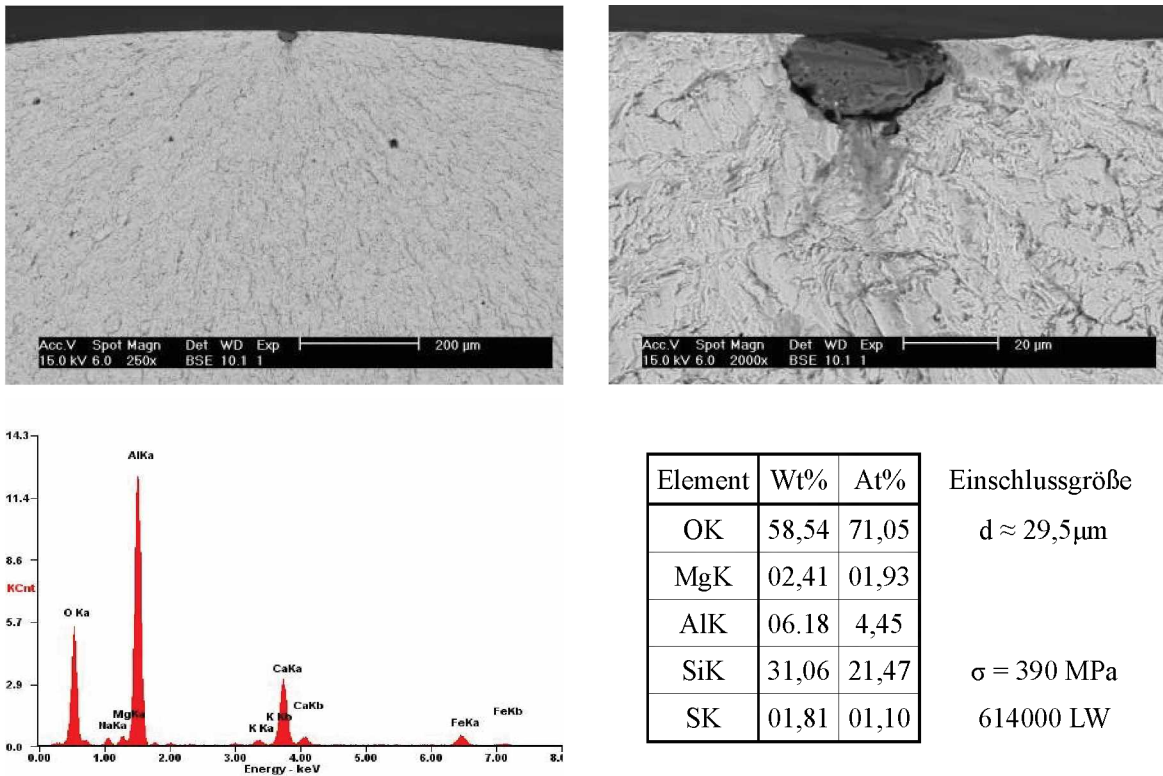
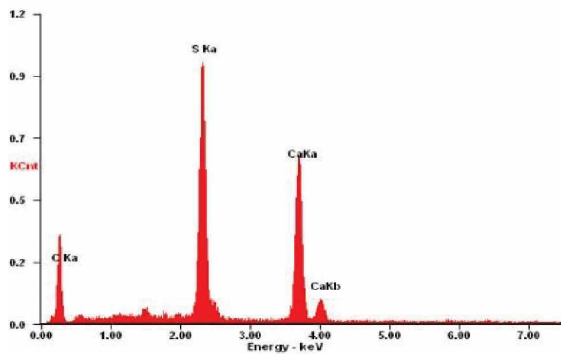
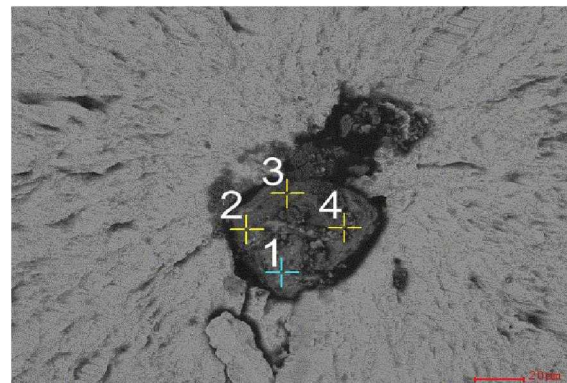
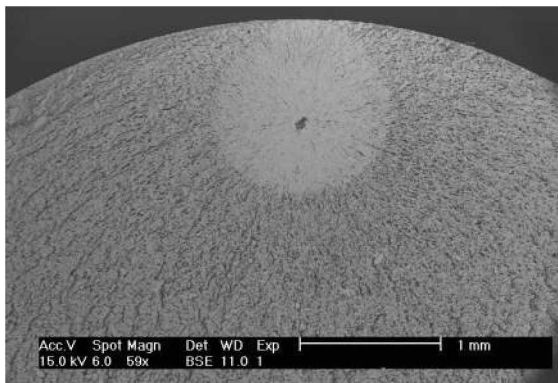


Abb. 4.22: Übersicht- und Detailaufnahme vom 0P14 mit EDX Analyse

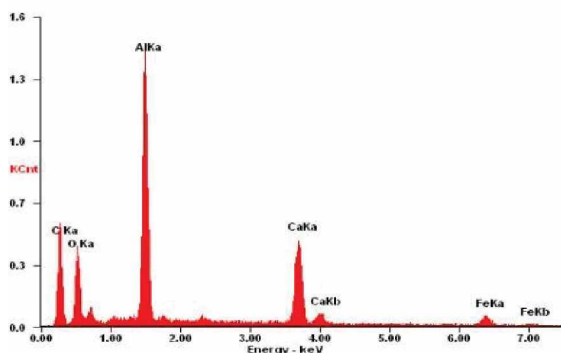
Aufgrund der Größe der NME werden an diesen mehrere Analysen durchgeführt (Abb. 4.23 bis Abb. 4.25). Beim Maps/Line Verfahren können Punkte oder Flächen festgelegt und danach automatisiert angefahren und analysiert werden. Mit Spot und anschließender Nummer sind die dazugehörigen Analysen gemeint. Dargestellt sind nur jene Analysen, die sich voneinander unterscheiden und kaum Matrix (Eisen) enthalten.



Spot 1

Element	Wt%	At%
SK	44,60	50,16
CaK	55,40	49,84

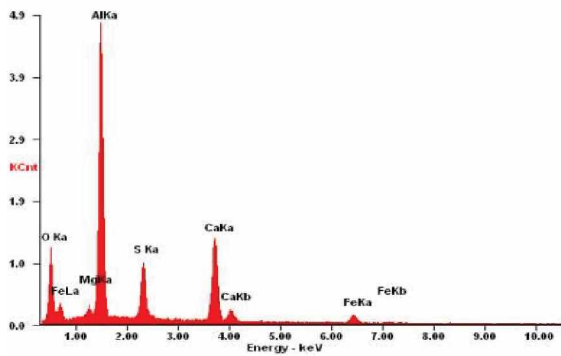
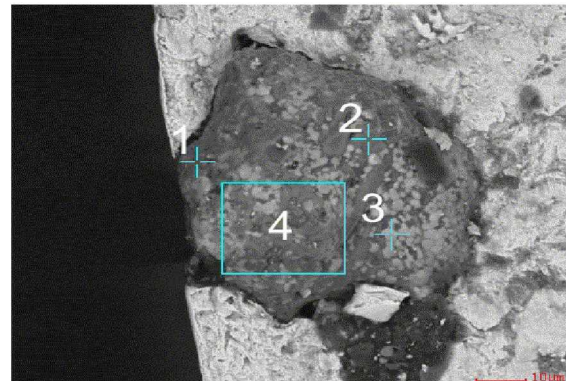
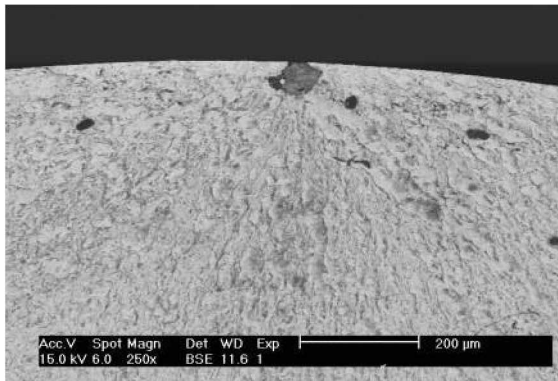
Einschlussgröße  
 $d \approx 94 \mu\text{m}$   
 Randabstand  
 $\approx 860 \mu\text{m}$   
 $\sigma = 468 \text{ MPa}$   
 791600 LW



Spot 2

Element	Wt%	At%
OK	41,86	58,27
AlK	34,91	28,82
SK	23,23	12,91

Abb. 4.23: Übersichts- und Detailaufnahme vom 9P02 mit EDX Analyse



Spot 1

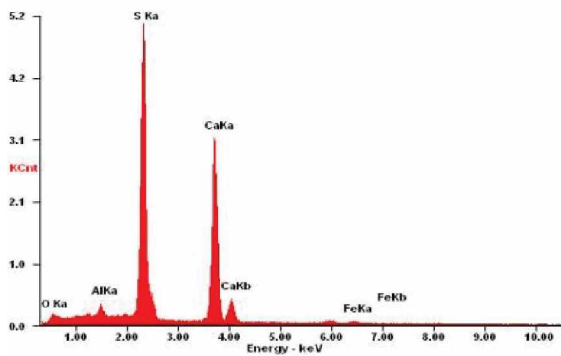
Element	Wt%	At%
OK	30,06	45,44
MgK	01,20	01,19
AlK	35,64	31,95
SK	09,59	07,23
CaK	23,52	14,19

