



Lehrstuhl für Eisen- und Stahlmetallurgie

Masterarbeit

Bedeutung des Reinheitsgrads für die
Zerspanungseigenschaften ausgewählter
Stahlsorten

Markus Heinrich Maunz, BSc

April 2019



Herrn Markus Maunz wird vom Lehrstuhl für Eisen- und Stahlmetallurgie folgendes Masterarbeitsthema S717 gestellt:

Bedeutung des Reinheitsgrads auf die Zerspanungseigenschaften ausgewählter Stahlsorten

Ziel der Masterarbeit ist es, einen potentiellen Zusammenhang zwischen dem Reinheitsgrad und den Zerspanungseigenschaften ausgewählter Stähle zu untersuchen. Vorrangig soll dabei ein Warmarbeitsstahl mit definierter chemischer Zusammensetzung genauer betrachtet werden. Es sollen unterschiedliche Chargen und damit verbundene Prozessschwankungen analysiert werden. Als Methode zur Einschlusscharakterisierung wird die automatisierte REM/EDX Analyse verwendet. Diese ermöglicht die Analyse mehrerer 1000 Partikel auf einer definierten Messfläche hinsichtlich Größe, Morphologie, chem. Zusammensetzung sowie Verteilung.

Mit den ausgewählten Stählen werden Zerspanungsversuche mittels Hartmetallwendeschneidplatten durchgeführt. Die Ergebnisse der Zerspanungstest sollen mit dem REM/EDX Ergebnissen verglichen und korreliert werden. Die Verschleißmechanismen der Werkzeuge sollen dabei mittels Digitalmikroskopie und REM im Detail untersucht und mit den Materialeigenschaften der Stähle in Zusammenhang gebracht werden.

Schwerpunkte:

- Literaturrecherche
- Durchführung und Auswertung von Zerspanungstests
- Charakterisierung des Reinheitsgrads mittels manueller und automatisierter REM/EDX Analyse
- Vergleich, Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse



Industriepartner:

Leoben, im November 2017

Assoz.Prof.Dr. Susanne Michelic

Kurzfassung

In der heutigen Zeit verlässt kein Produkt mehr ohne vorhergehender spanender Bearbeitung den Hersteller. Aus diesem Grund ist es unumgänglich, Verbesserungen beim Zerspanungsprozess durchzuführen. Hierbei bietet sich an, den Werkstoff für eine bessere Zerspanbarkeit zu optimieren. Dies führt zur Fragestellung, welche Einflussfaktoren die Zerspanbarkeit eines Werkstoffs verbessern können. Im Zuge der Arbeit wird im Detail auf den Einfluss von nichtmetallischen Einschlüssen in einem X38CrMoV5-1 Warmarbeitsstahl auf dessen Zerspanbarkeit eingegangen. Der erste Abschnitt der Arbeit umfasst eine detaillierte Literaturstudie, die sowohl die Thematik des Reinheitsgrads als auch das Thema der Zerspanung und Zerspanbarkeit behandelt. Zudem wird über den Einfluss der nichtmetallischen Einschlüsse zum einen auf die Materialeigenschaften und zum anderen auf die Zerspanbarkeit des Werkstoffs ausführlich berichtet. Der zweite Teil besteht in der Ausführung der praktischen Versuche, die neben der Durchführung von Zerspanungsversuchen ebenso eine automatisierte REM-EDX-Analyse von drei verschiedenen Chargen des X38CrMoV5-1 Warmarbeitsstahls beinhaltet. Die Zerspanungsergebnisse führten zur Erkenntnis, dass die drei verschiedenen Chargen bei unterschiedlichen Schnittparametern und verschiedenartiger Wendeschneidplattentypen sehr ähnliche zerspante Volumen aufwiesen. Analog dazu zeigte die automatisierte REM-EDX-Messung ebenfalls nur geringe Unterschiede in der Einschlusslandschaft der drei Chargen. Die im Zuge der Arbeit festgestellte konstante Zerspanbarkeit unabhängig von der verwendeten Stahlcharge bildet eine wichtige Basis für die zukünftige Optimierung und Neuentwicklung von Zerspanungswerkzeugen.

Abstract

In modern times any product leaves the manufacturer without a previous machining. For this reason it is important to optimize the machining process by improving the mechanical behavior of the product. Enhanced machining properties of the used material ease the production process. This leads to the question, which factors have a positive impact on the machinability of the material. The main focus of this thesis is the influence of nonmetallic inclusions in a X38CrMoV5-1 hot working tool steel on its machinability. The first part of the work includes a detailed literature research with the topics steel cleanness, machining and machinability. Furthermore the effect of nonmetallic inclusions on the material properties and also on the machinability of the material is discussed. The second part of the work describes the operation of practical turning tests and automated SEM/EDS-Analysis of three different X38CrMoV5-1 steel batches. The results of the machining tests lead to the understanding that the three various steel batches machined with changed cutting parameters and also different types of cutting inserts nearly show the same machined volume. In the same way, also the automated SEM/EDS-Analysis only detects small differences in the inclusion landscape of the three steel batches. During this work a constant machinability of the X38CrMoV5-1 steel, regardless of the batch was determined. This special property of the steel grade on the one hand enables the improvement of current tools and the development of new tools on the other hand.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den verwendeten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

.....
Maunz Markus

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract.....	II
Eidesstattliche Erklärung	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Allgemeine Formelzeichen	VII
Akronyme.....	IX
Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XIV
1 Einleitung	1
2 Reinheitsgrad.....	3
2.1 Quellen von nichtmetallischen Einschlüssen.....	5
2.2 Einfluss nichtmetallischer Einschlüsse auf die Werkstoffeigenschaften von Stahl	7
2.2.1 Korrosionsbeständigkeit	8
2.2.2 Ermüdungseigenschaften	8
2.2.3 Kerbschlagzähigkeit	9
2.2.4 Warmsprödigkeit.....	10
3 Zerspanung	11
3.1 Verschleiß.....	14
3.1.1 Adhäsion.....	15
3.1.2 Abrasion.....	15

3.1.3	Oberflächenzerrüttung	15
3.1.4	Tribooxidation	15
3.1.5	Diffusion	16
3.1.6	Verschleißformen.....	16
3.2	Standzeit	19
4	Zerspanbarkeit	20
4.1	Zerspanbarkeit von Stahlwerkstoffen	21
4.1.1	Mechanische Eigenschaften.....	22
4.1.2	Stahlgefüge.....	22
4.1.3	Wärmebehandlungszustand.....	24
4.1.4	Legierungselemente	24
4.2	Zerspanbarkeit von Werkzeugstählen.....	25
4.3	Einfluss nichtmetallischer Einschlüsse auf die Zerspanbarkeit.....	25
4.3.1	Sulfide.....	32
4.3.2	Oxide	32
4.3.3	Nitride	35
5	Experimentelles	36
5.1	Zerspanungsversuche	37
5.2	Verschleißuntersuchung	40
5.3	REM-EDX-Analyse der Stahlchargen	44
5.3.1	Probenahme	45
5.3.2	Auswerteschema der automatisierten REM-EDX-Analyse	47
5.4	REM-EDX-Analyse der Späne.....	47
5.5	Metallographische Charakterisierung der Chargen	48
6	Ergebnisse	49
6.1	Ergebnisse der Zerspanungsversuche.....	49
6.1.1	Zerspanungsversuche mit CNMG120408EN-M50 Wendeschneidplatten.....	51
6.1.2	Zerspanungsversuche mit CNMG120408EN-R58 Wendeschneidplatten	61
6.1.3	Zerspanungsversuche mit CNMG120408EN-F50 Wendeschneidplatten	65
6.2	REM-Untersuchung einer Wendeschneidplatte	70
6.3	Ergebnisse der automatisierten REM-EDX-Analyse	73
6.3.1	Einschlussanzahl.....	73
6.3.2	Einschlussgehalt.....	75
6.3.3	Einschlussgröße	77

6.4	Element-Mappings.....	79
6.5	REM-EDX-Untersuchung der Späne.....	81
6.6	Metallographische Charakteristika der Stahlchargen	86
7	Diskussion der Ergebnisse.....	89
7.1	Diskussion der Zerspanungsergebnisse	89
7.2	Diskussion der Ergebnisse von der automatisierten REM-EDX-Analyse.....	93
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	95
	Literaturverzeichnis	100
A	Ergebnisse Anhang A.....	A-1
A.1	Digitalmikroskopaufnahmen der verschlissenen Wendeschneidplatten	A-1
A.2	Detaillierte Resultate der automatisierten REM-EDX-Messung.....	A-10

Allgemeine Formelzeichen

f	Vorschub
v_c	Schnittgeschwindigkeit
a_p	Schnitttiefe
h	Spanungsdicke
Q	Zeitspanvolumen
A	Spanungsquerschnitt
VB	Verschleißmarkenbreite
T	Standzeit
K	Kolkverhältnis
KT	Kolktiefe
KM	Kolkmittenabstand zur Schneide
k_c	Spezifische Schnittkraft
$k_{c1.1}$	Hauptwert der spezifischen Schnittkraft
m_c	Werkstoffkonstante
k_{vc}	Korrekturfaktor Schnittgeschwindigkeit
k_{ver}	Korrekturfaktor Werkzeugverschleiß
k_{sp}	Korrekturfaktor Spanstauchung
k_γ	Korrekturfaktor Spanwinkel

γ	Spanwinkel
γ_0	Basisspanwinkel
F_c	Hauptschnittkraft
κ	Einstellwinkel

Akronyme

REM	Rasterelektronenmikroskop
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)
NME	Nichtmetallische Einschlüsse
WC	Wolframkarbid
WSP	Wendeschnidplatte
SiC	Siliziumkarbid
MnS	Mangansulfid
BN	Bornitrid
CaS	Kalziumsulfid

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Längs- und Querdrehen. [26]	11
Abbildung 3-2: Spanbildung, nach [26].	12
Abbildung 3-3: Spanbildungsarten. [29]	13
Abbildung 3-4: Verschleiß in Abhängigkeit von Vorschub, Schnitttiefe und Schnittgeschwindigkeit. [32].....	14
Abbildung 3-5: Schematische Darstellung der Verschleißmechanismen, nach [31].	15
Abbildung 3-6: Verschleißformen. [31].....	16
Abbildung 3-7: Verschleißmarkenbreite an einem Drehmeißel, nach [26].	17
Abbildung 3-8: Kolkverschleiß an einem Drehmeißel. [26]	18
Abbildung 3-9: Aufbauschneidenbildung. [29]	19
Abbildung 4-1: Hauptgruppen zur Bewertung der Zerspanbarkeit, nach [34].	21
Abbildung 4-2: Ergebnisse der Standzeitversuche von Ånmark et al. [38].....	28
Abbildung 4-3: Standzeit in Abhängigkeit von äquivalentem Kohlenstoffgehalt und durchschnittlicher Korngröße, nach [37].....	29
Abbildung 4-4: Massenanteil sowie Größenverteilung der extrahierten nichtmetallischen Einschlüsse. [37]	30
Abbildung 4-5: Standzeit in Abhängigkeit des Volumsanteils und des Seitenverhältnisses der Einschlüsse, nach [37].....	31

Abbildung 4-6: Größenverteilung der Sulfid-, Oxid- und Oxisulfid-Einschlüsse in den Qualitäten R, C und UC. [36]	31
Abbildung 4-7: Elementverteilung der Schicht an der Spanfläche, nach [42].....	34
Abbildung 5-1: Wendeschneidplatten-Geometrien. [45,46]	38
Abbildung 5-2: Versuchsparameter der Zerspanungstests.....	39
Abbildung 5-3: Skizze des zerspannten Segments.	40
Abbildung 5-4: Beispiel für die Messung der Verschleißmarkenbreite.....	41
Abbildung 5-5: Skizze des Schnittverlaufs der Wendeschneidplatte.	42
Abbildung 5-6: Errechnete Schnittkraftwerte.	44
Abbildung 5-7: Ablauf der Probennahme.	46
Abbildung 5-8: Untersuchte Probenbereiche.....	47
Abbildung 5-9: REM-Probenträger mit aufgeklebten Spänen.	48
Abbildung 6-1: Ergebnisübersicht der Zerspanungsversuche.	50
Abbildung 6-2: Ergebnisse der M50-WSP-Zerspanungstests.....	52
Abbildung 6-3: Zerspanungsergebnisse der CNMG120408-R58 Wendeschneidplatten..	61
Abbildung 6-4: Zerspanungsergebnisse der CNMG120408-F50 Wendeschneidplatten. .	65
Abbildung 6-5: Übersichts- und Nahaufnahme einer WSP mittels REM.	70
Abbildung 6-6: Poren und Stahlaufschmierung im Schliff der WSP.....	71
Abbildung 6-7: Übersichts- und Detailaufnahme der aufgerauten Beschichtung.	71
Abbildung 6-8: Interkristalline und transkristalline Risse.....	72
Abbildung 6-9: Übersichts- und Detailaufnahme des Kolkverschleißes.....	72
Abbildung 6-10: Einschlussanzahl der drei Chargen.....	74
Abbildung 6-11: Einschlussanzahl der 10 häufigsten Einschlüsse.	75
Abbildung 6-12: Einschlussgehalt der drei Chargen.....	76
Abbildung 6-13: Einschlussgehalt der 10 häufigsten Einschlüsse.	77
Abbildung 6-14: Einschlussgrößenverteilung der drei Chargen.....	78
Abbildung 6-15: Einschlussgröße der 10 häufigsten Einschlüsse.	79
Abbildung 6-16: Mapping eines Ca-Sulfid (Querschliff).....	80

Abbildung 6-17: Mapping eines (Al, Ca, Mg)-Oxisulfid (Querschliff).....	80
Abbildung 6-18: Mapping eines (Al, Ca, Mg)-Oxisulfid (Längsschliff).....	80
Abbildung 6-19: REM-Aufnahme der Innenseite von den Spänen.....	81
Abbildung 6-20: Übersicht- und Nahaufnahme der Späne.....	82
Abbildung 6-21: Einschlüsse auf der Spanaußenseite.....	82
Abbildung 6-22: Übersichtsaufnahmen der Späne.....	83
Abbildung 6-23: Einschluss auf der Spanaußenseite.....	84
Abbildung 6-24: Elementmapping des Einschlusses nahe an der Schnittfläche.....	84
Abbildung 6-25: Einschluss auf der Spaninnenseite.....	85
Abbildung 6-26: Elementmapping des Einschlusses nahe an der Spaninnenseite.....	85
Abbildung 6-27: Bainitgefüge der Charge X im Querschliff (1000x).....	86
Abbildung 6-28: Geätzte Längsschliffe der Charge X und V (50x).....	87
Abbildung 6-29: Karbidstruktur der Charge V und X (370x).....	87
Abbildung 6-30: Karbidstruktur der Charge V und X (1200x).....	88
Abbildung 7-1: Zerspanntes Volumen in Abhängigkeit des Zeitspanvolumens.....	91
Abbildung 8-1: Zusammenfassung der Zerspannungsergebnisse.....	97
Abbildung A-1: Einschlussanzahl aller Längsproben.....	A-10
Abbildung A-2: Einschlussanzahl aller Querproben.....	A-11
Abbildung A-3: Einschlussgehalt aller Längsproben.....	A-11
Abbildung A-4: Einschlussgehalt aller Querproben.....	A-12
Abbildung A-5: Einschlussanzahl der detektierten Oxide.....	A-12
Abbildung A-6: Einschlussanzahl der detektierten Oxisulfide.....	A-13
Abbildung A-7: Einschlussanzahl der detektierten Sulfide.....	A-13
Abbildung A-8: Einschlussanzahl der detektierten Nitride.....	A-14
Abbildung A-9: Einschlussgehalt der detektierten Oxide.....	A-14
Abbildung A-10: Einschlussgehalt der detektierten Oxisulfide.....	A-15
Abbildung A-11: Einschlussgehalt der detektierten Sulfide.....	A-15
Abbildung A-12: Einschlussgehalt der detektierten Nitride.....	A-16

Abbildung A-13: ECD der detektierten Oxide..... A-16

Abbildung A-14: ECD der detektierten Oxisulfide..... A-17

Abbildung A-15: ECD der detektierten Sulfide. A-17

Abbildung A-16: ECD der detektierten Nitride. A-18

Abbildung A-17: Elementmapping eines (Ca,Mg)-Oxisulfids (Querschliff)..... A-18

Abbildung A-18: Elementmapping eines (Ca,Mg,Ti)-Oxisulfids (Querschliff)..... A-19

Abbildung A-19: Elementmapping eines (Al,Mg,Ti)-Oxisulfids (Längsschliff). A-19

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-I: Übersicht der direkten Methoden zur Bestimmung des Reinheitsgrades. [2,5–7]	4
Tabelle 2-II: Übersicht der indirekten Methoden zur Bestimmung des Reinheitsgrades. [2,8].....	5
Tabelle 2-III: Mögliche Quellen von Einschlüssen. [4]	6
Tabelle 4-I: Chemische Zusammensetzung der von Ånmark et al. [37] untersuchten Stähle, nach [37].....	27
Tabelle 4-II: Materialkennwerte der verschiedenen Stahlgüten, nach [37].....	29
Tabelle 4-III: Kennwerte der aus den drei Stahlgüten extrahierten Einschlüsse, nach [37].....	30
Tabelle 5-I: Beschreibung der Wendeschneidplatten-Geometrien. [45,46].....	37
Tabelle 5-II: Kennzahlen für die Schnittkraftberechnung. [45–47]	43
Tabelle 5-III: Messeinstellungen der automatisierten REM-EDX-Analyse.	44
Tabelle 6-I: Verschleißbilder der M50-WSPs bei $v_c = 250$ m/min und $f = 0,35$ mm für alle drei Chargen.....	53
Tabelle 6-II: Schliffbilder der M50-WSPs bei $v_c = 250$ m/min und $f = 0,35$ mm für alle drei Chargen.....	54
Tabelle 6-III: Verschleißbilder der M50-WSPs für die Charge V bei einem konstantem $f = 0,35$ mm und steigender Schnittgeschwindigkeit.	56

Tabelle 6-IV: Schliffe der M50-WSPs bei konstantem $f = 0,35$ mm und steigender Schnittgeschwindigkeit.	57
Tabelle 6-V: Verschleißbilder der M50-WSPs für die Charge V bei konstanter $v_c = 250$ m/min und steigendem Vorschub.....	59
Tabelle 6-VI: Schliffe der M50-WSPs bei konstanter $v_c = 250$ m/min und steigendem Vorschub.	60
Tabelle 6-VII: Verschleißbilder der R58-WSPs für die Charge V bei konstantem Zeitspanvolumen von 210 [cm ³ /min].	63
Tabelle 6-VIII: Schliffe der R58-WSPs für Charge V.	64
Tabelle 6-IX: F50 Digitalmikroskopaufnahmen der WSP für Charge V bei einem konstanten Zeitspanvolumen von 175 [cm ³ /min].	67
Tabelle 6-X: Schliffe der F50-WSPs für Charge V.....	68
Tabelle 6-XI: Gemittelte Härtewerte der drei Chargen.....	88
Tabelle A-I: M50 Digitalmikroskopaufnahmen der Hauptschneide 20° verkippt.....	A-2
Tabelle A-II: M50 Digitalmikroskopaufnahmen der Hauptfreifläche.	A-4
Tabelle A-III: R58 Digitalmikroskopaufnahmen der Hauptschneide 20° verkippt.....	A-6
Tabelle A-IV: R58 Digitalmikroskopaufnahmen der Hauptfreifläche.	A-7
Tabelle A-V: F50 Digitalmikroskopaufnahmen der Hauptschneide 20° verkippt.	A-8
Tabelle A-VI: F50 Digitalmikroskopaufnahmen der Hauptfreifläche.	A-9

1 Einleitung

In der modernen Fertigung, in der kein Produkt in den Verkauf geht, welches während der Produktion nicht zumindest einmal einem spanenden Fertigungsschritt unterzogen wird, spielt die Verbesserung der Zerspanbarkeit eines Werkstoffs eine bedeutende Rolle, da dadurch im großen Maße auch die Kosten der Bearbeitung beeinflusst werden können. Im Zuge dieser Arbeit wurde daher auf die Thematik der Zerspanbarkeit eingegangen und ein besonderes Hauptaugenmerk auf den Einfluss der Stahlcharge durch dessen Reinheitsgrad gelegt. Zudem erfolgten bis dato nur wenige Untersuchungen, welche den Einfluss nichtmetallischer Einschlüsse auf die Zerspanbarkeit von Warmarbeitsstählen beurteilten, was wiederum ebenfalls eine detaillierte Erforschung erforderte.

Bei der Zerspanung gibt es zahlreiche verschiedene Schneidstoffe wie Schnellarbeitsstahl, Hartmetall, Cermets und viele mehr. Für die hohen Anforderungen in der modernen Zerspanung hat sich das Hartmetall durchgesetzt. Wolframkarbid ist der Hauptbestandteil von Hartmetall, das zudem auch Kobalt und Mischkarbide enthält. Die weltweite Produktion an Wolframkarbid belief sich im Jahr 2004 auf etwa 39070 t pro Jahr. Fast sämtliches produziertes Wolframkarbid findet in der Hartmetallherstellung Verwendung. [1]

Der erste Abschnitt der Arbeit fasst die Ergebnisse der detaillierten Literaturrecherche zusammen. Es wird zum einen eine Übersicht über die Verfahren zur Charakterisierung von nichtmetallischen Einschlüssen, als auch ein Überblick über den Einfluss von nichtmetallischen Einschlüssen auf die Werkstoffeigenschaften gegeben. Ebenso gibt es ein Kapitel, das dem Thema Zerspanung gewidmet ist. Zudem wird auf die Thematik der Zerspanbarkeit mit Hauptaugenmerk auf den Einfluss von NME auf die Zerspanbarkeit eingegangen. Der zweite Abschnitt beschäftigt sich mit der Durchführung der Zerspanungsversuche der drei unterschiedlichen Stahlchargen auf einer CNC-Drehmaschine

und der anschließenden Verschleißuntersuchung der verschlissenen Wendeschneidplatten. Weiters befasst sich die Arbeit mit der automatisierten REM-EDX-Untersuchung der drei verschiedenen Stahlchargen, sowohl im Querschliff, als auch im Längsschliff, mit anschließender Auswertung, Klassifizierung in Hauptgruppen und Detailklassifizierung in definierte Einschlusstypen. Ebenso werden die während der Zerspanung erhaltenen Späne einer Untersuchung auf Einschlüsse mit REM-EDX unterzogen. Der letzte Teil der Arbeit besteht in der Auswertung und Interpretation sämtlicher Ergebnisse des Versuchsteils.

2 Reinheitsgrad

Der Reinheitsgrad von Stählen wird durch die Anzahl, Größe, Verteilung, Morphologie und chemische Zusammensetzung der enthaltenen nichtmetallischen Einschlüsse (NME) bestimmt. [2]

NME sind Partikel, welche einen nichtmetallischen Charakter aufweisen und sich in einer Matrix aus Metall und Legierungselementen befinden. Je nach Entstehungsort können nichtmetallische Einschlüsse in exogene und endogene Einschlüsse unterschieden werden. Endogene Einschlüsse entstehen als Reaktionsprodukte in der flüssigen oder in der erstarrenden Schmelze. Exogene Einschlüsse stammen von Außerhalb der Schmelze, wie zum Beispiel dem verwendeten Feuerfestmaterial. [3,4]

Zur Bestimmung des Reinheitsgrades gibt es eine Vielzahl an möglichen Methoden. Diese unterteilen sich in direkte und indirekte Methoden. Die **Tabelle 2-I** liefert Beispiele für die direkten und die **Tabelle 2-II** für die indirekten Methoden. Zudem enthalten die Tabellen Vor- und Nachteile der aufgelisteten Analyseverfahren. [2]

Tabelle 2-I: Übersicht der direkten Methoden zur Bestimmung des Reinheitsgrades. [2,5–7]

Analysemethode	Vorteile	Nachteile
Metallographische Untersuchung mittels Mikroskop <u>Normen:</u> <ul style="list-style-type: none"> • DIN 50602 • EN 10247: 2007 	<ul style="list-style-type: none"> • Auskunft über Anzahl, Größenverteilung und Morphologie der Einschlüsse • Informationen über Einschlussmenge, -größe und -morphologie • Quantitative Aussage über Länge, Anzahl und Gehalt der Einschlüsse • Automatisierbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Zweidimensionale Betrachtung • Keine Auskunft über die chemische Zusammensetzung • Keine Auskunft über die chemische Zusammensetzung • Keine Auskunft über die chemische Zusammensetzung
XPS	<ul style="list-style-type: none"> • Messung der chemischen Zusammensetzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Auskunft über Anzahl, Größenverteilung und Morphologie
OES-PDA	<ul style="list-style-type: none"> • Schnell • Bedingte Auskunft über Größenverteilung, chemischer Zusammensetzung und totalen Sauerstoffgehalt 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Information über die Morphologie • Nur NME kleiner 12 µm messbar
MIDAS	<ul style="list-style-type: none"> • Detektiert seltene Makroeinschlüsse 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Information über Morphologie und chemischer Zusammensetzung • Für Einschlüsse > 40µm
Manuelle REM-Messung	<ul style="list-style-type: none"> • Bestimmung der zweidimensionalen Morphologie • Information über die chemische Zusammensetzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Misst nur einzelne Einschlüsse • Hoher Zeitaufwand für mehrere Einschlüsse
Automatisierte REM/EDX-Messung	<ul style="list-style-type: none"> • Daten über Position, Größe und chemische Zusammensetzung jedes gemessenen NME 	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr hoher Zeitaufwand (Abhängig von der Messfläche)

Tabelle 2-II: Übersicht der indirekten Methoden zur Bestimmung des Reinheitsgrades. [2,8]

Analysemethode	Vorteile	Nachteile
Messung des Gesamt-sauerstoffgehaltes	<ul style="list-style-type: none"> • Auskunft über Menge der Oxideinschlüsse • Einfache Messung 	<ul style="list-style-type: none"> • Berücksichtigt keine Makroeinschlüsse
Stickstoffaufnahme	<ul style="list-style-type: none"> • Grobe Abschätzung des Gesamtsauerstoffgehaltes möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Beschleunigte Stickstoffaufnahme, wenn der Sauerstoffgehalt gering ist
Messung der Schlacken-zusammensetzung	<ul style="list-style-type: none"> • Schlackenproben vor und nach der Behandlung geben Auskunft über Einschlussabsorptionsvermögen der Schlacke 	<ul style="list-style-type: none"> • Komplizierte Methodik
Messung des gelösten Al-Gehaltes	<ul style="list-style-type: none"> • Indikator für das Auftreten einer Reoxidation 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Genauigkeit, da das Al auch durch die Schlacke reoxidiert werden kann

2.1 Quellen von nichtmetallischen Einschlüssen

Während der Stahlherstellung entstehen unweigerlich NME. Diese können unterschiedlichste Ursprünge haben. Die häufigsten exogenen Quellen nichtmetallischer Einschlüsse sind: [2]

- **Desoxidationsprodukte:**

Diese entstehen bei der Desoxidation der Schmelze mit der Hilfe eines Desoxidationsmittels, wie zum Beispiel Aluminium.

- **Reoxidationsprodukte:**

Zur Bildung von Reoxidationsprodukten kommt es zum einen durch Kontakt mit der Atmosphäre und zum anderen durch die Oxidation des verbliebenen Aluminiums in der Schmelze durch andere Oxide in der Schlacke oder im Feuerfestmaterial.

- **Schlackeneinschlüsse:**

Sie entstehen durch das Einziehen von Schlacke in die Stahlschmelze. Dies tritt häufig beim Umfüllen der Schmelze von einem Behälter zum anderen auf. Charakteristisch für diese Art der Einschlüsse ist ihre sphärische Form.

Bei den exogenen Quellen nichtmetallischer Einschlüsse handelt es sich um: [2]

- **Exogene Einschlüsse von anderen Quellen:**

Dazu zählen Schmutz, Bruchstücke des Feuerfestmaterials und Partikel der keramischen Auskleidung. Diese Einschlüsse weisen meist eine unregelmäßige Form auf und dienen als Keimstelle für weitere Einschlüsse.

- **Chemische Reaktionen:**

Ein Beispiel dafür ist die Bildung von modifizierten Einschlüssen durch eine gezielte Kalzium-Behandlung.