Einschlussgröße

$d \approx 65 \mu\text{m}$

$\sigma = 389 \text{ MPa}$

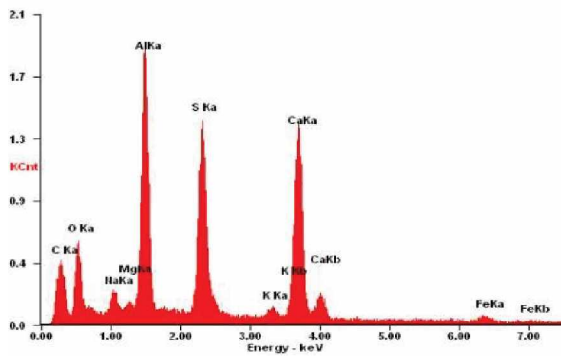
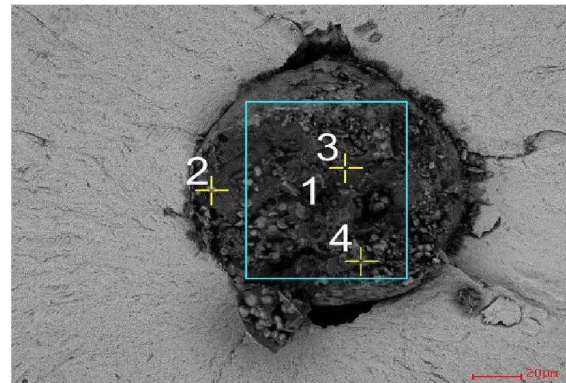
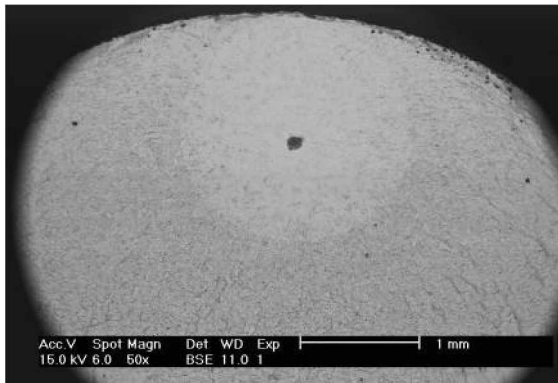
724500 LW



Spot 3

Element	Wt%	At%
OK	04,24	08,99
AlK	01,29	01,62
SK	44,57	47,15
CaK	49,90	42,24

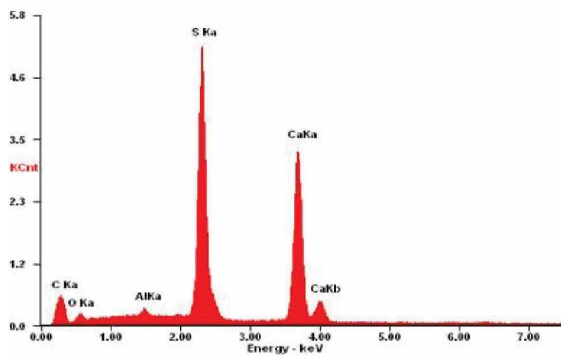
Abb. 4.24: Übersichts- und Detailaufnahme vom 9P12 mit EDX Analyse



Flächenanalyse 1

Element	Wt%	At%
OK	33,09	50,61
AlK	19,48	17,66
SK	18,17	13,86
CaK	29,26	17,86

Einschlussgröße  
 $d \approx 121 \mu\text{m}$   
 Randabstand  
 $\approx 1200 \mu\text{m}$   
 $\sigma = 408 \text{ MPa}$   
 1161000 LW



Spot 2

Element	Wt%	At%
OK	05,83	12,16
AlK	00,94	01,17
SK	43,32	45,10
CaK	49,91	41,57

Abb. 4.25: Übersicht- und Detailaufnahme vom 9K08 mit EDX Analyse

Die Zusammensetzung der NME kann nun in Schlacken Dreistoffsysteme eingetragen werden. Da bei vielen NME aufgrund der Größe mehr als eine chemische Analyse zur Verfügung steht, (manchmal auch Flächenanalysen) sind auch dementsprechend eine höhere Anzahl an Analysen in den Dreistoffsystemen eingetragen, als NME detektiert wurden.

Legende:

- ▲ In unterschiedlichen Farben bedeutet NME ab einem Durchmesser von mindestens 10 µm (kleinere NME sind nicht bruchauslösend).
- △ In unterschiedlichen Farben steht für NME, deren Größe nicht feststellbar war (meist aufgrund von „Verschlagen“ der Bruchflächen an der Probe).
- In unterschiedlichen Farben steht für NME, die überdurchschnittlich groß sind (ab 30 µm)

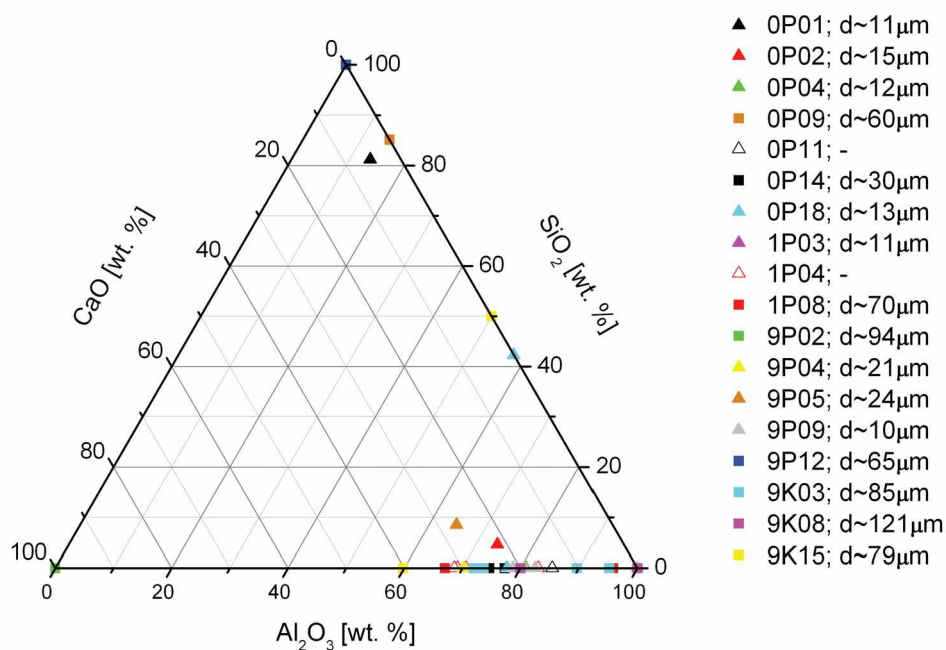


Abb. 4.26: Dreistoffsystem  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaO}$

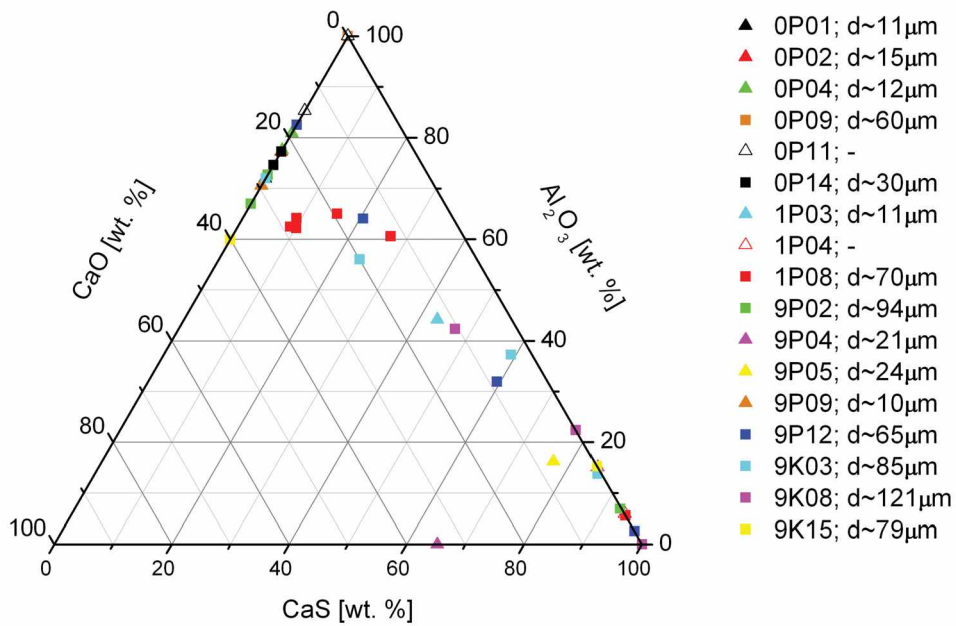


Abb. 4.27: Dreistoffsystem CaS-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO

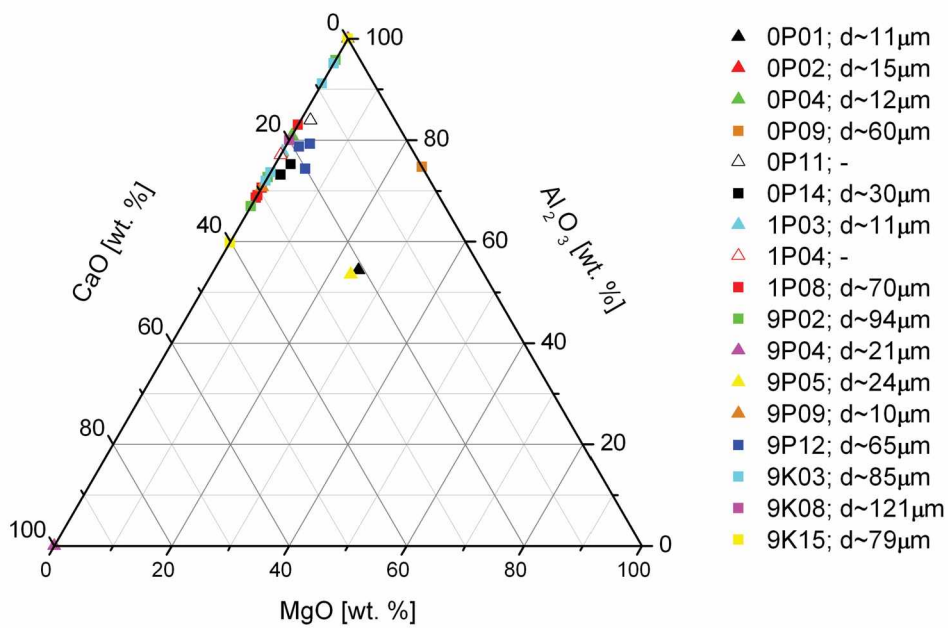


Abb. 4.28: Dreistoffsystem MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO

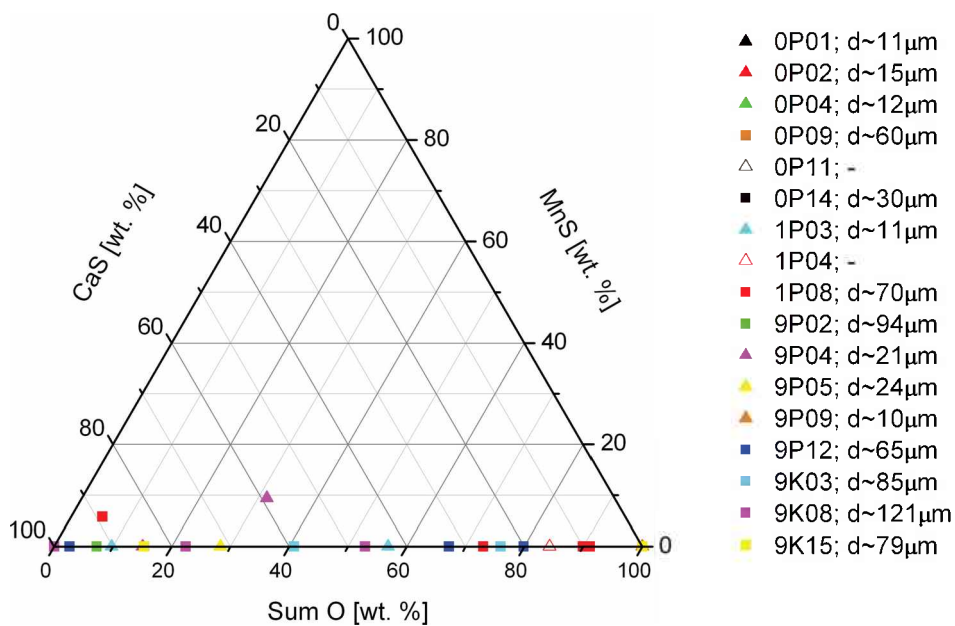


Abb. 4.29: Dreistoffsystem Sum O-MnS-CaS

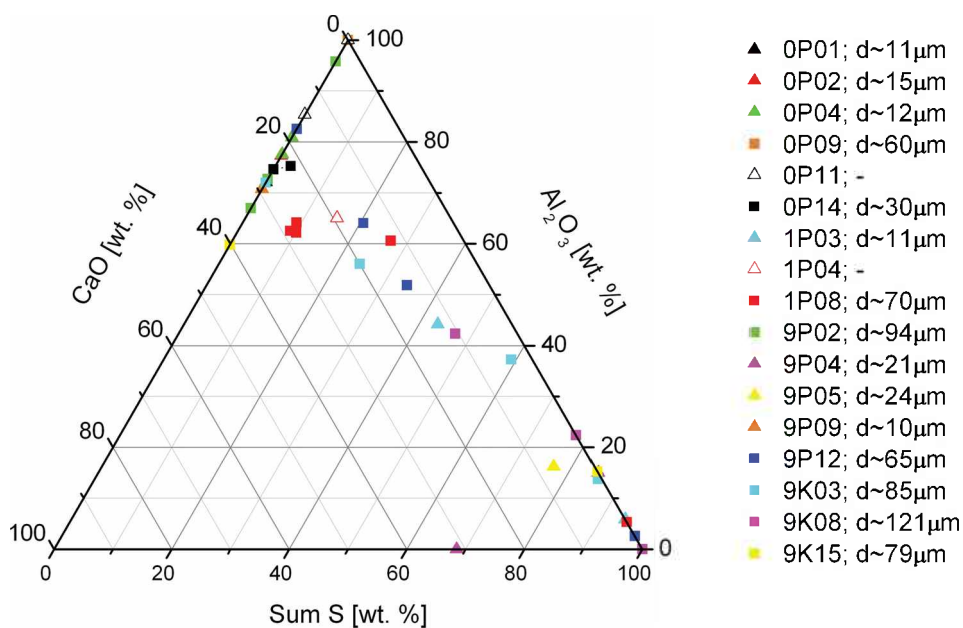


Abb. 4.30: Dreistoffsystem Sum S-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO

In Tabelle 45 sind nochmals alle chemischen Analysen zusammengefasst. Dabei muss berücksichtigt werden, dass diese Werte immer auf 100 Prozent aufgerechnet sind, da sonst die Darstellung der Ergebnisse in den Dreistoffsysteme nicht korrekt wäre. Da eine Punktanalyse bei einigen wenigen Proben nicht sinnvoll erschienen, wurden diese mit einer Flächenanalyse ergänzt (gekennzeichnet in Tabelle 45 mit „Fl.“). Eine weitere Klassifizierung der NME erfolgt durch die sieben Gruppen, die in Tabelle 44 erklärt sind.

Folgende Klassen von Einschlüssen wurde detektiert:

Kl.	Einschlusstyp	Erklärung
1	Excluded	Partikel, die aufgrund ihrer Elementanalyse keine Einschlüsse sind (zum Beispiel reines SiO <sub>2</sub> )
2	CA	Calciumaluminat
3	CA-CaS	Calciumaluminat mit Calciumsulfid-Anteil
4	Al-Silicate	Aluminium-Silikate (Mullite)
5	CaS	Calcium-Sulfide
6	(Mn, Fe, Ca, Ti, Mg) S	Mangan-Eisen-Calcium-Titan-Magnesium-Sulfide
7	OS	Oxidische Einschlüsse mit Sulfidanteil

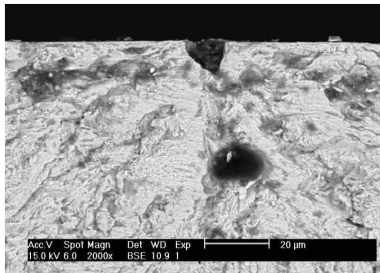
**Tabelle 44: Klasseneinteilung von NME**

Detailaufnahmen aller detektierten bruchauslösenden NME sind in Abb. 4.31 und Abb. 4.32 dargestellt.

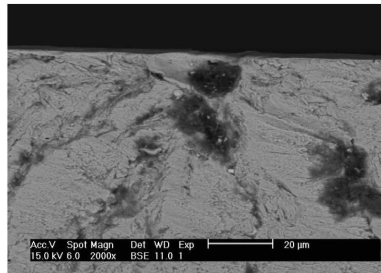


Probe	MnS	CaS	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	SUM S	SUM O	Klasse
A 0P01			14,22		80,91	4,87		100	7
B 0P02			12,15	4,74	72,59	5,52		100	4
C 0P04			73,69	21,66	4,65			100	2
D 0P09			80,89	19,10				100	2
			77,64	22,36				100	2
E 0P11			46,13					100	7
			83,92	14,37		1,71		100	2
F 0P14 Fl. 0P14			70,90	24,10		1,86		100	2
			71,80	21,09		2,51		100	2
G 0P18					100,00			100	1
H 1P03		43,16	44,18	12,65			43,16	56,84	3
		90,22	5,66		4,12		90,22	9,78	5
I 1P04		15,65	65,01	19,33			15,65	84,35	3
J 1P08		9,15	64,17	26,68			9,15	90,85	3
		10,08	62,20	27,71			10,08	89,92	3
		8,88	62,55	28,57			8,88	91,12	3
		27,03	60,59	12,38			27,03	72,97	3
		5,85	88,85	5,31			94,69	5,31	5
K 9P02		100,00					100,00		5
			66,99	33,01				100	2
			72,67	27,32				100	2
		92,73	6,92	0,34			92,73	7,27	5
L 9P04	9,41	59,13		31,46			68,54	31,46	6
		84,93	15,07				84,93	15,07	7
M 9P05		71,75	15,06	6,40		6,79	71,75	28,25	3
N 9P09			64,78	26,69	8,53			100,00	2
O 9P12		20,16	62,91	15,07		1,86	20,16	79,84	3
			79,35	16,77		3,87		100,00	2
		97,36	2,64				97,36	2,64	5
O 9P12 Fl.		32,85	49,90	13,49		3,76	32,85	67,15	3
P 9K03			72,02	27,98				100,00	2
		24,04	56,02	19,93			24,04	75,96	3
		85,45	13,82	0,72			85,45	14,55	3
		59,16	37,28	3,55			59,16	40,84	3
Q 9K08 Fl.		47,07	42,38	10,55			47,07	52,93	3
Q 9K08		100,00					100,00		5
		77,56	22,44				77,56	22,44	7
R 9K15			59,76					100,00	2
		84,73	15,27				84,73	15,27	7

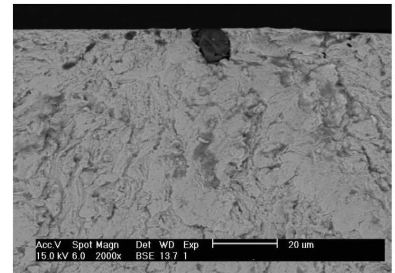
**Tabelle 45: Zusammensetzung der NME mit Klassifizierung**