Nichtmetallische Einschlüsse, welche von Außen in die Schmelze eingebracht werden, lassen sich vermeiden. Hingegen sind Reoxidationsprodukte und Desoxidationsprodukte, also Einschlüsse die innerhalb der Schmelze entstehen nicht gänzlich vermeidbar, jedoch ist eine Modifizierung der Einschlüsse hinsichtlich Größe, Anzahl, Verteilung und Morphologie möglich. [4]

Der Reinheitsgrad des Stahles wird durch eine Vielzahl von Verfahrensschritten entlang der Stahlherstellung beeinflusst. Dazu zählen der Zeitpunkt und der Ort der Zugabe von Desoxidationsmitteln und Legierungselementen beziehungsweise ihre jeweilige chemische Zusammensetzung, Dauer und Art der sekundärmetallurgischen Behandlung, Transportvorgänge, Spülgasbehandlung, chemische Zusammensetzung des Feuerfestmaterials, Aufnahmefähigkeit der verwendeten Schlacken und das Gießverfahren. [2,4]

Der **Tabelle 2-III** können je nach Verfahrensschritt der Stahlherstellung, die möglichen Quellen der Einschlüsse entnommen werden. [4]

Tabelle 2-III: Mögliche Quellen von Einschlüssen. [4]

Entstehungsort	Quelle	Hauptelemente der NME
Ofen	• Ofenschlacke	Ca
	• Ofenzustellung	Ca
	• Ferrolegierungen	Al, Cr, Si
Abstich	• Oxidation	FeO
	• Feuerfestmaterial von der Abschirmung	Mg, K, Ti
Pfanne	• Desoxidation	
	• Pfannenzustellung	Mg, Ti, K

	<ul style="list-style-type: none"> • Pfannenschlacke 	Ca, Mg
Verteiler	<ul style="list-style-type: none"> • Oxidation • Feuerfestmaterial von Stoppfern und Düsen 	FeO Mg, Ti, K
Kokille	<ul style="list-style-type: none"> • Desoxidation • Feuerfestmaterial 	Mg, Ti, K

Der Reinheitsgrad kann durch eine sekundärmetallurgische Behandlung des Stahls und durch den Strangguss positiv beeinflusst werden. Hierfür spielen Pfannenbehandlung, Stranggussverteiler und Stranggusskokille eine übergeordnete Rolle. Die einschlussabscheidende Wirkung dieser Einflussfaktoren nimmt mit genannter Reihenfolge ab. [2]

Um die negative Wirkung mancher Einschlüsse zu verringern, ist es möglich, eine gezielte Kalzium-Behandlung durchzuführen. Dies führt zu einer Modifikation des Aluminiumoxids zu einem niedrigschmelzenden Kalziumaluminat, was eine verringerte Gefahr des Cloggings zur Folge hat. Zudem werden dadurch harte, scharfkantige Aluminiumoxide in weiche, globulare Kalziumaluminat umgewandelt. Aufgrund dessen kommt es zu verbesserten Stahleigenschaften und weiters verringert sich der abrasive Verschleiß am Zerspanungswerkzeug. [9–14]

2.2 Einfluss nichtmetallischer Einschlüsse auf die Werkstoffeigenschaften von Stahl

Nichtmetallische Einschlüsse treten sehr fein verteilt im Stahl auf und nehmen nur einen geringen Volumsanteil ein. Trotzdem beeinflussen sie seine Eigenschaften signifikant. Diese Wirkung ist zumeist negativ, kann allerdings auch positiv sein. Das Vorhandensein von NME im Stahl verändert dessen Eigenschaften, wie zum Beispiel Korrosionsbeständigkeit, Kerbschlagzähigkeit, Dauerfestigkeit und Warmumformbarkeit. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Änderung dieser Materialeigenschaften. Die Wirkung der NME auf die Zerspanbarkeit wird gesondert in **Kapitel 4.3** detailliert behandelt. [3,4,12,15,16]

Die Wirkung der Einschlüsse auf die Eigenschaften des Stahls kann sowohl durch deren Form als auch Größe, Größenverteilung und chemischer Zusammensetzung bestimmt

werden. Letzteres bestimmt maßgeblich Verformbarkeit, E-Modul und thermischen Ausdehnungskoeffizient der nichtmetallischen Einschlüsse. [3,15,17]

2.2.1 Korrosionsbeständigkeit

Laut Kiessling et al. [18] beeinflussen nichtmetallische Einschlüsse die Korrosionsbeständigkeit des Stahls negativ. Besonders Sulfide erhöhen die Gefahr der Lochkorrosion in einem weiten Spektrum an korrosiven Medien. Dabei fungieren die Sulfide an der Oberfläche als Initiator für die Bildung der Lochkorrosion, dies ist durch die anodische Wirkung der Sulfide im Vergleich zur Stahlmatrix begründet. Die Entstehung der Löcher hängt sowohl von der Zusammensetzung als auch von der Form der Sulfid-Einschlüsse ab. Hierbei weisen längliche Partikel eine höhere Auflösungsgeschwindigkeit als runde mit derselben chemischen Zusammensetzung auf. Kiessling et al. [18] beschreibt, dass durch das Vorhandensein von sulfidischen Partikel des Typs (Mn,Me)-Sulfid im Stahl, die Wahrscheinlichkeit der Lochkorrosion am größten ist. [18]

Zaitsev et al. [19] untersuchten ebenfalls die Wirkung von nichtmetallischen Einschlüssen auf die Korrosionsbeständigkeit. Hierbei wurden 41Cr4-Stähle mit unterschiedlicher Einschlusslandschaft auf ihre Korrosionsbeständigkeit beurteilt. Als Korrosionsmedium fand eine wässrige Lösung aus 9 g/l NaCl und 3,4 g/l MgCl₂ Anwendung. Bei den von ihnen durchgeführten Versuchen konnte festgestellt werden, dass sich vor allem zwei Arten von nichtmetallischen Einschlüssen negativ auf das Korrosionsverhalten auswirken können. Hierzu zählen zum einen Oxisulfide, die als Oxidbestandteil Al₂O₃-MgO-SiO₂ oder CaO-Al₂O₃-MgO mit einem zusätzlichen SiO₂-Gehalt von maximal 5 % enthalten. Zum anderen ebenfalls Oxisulfide aus Kalzium- und/oder Magnesiumaluminat als Oxidkomponente und CaS als Sulfidbestandteil. [19,20]

2.2.2 Ermüdungseigenschaften

Einschlüsse wirken als Initiator für Risse und erhöhen dadurch die Wahrscheinlichkeit für eine Materialermüdung. Nichtmetallische Partikel, welche sich negativ auf die Ermüdungseigenschaften auswirken, müssen zwei Kriterien erfüllen. Zum einen ist eine Mindestgröße abhängig vom Abstand zur Oberfläche nötig. Diese sinkt je näher sich die Einschlüsse an der Werkstückoberfläche befinden. Zum anderen dürfen die Einschlüsse nur geringe plastische Verformbarkeit aufweisen. Diese hängt vom Typ und von der vorherrschenden Temperatur ab. Zu einer Ermüdung des Werkstoffs führen vor allem nicht verformbare Aluminiumoxide, Spinelle und Kalziumaluminat. Bei höheren Temperaturen

erweichen die Kalziumaluminat und dadurch sinkt die schädliche Wirkung dieses Einschlusstyps. Mangansulfide (MnS) besitzen eine gute plastische Verformbarkeit und beeinflussen die Ermüdungseigenschaft des Werkstoffs daher nicht. Die schädliche Wirkung der Oxide kann durch eine Ummantelung aus weichen MnS um die Oxide verringert werden. [4]

Nichtmetallische Einschlüsse bestimmen in einem großen Maße die Dauerfestigkeit von Wälzlagerstählen. Besonders große Einschlüsse verringern die Dauerfestigkeit des Stahls signifikant. Schädlich wirken sich zudem TiN-Einschlüsse aus, da sie aufgrund ihrer scharfkantigen Form eine Rissinitiierung begünstigen. Auch Kalziumaluminat wie CaO-Al₂O₃- und CaO-Al₂O₃-SiO₂-Einschlüsse verringern, aufgrund ihrer zumeist großen Abmessungen im Vergleich zu anderen Einschlusstypen, die Dauerfestigkeit des Werkstoffs. Die Dauerfestigkeit verringert sich ebenfalls durch das Vorhandensein von MnS und Al₂O₃ im Wälzlagerstahl. [21]

Guan et al. [22] untersuchten den Einfluss nichtmetallischer Einschlüsse auf die Rissausbreitung in Wälzlagerstählen. Hierbei führten sie sowohl eine Berechnung der Mises-Spannung als auch eine Simulation für die Rissausbreitung durch. Da bei Wälzlagerstählen hauptsächlich Einschlüsse nah an der Oberfläche zu einer Schädigung führen, beschäftigte sich diese Untersuchung nur mit diesen. Guan et al. [22] stellten fest, dass es durch das Vorhandensein von Einschlüssen nahe an der Lageraufläche während des Abrollens zu einem lokalen Anstieg der Spannung und in Folge dessen zu einer Rissbildung im Material kommt. Die maximale Spannung beziehungsweise die Rissinitiierung tritt hierbei an der Grenzfläche zu Einschluss und Matrix auf. [22]

2.2.3 Kerbschlagzähigkeit

Die Kerbschlagzähigkeit von Stählen hängt von der Anisotropie des Werkstoffs ab. Diese wird wiederum durch das Vorhandensein von Einschlüssen mitbestimmt. Hierbei führen insbesondere große Mangansulfide im Stahl zu einer Anisotropie des Werkstoffs. Diese verformen sich während des Warmwalzprozesses zu dünnen, langgezogenen Einschlüssen, die in Walzrichtung liegen. Aufgrund dieser gerichteten MnS-Einschlüsse sinkt die Kerbschlagzähigkeit des Werkstoffs, wenn dieser 90° zur Walzrichtung belastet wird. Eine solche richtungsabhängige Kerbschlagzähigkeit ist besonders bei Stählen mit hohem Schwefel- und Mangangehalt zu beobachten. Bei geringeren Gehalten an diesen beiden Legierungsbestandteilen entstehen weniger und kleinere Mangansulfide, die dadurch zu einer geringeren Beeinflussung der Kerbschlagzähigkeit führen. [23]

2.2.4 Warmsprödigkeit

Für die Warmsprödigkeit von Stahl sind hauptsächlich FeS-Einschlüsse, welche sich an den Austenitkorngrenzen ansammeln, verantwortlich. Diese weisen einen relativ niedrigen Schmelzpunkt von 1190 °C auf und bilden niedrig schmelzende Eutektika, die bei Temperaturen zwischen 900-1200 °C bereits flüssig auftreten können. Diese niedrigschmelzenden Einschlüsse führen bei höheren Temperaturen zu einer verringerten Scherfestigkeit im Bereich des Einschlusses und begünstigen dadurch die Bildung von Rissen an den Korngrenzen. Die Warmsprödigkeit kann durch eine erhöhte Manganaktivität im Stahl verringert werden. Dies führt zum Abbinden des Schwefels als MnS, welches einen höheren Schmelzpunkt als FeS aufweist und daher die Gefahr der Rissbildung reduziert. [4]

3 Zerspanung

Zerspanung ist das Abtrennen von Werkstoffpartikel auf mechanischem Weg. Es kann entsprechend der DIN 8580 [24] der Hauptgruppe „Trennen“ zugeordnet werden. Des Weiteren wird zwischen „Spanen mit geometrisch unbestimmter“ und „Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide“ unterschieden, siehe DIN 8589-0 [25]. Die Drehanwendung gehört zu Letzterem. [24–26]

Beim Drehen bewegt sich das Werkstück und vollführt die Schnittbewegung. Das Werkzeug hingegen ist statisch und bewegt sich nur entlang der Vorschubrichtung. Die Drehbearbeitung lässt sich abhängig von der Vorschubrichtung, längs oder quer zur Werkstückdrehachse, in Längs- und Querdrehen einteilen, siehe ein schematisches Beispiel in **Abbildung 3-1**. [27]

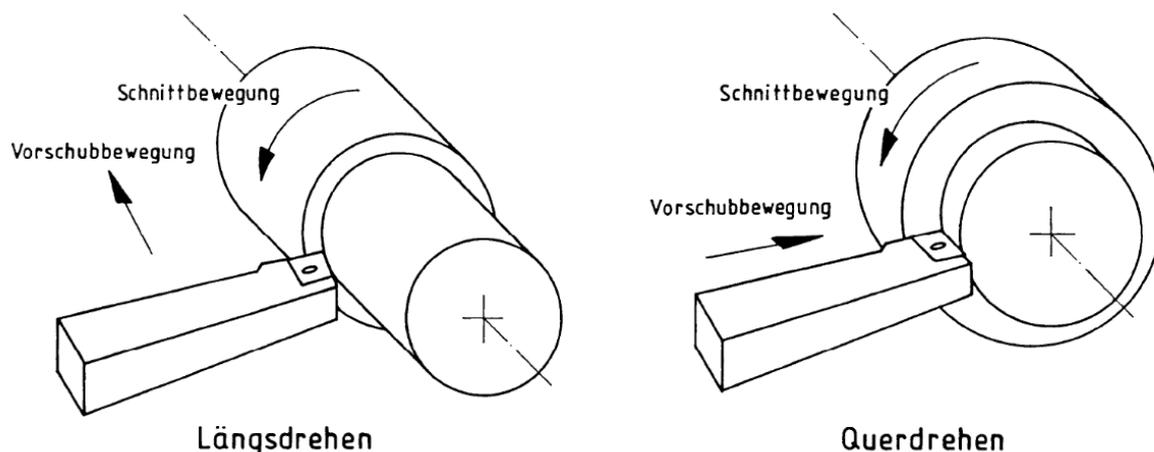


Abbildung 3-1: Längs- und Querdrehen. [26]

Während der Zerspanung erfolgt der Materialtransport über die Spanbildung (**Abbildung 3-2**). Zu Beginn der Spanbildung dringt das keilförmige Werkzeug in den Werkstoff ein, dabei verformt sich das Material elastisch. Sobald die wirkenden Schubspannungen die Fließspannung des Werkstoffs erreichen, kommt es zu einer Materialabscherung entlang der Schneidkeilkante und der Werkstoff wird plastisch verformt. Aufgrund der dabei entstehenden Normalspannungen, welche die Kohäsionskräfte des Materials überschreiten, entstehen Risse. Diese Risse führen zum Brechen des Spans. [26]

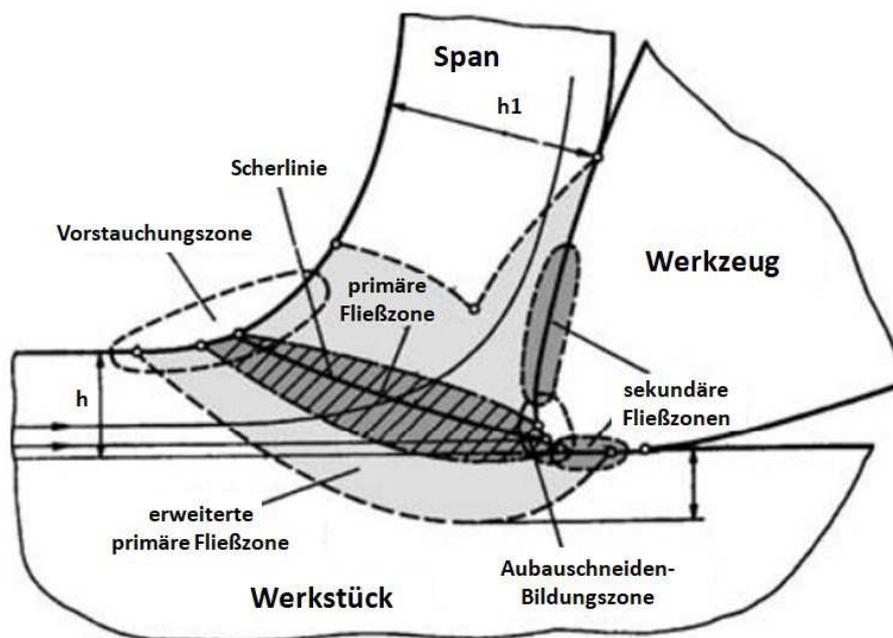


Abbildung 3-2: Spanbildung, nach [26].

Abhängig von den Zerspanungsbedingungen und dem zerspannten Werkstoff gibt es vier verschiedene Spanbildungsarten. Dabei handelt es sich um die Fließspanbildung, die Lamellenspanbildung, die Scherspanbildung und die Reißspanbildung. Dieser Reihenfolge entsprechend sinkt die Neigung zur Bildung von Endlosspänen. Die vier verschiedenen Spanbildungsarten können der **Abbildung 3-3** entnommen werden. [26,28,29]

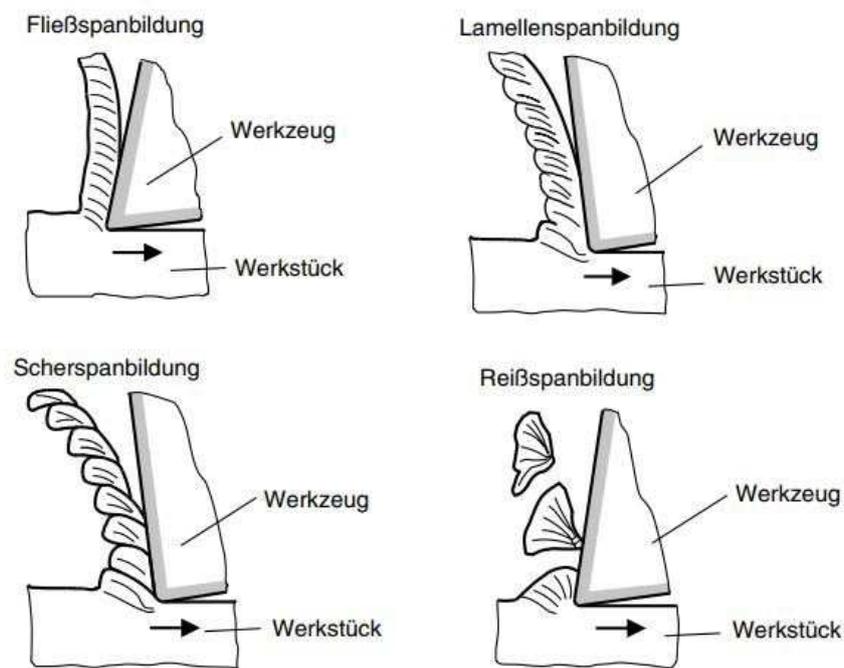


Abbildung 3-3: Spanbildungsarten. [29]

Als Schneidstoffe für die Zerspaltung kommen diverse Werkstoffe in Frage. Hauptanwendung finden Werkzeuge aus: [27]

- Werkzeugstahl
- Schnellarbeitsstahl
- Hartmetall
- Keramik
- Diamant
- Kubisches Bornitrid

Dabei sind Wendeschneidplatten aus beschichtetem Hartmetall am universellsten einsetzbar. Hartmetall ist ein Komposit-Werkstoff, der aus einer harten Phase, wie beispielsweise Wolframkarbid (WC) und einer weichen Phase als Binder, wie Kobalt, besteht. Das WC liefert die benötigte Härte und Verschleißfestigkeit und das Kobalt bringt die gewünschte Zähigkeit mit sich. WC-Co-Hartmetalle können mit weiteren Mischkarbiden wie Titan-, Tantal- und Niob-Karbiden legiert werden, um geeignete Eigenschaften für die Stahlzerspannung zu erhalten. [27,30]

3.1 Verschleiß

Das Werkzeug wird während des Zerspanens einer äußerst komplexen Beanspruchung ausgesetzt, so führen die hohe mechanische Beanspruchung von über 1000 MPa und die auftretenden hohen Temperaturen von über 1000 °C zu einem erhöhten Verschleiß. Der entstehende Verschleiß hängt von einer Vielzahl von verschiedenen Parametern ab. In der **Abbildung 3-4** ist der Einfluss von Schnittgeschwindigkeit, Schnitttiefe und Vorschub auf den Verschleiß und in weiterer Folge auf die während der Zerspanung entstehenden Temperaturen illustriert. Es lässt sich erkennen, dass der Verschleiß am stärksten mit steigender Schnittgeschwindigkeit und am geringsten mit steigender Schnitttiefe zunimmt. [29,31,32]

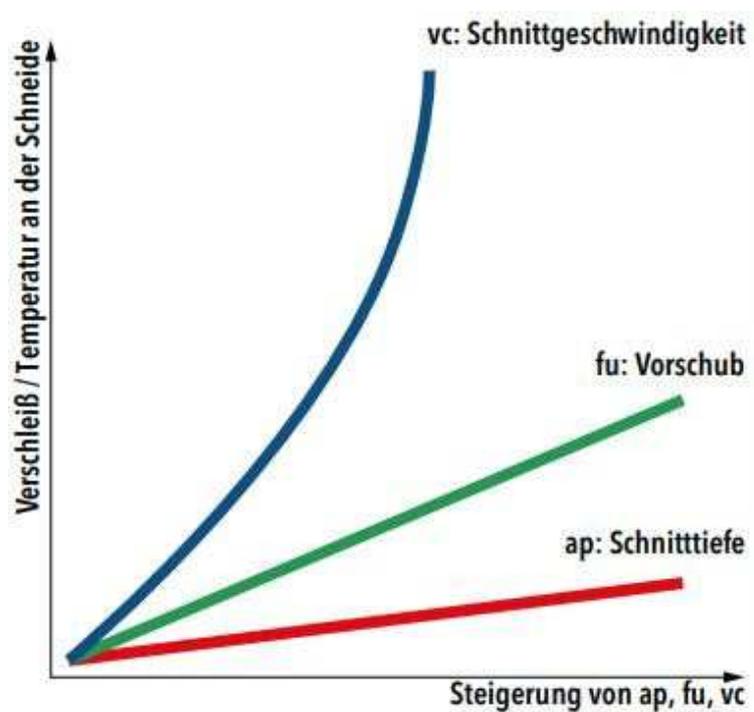


Abbildung 3-4: Verschleiß in Abhängigkeit von Vorschub, Schnitttiefe und Schnittgeschwindigkeit. [32]

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen auftretenden Verschleißmechanismen in der Drehanwendung näher beschrieben. [29,31]

Die vier wichtigsten Verschleißmechanismen sind Adhäsion, Abrasion, Oberflächenzerrüttung und tribochemische Reaktionen (**Abbildung 3-5**). [31]

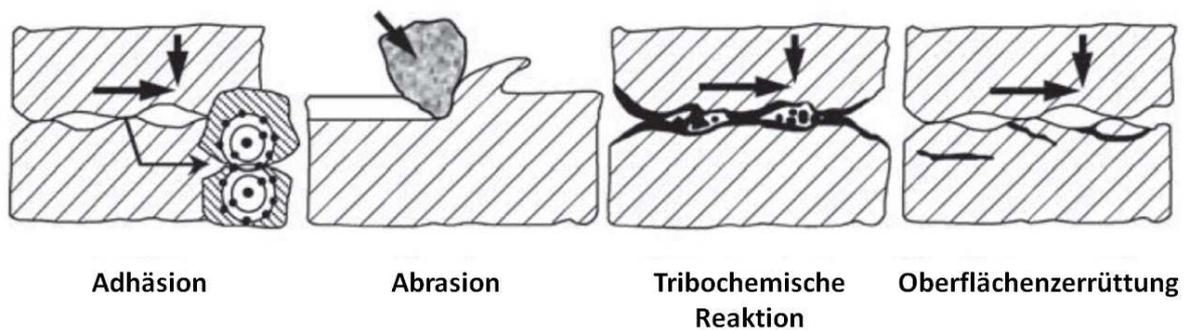


Abbildung 3-5: Schematische Darstellung der Verschleißmechanismen, nach [31].

3.1.1 Adhäsion

Charakteristisch für die Adhäsion ist die Bildung einer Grenzflächen-Haftverbindung zwischen Werkzeug und Werkstoff. Dabei handelt es sich um eine durch Mikroverschweißungen hervorgerufene atomare Bindung. Während des Zerspanprozesses kommt es wiederholt zu einer Mikroverschweißung der Reibpartner, welche allerdings durch die Relativbewegung der Reibpartner wieder verformt, verfestigt und abgeschert wird. [31]

3.1.2 Abrasion

Abrasion tritt auf, wenn Oberflächenerhebungen des Werkstoffs oder Partikel die Oberfläche des Werkzeuges penetrieren. Bedingt durch die zusätzlich auftretende Relativbewegung der Verschleißpartner kommt es zur Entstehung von Riefen auf der Schneidstoffoberfläche und zur Bildung von mikroskopisch kleinen Spänen. [31]

3.1.3 Oberflächenzerrüttung

Eine Oberflächenzerrüttung entsteht, wenn die Schneidenoberfläche einer durch Reibung verursachten Wechselbeanspruchung ausgesetzt wird. Dies kann in eine Gefügeumbildung und in eine Rissbildung mit fortschreitendem Risswachstum resultieren. Im Zuge dieser Vorgänge kann es zu einer Abtrennung von Schneidstoffpartikeln kommen. [31]

3.1.4 Tribooxidation

Bei der Tribooxidation findet eine chemische Reaktion zwischen dem Werkzeug- und dem Werkstückmaterial mit Komponenten des Kühlschmiermittels oder mit der umgebenden Luft

statt, wobei dies eine durch Reibung bedingte Aktivierung voraussetzt. Hierbei können sich sowohl stabile verschleißhemmende als auch nichtstabile verschleißsteigernde Grenzschichten bilden. [31]

3.1.5 Diffusion

Diffusion ist durch einen Platzwechsel der Atome zwischen Schneidstoff und Werkstoff bestimmt. Dieser Vorgang setzt eine thermische Aktivierung voraus. Die Verschleißsteigerung kann sowohl durch das Herausdiffundieren der Atome des Schneidwerkstoffs als auch durch das Eindiffundieren von Fremdatomen in das Werkzeugmaterial erfolgen. [31]

3.1.6 Verschleißformen

Während der Zerspanung treten an der Schneidkante charakteristische Formen des Verschleißes auf. In der **Abbildung 3-6** ist das Aussehen und der Auftrittsort üblicher Verschleißformen ersichtlich. Die zwei bedeutendsten Verschleißformen sind der Freiflächen- und der Kolkverschleiß. Häufig ist auch noch eine plastische Verformung an der Schneidenecke zu beobachten. [31]

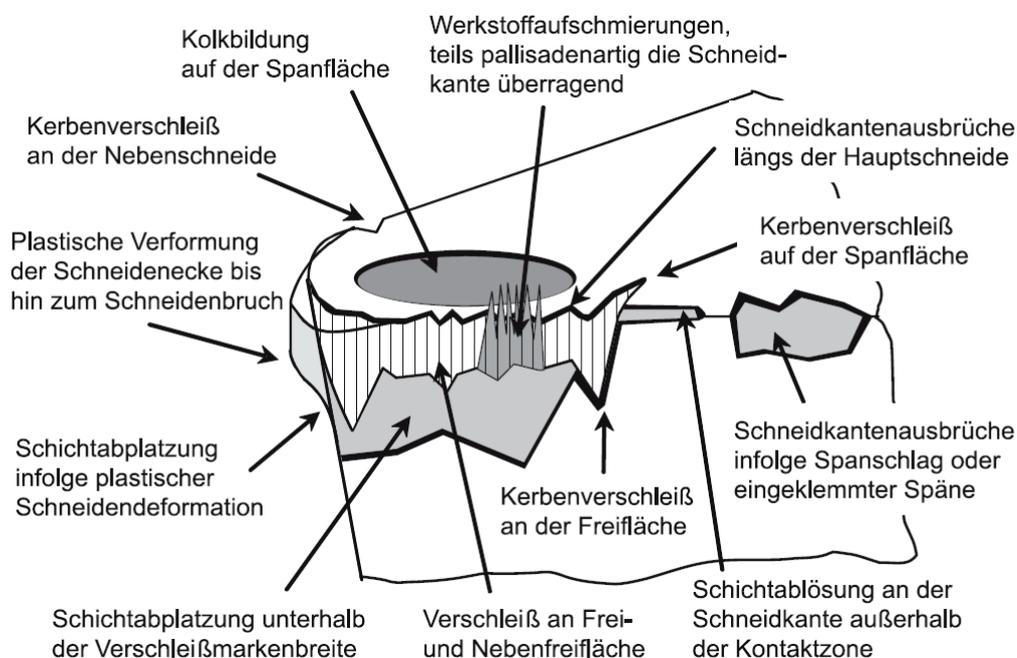


Abbildung 3-6: Verschleißformen. [31]

Freiflächenverschleiß tritt an den Freiflächen der Hauptschneide und der Nebenschneide auf (**Abbildung 3-7a**), hat senkrechte Abtragsriefen und entsteht vor allem durch Reibung. Die Verschleißmarkenbreite ist über die Breite der sichtbaren Riefen definiert. Mit Hilfe dieser Kenngröße kann der Verschleiß des Werkzeugs beurteilt werden. Als kritische Verschleißmarkenbreite wird für Schruppdrehen 0,6 bis 1,5 mm und für das Schlichtdrehen 0,3 bis 0,4 mm als Grenzwert herangezogen. In der **Abbildung 3-7** ist die Verschleißmarkenbreite VB für einen Drehmeißel ersichtlich. [26,27]

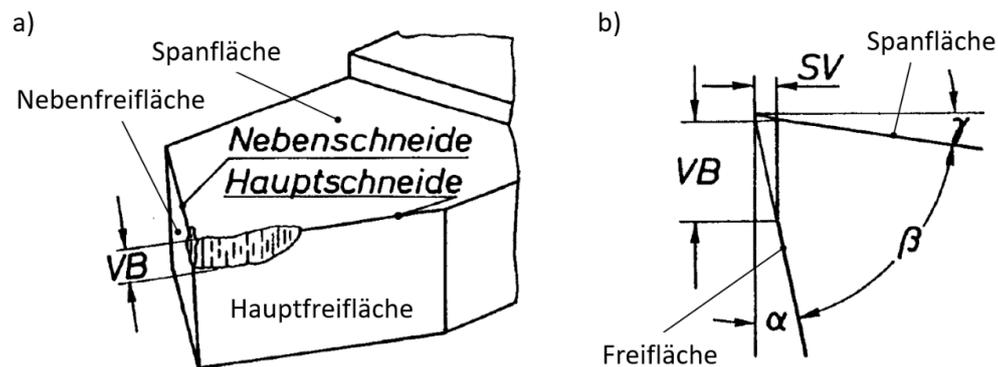


Abbildung 3-7: Verschleißmarkenbreite an einem Drehmeißel, nach [26].

Kolkverschleiß ist eine Verschleißform, welche durch eine Kombination aus Diffusion und Reibung entsteht. Sie wird durch eine kraterförmige Vertiefung auf der Spanfläche charakterisiert. Zur Bestimmung des Kolkverschleißes wird das Kolkverhältnis K herangezogen. Das Kolkverhältnis errechnet sich aus der Division der Kolktiefe KT durch den Kolkmittenabstand zur Schneide KM, ersichtlich in Gleichung (3.1). [26]

$$K = \frac{KT}{KM} \quad (3.1)$$

Das höchst zulässige Kolkverhältnis entspricht 0,4. Ab diesem Grenzwert verringert sich die Stabilität der Schneide und die Gefahr eines plötzlichen Schneidkantenausbruchs steigt. Die Bestimmung der nötigen Parameter KT und KM erfolgt laut **Abbildung 3-8**. [26]

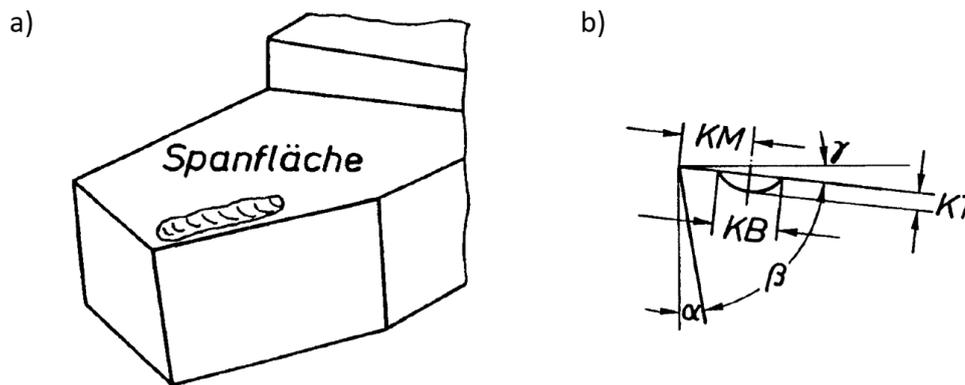


Abbildung 3-8: Kolkverschleiß an einem Drehmeißel. [26]

Eine **plastische Verformung** an der Schneidenecke entsteht, wenn die mechanischen und thermischen Belastungen auf das Werkzeug größer sind, als der Verformungswiderstand des Schneidstoffs. Die Verformung wird beeinflusst durch: [31]

- Festigkeit des zu zerspanenden Werkstoffs
- Wendeschneidplattengeometrie
- Schnittparameter
- Druckfestigkeit, Härte und Kriechverhalten des Schneidstoffs bei hoher Temperatur

Bei Hartmetallen tritt die plastische Verformung der Werkzeugschneide vorwiegend bei großen Kräften und hohen Temperaturen auf. Die hohen Temperaturen entstehen vor allem durch eine hohe Schnittgeschwindigkeit. Mit steigendem Binderanteil im Hartmetall verstärkt sich die Neigung zur plastischen Verformung. Diese Verformung an der Schneidenecke führt zu einer Steigerung des Verschleißes. Zusätzlich erhöht sich die Gefahr eines plötzlichen Versagens des Werkzeugs durch eine Abscherung der Schneidkante. [31]

Bei einer **Aufbauschneide** handelt es sich um eine Werkstoffanlagerung sowohl auf der Schneidkante als auch auf der Spanfläche (**Abbildung 3-9a**). Aufgrund der starken Umformung und Kaltverfestigung weisen die angelagerten Werkstoffpartikel eine wesentlich höhere Härte als das Werkstückgrundmaterial auf. Das Vorhanden einer Aufbauschneide am Werkzeug führt zu einer Veränderung der Schneidkeilgeometrie. Bei hohen Schnittgeschwindigkeiten und daraus resultierenden Temperaturen, welche oberhalb der Rekristallisationstemperaturen des Werkstoffs sind, kommt es während der Umformung zu keiner Kaltverfestigung und in weiterer Folge zu einem Abbau der Aufbauschneide (**Abbildung 3-9b**). [29]

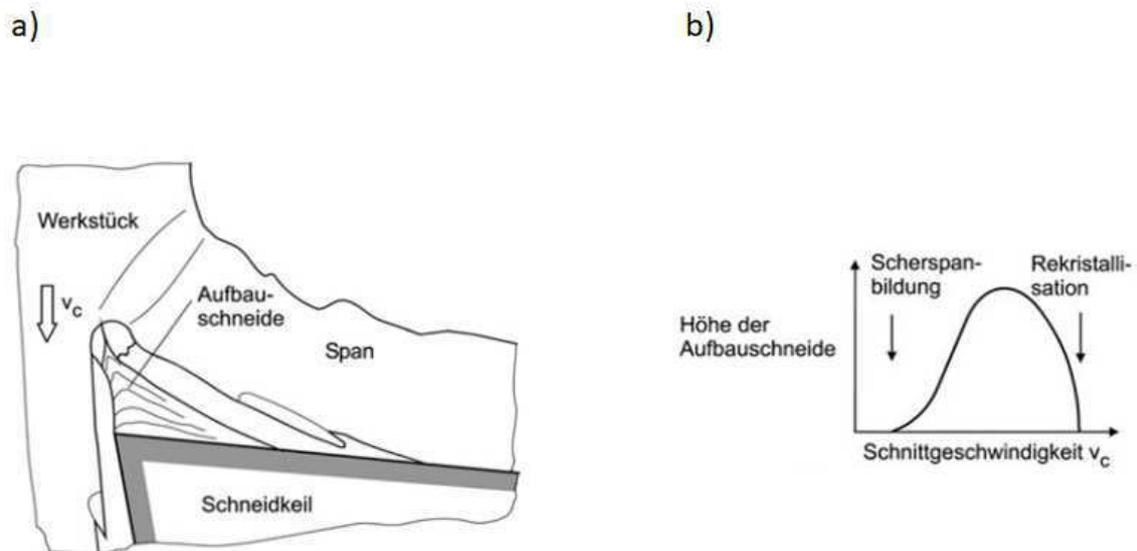


Abbildung 3-9: Aufbauschneidenbildung. [29]

Neben diesen Hauptverschleißformen gibt es noch eine Vielzahl anderer Verschleißformen, wie: [26,31]

- Werkstoffaufschmierung
- Kammrisse
- Kantenabrundung
- Kerben an der Haupt- und Nebenschneide
- Kerben auf der Spanfläche
- Schichtabplatzung
- Ausbrüche an der Schneidenkante

3.2 Standzeit

Standzeit ist die nutzbare Zeit in Minuten, in welchem sich das Werkzeug im Eingriff befindet. Diese entspricht dem Zeitraum zwischen Anschnitt und Unbrauchbarwerden der Schneide. Definierte Standzeitkriterien wie zum Beispiel die Verschleißmarkenbreite bestimmen den Ausscheidezeitpunkt des Werkzeugs. Die Standzeit eines Werkzeuges hängt von einer Vielzahl an Einflussgrößen ab. Haupteinfluss haben die Werkstoff-Schneidstoff-Paarung, die Werkzeuggeometrie und die Maschineneinstellungen bei der Zerspaltung. [29,31]

4 Zerspanbarkeit

Bei der Herstellung von Geräten, Bauteilen und Werkzeugen aus Stahl kommt so gut wie immer eine spanende Bearbeitung zum Einsatz. Zu den spanenden Bearbeitungsverfahren zählen zum Beispiel Bohren, Fräsen, Drehen, Sägen, Honen, Schleifen und Polieren. Bei einer Vielzahl an Produkten, die aus Gesenk- und Freiformschmiedestücken, Fließpressteilen, Stahlformgussbauteilen oder aus Stabstahl als Vorprodukt hergestellt werden, ist zur Erreichung der Endform und der geforderten Oberflächengüte eine umfassende zerspanende Bearbeitung unumgänglich. Um eine hohe Wirtschaftlichkeit der Fertigung, vor allem bei der Serienfertigung sicherzustellen, ist eine gute Zerspanbarkeit des Stahls essenziell. [33]

Die Zerspanbarkeit eines Werkstoffs kann nicht eindeutig definiert werden. Sie obliegt immer der Beurteilung des jeweiligen Zerspanungstechnikers, welcher sie bewertet. Grundsätzlich gibt es fünf Hauptgruppen mit welchen eine Abschätzung der Zerspanbarkeit möglich ist. Diese und ihre dazugehörigen Unterpunkte sind in der **Abbildung 4-1** ersichtlich. [34]



Abbildung 4-1: Hauptgruppen zur Bewertung der Zerspanbarkeit, nach [34].

Der **Werkzeugverschleiß** nimmt bei der Beurteilung der Zerspanbarkeit eine übergeordnete Rolle ein, da dieser bei der Massenfertigung über die Wirtschaftlichkeit der Zerspanung entscheidet. Die **Oberflächenbeschaffenheit** des Werkstücks ist für dessen Gebrauch von großer Wichtigkeit. Sie hängt werkzeugseitig von den Schnittbedingungen und der Schneidenform sowie von der Werkzeugmaschine ab. Werkstückseitig wird sie von der Scherfestigkeit, dem Klebeverhalten und der Verformbarkeit des Werkstoffs beeinflusst. Die **Spanbildung** ist für einen störungsfreien Zerspanungsablauf von großer Bedeutung, denn die Bildung von Wirr-, Band- und langen Wendelspänen führt zu einer eingeschränkten Späneabfuhr und daraus folgend zu einer Störung des Zerspanungsprozesses. Die **Schnittkraft** hilft bei der Auswahl des Werkzeugs und der Werkzeugmaschine und bestimmt den nötigen Energiebedarf für die Zerspanung. [33]

4.1 Zerspanbarkeit von Stahlwerkstoffen

Bei der Zerspanung von Stählen gibt es eine Vielzahl an Einflussfaktoren, die dessen Zerspanbarkeit entweder positiv oder negativ beeinflussen können, dieses Unterkapitel beschäftigt sich mit diesen.

4.1.1 Mechanische Eigenschaften

Die Festigkeit des Stahls spielt bei dessen Zerspanung eine wesentliche Rolle. Für eine gute Zerspanbarkeit des Werkstoffs muss sich seine Festigkeit in einem bestimmten Zugfestigkeitsbereich befinden. Eine zu geringe Zugfestigkeit des zerspannten Materials begünstigt die Bildung von Aufbauschneiden am Werkzeug und es kommt vermehrt zum Schmieren des Stahls. Des Weiteren erhöht sich die Schnittkraft, da es zu einer starken Spanstauchung kommt. Dies hat einen erhöhten Verschleiß am Werkzeug zur Folge. Stähle mit einer sehr hohen Festigkeit führen ebenfalls zu einer verringerten Zerspanbarkeit, da die hohe Härte des Stahls einen erhöhten Verschleiß am Werkzeug bewirkt. [33]

4.1.2 Stahlgefüge

Die Zerspanbarkeit von Stählen wird in hohem Maße durch dessen Gefügebestandteile bestimmt. In Stahl können unter anderem folgende Phasen in verschiedenen Wärmebehandlungszuständen enthalten sein: [31,35,36]

- Ferrit
- Zementit
- Perlit
- Austenit
- Bainit
- Martensit
- Karbide
- Nichtmetallische Einschlüsse

Stahl kann je nach Kohlenstoffgehalt, Legierungselemente und Wärmebehandlungszustand aus einem oder mehreren dieser Gefügekomponenten bestehen. Jeder dieser Gefügebestandteile beeinflusst die Zerspanbarkeit unterschiedlich, da er andere mechanische Eigenschaften wie Härte, Zugfestigkeit und Dehnung besitzt. [31]

Ferrit weist eine geringe Festigkeit und Härte auf, ist allerdings gut verformbar. Bei der Zerspanung kann dieses Gefüge zu folgenden Problemen führen: [31]

- Bildung von Aufbauschneiden und Stahlaufschmierungen am Werkzeug durch dessen hohe Adhäsionsneigung
- Ausbildung eines Grates am Werkstück
- Schlechte Oberflächenqualität des Werkstücks

- Auftreten von schädlichen Wirr- und Bandspänen aufgrund seines hohen Formänderungsvermögens

Zementit zeichnet sich durch eine sehr hohe Härte und ein sprödes Werkstoffverhalten aus. Aufgrund dieser Eigenschaften ist er kaum zerspanbar. Zementit kann je nach Abkühlbedingung und Kohlenstoffgehalt, frei oder als Bestandteil von Perlit und Bainit im Gefüge vorkommen. [31]

Das eutektoide Phasengemisch aus Ferrit und Zementit wird als **Perlit** bezeichnet. Perlit weist zumeist eine zeilenartige Struktur auf, jedoch kann mittels Weichglühen eine globulare Eiformung der Zementitlamellen im Ferrit erreicht werden. Perlit besitzt eine hohe Härte und eine geringe Verformbarkeit, aus diesem Grund führt es bei der Zerspanung zu einem starken abrasiven Verschleiß und zu hohen Schnittkräften. Diese mechanischen Eigenschaften haben auch folgende positive Effekte auf die Zerspanungseigenschaften: [31]

- Verringerung von Aufklebungen und Aufbauschneidenbildung
- Verringerung der Gratbildung am Werkstück
- Verbesserung der Oberflächengüte des Werkstücks
- Ausbildung von erwünschten Spanarten

Austenit ist Hauptbestandteil von vielen nichtrostenden Stählen und zeichnet sich durch eine geringe Härte aus, diese kann jedoch mittels Kaltverfestigung gesteigert werden. Dieses Gefüge führt bei der Zerspanung durch dessen hohe Verformbarkeit und Zähigkeit zum einen zu einer erhöhten Bildung von Aufbauschneiden und Aufschmierungen am Werkzeug und zum anderen zur Bildung von unerwünschten Band- und Wirrspänen. Aufgrund der Tendenz des Austenits zur Kaltverfestigung führt die während der Zerspanung auftretende plastische Verformung zu einer Festigkeitssteigerung der Werkstückoberfläche, die beim darauffolgenden Schnitt das Spanen erschwert. Des Weiteren besitzen austenitische Stähle eine um etwa 1/3 geringere Wärmeleitfähigkeit als unlegierte Stähle. Dies führt zu einer schlechteren Wärmeabfuhr über den Span und in weiterer Folge zu einer erhöhten Temperatureinwirkung auf die Werkzeugschneide. [31]

Martensit weist ein feinnadeliges Gefüge auf, welches sehr hart und spröde ist. Aufgrund dieser Eigenschaft lässt es sich nur schwer zerspanen. Martensit führt während der Zerspanung zu einem erhöhten abrasiven Verschleiß und zu einer verstärkten mechanischen und thermischen Einwirkung auf das Werkzeug. [31]

4.1.3 Wärmebehandlungszustand

Mit Hilfe einer Wärmebehandlung lässt sich das gewünschte Gefüge hinsichtlich Anteil, Form und Verteilung der Gefügebestandteile gezielt einstellen. Folglich können mittels einer Wärmebehandlung die mechanischen Eigenschaften und somit auch die Zerspanbarkeit des Werkstoffs beeinflusst werden. [31]

4.1.4 Legierungselemente

Legierungselemente können sowohl die Ausbildung des Gefüges beeinflussen, als auch zu einer Bildung von Ausscheidungen und Einschlüssen führen. Somit kann dadurch die Zerspanbarkeit des Stahls beeinflusst werden. [31]

Nickel führt zu einer Festigkeitssteigerung des Stahls, dies hat eine Verringerung der Zerspanbarkeit zur Folge. Vor allem bei austenitischen Nickelstählen mit hohem Nickel-Gehalt ist die Verringerung besonders ausgeprägt. Durch die Zugabe von **Mangan** kommt es zu einer besseren Härbarkeit und einer Steigerung der Festigkeit des Stahls. Mangan bildet mit **Schwefel** Mangansulfide. Diese verbessern bei Stählen mit niedrigem Kohlenstoffgehalt die Zerspanbarkeit, jedoch nur bis zu einem Mangan-Gehalt von 1,5 %. Durch die MnS im Stahl kommt es zudem zu einer verbesserten Oberflächenqualität des Werkstücks, zu einer verringerten Aufbauschneidenbildung und zum Auftreten von kurzbrüchigen Spänen. Lange Mangansulfide beeinträchtigen jedoch die mechanischen Eigenschaften des Stahls, wie zum Beispiel Festigkeit und Kerbschlagzähigkeit. **Silizium** steigert die Festigkeit der Ferrit-Phase im Gefüge und bildet mit Sauerstoff harte Siliziumoxid-Einschlüsse. Aufgrund dessen erhöht sich der Werkzeugverschleiß. Die Zugabe von **Molybdän** und **Chrom** bewirkt eine verbesserte Härbarkeit. Dadurch verändert sich die Festigkeit und das Gefüge des Stahls und beeinflusst somit die Zerspanbarkeit. Bei Stählen mit hohem Legierungs- und Kohlenstoffgehalt bilden Chrom, Molybdän und **Wolfram** Sonder- und Mischkarbide, welche die Zerspanbarkeit herabsetzen. Bei Automatenstählen kommt **Phosphor** als Legierungselement zum Einsatz, um eine gute Zerspanbarkeit zu gewährleisten. Phosphor bewirkt eine Versprödung des Ferrits im Stahl und hat die Bildung von kurzbrüchigen Spänen zur Folge. Diese positive Beeinflussung der Zerspanbarkeit ist nur bis zu einem Phosphor-Gehalt von 0,1 % beobachtbar, darüber findet ein erhöhter Werkzeugverschleiß statt. Das Zulegieren von **Titan** und **Vanadium** führt zur Bildung von fein verteilten Karbiden und Karbonitriden. Diese bewirken eine Kornfeinung und in Folge dessen eine Erhöhung der Festigkeit, was wiederum in einer Senkung der Zerspanbarkeit resultiert. **Blei** im Stahl bildet aufgrund dessen geringer Schmelztemperatur während der

Zerspanung eine schützende Blei-Schicht zwischen Werkstoff und Werkzeug, dies resultiert in einen verringerten Werkzeugverschleiß. [31]

4.2 Zerspanbarkeit von Werkzeugstählen

Laut Klocke et al. [31] gibt es bei der Beurteilung der Zerspanbarkeit von Werkzeugstählen hauptsächlich die Unterteilung in legierte und unlegierte Werkzeugstähle. Legierte Werkzeugstähle weisen zumeist einen hohen Kohlenstoff- und Legierungsgehalt an Chrom, Molybdän und Wolfram auf. Dies führt zur Bildung von harten Sonder- und Mischkarbiden, welche die Zerspanbarkeit stark negativ beeinflussen. Sowohl legierte als auch unlegierte Werkzeugstähle werden aufgrund ihrer hohen Härte und Festigkeit zumeist im weichgeglühten Zustand spanend bearbeitet, da durch die eingeformten Zementitlamellen der Verschleiß am Werkzeug verringert wird. Das Weichglühen führt jedoch zu einer verschlechterten Spanbildung und zu einer erhöhten Neigung zur Aufbauschneidenbildung, da der Werkstoff durch das Weichglühen eine höhere Adhäsionsneigung aufweist. Dies bedingt wiederum eine schlechte Zerspanbarkeit, allerdings ist der Verschleiß am Werkzeug geringer. [9,31]

4.3 Einfluss nichtmetallischer Einschlüsse auf die Zerspanbarkeit

Nichtmetallische Einschlüsse bestimmen in großen Maßen die Zerspanbarkeit des Stahls. Vor allem der Verschleiß am Werkzeug wird von NME beeinflusst. Dies betrifft hauptsächlich den Freiflächen- und den Kolkverschleiß. Da die Temperatur während des Zerspanens an der Freifläche um einige Hundert Grad Celsius geringer ist als an der Spanfläche haben die Einschlüsse auf der neu gebildeten Werkstückoberfläche annähernd dieselben mechanischen Eigenschaften wie bei Raumtemperatur und wirken daher sehr abrasiv. Dies führt zu einem verstärkten Freiflächenverschleiß. Die erhöhte Temperatur an der Spanfläche führt hingegen zur Bildung eines diffusionsbedingten Kolkverschleißes. Manche Einschlüsse sind in der Lage, den Kolkverschleiß durch die Bildung einer Diffusionsbarriere zu vermindern. [4]

Es wird berichtet, dass nichtmetallische Einschlüsse die folgenden Wirkungen auf den Zerspanungsprozess aufweisen sollten, um die Zerspanbarkeit des Stahls positiv zu beeinflussen: [4,10]

- Erhöhung der Spannung in der Scherzone, dies bewirkt eine Rissinitiierung und verbessert dadurch die Spannbildung
- Aktive Teilnahme am Materialfluss, führt zu einer erleichterten Abscherung
- Bildung einer Diffusionsbarriere an der Spanfläche des Werkzeugs
- Bildung einer glatten Werkstückoberfläche, ohne abrasiven Verschleiß an der Werkzeugfreifläche
- Schmierende Wirkung

Bei der Zerspanung von Stahlwerkstoffen spielen nachstehende Einflussgrößen betreffend nichtmetallischer Einschlüsse ein Rolle: [4,37]

- Einschlussanzahl
- Einschlussgröße
- Einschlussform
- Einschlusszusammensetzung
- Einschlussverteilung
- Abstand zwischen den Einschlüssen

Ánmark et al. [10,36–38] führten Untersuchungen durch, die sich mit dem Einfluss von nichtmetallischen Einschlüssen auf die Zerspanbarkeit beschäftigten. Dabei wurden drei Kohlenstoffstähle mit ähnlicher Zusammensetzung aber unterschiedlichem Reinheitsgrad auf deren Zerspanbarkeit beurteilt. Die chemische Zusammensetzung der Stähle ist in der **Tabelle 4-I** ersichtlich. Der erste Stahl mit der Bezeichnung R war die Standardqualität, beim zweiten handelte es sich um einen Stahl mit verbessertem Reinheitsgrad mit der Kennzeichnung C. Des Weiteren wurde ein mit Kalzium behandelter Kohlenstoffstahl mit noch höherem Reinheitsgrad abgekürzt mit UC verwendet. Alle drei Stahlgüten befanden sich beim Zerspanen in einem weichgeglühten Zustand. [10,36–38]

Tabelle 4-I: Chemische Zusammensetzung der von Ánmark et al. [37] untersuchten Stähle, nach [37].

Bezeichnung	Stahlgüte	C	Mn	Cr	Ni	S	O	Ca
		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
R	20NiCrMo2-2	0,21	0,88	0,56	0,50	0,028	0,0009	0,0002
C	20NiCrMo7	0,20	0,60	0,53	1,69	0,003	0,0005	0,0002
UC	16NiCr6-4 F	0,17	0,78	1,13	1,35	0,002	0,0004	0,0010

Bei den durchgeführten Zerspanungsversuchen handelte es sich um Plandrehversuche mit Wolframkarbid-Wendeschnidplatten, bei denen der Vorschub von 0,3 mm konstant gehalten und die Schnittgeschwindigkeit zwischen 280-560 m/min variiert wurde. Im Zuge der Versuche kam eine 5 % Öl-Emulsion zum Einsatz und die Zustellung wechselte zwischen zwei und drei Millimeter. Die Beurteilung der Standzeit, der bei den Versuchen verwendeten Wendeschneidplatten erfolgte über die Verschleißmarkenbreite an der Freifläche. Der maximal erlaubte Wert war hierfür 0,3 mm. Die Ergebnisse der Standzeitversuche von Ánmark et al. [10,38] können der **Abbildung 4-2** entnommen werden. Es ist erkennbar, dass die Standzeit für die drei Stahlgüten mit steigendem Reinheitsgrad abnimmt. Die optische Untersuchung der Wendeschneidplatten zeigte bei der Stahlgüte C und UC einen stärkeren Kolkverschleiß verglichen mit der Stahlgüte R, der UC-Stahl führte zum stärksten Kolkverschleiß. Dieses Ergebnis spiegelte sich auch im Freiflächenverschleiß wieder. Bei einer REM-EDX-Untersuchung der Stahlaufschmierungen auf der Spanfläche der verwendeten Wendeschneidplatten konnte bei den Stahlgüten C und UC die Elemente Fe, C, O und Ni gefunden werden, bei der Stahlgüte R zusätzlich auch noch Schwefel. [10,38]

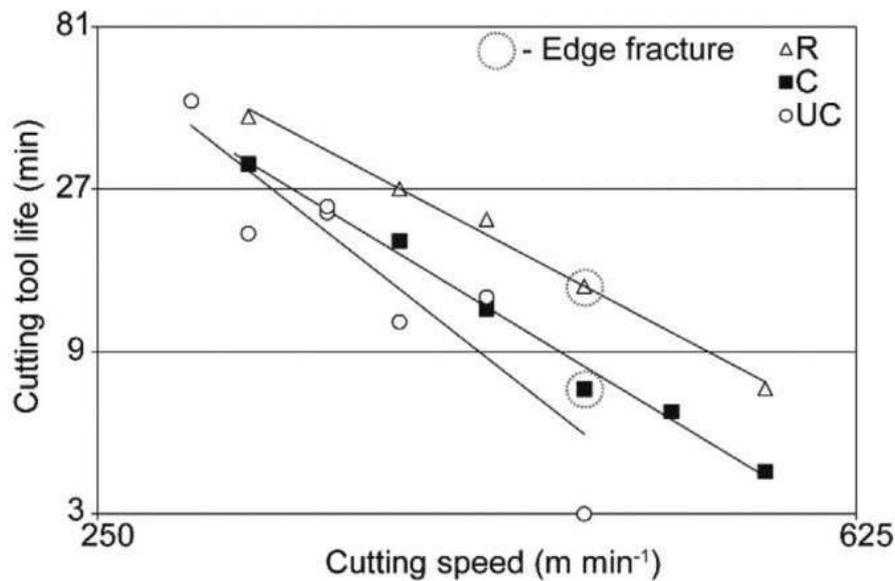


Abbildung 4-2: Ergebnisse der Standzeitversuche von Ánmark et al. [38].

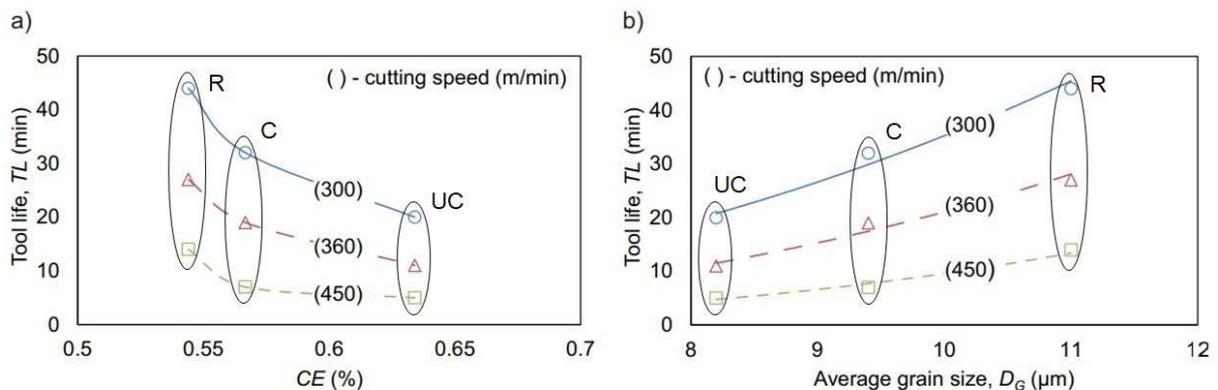
Um die Zerspanbarkeit besser beurteilen zu können, wurden von Ánmark et al. [38] auch Spanbruchtests mit der Variation von Schnittgeschwindigkeit, Zustellung und Vorschub durchgeführt. Diese zeigten für die Stahlgüte R das beste Ergebnis. Zudem konnte festgestellt werden, dass mit steigendem Reinheitsgrad die Späne eine ungünstigere Form annahmen. Ánmark et al. [38] führten dieses Ergebnis auf die Steigerung der Spannung in der Scherzone durch die enthaltenen Sulfide in der Stahlgüte R und die dadurch erhöhte Neigung zur Rissbildung zurück. Dadurch entstanden kurzbrüchige Späne, welche sich positiv auf das Verschleißverhalten der Wendeschneidplatten auswirkten. Darüber hinaus berichteten sie, dass der enthaltene Schwefel zur Bildung einer schützenden Schicht auf dem Werkzeug führte. Diese kann zum einen als Barriere für den Freiflächenverschleiß und zum anderen als Diffusionsbarriere für den Kolkverschleiß fungieren. Die Schicht kann sowohl einen positiven als auch einen negativen Einfluss auf den Verschleiß haben. Vor allem bei dem diffusionsbedingten Kolkverschleiß kann das Fehlen der schützenden Schicht zu einer verringerten Werkzeuglebensdauer führen. [38]

Ánmark et al. [37] untersuchten bei ihren Zerspanungsversuchen auch den Einfluss des äquivalenten Kohlenstoffgehaltes, Korngröße und Mikrohärtigkeit der drei verschiedenen Stahlgüten auf deren Zerspanbarkeit. Die Materialkennwerte der drei Stahltypen können der **Tabelle 4-II** entnommen werden. [37]

Tabelle 4-II: Materialkennwerte der verschiedenen Stahlgüten, nach [37].

Bezeichnung	Äquivalenter Kohlenstoffgehalt [%]	Durchschnittliche Korngröße [μm]	Mikrohärte [HV5]
R	0,54	$11,0 \pm 0,3$	149 ± 4
C	0,57	$9,4 \pm 0,5$	165 ± 6
UC	0,63	$8,2 \pm 0,3$	171 ± 1

Es zeigte sich, dass eine geringe durchschnittliche Korngröße die Lebensdauer des Werkzeugs senkt. Denn durch die hohe Anzahl an Korngrenzen erhöht sich der nötige Kraftaufwand zum Zerspanen und verringert somit die Standzeit der Wendeschneidplatte. Zudem führt auch ein hoher äquivalenter Kohlenstoffgehalt, aufgrund der resultierenden höheren Materialhärte, zu einer Verringerung der Werkzeuglebensdauer. In der **Abbildung 4-3** ist die Standzeit der Versuche in Abhängigkeit von dem äquivalentem Kohlenstoffgehalt (a) und der durchschnittlichen Korngröße (b) ersichtlich. Der Einfluss vom äquivalentem Kohlenstoffgehalt und der durchschnittlichen Korngröße auf die Zerspanbarkeit ist bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten am größten. [37]

**Abbildung 4-3:** Standzeit in Abhängigkeit von äquivalentem Kohlenstoffgehalt und durchschnittlicher Korngröße, nach [37].