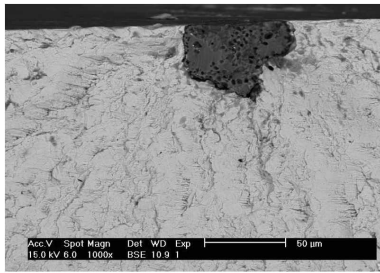
A) 0P01



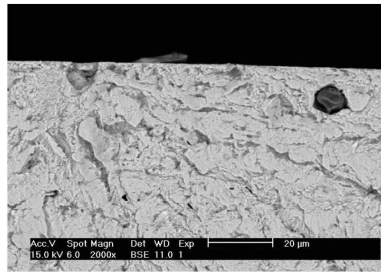
B) 0P02



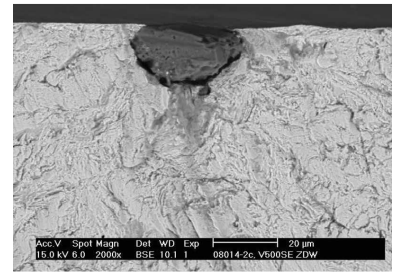
C) 0P04



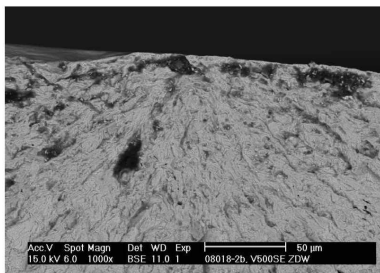
D) 0P09



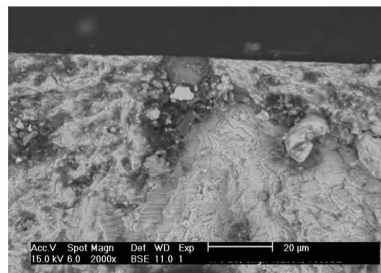
E) 0P11



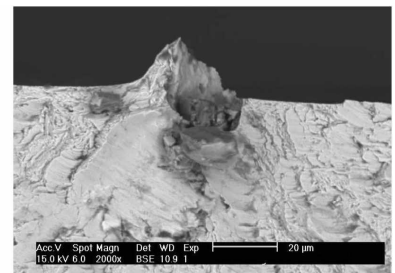
F) 0P14



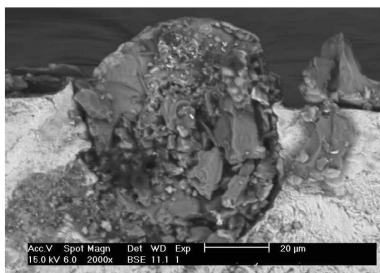
H) 0P18



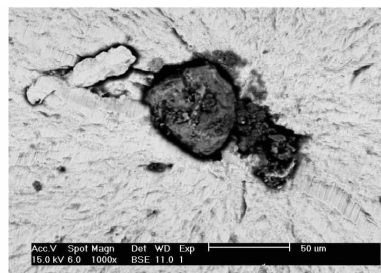
I) 0P11



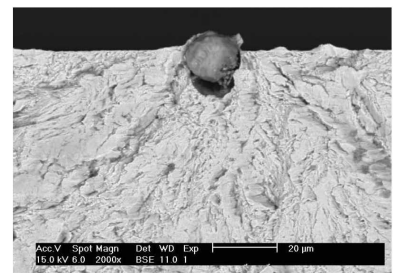
J) 0P14



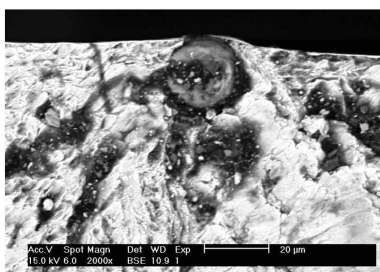
K) 1P08



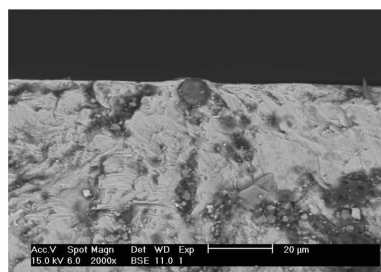
L) 9P02



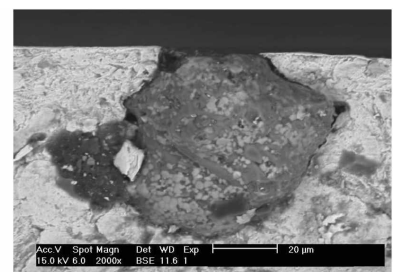
M) 9P04



N) 9P05

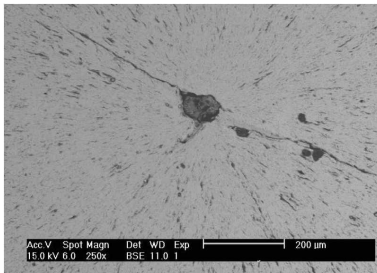


O) 9P09

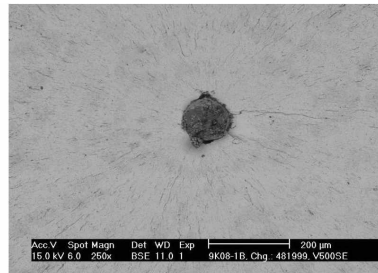


P) 9P12

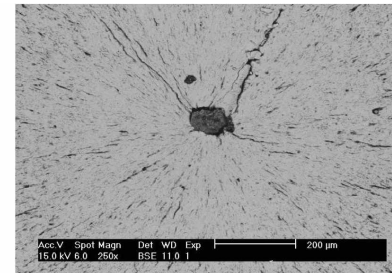
Abb. 4.31: Übersicht der NME A bis P



**Q) 9K03**



**R) 9K08**



**S) 9K15**

**Abb. 4.32: Übersicht NME Q bis S**

#### 4.4. Chargennummer 488730 – Cf53

Dieser unlegierter Vergütungsstahl mit einer Zugfestigkeit von 600 - 760 MPa im normalgeglühten Zustand, findet Anwendung für Ketten und Kettenbolzen, Bohr- und Drehbankspindeln sowie Getriebewellen und Räder.

Von dieser Charge steht ausschließlich normalgeglühtes Stangenmaterial des Kunden zur Verfügung. Eine weitere Wärmebehandlung ist daher nicht vorgesehen. Ein Teil der polierten Proben wird auch hier, um den Randeinfluss abzumildern, kugelgestrahlt. Da die Probengeometrie gleich und die mechanischen Eigenschaften dieser Charge ähnlich sind, im Vergleich mit den anderen kugelgestrahlten Proben der Stahlmarke 37CrS4, können die Strahlparameter aus Tabelle 19 auch hier verwendet werden.

##### 4.4.1. Mechanische Eigenschaften

Die relevanten mechanischen Eigenschaften inklusive der Kerbschlagarbeit befinden sich in Tabelle 46 und Tabelle 47. Die Aufnahmen der Bruchflächen sind in Abb. 4.33 ersichtlich.

Charge	Probenmaterial	R <sub>p0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>50mm</sub>	Z
		[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
488730	Stange vorvergütet	298	604	26,64	52,73
	von	382	606	25,50	51,65
	Kunde	298	601	25,12	51,23
	Mittelwert	<b>326</b>	<b>604</b>	<b>25,75</b>	<b>51,87</b>

Tabelle 46: Ergebnisse des Zugversuchs bei Raumtemperatur

	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Mittelwert
A <sub>v</sub> [J]	14,1	18,2	28,1	<b>20,1</b>
A <sub>k</sub> [J/cm <sup>2</sup> ]	17,6	22,8	35,1	<b>25,2</b>

Tabelle 47: Ergebnisse des Kerbschlagversuchs bei Raumtemperatur



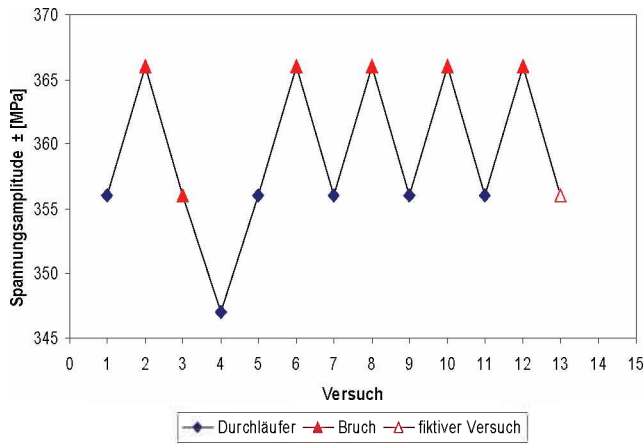
**Abb. 4.33: Bruchfläche der Kerbschlagprobe**

#### 4.4.2. Auswertung der Zug/Schwell-Versuche

Die Zug/Schwell-Proben, die alle bei  $R = 0$  geprüft werden, stehen sowohl poliert, als auch kugelgestrahlt in einer ausreichend großen Menge zur Verfügung, um die Durchführung von Treppenstufenversuchen zu gewährleisten (siehe Tabelle 48 bis Tabelle 51 und Abb. 4.34 bis Abb. 4.37). Bei der anschließenden REM Untersuchung konnte kein bruchauslösender NME detektiert werden.

Cf53 kugelgestrahlt								
Probe Nr.	MPa	Lastwechsel	Probe Nr.	MPa	Lastwechsel	Probe Nr.	MPa	Lastwechsel
5	366	590600	6	356	2000000	9	347	200000
7		654500	8		849300			
11		602200	10		2000000			
13		464000	12		2000000			
15		398500	14		2000000			
17		469800	16		2000000			

**Tabelle 48: Ergebnisse Schwingversuch; kugelgestrahlt**



$i$	$f_i$	$i \cdot f_i$	$i^2 \cdot f_i$
2	6	12	24
1	7	7	7
0	1	0	0
$\Sigma$	14	19	31
	F	A	B