Ånmark et al. [37] untersuchten auch die Einschlusslandschaft der drei zerspanen Stahlgüten. Hierzu nahmen sie aus allen drei Stahlchargen eine $15 \times 10 \times 4$ mm große Probe, lösten die Stahlmatrix mittels elektrolytischer Extraktion und untersuchten die extrahierten nichtmetallischen Einschlüsse mit einer manuellen REM/EDX-Analyse. Es konnte festgestellt werden, dass die Stahlgüte R eine viel größere Menge an

nichtmetallischen Einschlüssen (207 Partikel) aufwies als C (119 Partikel) und UC (70 Partikel). In der **Abbildung 4-4** sind für alle drei Stahlgüten die enthaltenen Einschlussarten (a) und ihr Massenanteil sowie Größenverteilung der Einschlüsse (b) dargestellt. [37]

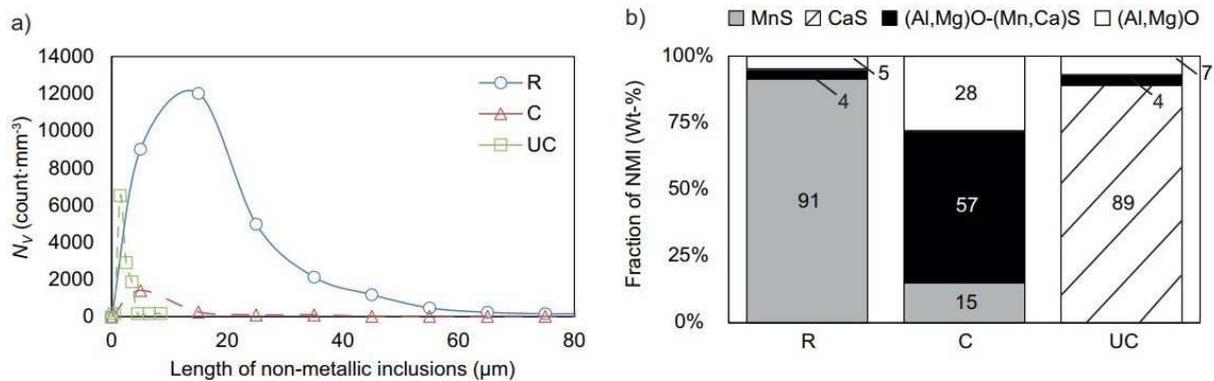


Abbildung 4-4: Massenanteil sowie Größenverteilung der extrahierten nichtmetallischen Einschlüsse. [37]

Es zeigte sich, dass der Stahl R sehr viele langgestreckte MnS mit einer Länge von bis zu 145 µm aufwies. Zudem waren auch noch komplexe Oxisulfide und (Al,Mg)-Oxide auffindbar. Der Großteil der enthaltenen Einschlüsse hatte eine Länge von etwa 20 µm. Die Stahlgüte C besaß die geringste Menge an Einschlüssen und bei den enthaltenen NME handelte es sich um komplexe Oxisulfide, MnS und (Al,Mg)-Oxide. Die Einschlusslandschaft des mit Kalzium behandelten UC Stahls bestand zum Großteil aus CaS. Darüber hinaus konnten auch noch geringe Mengen an komplexen Oxisulfiden und (Al,Mg)-Oxiden gefunden werden. Die Einschlüsse im UC Stahl waren rund geformt und hatten eine maximale Größe von 10 µm. Ånmark et al. [37] stellte zudem fest, dass die in den Stählen enthaltenen komplexen Oxisulfide aus einem (Al,Mg)-Oxidkern und einem angekeimten MnS oder (Mn,Ca)-Sulfid bestanden. In der **Tabelle 4-III** sind die Kennwerte der Einschlüsse, welche in den drei verschiedenen Stahlgüten gefundenen wurden, ersichtlich. [37]

Tabelle 4-III: Kennwerte der aus den drei Stahlgüten extrahierten Einschlüsse, nach [37].

Bezeichnung	S	Länge	Seitenverhältnis	ECD	Anzahl	Volumensanteil
	[%]	[µm]	[-]	[µm]	[1/mm ³]	[-]
R	0,028	19 ± 17	10 ± 7	5 ± 3	3,10 x 10 ⁴	3,60 x 10 ⁻³
C	0,003	15 ± 40	8 ± 11	4 ± 3	0,26 x 10 ⁴	0,46 x 10 ⁻³
UC	0,002	2 ± 1	1 ± 0,2	2 ± 1	1,20 x 10 ⁴	0,16 x 10 ⁻³

Anhand der Kenndaten der Einschlüsse in den drei Stahlchargen beschreiben Ånmark et al. [37] den Verlauf der Standzeit des Werkzeugs in Abhängigkeit des Volumensanteils und der Seitenverhältnisse der Einschlüsse, ersichtlich in **Abbildung 4-5**. Es ist zu beobachten, dass sich sowohl mit sinkendem Volumenanteil als auch mit abnehmendem Seitenverhältnis der Einschlüsse, die Lebensdauer des Werkzeugs verringert. Der Einfluss der beiden Parameter ist bei hohen Schnittgeschwindigkeiten am größten. [37]

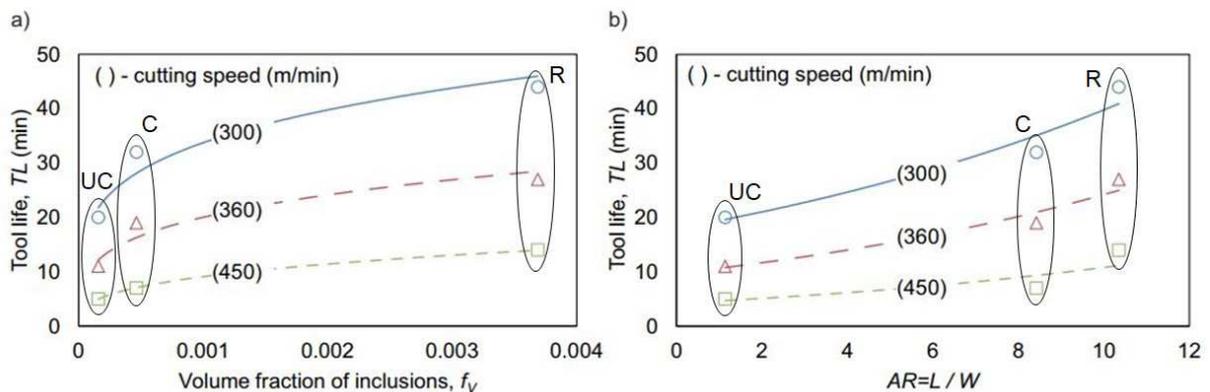


Abbildung 4-5: Standzeit in Abhängigkeit des Volumensanteils und des Seitenverhältnisses der Einschlüsse, nach [37].

Neben der Einschlussuntersuchung mittels elektrolytischer Extraktion führten Ånmark et al. [36] auch eine automatisierte REM/EDX-Messung der drei Stahlchargen anhand von Schliffen durch. Die dabei gewonnenen Größenverteilungen der in den Stahlchargen enthaltenen Einschlüsse, sowie die Unterschiede hinsichtlich der Anzahl verschiedener Einschlusstypen, können der **Abbildung 4-6** entnommen werden. [36]

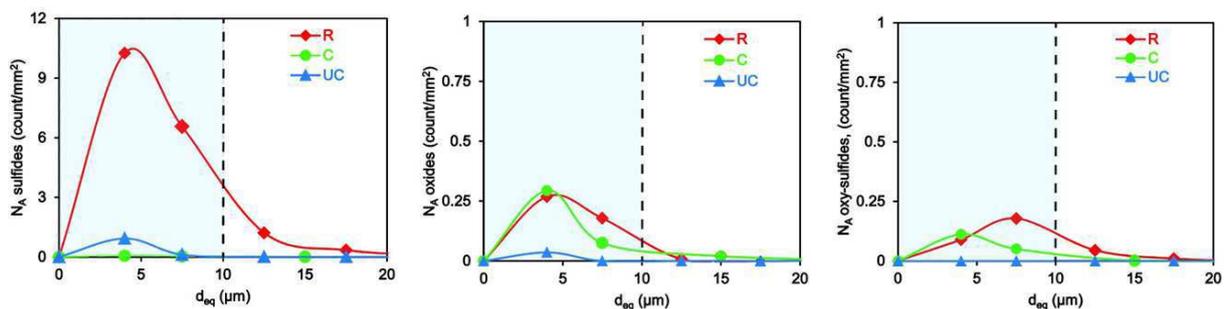


Abbildung 4-6: Größenverteilung der Sulfid-, Oxid- und Oxisulfid-Einschlüsse in den Qualitäten R, C und UC. [36]

Durch die Zerspanungstests und der Einschlussuntersuchung mit Hilfe der elektrolytischen Extraktion konnte festgestellt werden, dass mit steigendem Volumensanteil an Einschlüssen und einem großen Seitenverhältnis eine höhere Standzeit erreicht werden kann. Hierbei

wirken sich vor allem die langen MnS in der Stahlgüte R sehr positiv auf den Zerspanungsprozess aus. Zudem erhöht sich durch die Mangansulfide im R-Stahl die Lebensdauer des Werkzeugs. Des Weiteren weisen die MnS-Einschlüsse bei der während der Zerspanung entstehenden Temperatur eine geringere Härte als die enthaltenen Oxide auf. Aus diesem Grund führen MnS zu einem geringen abrasiven Verschleiß. Die in der Stahlgüte UC gefundenen Kalziomsulfide wirken sich zwar positiv auf die Dauerfestigkeit aus, sind aber härter und somit abrasiver als die Mangansulfide im R-Stahl. Zusätzlich entsteht durch die Mangansulfide im Stahl während des Spanvorganges eine schützende Schicht am Werkzeug. [37]

4.3.1 Sulfide

Durch das Vorhandensein von genügend Mangan im Stahl kommt es mittels Schwefel zur Bildung von Mangansulfiden. Diese bewirken eine Spannungssteigerung in der Scherzone, was zu einer Rissinitiierung führt. Die gebildeten Risse können sich daraufhin weiter ausbreiten und setzen dadurch die Trenn- und Scherfestigkeit des Stahls merklich herab. Die Fähigkeit eines Einschlusses als Spannungserhöher in der Scherzone zu fungieren, hängt sowohl von der Form als auch von der Größe ab. Die größte Steigerung der Spannung lässt sich durch große, langgestreckte Einschlüsse erzielen. Dies trifft auf Mangansulfide im Stahl zu. Aus diesem Grund führen sie zu einer deutlich verbesserten Zerspanbarkeit des Stahls. Weiters fungiert das erweichte Mangansulfid während dem Spanen als Gleitmittel zwischen Werkzeug und Werkstück. Zudem kann durch das Vorhandensein von MnS eine bessere Oberflächenqualität erzielt werden. Durch die hohe Verformbarkeit der Mangansulfide in einem breiten Temperaturintervall, können sie optimal am Materialfluss teilnehmen und somit die Zerspanbarkeit positiv beeinflussen. [4,33]

Kiessling et al. [4] berichtet, dass Mangansulfide an der Spanfläche eine dünne Schicht bilden, welche als Diffusionsbarriere wirkt. Diese Schicht ist jedoch hauptsächlich bei niedrigen und mittleren Schnittgeschwindigkeiten beobachtbar, bei hohen verschwindet sie wieder. [4]

4.3.2 Oxide

Oxide entstehen hauptsächlich durch die Desoxidation des Stahls und erhöhen aufgrund ihrer sehr geringen Verformbarkeit und hohen Härte den Verschleiß des Werkzeugs und senken dadurch die Zerspanbarkeit des Stahls. Abhängig vom Desoxidationsverfahren, bilden sich Einschlüsse mit unterschiedlicher Form, chemischer Zusammensetzung und

mechanischer Eigenschaften. Die meisten Oxide weisen im relevanten Temperaturbereich der Zerspanung keine Verformbarkeit auf, hierzu zählt zum Beispiel das Aluminiumoxid. Durch dessen geringe Verformbarkeit und hohe Härte ist es einer der Hauptverursacher für den abrasiven Verschleiß an der Freifläche. Selbst eine sehr harte und verschleißfeste Beschichtung aus Aluminiumoxid kann den Al_2O_3 -Einschlüssen nicht standhalten, da sie durch die Zerspanung eine Erwärmung erfährt und dadurch weicher ist als die Einschlüsse, die nahezu Raumtemperatur aufweisen. Nur wenige Oxideinschlüsse wie $\text{MnO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ und $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ lassen sich bei Temperaturen zwischen 800-1200 °C gut verformen und bilden dadurch eine schützende Schicht auf der Spanfläche. Dies reduziert bei hohen Schnittgeschwindigkeiten die Bildung des Kolkverschleißes. [4,33,39]

Laut Kirsch-Racine et al. [40] entsteht bei der Zerspanung von kalziumbehandelten Stählen ebenfalls eine schützende Schicht zwischen Werkzeug und Span, diese weist eine Dicke von 10 bis 20 μm auf. Unter den gegebenen hohen Temperaturen und hohen isostatischen Drücken kann diese Schicht einer sehr großen Beanspruchung widerstehen. Kirsch-Racine et al. [40] nehmen an, dass sich die Schicht nicht wie ein plastisches Metall sondern eher wie eine viskose Flüssigkeit verhält. Das Aufrechterhalten der pseudoflüssigen Schicht ist begründet durch die lokal sehr hohen Temperaturen während des Zerspanens. Die gebildete Schicht am Werkzeug verringert die Schnittkräfte und zudem den Verschleiß durch Abrasion. Zusätzlich wirkt sie als Diffusionsbarriere bei Karbidwerkzeugen. Für die Bildung dieser Schicht muss der Stahl niedrigschmelzende Kalziumaluminat und Mangansulfide enthalten. Die Schicht ist bis zu einer hohen Temperatur, also bis zu einer hohen Schnittgeschwindigkeit beständig. Bei der Zerspanung von Stählen, welche hauptsächlich MnS als nichtmetallische Einschlüsse enthalten, entsteht ebenfalls eine Schicht am Werkzeug jedoch weist diese bei höheren Temperaturen eine geringe Beständigkeit auf. Der Belag am Werkzeug wird sofort nach der Bildung wieder zerstört und kann sich somit nicht positiv auf die Zerspanbarkeit auswirken. [40]

Eine andere Begründung für die Reduktion des Kolkverschleißes an der Spanfläche durch die Verwendung eines kalziumbehandelten Stahles wird von Matsui et al. [41] gegeben. Diese verglichen die Zerspanbarkeit eines Referenzstahls mit MnS- und Al_2O_3 -Einschlüssen mit dem gleichen Stahl der allerdings kalziumbehandelt wurde. Dieser besaß anstatt der Aluminiumoxide im Stahl Kalziumaluminat. Die trocken durchgeführten Zerspanungsversuche zeigten, dass der mit Kalzium modifizierte Stahl eine bessere Zerspanbarkeit als der Referenzstahl aufwies. Matsui et al. [41] nehmen an, dass die Kalziumaluminat, bei den während der Zerspanung entstehenden Temperaturen, eine geringere Härte als die Aluminiumoxide aufweisen. Dies führt dazu, dass die sich am

Werkzeug gebildete MnS-Schicht durch die weichen Kalziumaluminat nur eine geringe Abtragung erfährt. Aluminiumoxide besitzen bei den gegebenen Temperaturen hingegen immer noch genügend Härte um die Mangansulfidschicht größtenteils abzutragen und dadurch den schützenden Effekt der Schicht zu reduzieren. [41]

Eine detaillierte Untersuchung, welche die chemische Zusammensetzung der schützenden Schicht auf dem Drehwerkzeug bei der Zerspanung eines kalziumbehandelten 42CrMo4 wieder gibt, wurde von Larsson et al. [42] durchgeführt. Bei der von ihnen durchgeführten Einschlusscharakterisierung des Stahls konnten drei Haupteinschlusstypen detektiert werden. Dabei handelte es sich um Mangansulfide mit einem geringen Anteil an Kalzium, einem zweiphasigen Einschluss bestehend aus $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ -Kern und einem umgebenden $\text{Ca}_{0,02}\text{Mn}_{0,98}\text{S}$ -Kranz. Der dritte Einschlusstyp besaß eine globulare Form, hatte einen $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ -Kern und eine Ummantelung aus $\text{Ca}_{0,85}\text{Mn}_{0,15}\text{S}$. Die Analyse der während der Zerspanung gebildeten Schicht an der Spanfläche zeigte drei unterschiedliche Bereiche mit den jeweiligen detektierten Elementen, ersichtlich in **Abbildung 4-7**. [42]

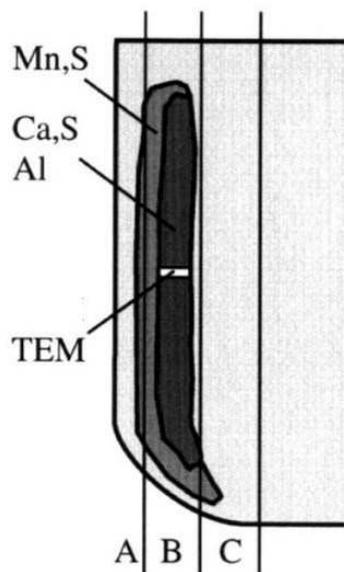


Abbildung 4-7: Elementverteilung der Schicht an der Spanfläche, nach [42].

Der Bereich A repräsentiert die Klebezone und der Abschnitt B die Scher- und Gleitzone, in welcher sich die Schicht aus Einschlüssen bildet. In der Zone C kommt es nur mehr zum Gleiten und der Kolkverschleiß tritt verstärkt auf. Larsson et al. [42] untersuchten einen Teil der Schicht mittels Transmissionselektronenmikroskop (TEM) und fanden heraus, dass sie aus zwei Hauptphasen bestand. Zum einen bestand sie aus einem Sulfid mit einer Zusammensetzung von $\text{Ca}_{0,85}\text{Mn}_{0,15}\text{S}$ und zum anderen aus einem $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ -Oxid. Beide Einschlusstypen wurden auch als nicht metallischer Einschluss im Stahl aufgefunden. [42]

Laut Larsson et al. [42] hängt die Zusammensetzung der gebildeten Schicht stark von der Temperatur zwischen Span und Werkzeug ab. Hohe Schnittgeschwindigkeiten und/oder hohe Vorschübe führen zu hohen Temperaturen während der Zerspanung. Dies hat zur Folge, dass die gebildete Schicht zu einem größeren Teil aus hochschmelzenden Komponenten bestehen, da die niedrigschmelzenden Bestandteile zu weich und daher nicht beständig genug sind, um eine dauerhafte Schicht auszubilden. Niedrige Schnittgeschwindigkeiten führen zu einem größeren Anteil an niedrigschmelzenden Komponenten in der Schicht. [42]

4.3.3 Nitride

Chen et al. [43] führten Versuche durch, in denen sie Mangansulfide durch einen gewissen Anteil an Bornitrid ersetzen. Die Reduktion der MnS war durch deren negative Wirkung auf die Kerbschlagzähigkeit und der Warmverformbarkeit begründet. Bei dieser Untersuchung kam eine Trockendrehanwendung mit Wolframkarbidwerkzeugen zum Einsatz. Als Werkstoff wurde ein C45-Stahl einmal mit zusätzlich 2000 ppm S und einmal mit 1000 ppm S, 240 ppm N und 115 ppm B legiert. Chen et al. [43] stellten fest, dass durch das Substituieren der Hälfte des Schwefels im Stahl durch Stickstoff und Bor eine gleichwertige, beziehungsweise verbesserte Zerspanbarkeit des Stahls zu beobachten war. [43]

Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen auch Tanaka et al. [44]. Diese führten Zerspanungsversuche mit einem 42CrMo4-Stahl und dem gleichen Stahl mit zulegiertem Bor und Stickstoff. Es wurden Drehversuche ohne Kühlschmiermittel durchgeführt. Bei den Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass der Stahl mit enthaltenen Bornitriden eine Verringerung des Verschleißes im Vergleich zum Stahl ohne BN am Karbidwerkzeug verursacht. Tanaka et al. [44] begründet dieses Verhalten durch die Bildung einer AlN-Schicht am Werkzeug, welche als Diffusionsbarriere wirkt und dadurch den Verschleiß verringert. Daher ist neben dem Bor und Stickstoffgehalt auch der Gehalt an Aluminium im Stahl von Bedeutung, um die Zerspanbarkeit zu verbessern. [44]

5 Experimentelles

Laut Literatur beeinflussen nichtmetallische Einschlüsse die Zerspanbarkeit in großem Maße. Vor allem der Verschleiß am Werkzeug wird von NME beeinflusst. Dies betrifft hauptsächlich den Freiflächen- und den Kolkverschleiß. Hierbei spielt vor allem die Verformbarkeit der Einschlüsse eine Rolle. Die meisten Oxide besitzen nur eine sehr geringe Verformbarkeit und verstärken dadurch den Verschleiß am Werkzeug. Die negative Wirkung der oxidischen Einschlüsse auf die Zerspanbarkeit kann jedoch mit Hilfe einer gezielten Kalziumbehandlung reduziert werden. Mangansulfide wirken sich sehr positiv auf die Zerspanbarkeit aus, da sie weich und daher gut verformbar sind. Aufgrund dieser Eigenschaft können sie während der Zerspanung zwischen Werkzeug und Werkstück als Gleitmittel fungieren. Zusätzlich führen MnS während des Zerspanungsvorganges zu einer Spannungssteigerung in der Scherzone und in weiterer Folge zu einer erleichterten Rissinitiierung.

Eine Studie, welche drei Standardstahlchargen mit annähernd gleicher chemischen Zusammensetzung aber unterschiedlichem Reinheitsgrad hinsichtlich ihrer Zerspanbarkeit beurteilte, stellte fest, dass der Reinheitsgrad der Stahlcharge die Zerspanbarkeit in großem Maße beeinflusst. Hierbei zeigte sich, dass die Stahlcharge mit dem schlechtesten Reinheitsgrad die beste Zerspanbarkeit aufwies.

In der Literatur wird hauptsächlich die Zerspanbarkeit von Standardstahlgüten beurteilt. Der Hauptgruppe der Warmarbeitsstähle wurden bis jetzt nur sehr wenige Forschungsarbeiten gewidmet. Aus diesem Grund gibt es wenige Informationen über die Zerspanbarkeit des X38CrMoV5-1 Warmarbeitsstahls. Da diese Stahlgüte für Kunden der Ceratizit GmbH von Wichtigkeit ist, soll durch diese Arbeit ein besseres Verständnis für dessen Zerspanbarkeit ausgearbeitet werden.

Dieser Teil der Arbeit gibt sowohl einen Überblick über die durchgeführten Zerspanungsversuche mit dazugehöriger Verschleißbeurteilung der verschlissenen Wendeschneidplatten (WSP) als auch eine Beschreibung der Einschlussuntersuchung. Bei den Versuchen kamen drei verschiedene X38CrMoV5-1 (1.2343) Stahlchargen mit unterschiedlichem Reinheitsgrad zum Einsatz. Die Charge V und W wurde von Stahlhersteller 1 und die Charge X vom Stahlhersteller 2 geliefert. Die Zerspanung der drei Chargen erfolgte in einem weichgeglühten Zustand.

5.1 Zerspanungsversuche

Bei den im Zuge der Arbeit durchgeführten Zerspanungsversuchen der drei Stahlchargen, handelte es sich um Längsdrehversuche, welche mit einer EMCO HyperTurn 665 Drehmaschine realisiert wurden. Als Zerspanungswerkzeug kamen dabei drei verschiedene Wendeschneidplatten-Geometrien, eine für den universellen Einsatz CNMG120408-M50, eine für die Grobbearbeitung CNMG120408-R58 und eine für die Feinbearbeitung CNMG120408-F50, zum Einsatz. Die genaue Beschreibung der verwendeten WSPs kann der **Tabelle 5-I** entnommen werden.

Tabelle 5-I: Beschreibung der Wendeschneidplatten-Geometrien. [45,46]

Geometrie	Plattenstärke	Schneidenlänge	Eckenradius	Schneidkante	Stufenform
[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
CNMG 120408EN-M50	4,76	12,9	0,8	gerundet	M50
CNMG 120408EN-R58	4,76	12,9	0,8	gerundet	R58
CNMG 120408EN-F50	4,76	12,9	0,8	gerundet	F50

Zudem sind in **Abbildung 5-1** Darstellungen der Wendeschneidplatten ersichtlich. Das Werkzeug besteht aus einem CTCP125-Hartmetall mit einer Zusammensetzung von 87 Gew.-% Wolframkarbid, 6 Gew.-% Mischkarbide und 7 Gew.-% Kobalt. Als Verschleißschutz besitzen die Wendeschneidplatten eine mittels Chemical Vapor Deposition aufgebrauchte TiN-TiCN-Al₂O₃-Oberflächenschicht. Als Kühlschmiermittel fand bei den Zerspanungsversuchen eine 6 % Öl-Emulsion Verwendung.

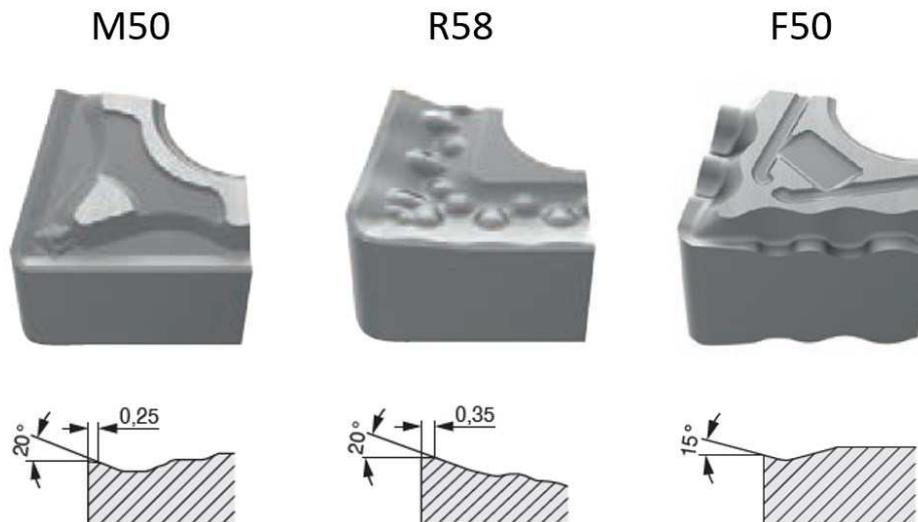


Abbildung 5-1: Wendeschneidplatten-Geometrien. [45,46]

In **Abbildung 5-1** ist ersichtlich, dass sich die drei Werkzeug-Geometrien hauptsächlich hinsichtlich ihrer Spanleitstufen unterscheiden. Dies spiegelt auch die **Tabelle 5-1** mit den Abmessungen der WSPs wieder.

Für die Zerspanungsversuche fand ein HSK-T DCLN14L-12 Wendeschneidplattenhalter mit einem Anstellwinkel von 95° Anwendung. Dieser weist eine Verkipfung der Wendeschneidplatte sowohl in Längs- als auch in Querrichtung um 6° nach unten auf.

Anhand der für die jeweilige Wendeschneidplatte empfohlenen Schnittwerte wurden die nötigen Versuchsparameter für die verschiedenen Zerspanungstests gewählt. Die Variation der Zerspanungseinstellungen erfolgte über die Schnittgeschwindigkeit und über den Vorschub. Die Schnitttiefe blieb für alle Versuche konstant und wies einen Wert von 2 mm auf. Um die Ergebnisse der Untersuchungen besser miteinander vergleichen zu können, wurden die Zerspanungsparameter so gewählt, dass immer mindestens zwei Versuche das gleiche Zeitspanvolumen \dot{Q} aufweisen.

Die Berechnung des Zeitspanvolumens ist in Gleichung (5.1) ersichtlich.

$$\dot{Q} = v_c * a_p * f \quad (5.1)$$

Durch die Zerspanungstests wurde primär das maximal mögliche zerspante Volumen bis zum Erreichen des Standzeitendes der Wendeschneidplatten für die verschiedenen Schnittparameter bestimmt. Die Beurteilung der Standzeit erfolgte über die

Verschleißmarkenbreite an der Hauptfreifläche, der maximal erlaubte Wert dafür belief sich auf 0,3 mm.

In der **Abbildung 5-2** können die verwendeten Versuchsparmeter mit den dazugehörigen Zeitspanvolumen der drei WSP-Geometrien entnommen werden. Alle ersichtlichen Parameterkonfigurationen wurden für alle drei Stahlchargen durchgeführt.

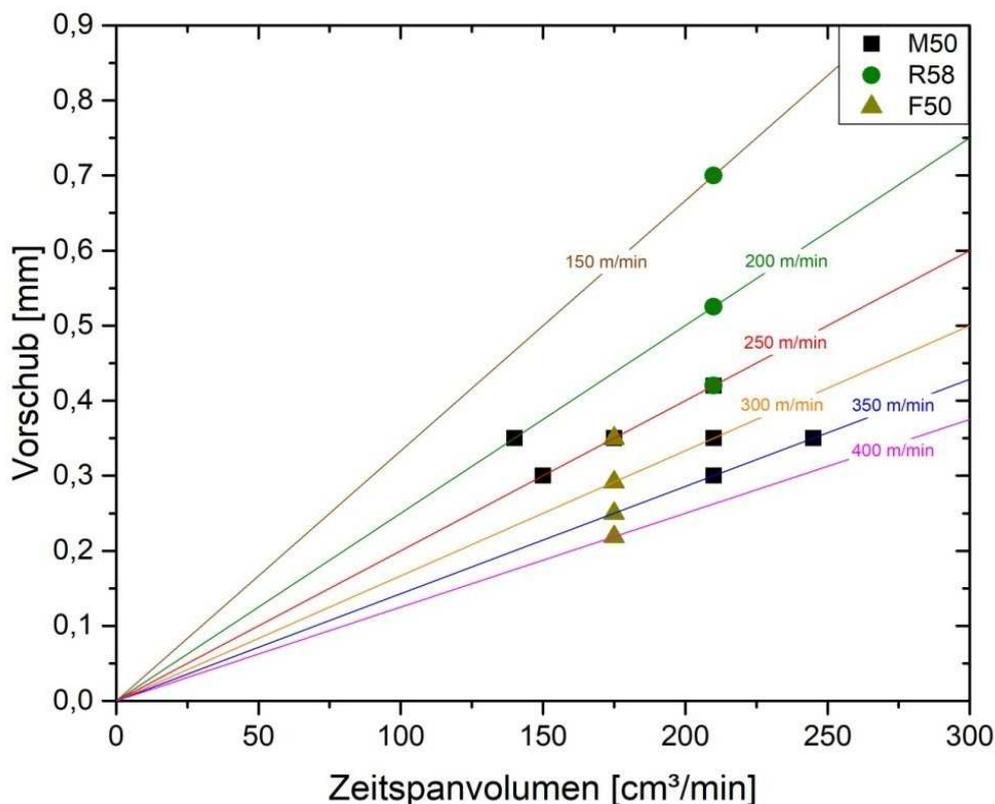


Abbildung 5-2: Versuchsparmeter der Zerspanungstests.

Um einen zeitlichen Verlauf des Verschleißes sichtbar zu machen, wurde jeder Versuch zwei Mal durchgeführt. Dabei kam es beim ersten Versuch genau nach 113,1 cm³ zerspantem Volumen zum Zerspanungstestende und beim zweiten erst beim Erreichen des Standzeitkriteriums. Die daraus gewonnenen Daten können zur Beurteilung des Einflusses des Reinheitsgrads auf die Zerspanbarkeit des Werkstoffs herangezogen werden.

Bei den Versuchen wurde immer ein Teil mit einem bestimmten Volumen von 113,1 cm³ zerspannt. Anhand der bis zum Erreichen des Standzeitkriteriums zerspannten Teile der jeweiligen Wendeschneidplatte, konnte danach auf das zerspannte Volumen und in weiterer Folge auf die Standzeit des Werkzeugs zurück gerechnet werden. Die genauen Abmessungen eines solchen Segments kann der **Abbildung 5-3** entnommen werden. Das blaue Volumen symbolisiert das zerspannte Volumen. Bei der Herstellung eines jeden Teils

blieb ein Wellenstück (graues Volumen) stehen, dass in weiterer Folge mit einem eigenen Abstichmeißel abgetrennt wurde.

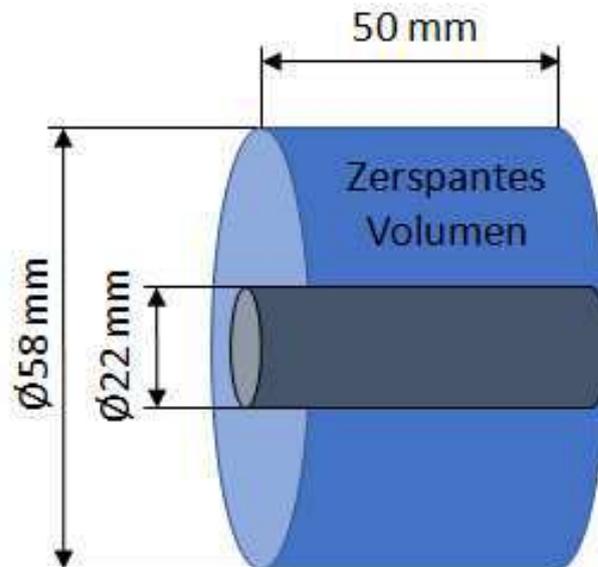


Abbildung 5-3: Skizze des zerspannten Segments.

Um eine Abschätzung der Ergebnisdeviation zu erhalten, wurde der M50-WSP-Versuch mit einer Schnittgeschwindigkeit von 250 m/min und einem Vorschub von $0,35 \text{ mm}$ zwei Mal wiederholt und daraus der Mittelwert und die Standardabweichung ermittelt.

5.2 Verschleißuntersuchung

Die Untersuchung der verschlissenen Wendschneidplatten aus den verschiedenen Versuchen erfolgte zum größten Teil mit einem Keyence VHX-5000 Digitalmikroskop. Hierbei wurden Bilder der Spanfläche und der beiden Freiflächen aufgenommen. Um die Hauptschneide, die Nebenschneide und die Schneidenecke besser darstellen zu können, erfolgte zudem die Erstellung von Aufnahmen mit einem Neigungswinkel des Mikroskops von 20° . Die **Abbildung 5-4** gibt ein Beispiel für eine verschlissene Wendschneidplatte mit vermessenem Freiflächenverschleiß.



Abbildung 5-4: Beispiel für die Messung der Verschleißmarkenbreite.

Des Weiteren kam es bei ausgewählten Wendeschneidplatten zu einer Verschleißuntersuchung anhand von Schliffen. Hierfür wurden die Wendeschneidplatten warmeingebettet und im Anschluss daran wie in **Abbildung 5-5** dargestellt, geschnitten. Durch die manuelle Schliffpräparation ist eine minimale Abweichung der Schnittposition nur schwer zu verhindern. Dies kann sich durch eine Veränderung der Position des Kolkverschleißes äußern.



Abbildung 5-5: Skizze des Schnittverlaufs der Wendeschneidplatte.

Das Schleifen erfolgte mit einem Schleifbock, welcher sowohl mit einer groben Diamantschleifscheibe (Körnung von 76 µm) als auch einer feinen (10 µm) versehen war. Im Anschluss an das Schleifen wurden die Proben auf einer Stuers RotoPol-22 Poliermaschine zuvor mit einer 3 µm und danach mit einer 1 µm Diamantsuspension poliert. Danach kam es zu einer detaillierten Untersuchung der Schlitze mittels Keyence VHX-5000 Digitalmikroskop und Nikon ECLIPSE MA200 Lichtmikroskop. Des Weiteren wurde der Schliff einer besonders stark verformten Wendeschneidplatte mittels Rasterelektronenmikroskop untersucht.

Zusätzlich erfolgte noch der Versuch, bei den Schliffen mit deutlich verformten WSPs, mittels einer Murakami-Ätzung (50 % Kaliumhydroxid und 50 % Kaliumferrizyanid mit H₂O) die Verformung der Wendeschneidplatte besser sichtbar zu machen. Denn bei einer Plastifizierung der Wendeschneidplatte entstehen Poren, welche durch eine Ätzung besser sichtbar gemacht werden können. Dieser Versuch führte bei der in den Zerspanungsversuchen verwendeten Hartmetallsorte allerdings zu keiner besseren Kontrastierung der Poren. Ein Grund dafür ist möglicherweise dessen hoher Gehalt an Mischkarbiden.

Um den Einfluss der Schnittkräfte auf die plastische Verformung der Wendeschneidplatten zu zeigen, erfolgte zudem die Berechnung der resultierenden Schnittkräfte für die jeweiligen Schnittparameter und Wendeschneidplattentypen. Da für die Abschätzung der resultierenden Schnittkräfte materialspezifische Kennwerte nötig waren, diese jedoch für den X38CrMoV5-1 Stahl (hochlegierter Werkzeugstahl) nicht zur Verfügung standen, wurden die Kennwerte für

die Stahlgruppe „schwer zerspanbare Werkzeugstähle, hochlegierte Stähle, harter Stahlguss“ für die Berechnung herangezogen. Die für die Berechnung verwendeten Kennwerte können der **Tabelle 5-II** entnommen werden. [47]

Tabelle 5-II: Kennzahlen für die Schnittkraftberechnung. [45–47]

Parameter	Wert
κ	95°
$k_{c1.1}$	2750 N/mm ²
k_{ver}	1,2
m_c	0,25
k_{vc}	1,0
γ_0	6°
k_{sp}	1,0
γ der M50-WSP	14°
γ der R58-WSP	14°
γ der F50-WSP	9°

Anhand der Gleichungen (5.2) - (5.5) war es möglich die entstandenen Schnittkräfte während des Zerspanens besser einschätzen zu können. Die Errechneten Schnittkraftwerte in N/mm² für die verschiedenen Schnittparameter und WSP-Typen kann der **Abbildung 5-6** entnommen werden. [47]

$$h = f * \sin(\kappa) \quad (5.2)$$

$$k_c = \frac{k_{c1.1}}{h^{m_c}} * k_{vc} * k_{ver} * k_{sp} * k_\gamma \quad (5.3)$$

$$k_\gamma = 1 - \frac{\gamma - \gamma_0}{100} \quad (5.4)$$

$$F_c = k_c * A = f * a_p \quad (5.5)$$

M50				R58			
v_c [m/min]	f [mm]			v_c [m/min]	f [mm]		
	0,30	0,35	0,42		0,42	0,53	0,70
200		2766		150			4651
250	2464	2766	3171	200		3749	
300		2766		250	3171		
350	2464	2766					

F50				
v_c [m/min]	f [mm]			
	0,22	0,25	0,29	0,35
250				2766
300			2412	
350		2149		
400	1944			

Schnittkräfte in N/mm²

Abbildung 5-6: Errechnete Schnittkraftwerte.

5.3 REM-EDX-Analyse der Stahlchargen

Die für die Zerspanungsversuche verwendeten drei Stahlchargen wurden um einen Einblick in dessen Einschlusslandschaft zu bekommen, mittels einer automatisierten REM-EDX-Analyse untersucht. Zudem erfolgte eine genaue Betrachtung ausgewählter nichtmetallischer Einschlüsse mittels Element-Mappings. Für diese Untersuchungen kam ein Rasterelektronenmikroskop JEOL 7200F mit Schottky Feldemitter Kathode zum Einsatz. Dieses besitzt für die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Einschlüsse einen 80 mm² EDX-Detektor (Oxford Instruments) und zur Identifikation der Einschlüsse über Grauwertvergleich einen Rückstreuелеktronendetektor. Die automatisierte REM-EDX-Messung erfolgte mit der Software AZTec 3.3, die Einstellungen dafür können der **Tabelle 5-III** entnommen werden.

Tabelle 5-III: Messeinstellungen der automatisierten REM-EDX-Analyse.

Parameter	Wert
Anregungsspannung	15 kV
Arbeitsabstand	10 mm
Vergrößerung	250
Auflösung	1024x768 px

min. Partikelgröße	4 px
min. gemessener ECD	1 μm
EDX-Messzeit pro Partikel	3 s
Abbruchkriterium	5000 Partikel/Messfläche

Die Bestimmung des Reinheitsgrads einer Stahlprobe mit Hilfe einer automatisierten REM/EDX-Analyse basiert auf dem Prinzip, dass Einschlüsse aufgrund ihres unterschiedlichen Materialkontrasts im Rückstreuелеktronenbild detektiert werden können. Schwere Elemente mit einer hohen Ordnungszahl erscheinen heller am Rückstreuелеktronenbild als leichte Elemente, da sie die Elektronen stärker zurück strahlen. Aus diesem Grund werden nichtmetallische Einschlüsse dunkler als die umgebende Matrix dargestellt. Die automatisierte REM/EDX-Messung liefert Informationen über Position, Morphologie und chemische Zusammensetzung jedes detektierten Einschlusses. Zusätzlich gibt die Methode Auskunft über die Verteilung der detektierten NME über die untersuchte Fläche an. Die Vorteile der automatisierten REM/EDX-Messung im Vergleich zur manuellen Analyse sind:

- Simultane Analyse von Einschlüssen mit stark unterschiedlichen Größen
- Höhere Anzahl an detektierbaren Einschlüssen
- Interessante Partikel können nach der Analyse mit Hilfe der Positionsdaten genauer analysiert werden

5.3.1 Probenahme

Die Probenahme erfolgte sowohl in Längs- als auch in Querrichtung der Stahlwelle. Zuerst wurde ein Reststück der Stahlwelle mit einem Durchmesser von 60 mm und einer Länge von etwa 45 mm auf einen Durchmesser von 48 mm gedreht. Im Anschluss daran kam es zum Abstechen einer 15 mm dicken Scheibe des Werkstoffs. Diese Größenreduktionen waren durch das begrenzte Platzangebot in der REM-Halterung begründet. Die durch das Abstechen gewonnene Scheibe diente als Querprobe. Die Längsprobe wurde durch das Vierteln des übriggebliebenen Wellenstücks gewonnen. Die schrittweise Gewinnung der Längs- und Querprobe, sowie die analysierten Flächen, können der **Abbildung 5-7** entnommen werden.

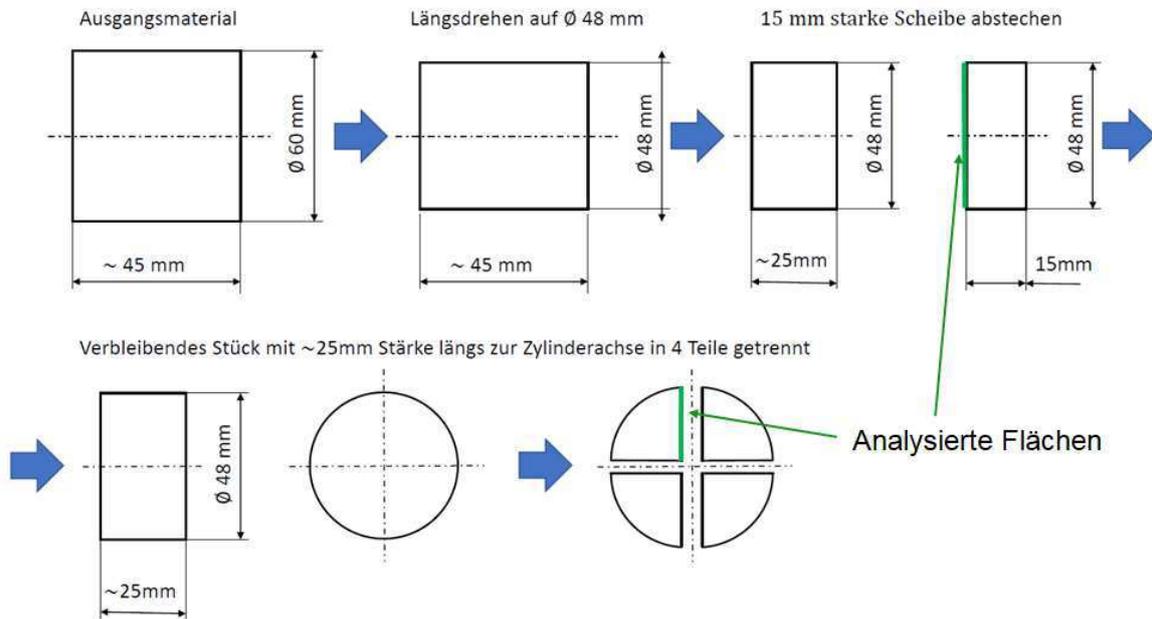


Abbildung 5-7: Ablauf der Probennahme.

Die Längsproben wurden in Kunstharz eingebettet, die Querproben hingegen nicht. Bei beiden Arten von Proben kamen anschließend mehrere Schleifgänge von Grob bis Fein zum Einsatz. Als letzter Schritt erfolgte das Polieren der Proben mit einer 3 μm Diamant-Suspension.

Der bei der automatisierten REM-EDX-Analyse betrachtete Bereich der Längsprobe und der Querprobe ist in der **Abbildung 5-8** illustriert. Diese Bereiche wurden so gewählt, dass sie den äußeren Bereich der Welle, welcher zerspannt wird, am besten abdecken.

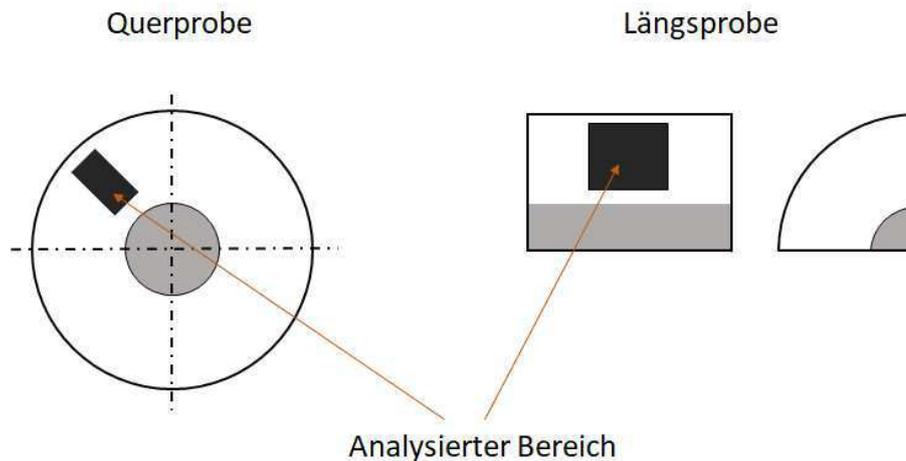


Abbildung 5-8: Untersuchte Probenbereiche.

5.3.2 Auswerteschema der automatisierten REM-EDX-Analyse

Die durch die automatisierte REM-EDX-Messung erhaltenen Daten mussten in weiterer Folge einer Korrektur unterzogen werden. Zu Beginn der Korrektur kam es zum Entfernen von Fehlmessungen und nicht relevanter Messungen, wie Lunker, Poren, Schleifrückstände, Polierflecken und Messungen ohne Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel oder Kohlenstoff. Danach wurden Karbide und Karbide mit angekeimten Einschlüssen ausgeschieden. Diese Korrekturen erfolgten mit Hilfe eines institutseigenem Auswerteschema. Nach der Korrektur der Messdaten kam es zu einer Hauptklasseneinteilung der NME in Oxide, Sulfide, Oxisulfide und Nitride. Jede einzelne Hauptgruppe wurde zudem noch in ihre zugehörigen Einschlusstypen unterteilt.

5.4 REM-EDX-Analyse der Späne

Neben der Einschluss-Analyse der Wellen erfolgte ebenfalls eine Untersuchung der entstandenen Späne, um den Einfluss des Zerspanungsvorgangs auf die NME im Stahl beurteilen zu können. Hierfür wurden die Späne der Charge X aus dem Zerspanungsversuch der M50-Wendescheidplatte mit einer Schnittgeschwindigkeit von 200 m/min und einem Vorschub von 0,35 mm verwendet. Die Entnahme der Späne fand zu Beginn des Versuchs statt, um den Einfluss des Verschleißes der WSP auf die Spanausbildung so gering wie möglich zu halten. Bei der Einschluss-Beurteilung der Späne kam wiederum das REM

JEOL 7200F mit Schottky Feldemitter Kathode zur Anwendung. Die Betrachtung der Späne erfolgte sowohl mit Hilfe eines Schliffes als auch mit nur auf einem Probenträger aufgeklebten Spänen, ersichtlich in **Abbildung 5-9**.



Abbildung 5-9: REM-Probenträger mit aufgeklebten Spänen.

5.5 Metallographische Charakterisierung der Chargen

Um einen Einfluss des Umformgrads auf die Zerspanungsergebnisse ausschließen zu können, wurde für zwei Chargen jeweils ein Längs- und ein Querschliff mittels Nital-Lösung geätzt, um so einen Einblick in das vorherrschende Gefüge zu bekommen. Zusätzlich kam es zu einer Untersuchung die Karbidstruktur der Schliffe mittels REM, um einen Unterschied in der Karbidstruktur aufzuzeigen. Des Weiteren erfolgte für jede Charge die Vickers-Härtemessung (HV_{20}) einer Querprobe. Die Positionen der Härteeindrücke wurden dabei so gewählt, dass sie innerhalb des zerspannten Bereichs der Welle liegen.

6 Ergebnisse

Dieser Teil der Arbeit gibt die Resultate der Zerspanungsversuche als auch der automatisierte REM-EDX-Analyse wieder. Zudem enthält dieses Kapitel die Ergebnisse der durchgeführten REM-EDX-Untersuchung der Späne und der metallographischen Charakterisierung der Stahlchargen.

6.1 Ergebnisse der Zerspanungsversuche

Eine Übersicht der durch die Zerspanungsversuche erhaltenen Ergebnisse ist in **Abbildung 6-1** zu sehen. Dabei ist das zerspannte Volumen über das Zeitspanvolumen aufgetragen. Jeder Punkt symbolisiert das Ergebnis eines Zerspanungsversuchs und die Form dessen, gibt Auskunft über die dabei verwendete WSP-Geometrie. Des Weiteren kann anhand der Farbe der Punkte die Schnittgeschwindigkeit und mit Hilfe ihrer Füllung die zerspannte Stahlcharge des Versuches herausgelesen werden. Neben dem erreichten zerspannten Volumen sind auf der zweiten Y-Achse die dabei zerspannten Teile dargestellt.

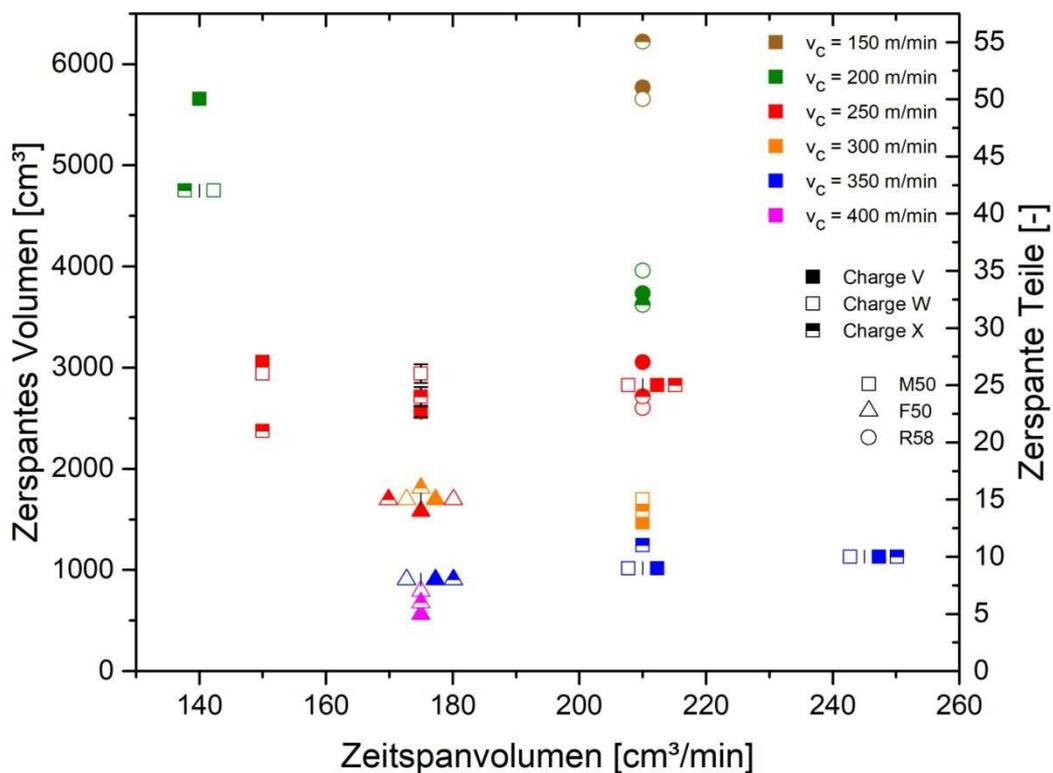


Abbildung 6-1: Ergebnisübersicht der Zerspanungsversuche.

In **Abbildung 6-1** ist zu erkennen, dass mit steigendem Vorschub und sinkender Schnittgeschwindigkeit das zerspannte Volumen der Versuche steigt. Alle drei Wendeschneidtypen folgen diesem Trend. Des Weiteren lässt sich feststellen, dass sich die Versuche mit gleichen Schnittparametern aber unterschiedlicher WSP-Geometrien in ihren Ergebnissen sehr ähneln.

Der Einfluss der unterschiedlichen Werkstoffchargen fällt bei den durchgeführten Zerspanungstests gering aus. Bei niedrigen Vorschüben und hohen Schnittgeschwindigkeiten ist das Zerspanungsergebnis annähernd ident, bei höheren Vorschüben und geringeren Schnittgeschwindigkeiten kann eine Abweichung des jeweiligen zerspannten Volumens beobachtet werden. Jedoch ist diese Abweichung nicht auf den verschiedenartigen Reinheitsgrad der Stahlchargen zurückzuführen, da sich keine Tendenz erkennen lässt, wonach eine bestimmte Charge besser zerspanbar ist als die Anderen. Die großen absoluten Abweichungen zwischen den Chargen bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten können dadurch erklärt werden, dass sich aufgrund des hohen zerspannten Volumens auch naturgemäß, größere Unterschiede in den Ergebnissen

einstellen. Die relative Abweichung entspricht im Gegensatz zu den absoluten Werten, etwa den Versuchen mit niedrigen Schnittgeschwindigkeiten.

Da die CNC-Drehmaschine während eines Zyklus immer ein Teil zerspant, kann es vorkommen, dass der Freiflächenverschleiß der Wendeschneidplatten bei manchen Versuchen stärker ausgeprägt ist, als bei denen eines anderen Versuchs mit demselben zerspannten Volumen. Denn der Zerspanungstechniker kann den Freiflächenverschleiß erst wieder nach einem vollen Zyklus, also nach einem zerspannten Teil überprüfen. Falls sich die Verschleißmarkenbreite davor noch unterhalb der 0,3 mm Grenze befand, wurde ein weiteres Teil zerspant.

6.1.1 Zerspanungsversuche mit CNMG120408EN-M50 Wendeschneidplatten

Die Ergebnisse der Zerspanungstests der M50-WSPs können der **Abbildung 6-2** entnommen werden. Es lässt sich feststellen, dass mit steigender Schnittgeschwindigkeit und konstantem Vorschub das zerspante Volumen sinkt. Bei steigendem Vorschub und konstanter Schnittgeschwindigkeit bleibt das zerspante Volumen hingegen annähernd ident. Die Wiederholungen des Versuchs mit einer Schnittgeschwindigkeit von 250 m/min und einem Vorschub von 0,35 mm führten zu einer sehr geringen Standardabweichung, ersichtlich als Fehlerbalken in der **Abbildung 6-2**.

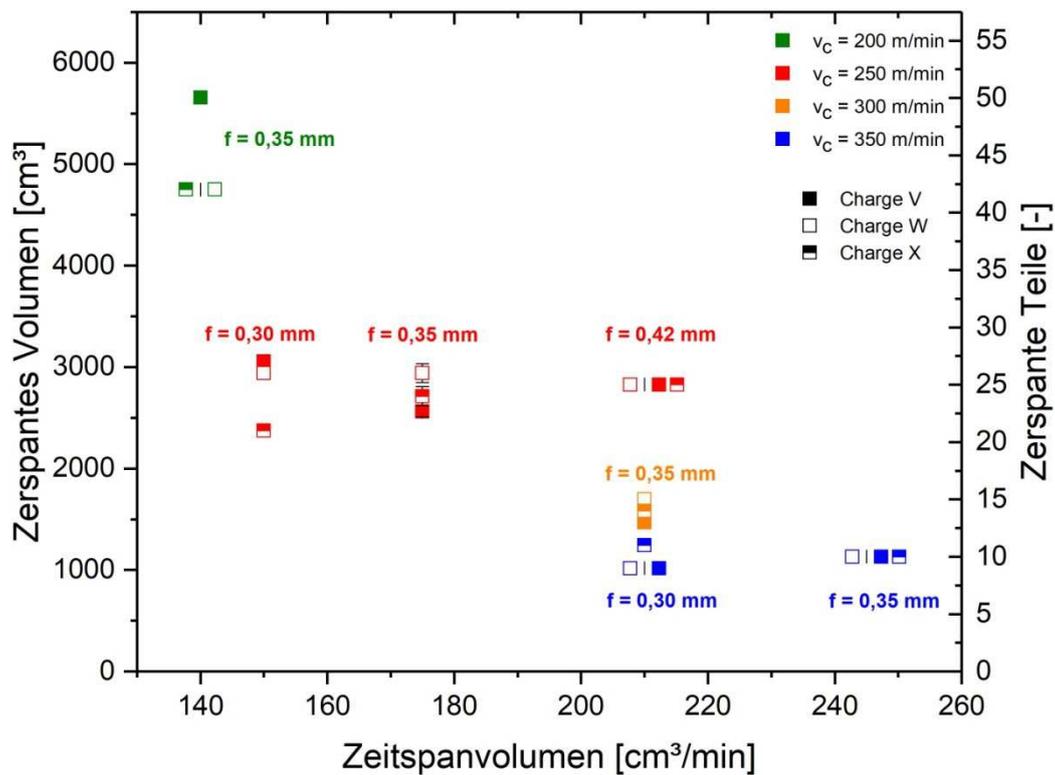


Abbildung 6-2: Ergebnisse der M50-WSP-Zerspanungstests.

Chargenvergleich:

Um den Einfluss der Stahlcharge auf den Verschleiß der WSPs zu zeigen, illustriert die **Tabelle 6-I** die chargenabhängigen Verschleißzustände der M50-Wendeschneidplatten bei bestimmten Schnittparametern von $v_c = 250$ m/min und $f = 0,35$ mm. Der Verschleiß der drei dargestellten Wendeschneidplatten unterscheidet sich nur geringfügig voneinander, lediglich die WSP mit der die Charge X zerspannt wurde, besitzt einen etwas gleichmäßigeren Freiflächenverschleiß an der Hauptschneide.

Tabelle 6-I: Verschleißbilder der M50-WSPs bei $v_c = 250$ m/min und $f = 0,35$ mm für alle drei Chargen.