Abb. 4.34: Treppenstufenversuch für kugelgestrahlte Proben

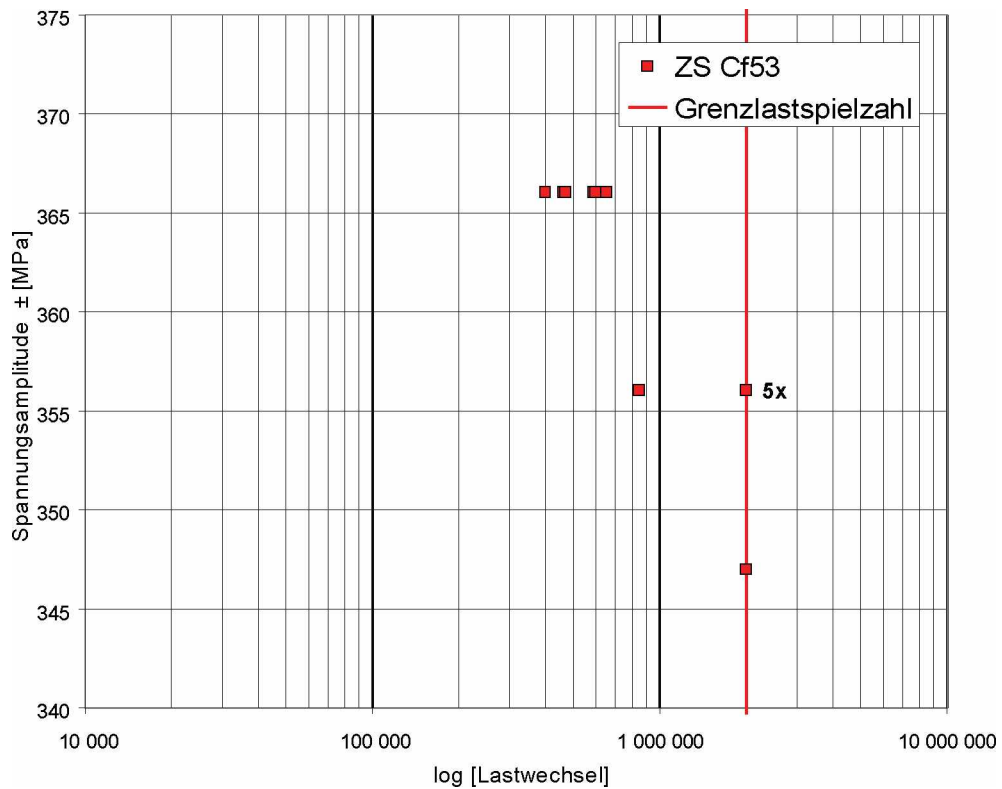


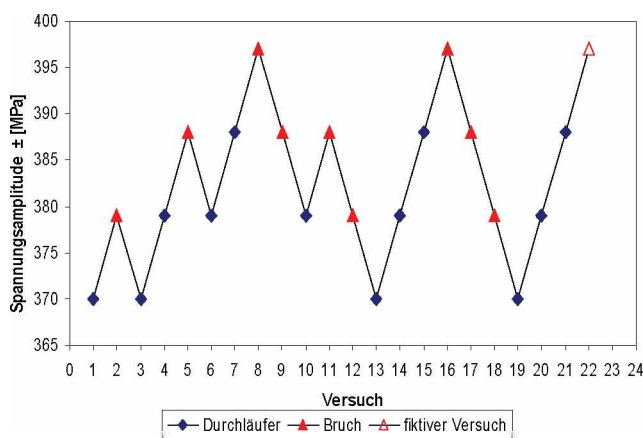
Abb. 4.35: Ergebnisse geordnet nach Spannungsniveaus; kugelgestrahlt

Dauerfestigkeitsbereich:			
F	14	s	4 MPa
A	19	C <sub>m</sub>	0,42
B	31	C <sub>s</sub>	0,6
k	0,37	P <sub>Ü10%</sub>	376 MPa
S <sub>D0</sub>	347 MPa	P <sub>Ü50%</sub>	358 MPa
d	10 MPa	P <sub>Ü90%</sub>	345 MPa

Tabelle 49: Parameter des Treppenstufenversuchs; kugelgestrahlt

Cf53 poliert								
Probe Nr.	MPa	Lastwechsel	Probe Nr.	MPa	Lastwechsel	Probe Nr.	MPa	Lastwechsel
8	397	1959900	2	379	1226400	1	370	2000000
16		321300	4		2000000	3		2000000
5	388	929700	6	2000000	13	2000000		
7		2000000	10	2000000	19	2000000		
9		1407000	12	1609300				
11		1484000	14	2000000				
15		2000000	18	1367400				
17		1248700	20	2000000				
21		2000000						

Tabelle 50: Ergebnisse Schwingversuch; poliert



i	f <sub>i</sub>	i*f <sub>i</sub>	i <sup>2</sup> *f <sub>i</sub>
3	3	9	27
2	7	14	28
1	8	8	8
0	4	0	0
Σ	22	31	63
	F	A	B

Abb. 4.36: Treppenstufenversuch für polierte Proben

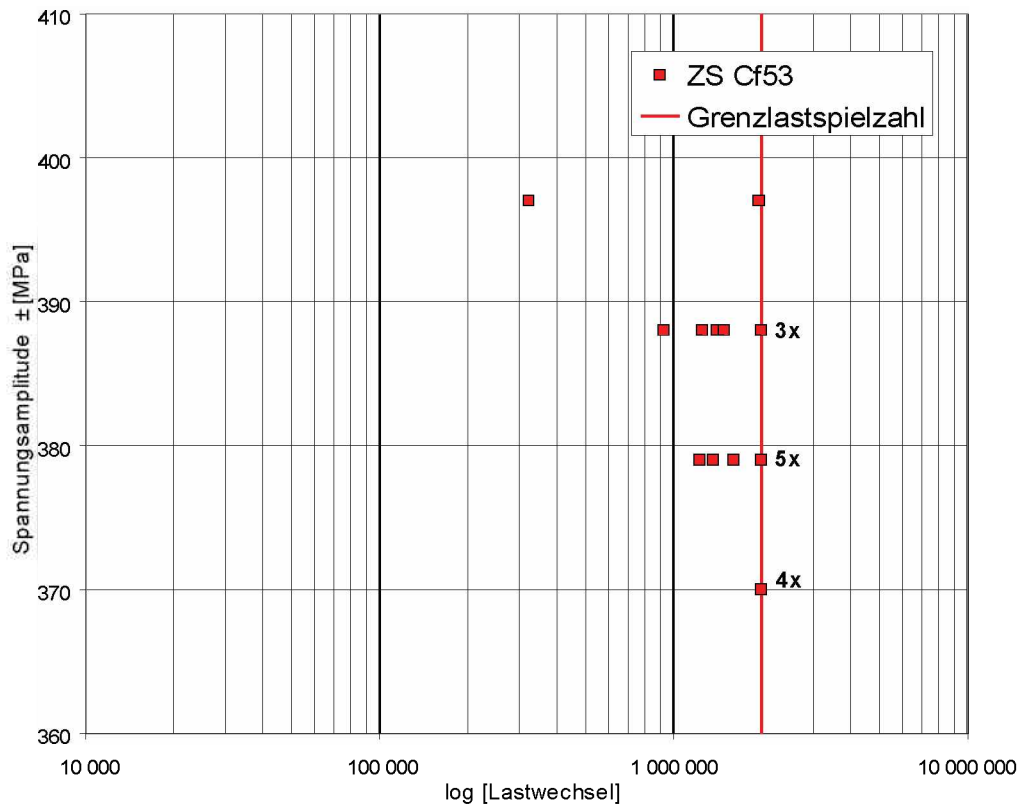


Abb. 4.37: Ergebnisse geordnet nach Spannungsniveaus: poliert

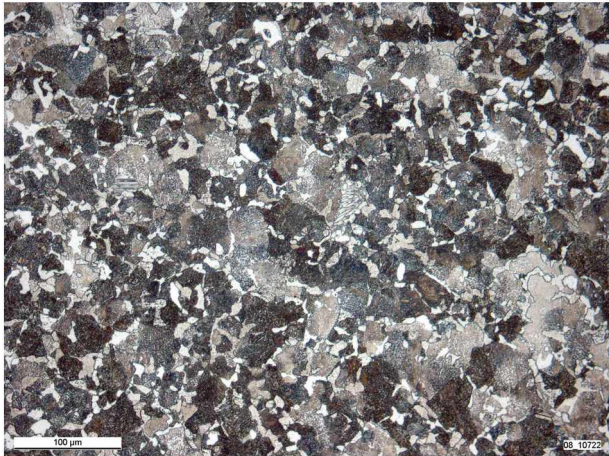
Dauerfestigkeitsbereich:			
F	22	s	13 MPa
A	31	C <sub>m</sub>	0,28
B	63	C <sub>s</sub>	1,8
k	0,88	P <sub>Ü10%</sub>	426 MPa
S <sub>D0</sub>	370 MPa	P <sub>Ü50%</sub>	378 MPa
d	9 MPa	P <sub>Ü90%</sub>	340 MPa

Tabelle 51: Parameter des Treppenstufenversuchs; poliert

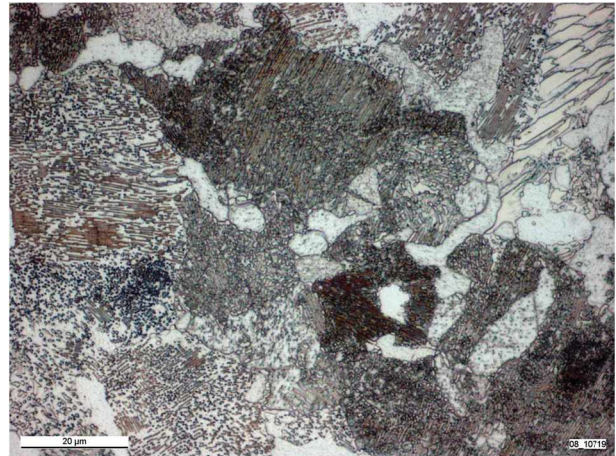


### 4.4.3. Gefügebilder

Da bei dieser Charge keine Wärmebehandlung stattfand, gibt es auch nur Gefügebilder von Proben im Auslieferungszustand (Abb. 4.38).



A) 200-fache Vergrößerung



B) 1000-fache Vergrößerung

Abb. 4.38: Gefügebilder normalisiert (Auslieferungszustand)

### 4.4.4. Reinheitsgraduntersuchungen

Typisch für diese Stahlmarke ist der hohe oxidische Reinheitsgrad, was sich auf in den geringen Einschlusszahlen und -größen widerspiegelt (siehe Tabelle 52 und Tabelle 53).

Charge: 488730		Anzahl der Einschlüsse nach Größenkennziffer											1. Zwischen- summe	
Probe Nr.	Schliff- fläche	Typ Faktor	0 0,05	1 0,10	2 0,20	3 0,5	4 1	5 2	6 5	7 10	8 20	Sulfid	Oxid	
1	260	SS		12	2							1,6		
		OA												
		OS												
		OG	1	1									0,15	
2	260	SS		11	4							1,9		
		OA												
		OS												
		OG	1										0,05	
3	260	SS		17	3							2,3		
		OA												
		OS												
		OG	2										0,1	
Σ	780	2. Zwischensumme											5,8	0,3
Bezogen auf 1000 mm <sup>2</sup>						Summenkennwert K0 oxidisch							<b>0,4</b>	
						Summenkennwert K1 sulfidisch						7		

**Tabelle 52: Reinheitsgradbestimmung nach DIN 50602**

Standard DIN 50602			
Charge	Marke	Wert	Max. EG
488730	Cf53	K0: 0,4	OG 1
		K1: 7	SS 2

**Tabelle 53: Größte Einschlüsse oxidisch und sulfidisch**

## 5. Diskussion der Ergebnisse, Zusammenfassung und Ausblick

Das Verhalten von Stählen unter schwingender Beanspruchung wird im wesentlichen metallurgisch, technologisch und durch die Beanspruchungsbedingungen beeinflusst.

Der Reinheitsgrad als Maß für den Gehalt an NME ist im metallurgischen Bereich von großer Bedeutung. Mit steigender Festigkeit des Grundwerkstoffs nimmt die Auswirkung von NME auf die Dauerfestigkeit von Stählen zu, da proportional dazu auch die Empfindlichkeit gegenüber äußeren und inneren Kerben steigt. Im Gegensatz dazu, wirken sich diese Einschlüsse nicht ganz so schädlich auf Stähle mit geringerer Festigkeit aus. Da hier die Möglichkeit besteht die freiwerdende Energie durch geringe plastische Verformung und Wärme abzugeben, die bei hochfesten Stählen bereits unweigerlich zur Anrissbildung und in weiterer Folge zum Versagen führt. Negativ wirkt sich jedoch bei allen Stählen die unumgängliche Spannungsüberhöhung an jeglicher Fehlstelle aus (= NME).

Die Minimierung der Einschlüsse in einem modernen Stahlwerk kann man in zwei Gruppen teilen:

1. Das Auftreten von NME minimieren – vornehmlich von Makroeinschlüssen – und
2. Modifikation der NME, um eine globulare Form und wünschenswerte Eigenschaften zu erhalten. Dies wird z. B. durch die Calciumbehandlung des flüssigen Stahls weitgehend erreicht.

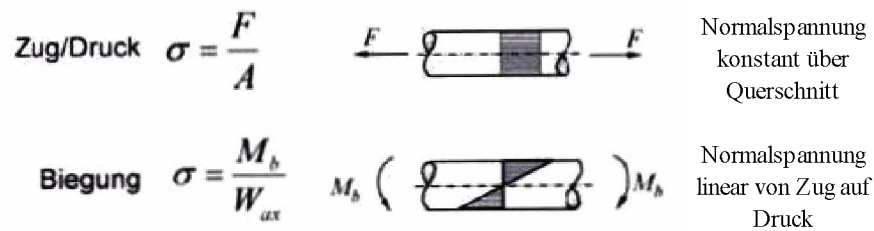
Im großen und ganzen kann man von zwei Einschlusstypen sprechen, die durch eine Calciumbehandlung entstehen:

- Die oxidische Phase besteht aus dem System  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ .
- Die sulfidische Phase hingegen besteht aus einer Lösung des Systems  $\text{CaS}$  und  $\text{MnS}$

Viele Verbindungen dieser beiden Systeme mit unterschiedlichen Schmelzpunkten entstehen dabei. Natürlich wird versucht den Einschlussgehalt möglichst gering zu halten. Laut R. Kissling [9] kann aber die Anzahl an oxidischen und sulfidischen Einschlüssen in einer Tonne Stahl mit

einem ppm von jedem der beiden Elemente mit  $10^{12}$  angegeben werden, wenn man davon ausgeht, dass sie einen Mikrometer groß sind. Diese Größe hat aber keinerlei schädliche Auswirkungen auf die Eigenschaften des Stahls. Problematisch wird es hingegen wenn man von einem Durchmesser ab  $10\ \mu\text{m}$  ausgeht, bei dem die Anzahl der NME noch immer bei einem Wert von  $10^9$  liegt. Daher scheint es sinnvoll nicht die Anzahl an Einschlüssen herabzusetzen, sondern nur die Größe der NME. Unter einem Stahl mit „wenigen Einschlüssen“ sollte man einen Stahl mit nur wenigen Einschlüssen über  $10\ \mu\text{m}$  im Durchmesser verstehen. Dies deckt sich auch mit detektierten NME in der vorliegenden Arbeit, da kein bruchauslösender NME hinsichtlich seines Durchmessers kleiner als  $10\ \mu\text{m}$  war.

Durch das Wissen aus der Literatur stand fest, dass zur Auffindung von NME UBW Versuche geeignet sind. Da alle 40 UBW Proben NME-freie Bruchflächen aufwiesen, wurde die Beanspruchungsart gewechselt (siehe Abb. 5.1).



**Abb. 5.1: Beanspruchungsarten**

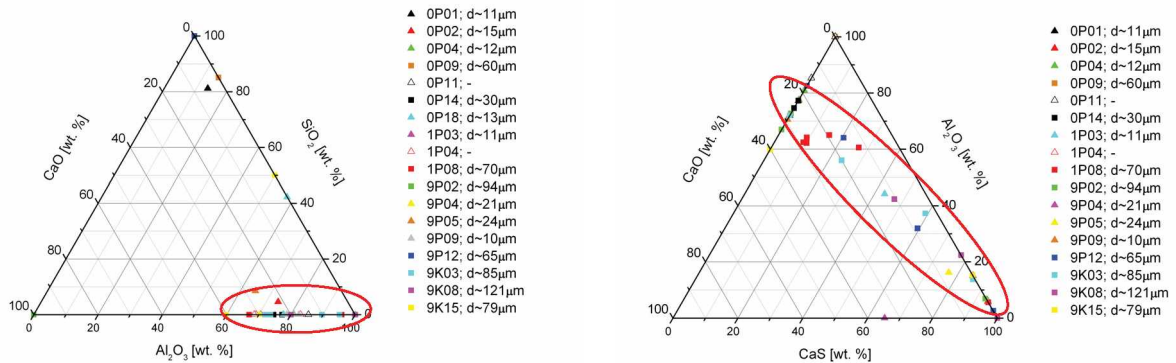
Während, wie bei den UBW Versuchen, nur die äußere Randschicht mit der nominellen Spannung belastet wird und diese Spannung bis zum Mittelpunkt der Probe bis auf Null abnimmt, ist bei einer Zug/Druck Beanspruchung der gesamte Querschnitt gleichbelastet. Dadurch wird ein Einschluss einer UBW Probe, der nicht oberflächennahe liegt „geschont“. Der Umstieg auf andere Stahlsorten war insofern unumgänglich, da eine Fertigung von Zug/Druck Proben aus dem Federstahl, nicht einmal in Anlehnung an eine Norm, möglich war (ein geeignetes Verhältnis Prüf- und Einspanndurchmesser war nicht gegeben). Daher kamen die beiden Vergütungsstähle 37CrS4 und Cf53, an den durch sein Einsatzgebiet, wesentlich höherer Anforderungen im Bezug auf die Reinheit gelten. Durch diese beiden Stähle mit unterschiedlichen Reinheitsgraden sollte geklärt werden, ob Zug/Druck Wechselversuche überhaupt geeignet sind, um NME zu detektieren. Aufgrund der Reinheitsgraduntersuchungen müsste die Stahlmarke 37CrS4 viele bruchauslösende NME und Cf53 keine NME enthalten.

Diese Überlegungen erwiesen sich, nach einem Resultatvergleich, als richtig. Während in der Stahlmarke 37CrS4 ungefähr 20 Einschlüsse detektiert wurden, waren bei der Stahlsorte Cf53 ausschließlich Ermüdungsbrüche ohne den Einfluss von NME feststellbar. Daraus ergibt sich, dass für Vergütungsstähle mit mittlerer Festigkeitswerten Zug/Druck-Wechselversuche ideal sind, um Brüche, die durch NME ausgelöst werden, zu generieren.

Die grundlegenden Aussagen aus der Literatur decken sich mit den Ergebnissen der Stahlsorte 37CrS4. Nicht die Einschlussanzahl sondern die Größe, ihre Lage und die Zusammensetzung ist entscheidend.

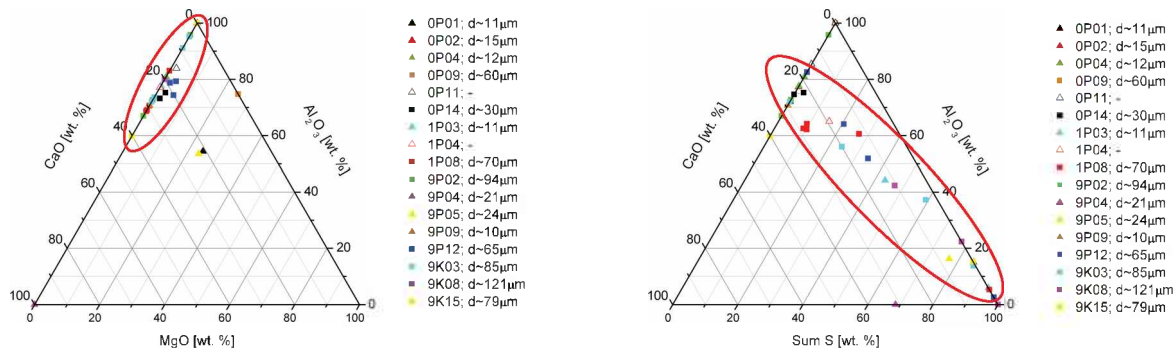
Einschlüsse, die direkt an der Oberfläche oder nur einige Mikrometer von dieser entfernt liegen, sind ab einem Durchmesser von 10  $\mu\text{m}$  bruchauslösend. Durch die Stützwirkung der Eisenmatrix, sind Einschlüsse, die unterhalb der Oberfläche liegen erst ab einem Durchmesser von 60  $\mu\text{m}$  bruchauslösend. Das Kugelstrahlen stellte sich als ideale Möglichkeit heraus um Oberflächenspannungen einzubringen, und so Brüche zu provozieren, die durch weiter innen liegende NME verursacht werden.

In den Dreistoffsystemen in Abb. 5.2 sind die Gebiete mit den wesentlichen Zusammensetzungen der NME rot gekennzeichnet. Bei den Analysen, die sich in Bild A außerhalb der Markierung befinden, handelt es sich um  $\text{SiO}_2$  in Form von Sand, der vermutlich von der feuerfesten Ausmauerung stammt. Ebenso um feuerfeste Bestandteile handelt es sich bei den Analysen im Dreistoffsystem C, die sich außerhalb des Rahmens befinden. In diesem Fall führte die Verbindung zwischen  $\text{MgO}$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  zur Spinellbildung. Der Schwefelgehalt der NME ist sehr gering, daher sind die Sulfide  $\text{CaS}$  und  $\text{MnS}$  für das Versagen von Probe nicht ausschlaggebend. Tonerde ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) und Calciumaluminat mit bis zu 35%  $\text{CaO}$  ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ ) wirken, wenn ein NME mit dieser Zusammensetzung die kritische Größe von 10  $\mu\text{m}$  überschreitet, bruchauslösend. Trotz ihrer globularen Form können diese NME nicht so verformt werden wie die Eisenmatrix, die sie umschließt. Durch den Umformprozess entsteht so eine Spalte oder Kluft („gap“) zwischen Einschluss und Matrix. Diese Spalten sind auch für die Rissausbreitung verantwortlich. Das ist auch der Grund, warum bei einigen Proben kein NME sondern nur noch ein Loch zu finden war – der NME wurde vermutlich aus der Matrix durch das Umformen gelöst und ging nach dem Bruch verloren.