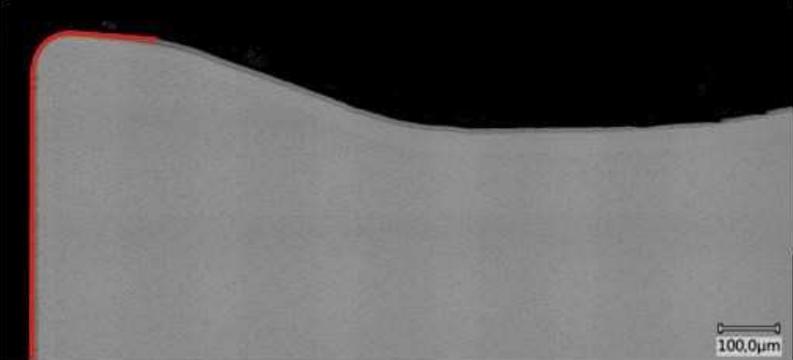
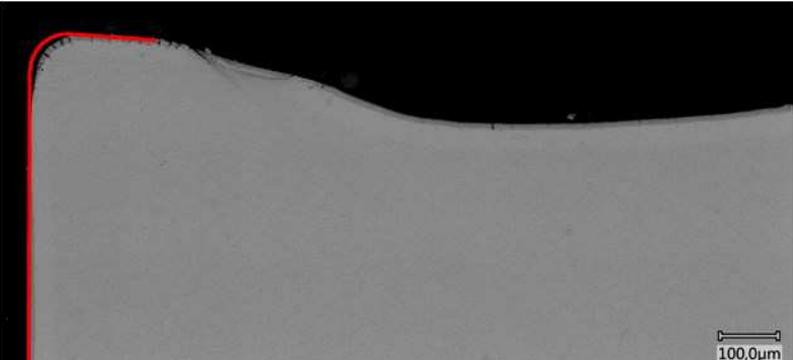
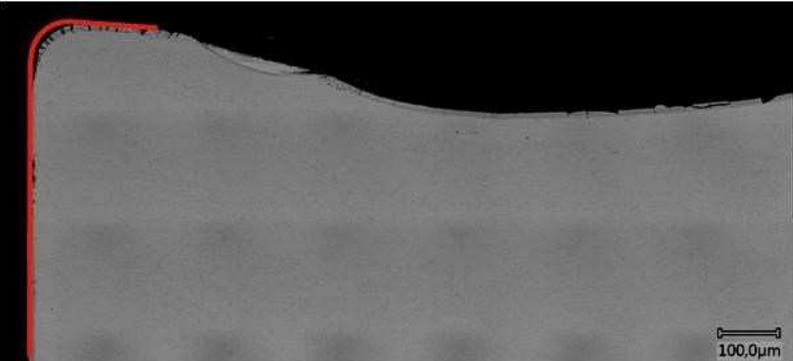
Charge	Hauptschneide 20° verkippt	Hauptfreifläche
Charge V		
Charge W		
Charge X		

Zusätzlich zeigen die Schliffbilder der M50-WSPs (**Tabelle 6-II**) bei $v_c = 250$ m/min und $f = 0,35$ mm für alle drei Chargen nur geringe Unterschiede auf. Neben den verschlissenen Wendeschneidplatten kann der **Tabelle 6-II** der Schliff einer unbenutzten M50-WSP entnommen werden. Dies ermöglicht es, die Wirkung der Schnittgeschwindigkeitserhöhung auf die Verformung der Wendeschneidplatten zu zeigen. Aus diesem Grund symbolisiert die

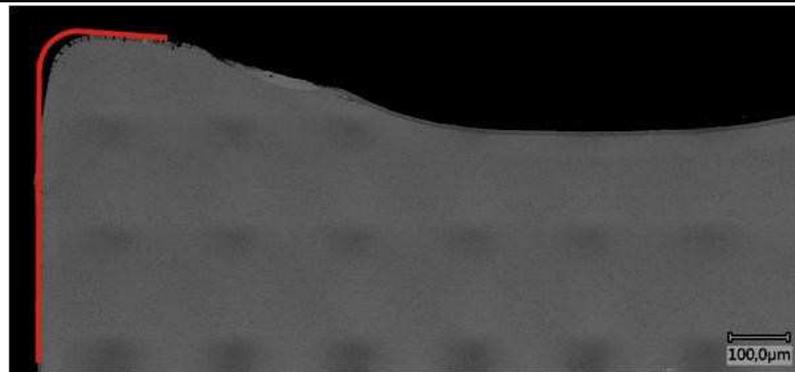
rote Linie in den Schliffen der verwendeten WSPs die Kontur einer unbenützten Wendeschneidplatte.

Aufgrund der sehr ähnlichen Verschleißzustände beim Zerspanen der verschiedenen Chargen wird nachfolgend nur noch auf die Verschleißbilder der Charge V eingegangen. Die Verschleißzustände der anderen Chargen kann der **Tabelle A-I** und **Tabelle A-II** entnommen werden.

Tabelle 6-II: Schliffbilder der M50-WSPs bei $v_c = 250$ m/min und $f = 0,35$ mm für alle drei Chargen.

Charge	Schliffbild
Unbenutzte M50-WSP	
Charge V	
Charge W	

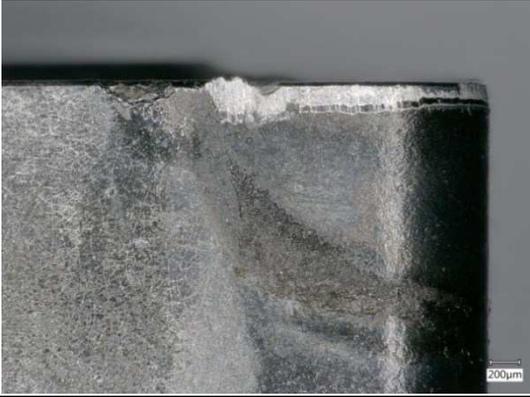
Charge X



Einfluss der Schnittgeschwindigkeit bei der Charge V:

Die Steigerung der Schnittgeschwindigkeit bei konstant gehaltenem Vorschub führt zu einer Veränderung des Freiflächenverschleißes, ersichtlich in **Tabelle 6-III**. Die Breite des Freiflächenverschleißes ist bei geringer Schnittgeschwindigkeit entlang der Hauptschneide konstant. Ab einer Schnittgeschwindigkeit von 250 m/min kommt es zu einem Maximum des Freiflächenverschleißes an der Position, in welcher die Hauptschneide in den Schneidenradius übergeht. Zudem lässt sich in **Tabelle 6-III** erkennen, dass der Kolkverschleiß bei einer Schnittgeschwindigkeit von 200 m/min breiter ausfällt, als bei höheren Schnittgeschwindigkeiten. Die Verschleißbilder der beiden anderen Chargen sind in der **Tabelle A-III** und **Tabelle A-IV** illustriert.

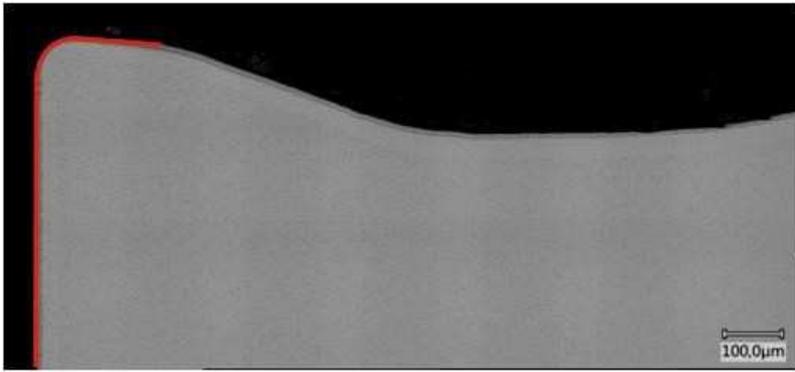
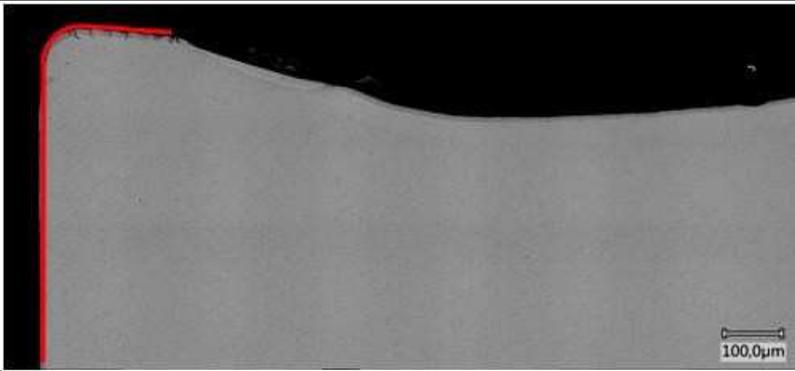
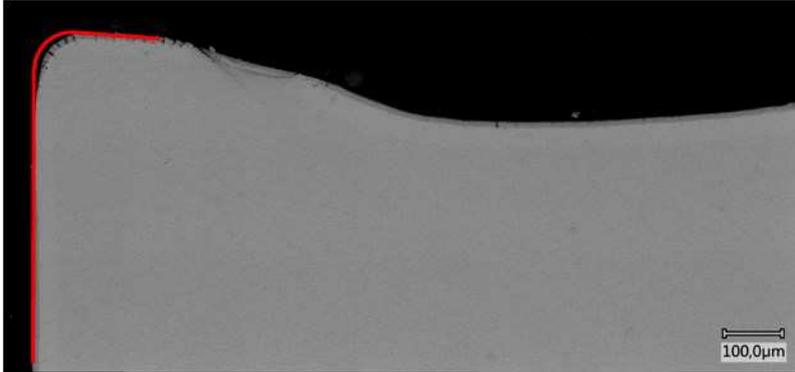
Tabelle 6-III: Verschleißbilder der M50-WSPs für die Charge V bei einem konstantem $f = 0,35 \text{ mm}$ und steigender Schnittgeschwindigkeit.

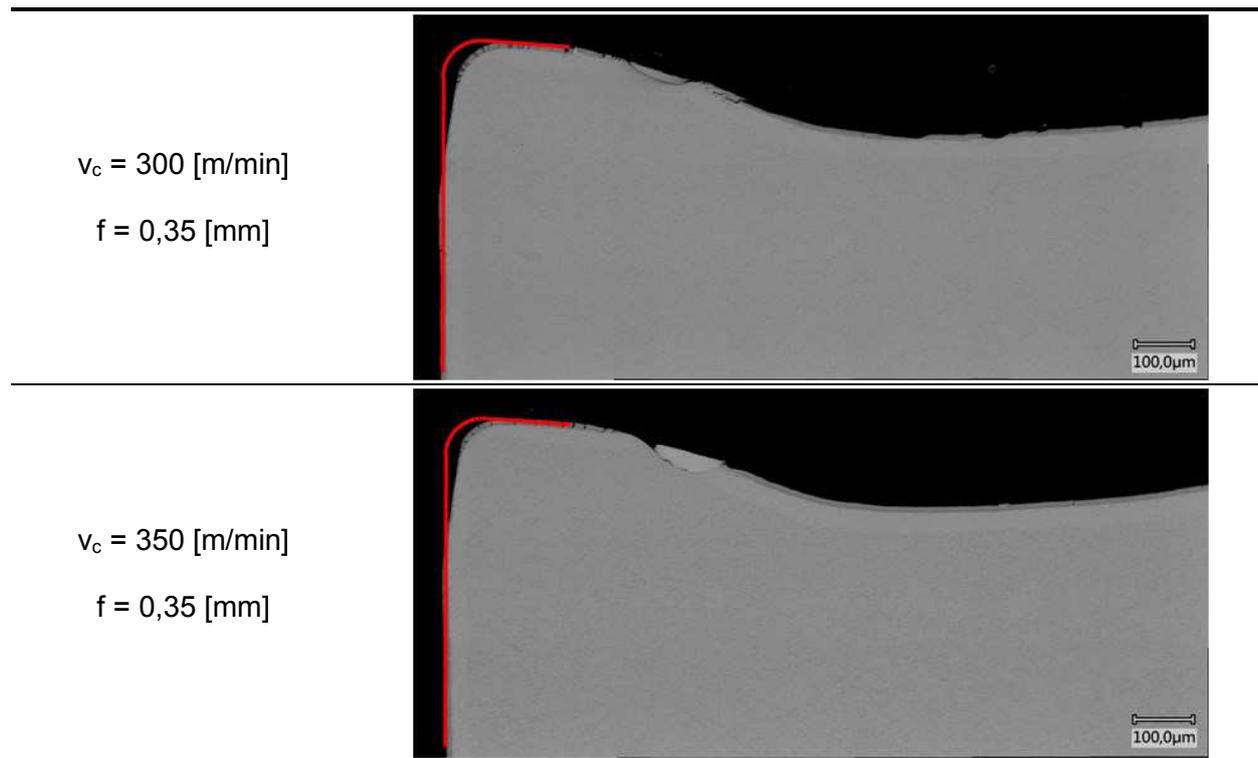
V_c [m/min]	Hauptschneide 20° verkippt	Hauptfreifläche
200	 <p>Neigungswinkel: 21 Grad 200µm</p>	 <p>200µm</p>
250	 <p>Neigungswinkel: 20 Grad 200µm</p>	 <p>200µm</p>
300	 <p>Neigungswinkel: 20 Grad 200µm</p>	 <p>200µm</p>
350	 <p>Neigungswinkel: 20 Grad 200µm</p>	 <p>200µm</p>

Zusätzlich sind die Schlitze der bereits in **Tabelle 6-III** illustrierten Wendeschneidplatten in der **Tabelle 6-IV** ersichtlich. Anhand der Schlitze ist erkennbar, dass die Hauptschneide ab einer Schnittgeschwindigkeit von 250 m/min nach innen und nach unten gedrückt wird. Dies zeugt von einer plastischen Verformung der WSP, die sich mit steigender Schnittgeschwindigkeit verstärkt.

Der Kolkverschleiß der Wendeschneidplatten befindet sich unabhängig von der Schnittgeschwindigkeit immer an der gleichen Position. Es ist ersichtlich, dass mit steigender Schnittgeschwindigkeit die Breite sinkt und die Tiefe des auftretenden Kolkverschleißes steigt.

Tabelle 6-IV: Schlitze der M50-WSPs bei konstantem $f = 0,35$ mm und steigender Schnittgeschwindigkeit.

Schnittparameter	Charge V
Unbenutzte M50-WSP	
$v_c = 200$ [m/min] $f = 0,35$ [mm]	
$v_c = 250$ [m/min] $f = 0,35$ [mm]	



Einfluss des Vorschubs bei der Charge V:

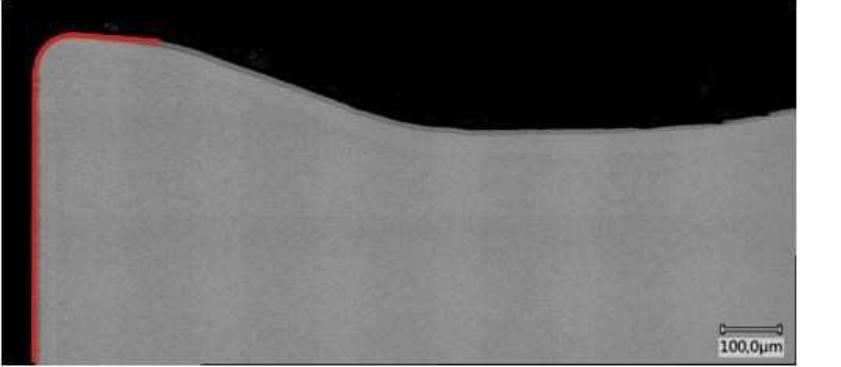
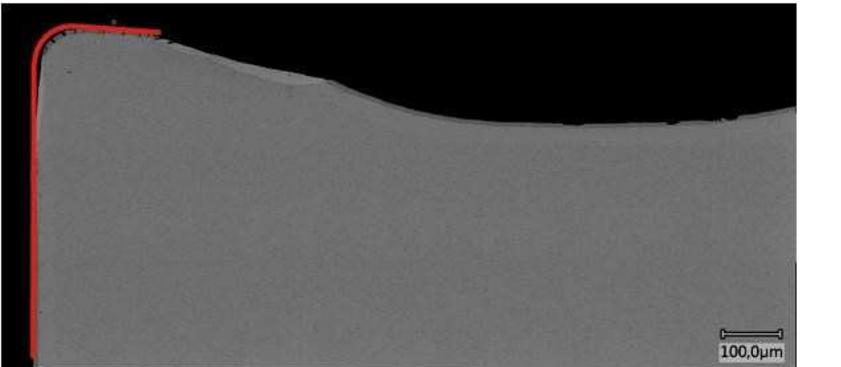
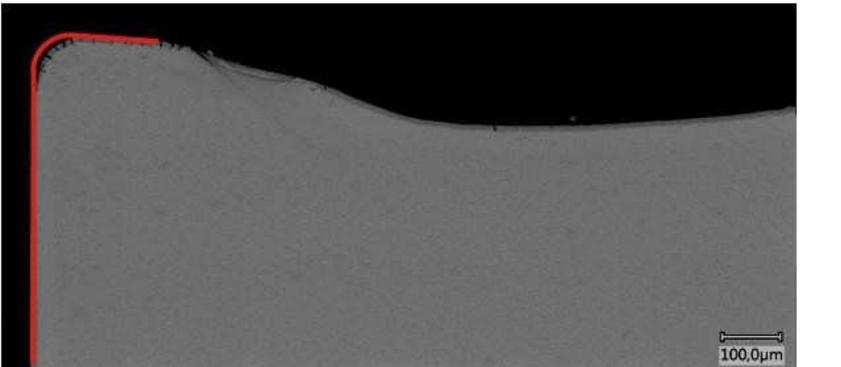
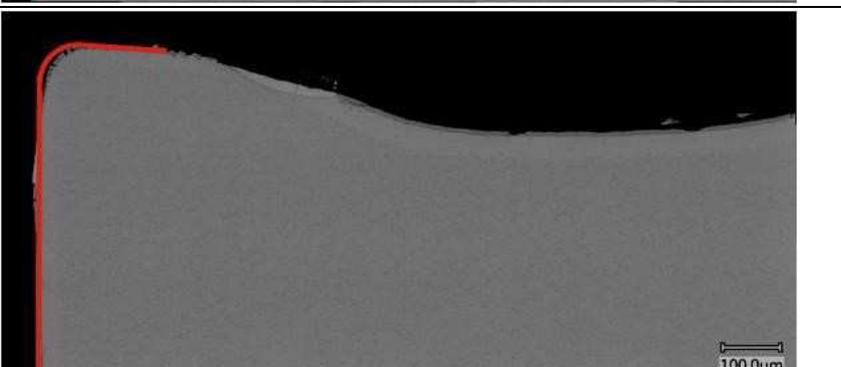
Die **Tabelle 6-V** gibt die Verschleißzustände der M50-WSPs bei konstanter Schnittgeschwindigkeit von 250 m/min und steigendem Vorschub wieder. Es lässt sich erkennen, dass sich die verschiedenen Verschleißbilder einander sehr ähneln. Abweichungen sind hauptsächlich durch Unterschiede im Freiflächenverschleiß erkennbar. Bei geringen Vorschüben befindet sich das Maximum des Freiflächenverschleißes weit entfernt von der Schneidenecke. Eine Steigerung des Vorschubs führt dazu, dass kein Maximum mehr beobachtbar und daher ein gleichmäßiger Freiflächenverschleiß entlang der Hauptschneide sichtbar ist. Die **Tabelle 6-V** zeigt, dass die drei Wendeschneidplatten einen unterschiedlich stark ausgeprägten Kolkverschleiß aufweisen. Der mittlere Vorschub führt zu einer Kolkverschleißbreite, die geringer ist als die der beiden anderen WSPs. Die Verschleißbilder der beiden anderen Chargen kann der **Tabelle A-I** und **Tabelle A-II** entnommen werden.

Tabelle 6-V: Verschleißbilder der M50-WSPs für die Charge V bei konstanter $v_c = 250$ m/min und steigendem Vorschub.

f [mm]	Hauptschneide 20° verkippt	Hauptfreifläche
0,30	 <p>Neigungswinkel: 20 Grad 200µm</p>	 <p>200µm</p>
0,35	 <p>Neigungswinkel: 20 Grad 200µm</p>	 <p>200µm</p>
0,42	 <p>Neigungswinkel: 20 Grad 200µm</p>	 <p>200µm</p>

Die **Tabelle 6-VI** illustriert die Schlitze der bereits in **Tabelle 6-V** dargestellten Wendschneidplatten. Die verschiedenen Schlitze weisen einen sehr ähnlichen Verschleißzustand auf. Der Kolkverschleiß befindet sich bei allen WSPs an der gleichen Position und zudem gibt es nur geringe Unterschiede in der Größe.

Tabelle 6-VI: Schlitze der M50-WSPs bei konstanter $v_c = 250$ m/min und steigendem Vorschub.

Schnittparameter	Charge V
<p>Unbenutzte M50-WSP</p>	
<p>$v_c = 250$ [m/min] $f = 0,30$ [mm]</p>	
<p>$v_c = 250$ [m/min] $f = 0,35$ [mm]</p>	
<p>$v_c = 250$ [m/min] $f = 0,42$ [mm]</p>	

6.1.2 Zerpanungsversuche mit CNMG120408EN-R58 Wendeschneidplatten

Die Zerpanungsversuche mit den Schruppplatten CNMG120408-R58 führten bei allen drei Stahlchargen zu dem Ergebnis, dass bei konstantem Zeitspanvolumen von 210 cm³/min mit steigendem Vorschub und sinkender Schnittgeschwindigkeit das zerspannte Volumen steigt. Ersichtlich sind diese Zerpanungstestergebnisse in **Abbildung 6-3**. Des Weiteren ist zu erkennen, dass sich mit der Schruppplatte bei einem Vorschub von 0,70 mm und einer Schnittgeschwindigkeit von 150 m/min das größte zerspannte Volumen erreichen lässt. Die Unterschiede der Zerpanungsergebnisse, beeinflusst durch die verschiedenen Stahlchargen variieren bei allen drei Schnittparameterpunkten nur gering. Es kann kein eindeutiger Einfluss der Charge auf das beim jeweiligen Versuch erreichte zerspannte Volumen beobachtet werden.

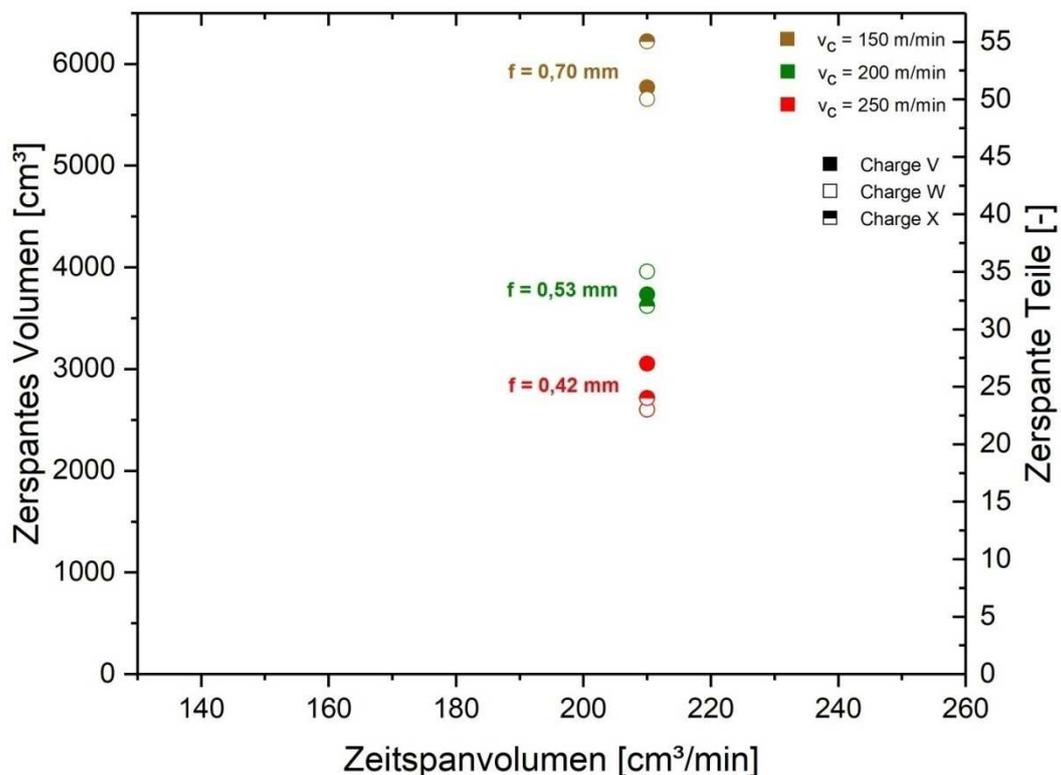


Abbildung 6-3: Zerpanungsergebnisse der CNMG120408-R58 Wendeschneidplatten.

In der **Tabelle 6-VII** können die Digitalmikroskopaufnahmen der verschlissenen R58-Wendeschneidplatten für die Charge V entnommen werden. Da die verwendeten Schneidwerkzeuge bei identen Schnittbedingungen, aber unterschiedlicher Stahlcharge annähernd gleich aussehen, illustriert die **Tabelle 6-VII** nur die WSPs der Charge V. Die WSP-Verschleißbilder der anderen Chargen sind in **Tabelle A-III** und **Tabelle A-IV** ersichtlich. Bei unterschiedlichen Schnittbedingungen und gleicher Stahlcharge verändert

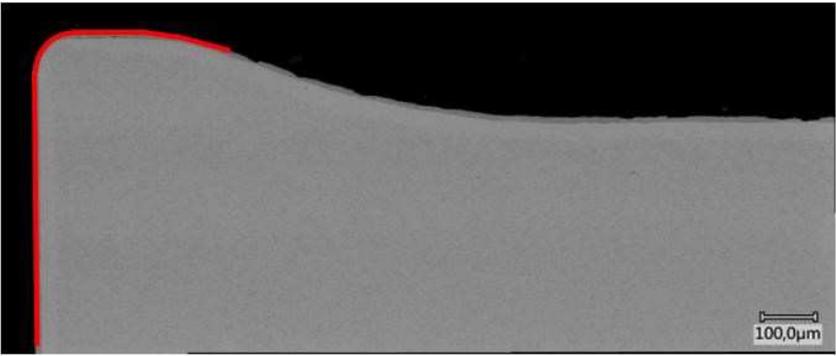
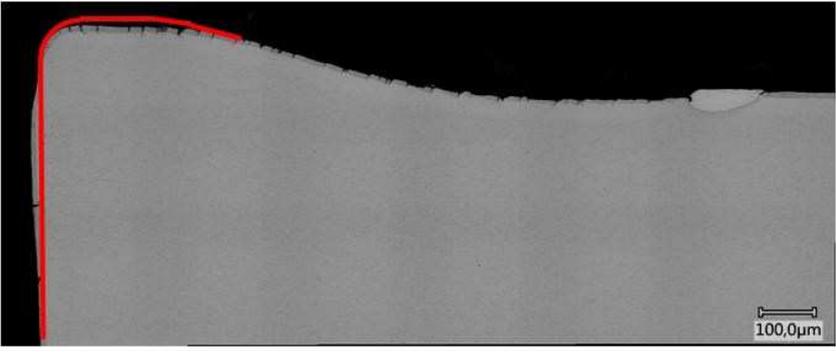
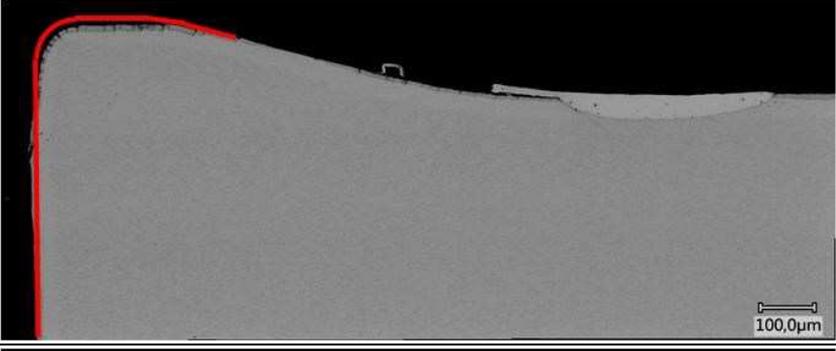
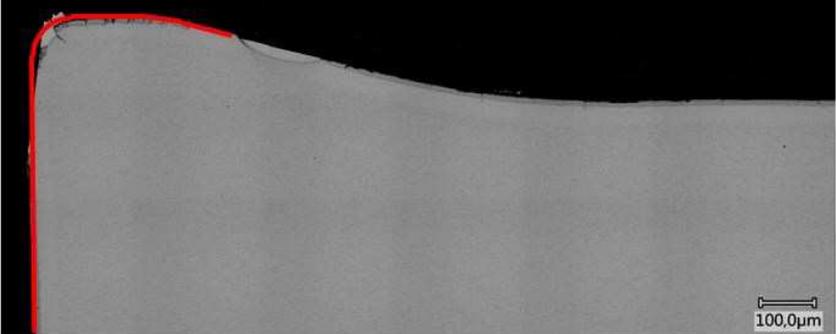
sich das Schädigungsbild an der WSP deutlich. Mit steigender Schnittgeschwindigkeit und sinkendem Vorschub verringert sich das Volumen der Stahlaufklebungen. Ebenfalls lässt sich eine Verringerung der Breite des Kolkverschleißes erkennen. Mit steigenden Schnittgeschwindigkeiten und verringerten Vorschüben verändert sich der Freiflächenverschleiß von einem über der Hauptschneide gleichmäßig verlaufenden Verschleiß, hin zu einem der Freiflächenverschleiß, dessen Breite hin zur Schneidenecke abnimmt. Ferner ist ersichtlich, dass bei einer Schnittgeschwindigkeit von 150 m/min und einem Vorschub von 0,70 mm eine deutliche Plastifizierung an der Schneidenecke auftritt. Zu dieser kommt es ebenfalls bei einer Schnittgeschwindigkeit von 200 m/min und einem Vorschub von 0,53 mm, jedoch in einer weniger ausgeprägten Form.