A)  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaO}$

B)  $\text{CaS-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$



C)  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$

D)  $\text{Sum S-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$

Abb. 5.2: Dreistoffsysteme

Für die theoretischen Verfahren zur Bestimmung der Lebensdauer unter Berücksichtigung von Kerben und NME sind die Ergebnisse aufgrund ihrer zu geringen Anzahl nicht geeignet. Anders als bei den dargestellten Dreistoffsystemen, in denen es ja um die chemische Zusammensetzung der NME geht, können die drei Chargen 37CrS4 keinesfalls miteinander verglichen werden, da sie unterschiedliche Dauerfestigkeiten aufweisen.

Einige grundlegenden Parameter zur Durchführung von Schwingversuchen an Vergütungsstählen, um Brüche ausgelöst von NME zu erhalten, sind mit dieser Arbeit festgelegt. Größten Wert wurde bei allen Prüfungen auf die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und auf die normgerechte Durchführung gelegt. Die vorliegende Diplomarbeit stellt eine hilfreiche Ergänzung zur bereits bestehenden Literatur dar.

## 6. Abkürzungsverzeichnis

[kV]	Kilo Volt
°C	Grad Celsius
Anlasstemp.	Anlasstemperatur
bzw.	Beziehungsweise
chem.	chemisch
Cu	Kupfer
Fe	Eisen
Fl.	Fläche
Kl.	Klasse
max	maximal
mm	Milimeter
MPa	Megapascal
Ni	Nickel
NME	Nichtmetallischer Einschluss
Pt	Platin
Rh	Rhodium
UBW	Umlaufbiegewechsel
Wbh	Wärmebehandlung
z. B.	Zum Beispiel
ZDW	Zug/Druck-Wechsel
µm	Mikrometer

## 7. Literaturverzeichnis

- [1] Kloos, K.H.: Untersuchung der Einflüsse des Reinheitsgrades und der Abkühlung auf die Dauerfestigkeit eines vergüteten und eines vergüteten-kugelgestrahlten Federstahles, Diplomarbeit, Technische Hochschule Darmstadt, 1978, 2-17.
- [2] Verein Deutscher Eisenhüttenleute: Werkstoffkunde Stahl, Band 1 Grundlagen, 1. Auflage, Stahl Eisen, Düsseldorf, 1984, 616-625.
- [3] Kiessling, R.: Non-metallic inclusions in steel, Part V, 1. Auflage, Bourne Press, Bournemouth, 1989, 44-50.
- [4] Ghosh, Ahindra: Secondary Steelmaking: Principles and Applications, CRC Press LLC, Florida, 2001, 255-270.
- [5] Majcenovic, C.: Skriptum Feuerfeste Baustoffe im Hüttenwesen, 2005.
- [6] Tschenett, H.: Einfluss sekundärmetallurgischer Parameter auf Cloggingerscheinungen während des Stranggießens von Stahl, Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben, 1999, 7-12.
- [7] Lindborg, U. und K. Torsell: Trans AIME 242, 1968, 94-102.
- [8] Kiessling, R.: Non-metallic inclusions in steel, Parts I - IV, Nachdruck der zweiten Auflage, Bourne Press, Bournemouth, 1997, Part II 97-120.
- [9] Presern, V.: Einschlüsse in kalziumbehandelten, aluminiumberuhigten Stählen, Veitsch - Radex Rundschau, 1991, Heft 1/2, 433-443.
- [10] Oesters, F.: Metallurgie der Stahlherstellung, 1. Auflage, Stahleisen, Düsseldorf, 1989, 71-74.
- [11] Tarman, R. und W. Meyer: Erfahrung mit der Kalziumbehandlung von Stählen und Auswirkungen auf den Reinheitsgrad und die mechanischen Eigenschaften, BHM 127 (1982), 9, 339-342.
- [12] Stolte, G.: Secondary Metallurgy, 1. Auflage, Stahleisen, Düsseldorf, 2002, 150-160.
- [13] Ohshiro, T., T. Ikeda, H. Matsuyama, S. Okushima, Y. Oki und N. Ibaraki, Verbesserung der Dauerhaltbarkeit von Ventildfederdraht, Stahl und Eisen 109 (1989), 21, 1011-1015.
- [14] Buch, A.: Einfluss der Stahlreinheit und Stahlhärte auf die Anisotropie der mechanischen Eigenschaften von Schmiedestücken, IfL-Mitt. 6, 1967, 402-408.
- [15] Eichelseder, W.: Skriptum Betriebsfestigkeit 1, Montanuniversität Leoben, 2006, 2-37.



- [16] Steger, G., J. Sieghart und E. Glauningner: Technische Mechanik 1, 2. Auflage, B. G. Teubner, Stuttgart, 1990, 147-153.
- [17] Neuber, H.: Kerbspannungslehre, 1. Auflage, Julius Springer Verlag, Berlin, 1937, 2-11.
- [18] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2006, 15-200.
- [19] Kleemann, U.: Dauerschwingfestigkeit bei spanend bearbeiteten Bauteilen, Carl Hanser Verlag 50 (2008), 7-8, 412-421.
- [20] Verpoort, C. and C. Gerdes: Shot peening and fatigue, In J. Eckersley and J. Chapaigne: Shot peening – theory and application, IITT-International, Gournay-sur-dormoy, 1989, 11-50.
- [21] Wieser, H.: Der Einfluß des Kugelstrahlens auf das Ermüdungs- und Korrosionsverhalten eines austenitischen Implantatwerkstoffs, Dissertation, Montanuniversität Leoben, 1997, 3-36.
- [22] Military Spezifikation: Shot Peening of Metal Parts, MIL S13165C, 1989.
- [23] Scholtes, B. und E. Macherauch: Auswirkungen mechanischer Randschichtverformungen auf das Festigkeitsverhalten metallischer Werkstoffe, Z. Metallkunde 77 (1986), 5, 322-337.
- [24] Wieser, H.: Einfluss der Oberflächenverfestigung der Implantatlegierung TiAl6V4 durch Kugelstrahlen auf die Schwingungskorrosionsbeständigkeit, Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben, 1992, 7-15.
- [25] Scholtes, B. und Vöhringer O.: Grundlagen der mechanischen Oberflächenbehandlung, In E. Broszeit und H. Steindorf: Mechanische Oberflächenbehandlung: Festwalzen-Kugelstrahlen-Sonderverfahren, DGM Informationsgesellschaft m.b.H., Oberursel, 1989, 3-20.
- [26] Wohlfart, H.: Ein Modell zur Vorhersage kugelstrahlbedingter Eigenspannungszustände, in E. Macherauch und V.Hauk: Eigenspannungen, Entstehung-Messung-Bewertung, Deutsche Gesellschaft für Metallkunde, Frankfurt, 1983, 301-319.
- [27] Leitner, H., H-P Gänser und W. Eichelseder: Oberflächenbehandlung durch Kugelstrahlen und Festwalzen, Carl Hanser Verlag 49 (2007), 7-8, 408-413.
- [28] Heitmann, H.: Betriebsfestigkeit von Stahl, Dissertation, RWTH Aachen, 1983, 10-13.
- [29] Leitner, H.: Skriptum Übung Betriebsfestigkeit, WS 08/09.
- [30] Feyrer, K.: Weibull- oder Normalverteilung im Maschinenbau, Konstruktion 2008, 11/12, 61-66.

- [31] Buxbaum, O.: Betriebsfestigkeit, 2. erweiterte Auflage, Stahl Eisen, Düsseldorf, 1992, 106-118.
- [32] Hück, M.: Ein verbessertes Verfahren für die Auswertung von Treppenstufenversuchen, Z. Werkstofftechnik 1983, 14, 406-417.
- [33] Frost, N E: A relation between the critical alternating propagation stress and crack length for mild steel, Proceedings of the institution of the mechanical engineers, 1959, 173, 811-836.
- [34] Murakami, Y. and M. Endo: Effects of defects, inclusions and inhomogeneities on fatigue strength, International journal of fatigue 16 (1994), 3, 163-182.
- [35] Murakami, Y.: Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions, Reprinted 2005, Elsevier Ltd, Oxford, 2002, 75-122.
- [36] Toriyama, T. and Y. Murakami: Effects of inclusions on fatigue strength of super clean bearing steel, Fatigue 96, Proc of the 6th Internat. Fatigue Congress, Vo. 2 (1996), 905-910.
- [37] Dr. Sommer Werkstofftechnik, Handbuch Datenbank StahlWissen NaviMAT, 2007.
- [38] Deutsche Norm: DIN EN 10002-1 Metallische Werkstoffe Zugversuch Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur, Beuth Verlag, Berlin, 2001, 1-43.
- [39] Deutsche Norm: DIN EN ISO 6507-2 Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers - Teil 2: Prüfung und Kalibrierung der Prüfmaschinen; Beuth Verlag, Berlin, 2006, 1-25.
- [40] Deutsche Norm: DIN 50 115 Prüfung metallischer Werkstoffe Kerbschlagbiegeversuch - Besondere Probenform und Auswerteverfahren; Beuth Verlag, Berlin, 1991, 1-4.
- [41] Deutsche Norm: DIN 50 602 Makroskopische Prüfung von Edelstählen auf nichtmetallische Einschlüsse mit Bildreihen, Beuth Verlag, Berlin, 1985, 1-12.
- [42] saarstahl, Werkstoff-Datenblatt - 54SiCr6, DIN EN 10089.
- [43] Anderson, J.: Ovahyd 650 – ein Hochleistungsstahl für die Hydraulikindustrie, 2007, 1-9.