Tabelle 6-VII: Verschleißbilder der R58-WSPs für die Charge V bei konstantem Zeitspanvolumen von 210 [cm³/min].

Schnitt- parameter	Hauptschneide 20° verkippt	Hauptfreifläche
$v_c = 150$ [m/min] $f = 0,70$ [mm]		
$v_c = 200$ [m/min] $f = 0,53$ [mm]		
$v_c = 250$ [m/min] $f = 0,42$ [mm]		

Zusätzlich sind in der **Tabelle 6-VIII** die Schliffe der verwendeten Wendeschneidplatten von den Zerspanungsversuchen der Charge V dargestellt. Zudem enthält sie auch den Schliff einer unbenutzten R58-Wendeschneidplatte, um die Verformungen der benutzten WSP besser darstellen zu können.

Tabelle 6-VIII: Schliffe der R58-WSPs für Charge V.

Schnittparameter	Charge V
Unbenutzte R58-WSP	
$v_c = 150$ [m/min] $f = 0,70$ [mm]	
$v_c = 200$ [m/min] $f = 0,53$ [mm]	
$v_c = 250$ [m/min] $f = 0,42$ [mm]	

In der **Tabelle 6-VIII**, welche die Schliffe der R58-WSPs abbildet, ist zu sehen, dass der Kolkverschleiß mit steigender Schnittgeschwindigkeit näher zur Hauptschneide wandert. Den stärksten Kolkverschleiß besitzt die Wendeschneidplatte des Versuchs mit $v_c = 200$ m/min und $f = 0,53$ mm. Zudem lässt sich an allen R58-WSPs außer an der des Zerspanungstests mit einer Schnittgeschwindigkeit von 250 m/min und einem Vorschub von 0,42 mm eine deutliche Plastifizierung erkennen. Im Vergleich zur plastischen Verformung bei den M50-Wendeschneidplatten ist diese nur nach unten gedrückt. Zudem zeigt diese WSP eine merkliche Ausbauchung an der Hauptfreifläche.

6.1.3 Zerspanungsversuche mit CNMG120408EN-F50 Wendeschneidplatten

Die zerspannten Volumen der Zerspanungstests mit den F50-WSPs sind in **Abbildung 6-4** illustriert. Es lässt sich feststellen, dass bei konstantem Zeitspanvolumen eine Steigerung der Schnittgeschwindigkeit zu einer Senkung des zerspannten Volumens führt. Die Abweichungen des zerspannten Volumens in Abhängigkeit von der Stahlcharge fallen nur sehr gering aus. Keiner Charge kann eine positive Beeinflussung des Zerspanungsergebnisses zugerechnet werden.

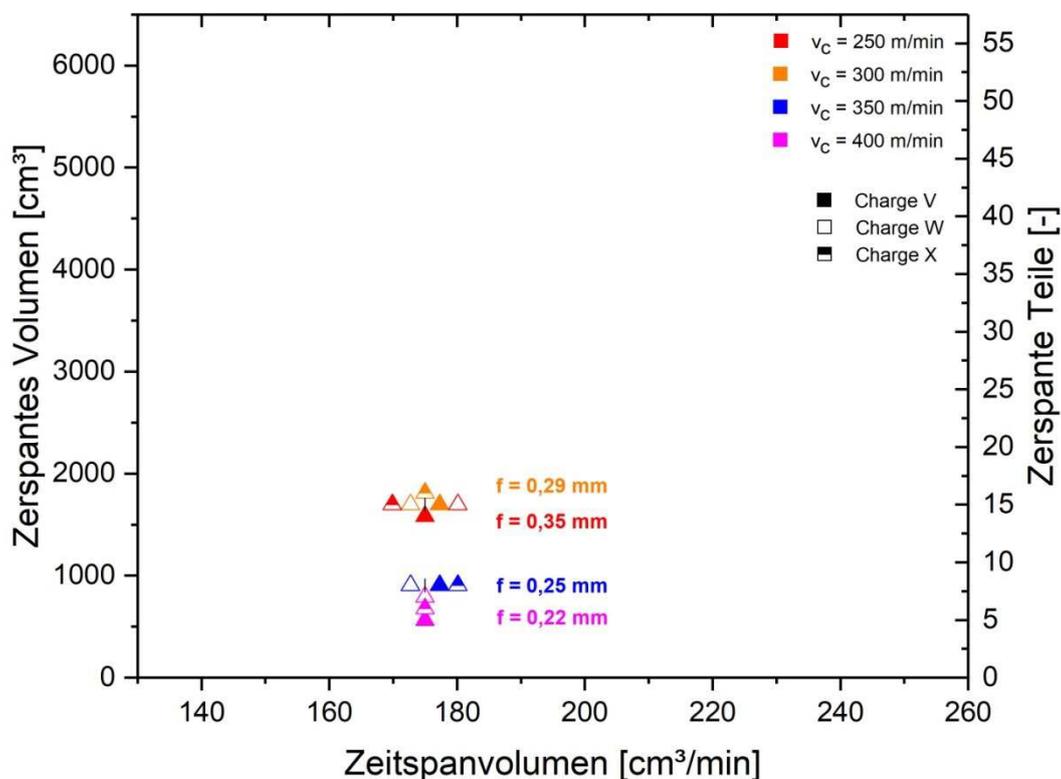
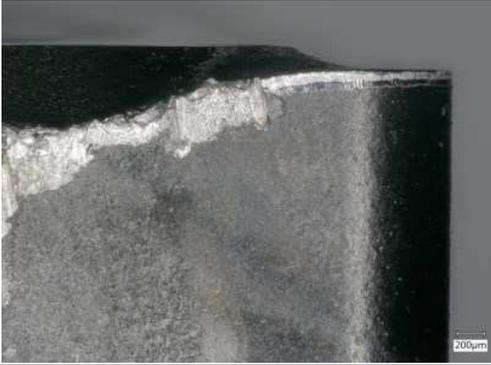


Abbildung 6-4: Zerspanungsergebnisse der CNMG120408-F50 Wendeschneidplatten.

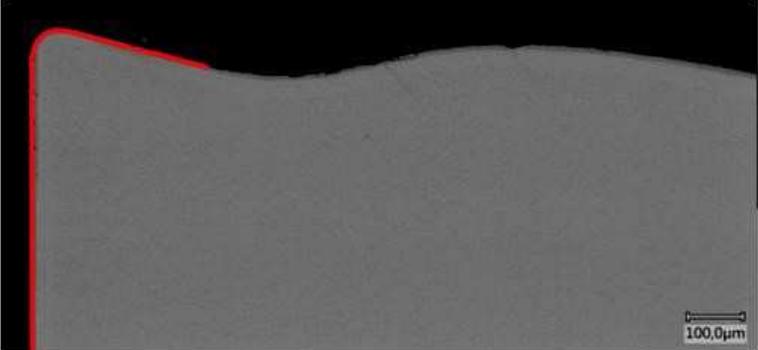
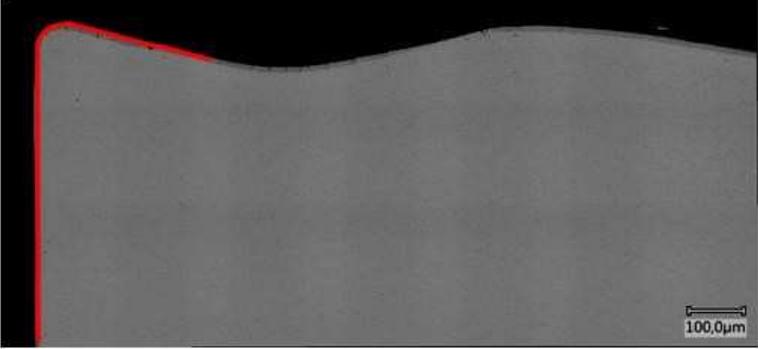
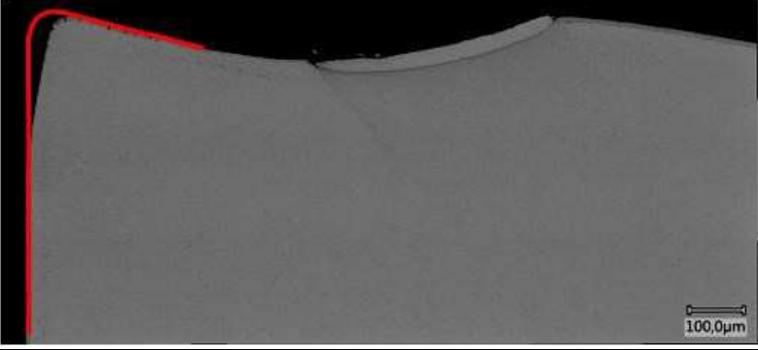
Die Verschleißbilder der F50-WSPs für die Charge V, welche mit Hilfe des Digitalmikroskops aufgenommen wurden, sind in **Tabelle 6-IX** ersichtlich. Mit steigender Schnittgeschwindigkeit tritt eine Reduzierung der Stahlaufschmierungen auf und des Weiteren verringert sich die Breite des Kolkverschleißes. Zudem ist zu erwähnen, dass bei dem Zerspanungsversuch mit einer Schnittgeschwindigkeit von 250 m/min und einem Vorschub von 0,35 mm ein Ausbruch der Schneidenkante zu einem vorzeitigen Ausscheiden der WSP führte. Dies konnte ebenfalls bei den anderen Chargen beobachtet werden, ersichtlich in **Tabelle A-V** und **Tabelle A-VI**. Bei den anderen Versuchen unterscheidet sich die Gestalt des Freiflächenverschleißes nur sehr gering voneinander. Das Maximum des Freiflächenverschleißes kann immer an der Position beobachtet werden, an welcher die Hauptschneide in den Schneidenradius übergeht.

Tabelle 6-IX: F50 Digitalmikroskopaufnahmen der WSP für Charge V bei einem konstanten Zeitspanvolumen von 175 [cm³/min].

Schnitt- parameter	Hauptschneide 20° verkippt	Hauptfreifläche
$v_c = 250$ [m/min] $f = 0,35$ [mm]	 <p style="text-align: right; font-size: small;">Neigungswinkel: 20 Grad 200µm</p>	 <p style="text-align: right; font-size: small;">200µm</p>
$v_c = 300$ [m/min] $f = 0,29$ [mm]	 <p style="text-align: right; font-size: small;">Neigungswinkel: 20 Grad 200µm</p>	 <p style="text-align: right; font-size: small;">200µm</p>
$v_c = 350$ [m/min] $f = 0,25$ [mm]	 <p style="text-align: right; font-size: small;">Neigungswinkel: 20 Grad 200µm</p>	 <p style="text-align: right; font-size: small;">200µm</p>
$v_c = 400$ [m/min] $f = 0,22$ [mm]	 <p style="text-align: right; font-size: small;">Neigungswinkel: 20 Grad 200µm</p>	 <p style="text-align: right; font-size: small;">200µm</p>

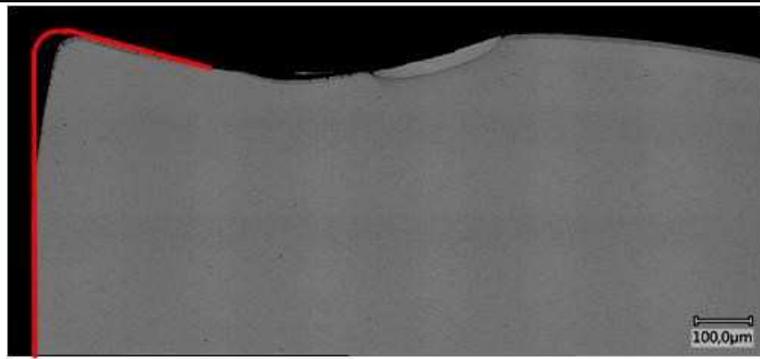
Die **Tabelle 6-X** bildet die Schlitze der verwendeten F50-Wendeschneidplatten für die Charge V ab. Ab einer Schnittgeschwindigkeit von 300 m/min tritt eine plastische Verformung der Wendeschneidplatten sowohl nach unten als auch nach hinten auf. Bei allen F50-WSPs, welche eine plastische Verformung aufweisen, ist die Verformung gleich stark ausgeprägt. Der Kolkverschleiß befindet sich bei allen betrachteten Wendeschneidplatten immer an derselben Position, lediglich dessen Größe ändert sich. Hierbei sinkt die Größe des Kolkverschleißes mit steigender Schnittgeschwindigkeit.

Tabelle 6-X: Schlitze der F50-WSPs für Charge V.

Schnittparameter	Charge V
<p>Unbenützte F50-WSP</p>	
<p>$v_c = 250$ [m/min] $f = 0,35$ [mm] (Abbruch wegen Ausbruch)</p>	
<p>$v_c = 300$ [m/min] $f = 0,29$ [mm]</p>	

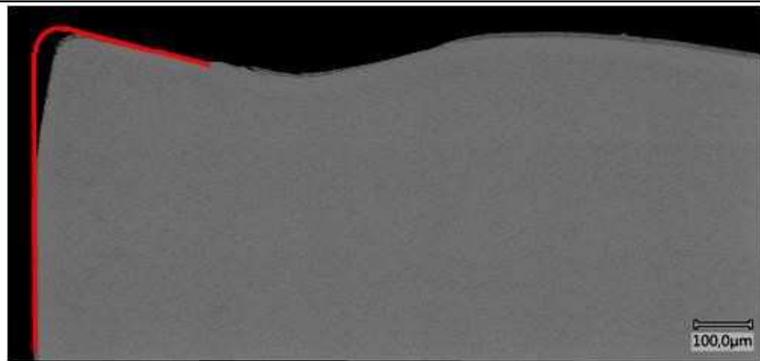
$v_c = 350$ [m/min]

$f = 0,25$ [mm]



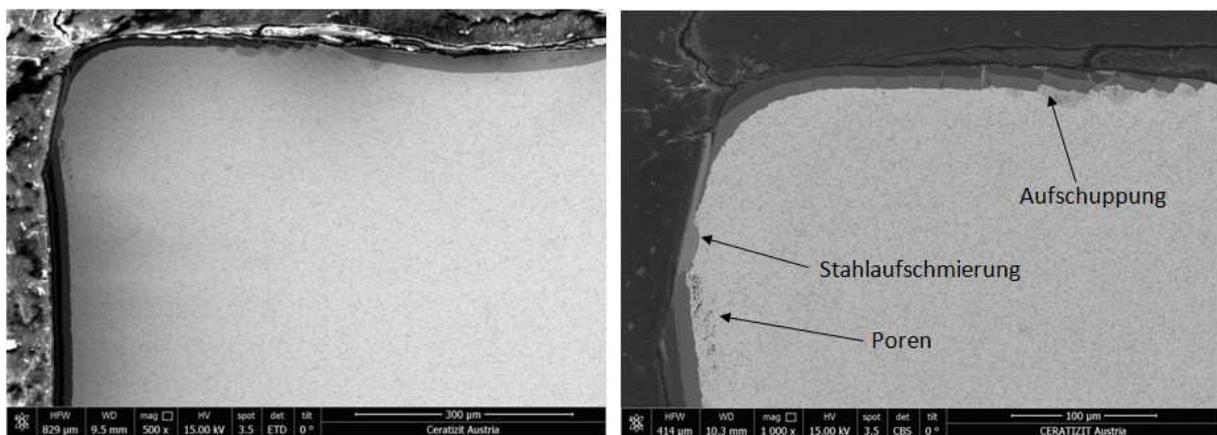
$v_c = 400$ [m/min]

$f = 0,22$ [mm]



6.2 REM-Untersuchung einer Wendschneidplatte

Die REM-Untersuchung der M50-Wendschneidplatte des Versuchs mit $v_c = 250$ m/min und $f = 0,30$ mm für die Charge V zeigt diverse Verschleißarten am Werkzeug auf. In **Abbildung 6-5** ist sowohl eine Übersichts- als auch eine Detailaufnahme der verschlissenen Wendschneidplatte ersichtlich. Es lässt sich ein deutlicher Kolkverschleiß an der Spanfläche, ein ausgeprägter Freiflächenverschleiß mit Stahlaufschmierung und Poren, entstanden durch die Plastifizierung, erkennen. Zudem kann eine Aufschuppung der Beschichtung auf der Spanfläche beobachtet werden.



Übersichtsaufnahme

Nahaufnahme

Abbildung 6-5: Übersichts- und Nahaufnahme einer WSP mittels REM.

In der **Abbildung 6-6a** ist ein vergrößertes Bild der Poren in der Nähe der Freifläche dargestellt. Zusätzlich gibt die **Abbildung 6-6b** eine detaillierte Aufnahme der Stahlaufschmierung an der Hauptfreifläche wieder.

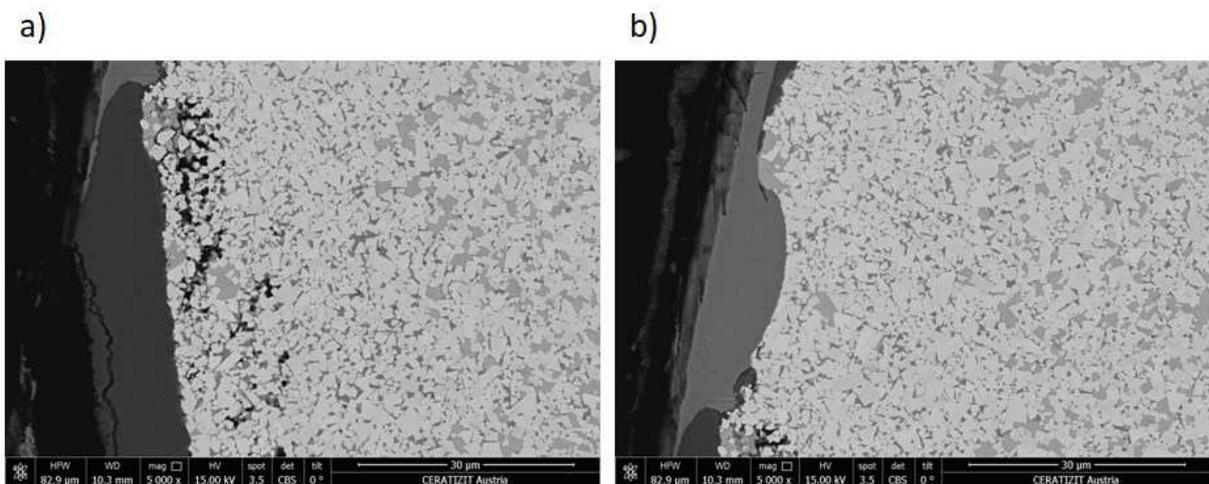


Abbildung 6-6: Poren und Stahlaufschmierung im Schliff der WSP.

Die Aufnahmen der aufgeschuppten Beschichtung mit höherer Vergrößerung zeigt die **Abbildung 6-7a**. Die Beschichtung weist Risse auf, welche durch die ganze Beschichtungshöhe laufen. An einigen Stellen ist zu sehen, dass sich die Beschichtungsstücke aufgrund der Destabilisierung durch die Risse, bei den hohen Zerspanungskräften aufgeschuppt haben. In der **Abbildung 6-7b** kann zudem hinein gepresster Stahl unterhalb beziehungsweise zwischen den Beschichtungsstücken entdeckt werden.

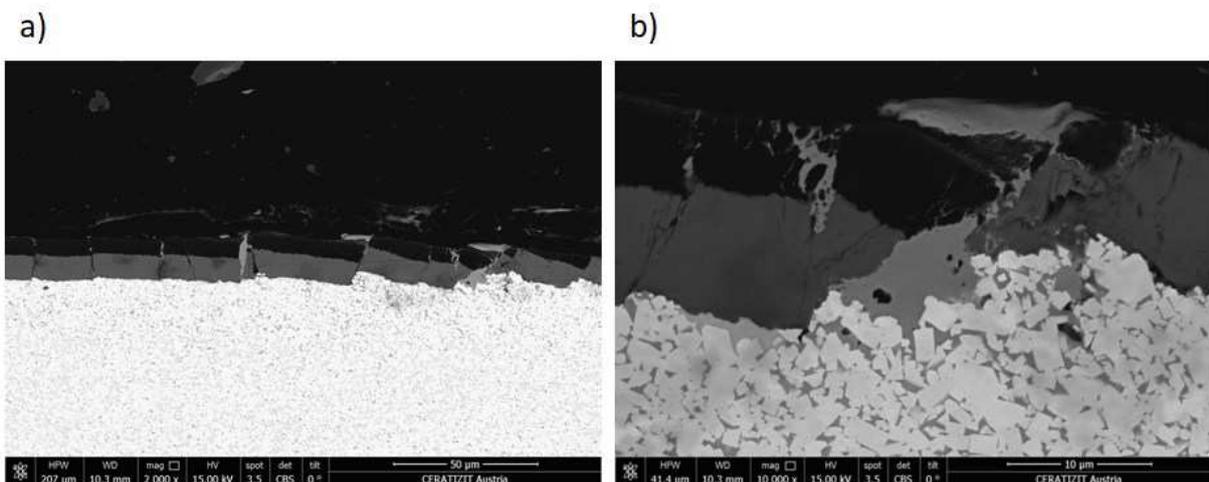


Abbildung 6-7: Übersichts- und Detailaufnahme der aufgerauten Beschichtung.

Neben den Rissen im aufgeschuppten Teil der Beschichtung, können des Weiteren auch Risse in den anderen Bereichen der Beschichtung detektiert werden. Diese verlaufen nicht nur durch die Beschichtung sondern verlaufen teilweise auch in das Hartmetall. Bei den

Rissen im Hartmetall handelt es sich sowohl um interkristalline (**Abbildung 6-8a**) als auch transkristalline Risse (**Abbildung 6-8b**).

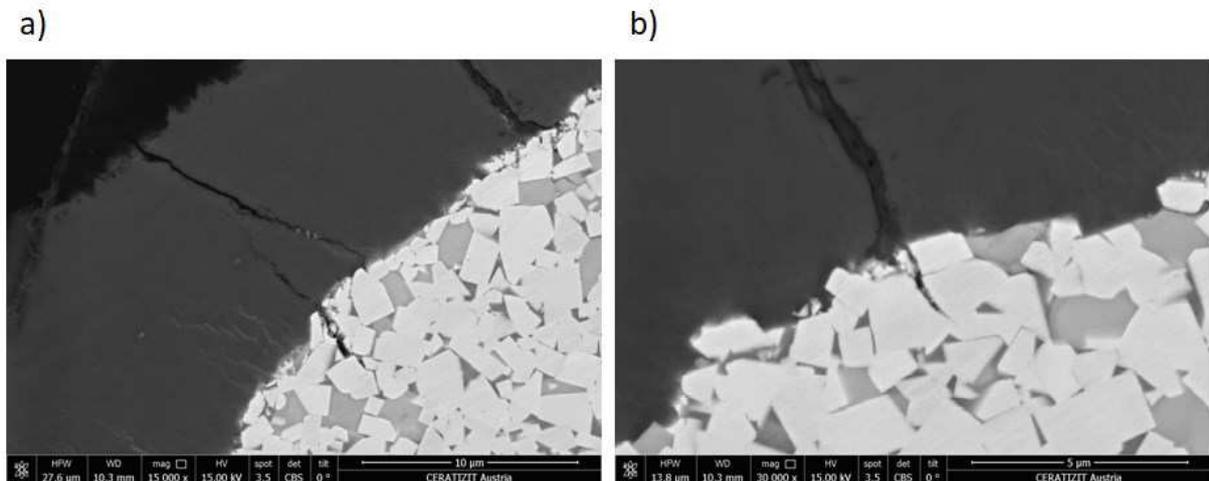


Abbildung 6-8: Interkristalline und transkristalline Risse.

Zu einer weiteren Erkenntnis führt die Untersuchung des Kolkverschleißes, siehe **Abbildung 6-9a**. Bei genauer Betrachtung kann festgestellt werden, dass die Mischkarbide, in der **Abbildung 6-9b** als dunkel graue Rauigkeitsspitzen dargestellt, dem Abtrag am meisten Widerstand entgegen setzen.

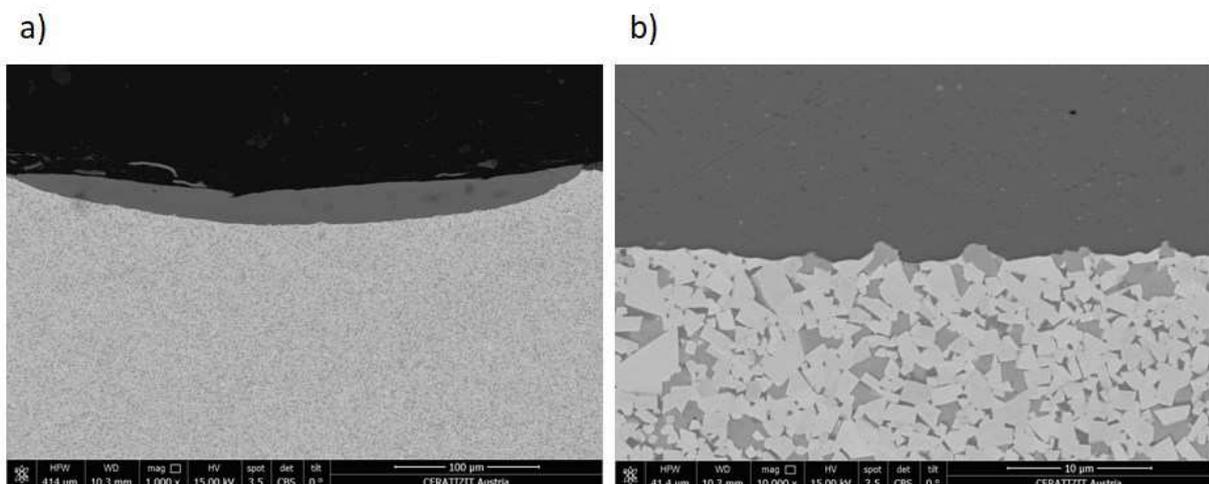


Abbildung 6-9: Übersichts- und Detailaufnahme des Kolkverschleißes.

6.3 Ergebnisse der automatisierten REM-EDX-Analyse

Dieses Kapitel gibt die Ergebnisse der automatisierten REM-EDX-Analyse der drei Stahlchargen wieder. Um die erfassten Daten besser darzustellen, werden die Messresultate der drei Proben jeweils für Längs- und Querschleif pro Charge zu einem Mittelwert zusammen gefasst. Die detaillierten Messdaten der einzelnen Proben können dem **Anhang A.2** entnommen werden.

6.3.1 Einschlussanzahl

Die detektierten Einschlussanzahlen der drei Chargen in der Längs- und Querprobe sind in der **Abbildung 6-10** zu sehen. Es lässt sich erkennen, dass der Längsschleif der Charge V die geringste Anzahl an Einschlüssen besitzt. Zudem kann darin nur eine sehr geringe Menge an Sulfiden aufgefunden werden. Der Vergleich Längs- zu Querprobe hinsichtlich Anzahl der NME zeigt, dass die Querschleife mehr nichtmetallische Einschlüsse enthalten. Die **Abbildung 6-10** illustriert zudem, dass die Querschleife mehr Sulfide als die Längsschleife aufweisen. Die Charge X besitzt die geringste Abweichung zwischen Längs- und Querprobe hinsichtlich Einschlussanzahl.

Die **Abbildung A-1** und **Abbildung A-2** illustrieren die Gesamteinschlussanzahlen aller Proben sowohl im Längs- als auch im Querschleif. Es kann festgestellt werden, dass die Einschlussanzahlen innerhalb der Chargen, also innerhalb der drei gemessenen Proben, im Querschleif am geringsten von einander abweichen. Im Längsschleif sind dagegen größere Schwankungen der Einschlussanzahlen innerhalb einer Charge erkennbar.

In der **Abbildung A-1** ist des Weiteren erkennbar, dass die Längsschleife der Probe 1 und Probe 8 die größte Deviation zum gemittelten Chargenwert aufweisen. Zusätzlich kann festgestellt werden, dass die Mengen der detektierten Einschlüsse in den Längsproben der Charge X stark voneinander unterscheiden.

Bei der detaillierten Betrachtung der Haupteinschlusstypen, ersichtlich in **Abbildung A-5**, **Abbildung A-6** und **Abbildung A-8**, fällt auf, dass in der Charge X im Gegensatz zu V und W keine Nb-haltigen Einschlüsse enthalten sind.

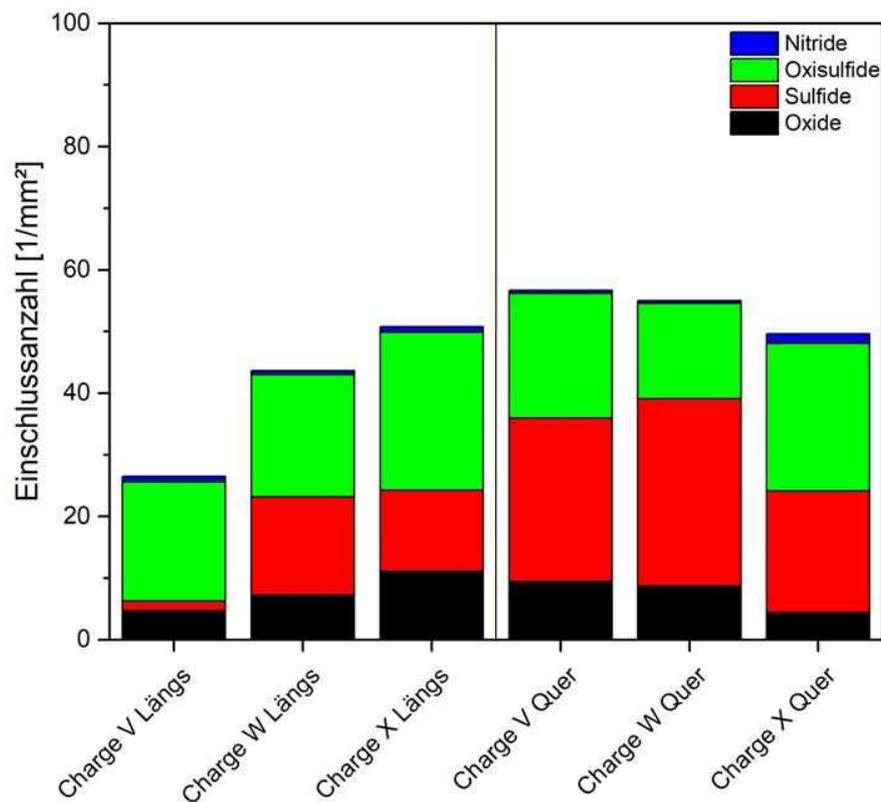


Abbildung 6-10: Einschlussanzahl der drei Chargen.