## 8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Typische Einschlüsse am Ausgang des Ermüdungsbruchs [13].....	6
Tabelle 2: Erklärung Abb. 2.2 und Abb. 2.3.....	9
Tabelle 3: Erklärung der doppellogarithmische Wöhlerlinie.....	13
Tabelle 4: Erklärung der Bruchbereiche.....	14
Tabelle 5: Dauerfestigkeitswerte bei unterschiedlichen Beanspruchungen-tendenziell [18].....	16
Tabelle 6: Parameter des Kugelstrahlens.....	19
Tabelle 7: Erklärung der Werte von Abb. 2.13.....	22
Tabelle 8: Vergleich der Verfahren [29].....	26
Tabelle 9: Variablen der Wöhlerkurve.....	28
Tabelle 10: Variablen des Treppenstufenversuchs.....	29
Tabelle 11: Variablen des Arcsin $\sqrt{P}$ -Verfahrens.....	31
Tabelle 12: Chemische Zusammensetzung Chargennummer 488472.....	36
Tabelle 13: Grenzwerte 54SiCr6 [37].....	36
Tabelle 14: Chemische Zusammensetzung Chargennummern 481999 bis 482001.....	37
Tabelle 15: Grenzwerte 37CrS4 [37].....	37
Tabelle 16: Chemische Zusammensetzung Chargennummer 488730 (Auszug).....	37
Tabelle 17: Grenzwerte Cf53 [37].....	37
Tabelle 18: Thermoelemente.....	39
Tabelle 19: Strahlenparameter.....	41
Tabelle 20: Ergebnisse des Zugversuchs.....	42
Tabelle 21: Parameter eines Rasterbildes.....	46
Tabelle 22: Vergütungsparameter 54SiCr6.....	48
Tabelle 23: Ergebnisse der Zugversuche bei unterschiedlichen Anlasstemperaturen.....	49
Tabelle 24: Ergebnisse der Härteprüfung HV10.....	49
Tabelle 25: Ergebnisse des Kerbschlagversuchs bei Raumtemperatur.....	49
Tabelle 26: Ergebnisse UBW Versuche Charge 488472.....	51
Tabelle 27: Kennwerte der Wöhlerlinie.....	51
Tabelle 28: Reinheitsgradbestimmung nach DIN 50602.....	54
Tabelle 29: GröÙte Einschlüsse oxidisch und sulfidisch.....	54

Tabelle 30: Vergütungsparameter 37CrS4.....	56
Tabelle 31: Ergebnisse des Zugversuchs bei Raumtemperatur.....	56
Tabelle 32: Ergebnisse der Härteprüfung HV10.....	57
Tabelle 33: Ergebnisse des Kerbschlagversuchs bei Raumtemperatur.....	57
Tabelle 34: Ergebnisse Schwingversuch Charge 482000.....	59
Tabelle 35: Kennwerte Arcsin $\sqrt{P}$ -Verfahren.....	60
Tabelle 36: Ergebnisse Schwingversuch Charge 481999.....	61
Tabelle 37: Parameter des Treppenstufenversuchs.....	62
Tabelle 38: Ergebnisse Schwingversuch Charge 482001.....	63
Tabelle 39: Parameter des Treppenstufenversuchs.....	64
Tabelle 40: Reinheitsgradbestimmung nach DIN 50602 Charge 482000.....	69
Tabelle 41: Größte Einschlüsse oxidisch und sulfidisch Charge 482000.....	69
Tabelle 42: Reinheitsgradbestimmung nach DIN 50602 Charge 481999.....	70
Tabelle 43: Größte Einschlüsse oxidisch und sulfidisch Charge 481999.....	70
Tabelle 44: Klasseneinteilung von NME.....	80
Tabelle 45: Zusammensetzung der NME mit Klassifizierung.....	81
Tabelle 46: Ergebnisse des Zugversuchs bei Raumtemperatur.....	84
Tabelle 47: Ergebnisse des Kerbschlagversuchs bei Raumtemperatur.....	84
Tabelle 48: Ergebnisse Schwingversuch; kugelgestrahlt.....	85
Tabelle 49: Parameter des Treppenstufenversuchs; kugelgestrahlt.....	87
Tabelle 50: Ergebnisse Schwingversuch; poliert.....	87
Tabelle 51: Parameter des Treppenstufenversuchs; poliert.....	88
Tabelle 52: Reinheitsgradbestimmung nach DIN 50602.....	90
Tabelle 53: Größte Einschlüsse oxidisch und sulfidisch.....	90

## 9. Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Zustandsschaubild CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [10].....	5
Abb. 2.2: Beanspruchungsarten [16].....	8
Abb. 2.3: Spannungsspitzen durch äußeren/inneren Einfluss [15].....	9
Abb. 2.4: Kraftlinienverdichtung durch eine Kerbe [15].....	10
Abb. 2.5: Kennwerte eines Schwingspiels [18].....	10
Abb. 2.6: Beanspruchungsverhältnisse und Spannungsverhältnisse [18].....	11
Abb. 2.7: Doppellogarithmische Wöhlerlinie [18].....	13
Abb. 2.8: Ausbildungsformen von Dauerbrüchen [16].....	14
Abb. 2.9: Haigh Diagramm [18].....	16
Abb. 2.10: Oberflächenfaktor nach Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung [19].....	18
Abb. 2.11: Oberflächenfaktor nach FKM-Richtlinie [20].....	18
Abb. 2.12: Modelle der Plastifizierung kugelgestrahlter Oberflächen [25].....	21
Abb. 2.13: Charakteristische Werte der Eigenspannungsverteilung [27].....	22
Abb. 2.14: Rasterelektronische Aufnahmen von Proben.....	23
Abb. 2.15: Phasen des Ermüdungsvorganges [16].....	25
Abb. 2.16: Treppenstufenversuch und Diagramm für s/d.....	29
Abb. 2.17: Hilfwerte des Treppenstufenversuchs [32].....	30
Abb. 2.18: Beispiel für Arcsin $\sqrt{P}$ -Verfahren [29].....	31
Abb. 3.1: Herstellroute (aus der voestalpine Datenbank).....	35
Abb. 3.2: Anlieferungszustand des Probenmaterials.....	38
Abb. 3.3: Wärmebehandlungsöfen.....	38
Abb. 3.4: Härten.....	39
Abb. 3.5: Anlassöfen.....	39
Abb. 3.6: Probengeometrie.....	40
Abb. 3.7: Probenhalterung beim Kugelstrahlen.....	41
Abb. 3.8: Vickers Härteprüfer.....	43
Abb. 3.9: Pendelschlagwerk.....	43
Abb. 3.10: Hochfrequenz Pulsator.....	44
Abb. 3.11: UBW Maschine.....	44

Abb. 3.12: Lichtmikroskop.....	45
Abb. 3.13: REM.....	46
Abb. 4.1: Vergütungsschaubild 54SiCr6 [42].....	48
Abb. 4.2: Bruchfläche der Kerbschlagprobe.....	50
Abb. 4.3: Ergebnisse Arcsin $\sqrt{P}$ -Verfahren.....	52
Abb. 4.4: Wöhlerkurve.....	52
Abb. 4.5: Gefügebilder.....	53
Abb. 4.6: Gefügebilder.....	53
Abb. 4.7: Vergütungsschaubild 37CrS4 [37].....	55
Abb. 4.8: Bruchfläche der Kerbschlagprobe.....	57
Abb. 4.9: Ergebnisse Arcsin $\sqrt{P}$ -Verfahren.....	59
Abb. 4.10: Ergebnisse geordnet nach Spannungsniveaus.....	60
Abb. 4.11: Treppenstufenversuch Chargennummer 481999.....	61
Abb. 4.12: Ergebnisse geordnet nach Spannungsniveaus.....	62
Abb. 4.13: Treppenstufenversuch Chargennummer 482001.....	63
Abb. 4.14: Ergebnisse geordnet nach Spannungsniveaus.....	64
Abb. 4.15: Gefügebilder Ausgangszustand.....	65
Abb. 4.16: Gefügebilder nach dem Normalisieren.....	66
Abb. 4.17: Gefügebilder nach dem Härten.....	67
Abb. 4.18: Gefügebilder nach dem Vergüten (gehärtet und angelassen).....	68
Abb. 4.19: Übersichts- und Detailaufnahme vom Probe 0P01 mit EDX Analyse.....	71
Abb. 4.20: Übersichts- und Detailaufnahme vom 0P18 mit EDX Analyse.....	72
Abb. 4.21: Übersichts- und Detailaufnahme vom 0P09 mit EDX Analyse.....	72
Abb. 4.22: Übersichts- und Detailaufnahme vom 0P14 mit EDX Analyse.....	73
Abb. 4.23: Übersichts- und Detailaufnahme vom 9P02 mit EDX Analyse.....	74
Abb. 4.24: Übersichts- und Detailaufnahme vom 9P12 mit EDX Analyse.....	75
Abb. 4.25: Übersichts- und Detailaufnahme vom 9K08 mit EDX Analyse.....	76
Abb. 4.26: Dreistoffsystem $Al_2O_3$ - $SiO_2$ - $CaO$ .....	77
Abb. 4.27: Dreistoffsystem $CaS$ - $Al_2O_3$ - $CaO$ .....	78
Abb. 4.28: Dreistoffsystem $MgO$ - $Al_2O_3$ - $CaO$ .....	78
Abb. 4.29: Dreistoffsystem Sum O-MnS- $CaS$ .....	79
Abb. 4.30: Dreistoffsystem Sum S- $Al_2O_3$ - $CaO$ .....	79

Abb. 4.31: Übersicht der NME A bis P.....	82
Abb. 4.32: Übersicht NME Q bis S.....	83
Abb. 4.33: Bruchfläche der Kerbschlagprobe.....	85
Abb. 4.34: Treppenstufenversuch für kugelgestrahlte Proben.....	86
Abb. 4.35: Ergebnisse geordnet nach Spannungsniveaus; kugelgestrahlt.....	86
Abb. 4.36: Treppenstufenversuch für polierte Proben.....	87
Abb. 4.37: Ergebnisse geordnet nach Spannungsniveaus: poliert.....	88
Abb. 4.38: Gefügebilder normalisiert (Auslieferungszustand).....	89
Abb. 5.1: Beanspruchungsarten.....	92
Abb. 5.2: Dreistoffsysteme.....	94