Die **Abbildung 6-11** illustriert die 10 häufigsten Einschlusstypen der verschiedenen Chargen. Die Einschlussanzahl der verschiedenen Typen von Einschlüssen variiert mit den drei Chargen und mit Quer- und Längsschliff. Es ist feststellbar, dass überwiegend Sulfide und Oxisulfide auffindbar sind. Alle mengenmäßig am häufigsten detektierten Einschlusstypen enthalten Kalzium. Zudem kann eine geringe Schwankung zwischen Längs- und Querschliff der Probe hinsichtlich der Einschlussanzahl pro mm² beobachtet werden.

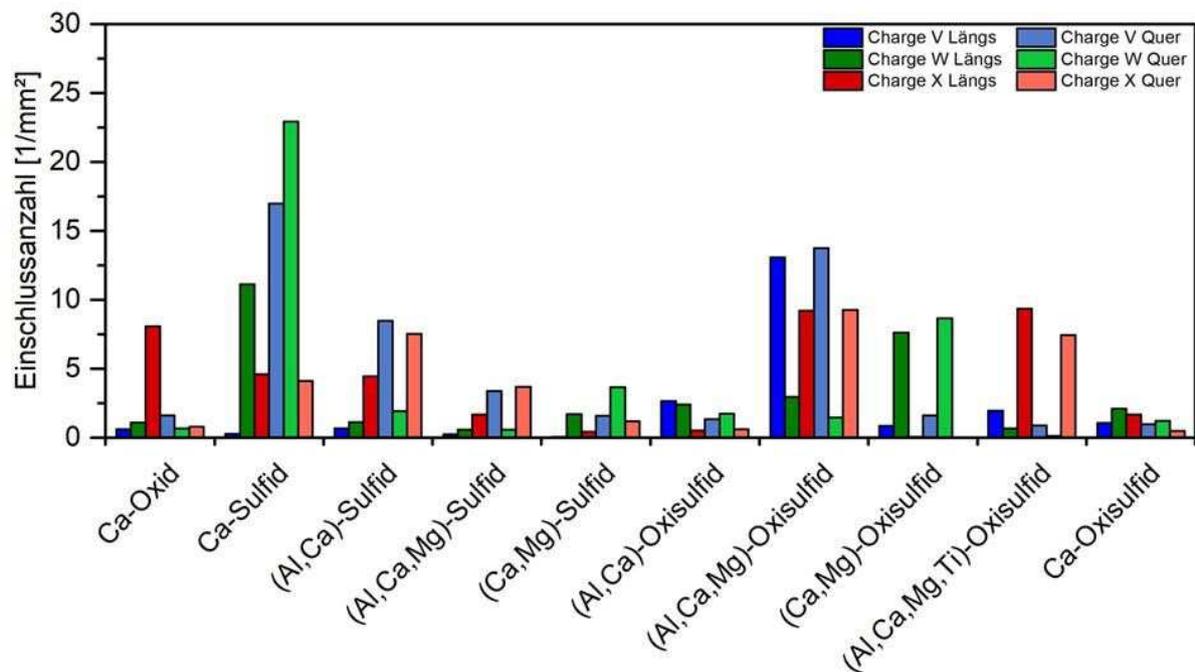


Abbildung 6-11: Einschlussanzahl der 10 häufigsten Einschlüsse.

6.3.2 Einschlussgehalt

Der gemessene Einschlussgehalt der verschiedenen Chargen kann der **Abbildung 6-12** entnommen werden. Der gemessene Einschlussgehalt ist im Längsschliff der Charge V am geringsten und im Querschliff der selbigen Charge am höchsten. Zudem lässt sich erkennen, dass der Einschlussgehalt der Querproben bei den Chargen V und W höher ist, als die der Längsproben. Bei der Charge X ist kein signifikanter Unterschied zwischen Quer- und Längsschliff hinsichtlich Gesamteinschlussgehalt erkennbar. Jedoch unterscheiden sich die gemessenen Gehalte der Sulfide, Oxide und Oxisulfide in den beiden Schliffarten. Des Weiteren kann festgestellt werden, dass der Einschlussgehalt an Sulfiden bei allen drei Chargen in den Querschliffen höher ist, als in den Längsschliffen.

Der Gesamteinschlussgehalt der einzelnen Proben für Längs- und Querschliff kann der **Abbildung A-3** und **Abbildung A-4** entnommen werden. Es zeigt sich, dass der Gesamteinschlussgehalt der Proben innerhalb einer Charge im Querschliff geringer voneinander abweicht als im Längsschliff.

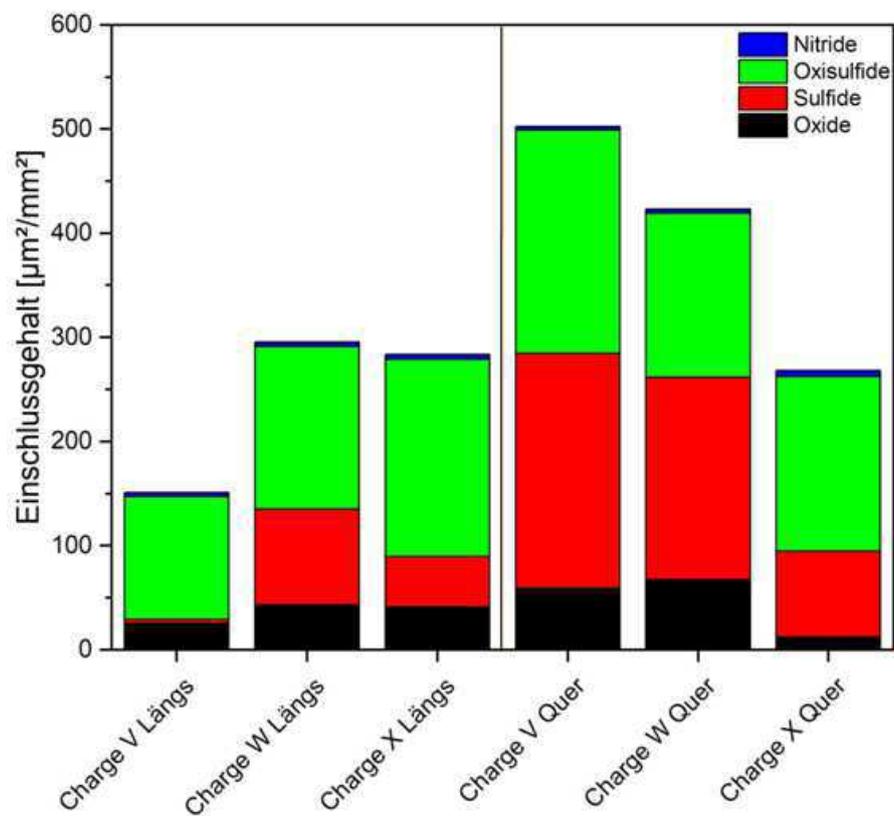


Abbildung 6-12: Einschlussgehalt der drei Chargen.

Der Einschlussgehalt der 10 häufigsten Einschlüsse variiert bei allen drei Chargen (**Abbildung 6-13**). Wie bereits bei der Einschlussanzahl kann auch beim Einschlussgehalt der 10 häufigsten Einschlüsse kein signifikanter Unterschied zwischen Längs- und Querschliff beobachtet werden.

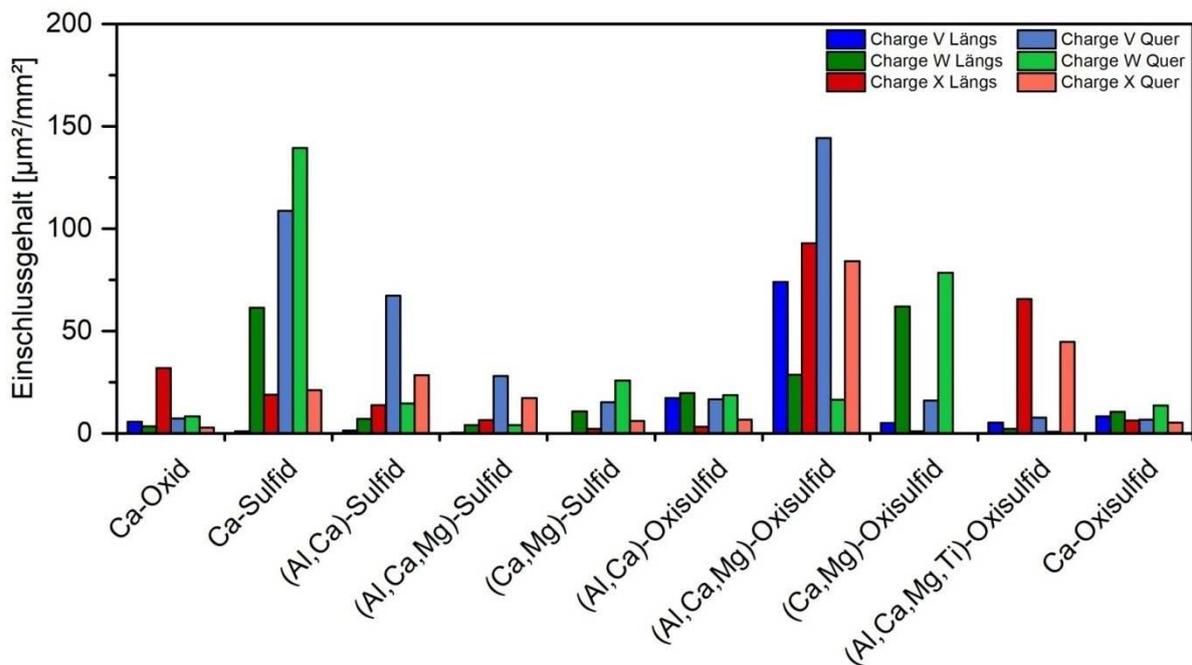


Abbildung 6-13: Einschlussgehalt der 10 häufigsten Einschlüsse.

6.3.3 Einschlussgröße

In der **Abbildung 6-14** sind die Größenverteilungen aller in den Chargen detektierten Einschlüsse illustriert. Bei dem abgebildeten Diagramm handelt es sich um ein Box-Whiskers-Diagramm, welches den Mittelwert (Kleines Viereck), die 25 % und 75 % Quartil, das den Größenbereich darstellt, in welchem sich 50 % aller Einschlüsse befinden (als Box symbolisiert), abbildet. Die Linie zwischen den Boxen gibt Auskunft über den Median der gemessenen Einschlussgrößen. Des Weiteren kann aufgrund der Kreuze auf den kleinsten und größten detektierten Einschluss in der Charge geschlossen werden. Zusätzlich repräsentieren die Antennen (Whisker) den Größenbereich, in welchem sich 90 % aller Einschlüsse befinden.

Die Einschlussgrößenverteilungen der verschiedenen Chargen ähneln einander sehr stark. Unterschiede bestehen hauptsächlich hinsichtlich des größten detektierten Einschlusses. Zudem lässt sich feststellen, dass die Boxen der 25 % und 75 % Quartile bei den verschiedenen Chargen im Längsschliff eine größere Breite als im Querschliff aufweisen. Im Längsschliff der Charge X kann der größte Einschluss detektiert werden. Wie die **Abbildung 6-14** illustriert, weisen alle Chargen in Quer- und Längsschliff eine homogene Größenverteilung auf.

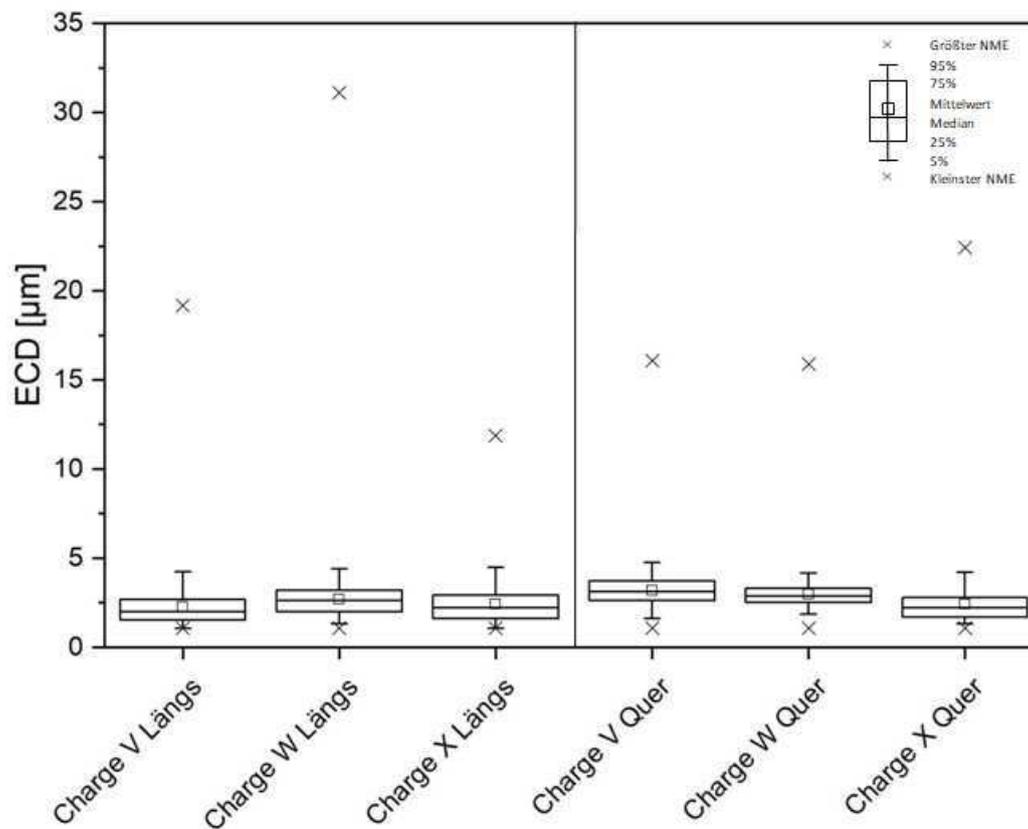


Abbildung 6-14: Einschussgrößenverteilung der drei Chargen.

Der gemittelte ECD der 10 häufigsten Einschusstypen für die drei Chargen ist in der **Abbildung 6-15** abgebildet. Es ist zu erkennen, dass die gemittelten ECDs innerhalb der Charge und Probenlage mit dem Einschusstyp variieren. Zusätzlich ist feststellbar, dass der ECD eines bestimmten Einschusstyps über die verschiedenen Chargen und Probenlagen voneinander abweichen. Bei den meisten Einschusstypen lässt sich eine Tendenz erkennen, wonach die Einschuss-ECDs im Längsschliff größer sind, als im Querschliff.

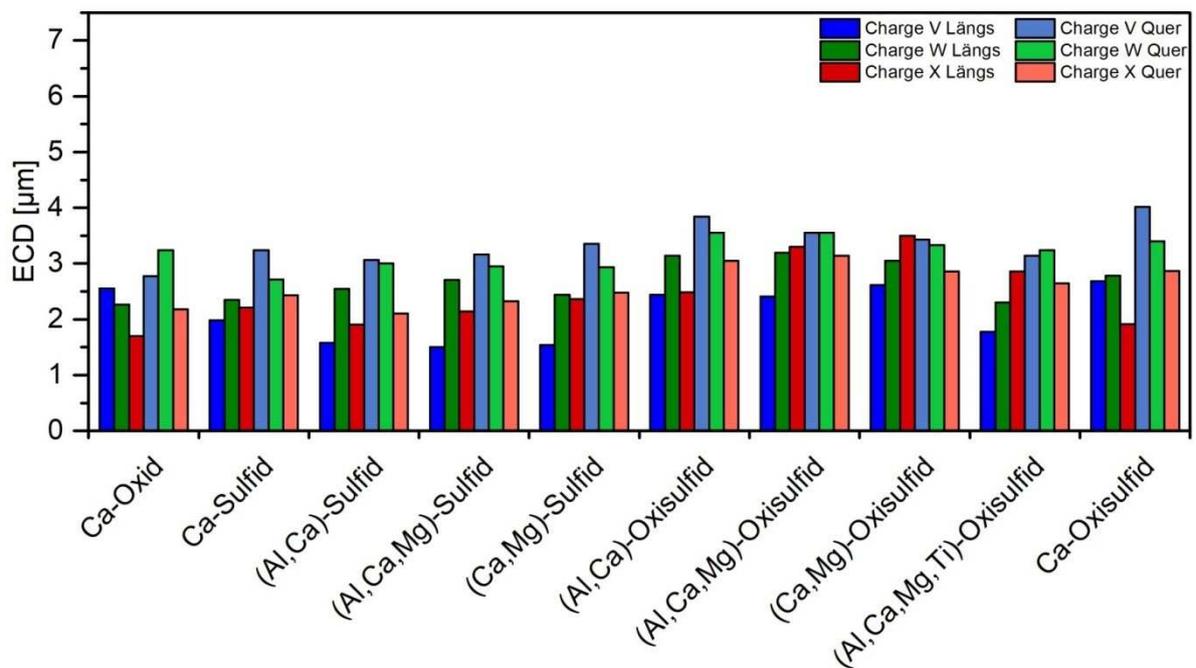


Abbildung 6-15: Einschussgröße der 10 häufigsten Einschlüsse.

6.4 Element-Mappings

Dieses Kapitel der Arbeit gibt Beispiele für die Gestalt und die chemische Zusammensetzung der häufigsten Einschlüsse in den Stahlchargen. Repräsentativ wird für die Haupteinschlussgruppen der Oxisulfide und Sulfide ein konkretes Beispiel gegeben. Für die Hauptgruppe der Sulfide zeigt die **Abbildung 6-16** das Elementmapping, eines im Querschliff einer Probe detektierten Ca-Sulfids. Die **Abbildung 6-17** und die **Abbildung 6-18** illustrieren sowohl ein (Al, Ca, Mg)-Oxisulfid in einem Querschliff als auch in einem Längsschliff. Der Einschluss im Querschliff weist einen runden Querschnitt auf. Beim Oxisulfid im Längsschliff kann hingegen eine deutliche Streckung beobachtet werden. Dies ist auf die Warmumformung durch das Walzen des Vorprodukts in ein Rundprofil und eine daraus resultierende Streckung der Einschlüsse in Längsrichtung zurückzuführen. Der in der **Abbildung 6-17** dargestellte Einschluss besitzt eine Seite, die aus CaS besteht und einen weiteren Teil, der ein (Al, Ca, Mg)-Oxid beinhaltet. Das (Al, Ca, Mg)-Oxisulfid, welches in der **Abbildung 6-18** dargestellt ist, besteht ebenfalls aus mehreren Bestandteilen. Deutlich erkennbar ist ein CaS-Schwanz mit einem (Al, Ca, Mg)-Oxidkopf. Elementmappings von weiteren detektierten Einschlüssen können dem **Anhang A.2** entnommen werden.

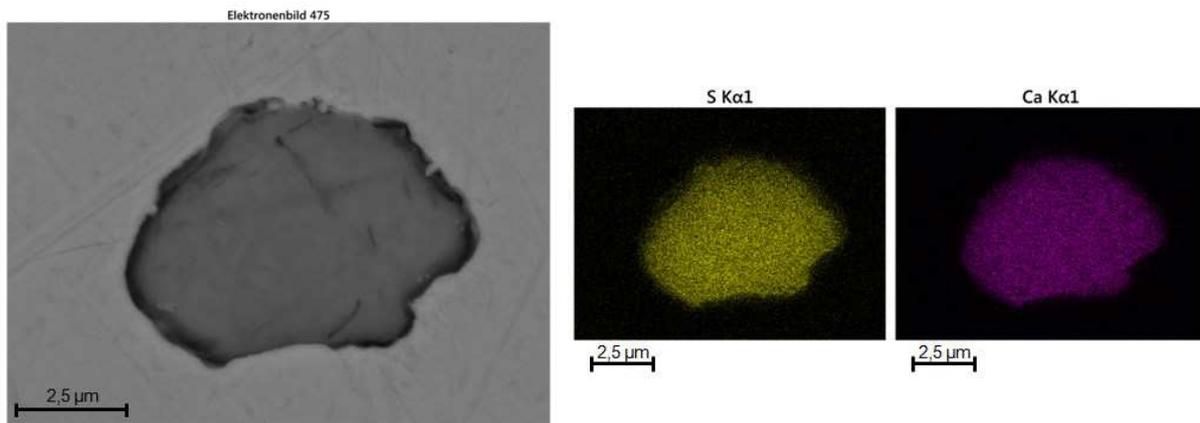


Abbildung 6-16: Mapping eines Ca-Sulfid (Querschliff).

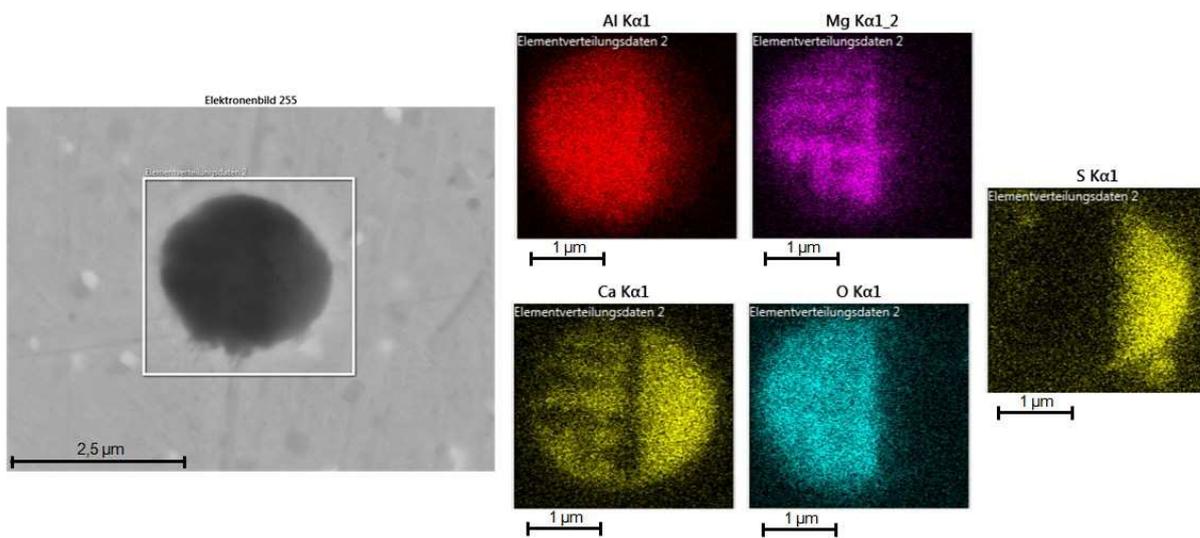


Abbildung 6-17: Mapping eines (Al, Ca, Mg)-Oxisulfid (Querschliff).

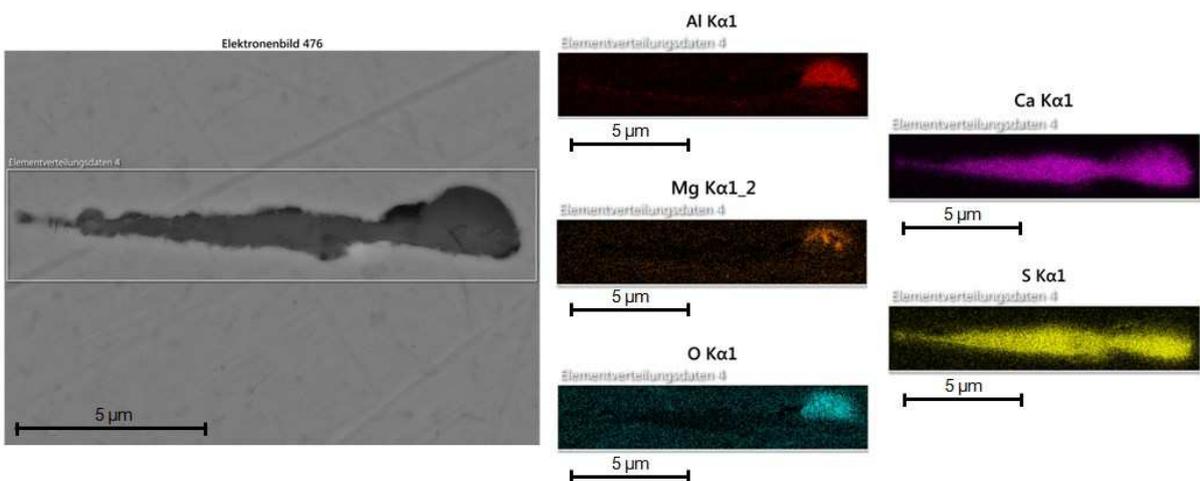
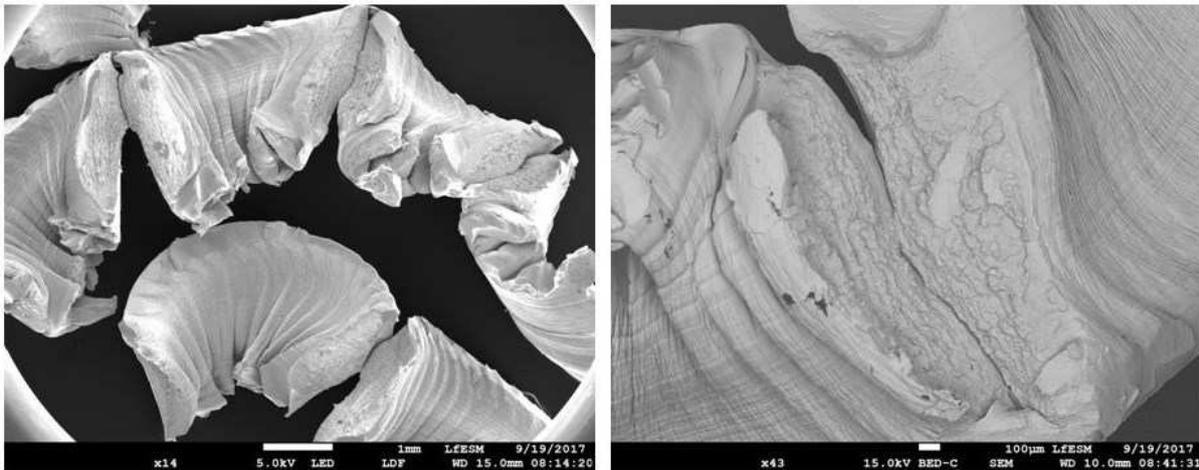


Abbildung 6-18: Mapping eines (Al, Ca, Mg)-Oxisulfid (Längsschliff).

6.5 REM-EDX-Untersuchung der Späne

Bei der Betrachtung der Innenseite der Späne (aufgeschuppte Seite) mittels REM-EDX können keine Einschlüsse entdeckt werden, jedoch ist es möglich in den Bruchflächen der Spanstücke, Einschlüsse mit dazugehöriger Kavität auf der gegenüberliegenden Bruchfläche zu detektieren. (**Abbildung 6-19**)

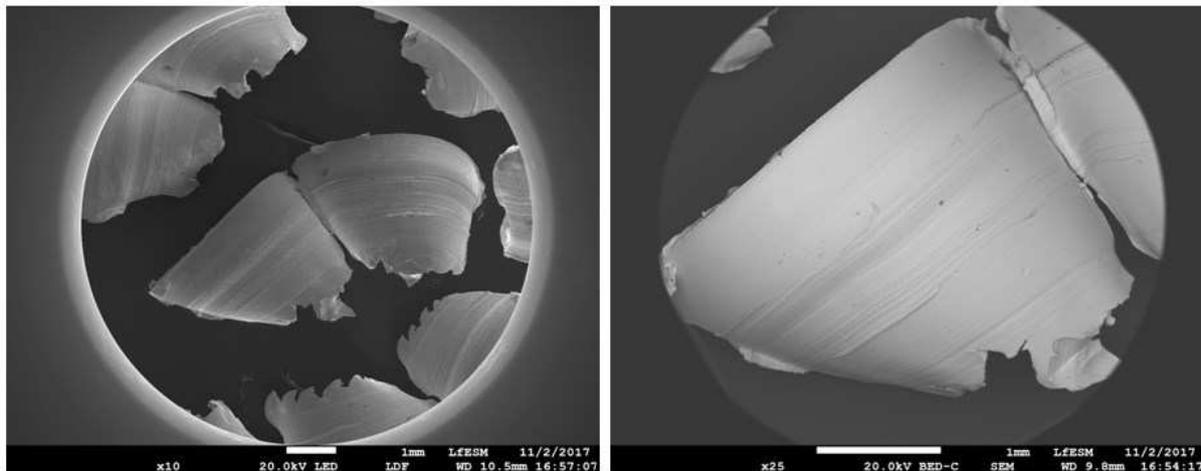


Übersichtsaufnahme

Nahaufnahme

Abbildung 6-19: REM-Aufnahme der Innenseite von den Spänen.

Bei der Untersuchung der Außenseite von Spänen (Schnittfläche) mittels REM-EDX ist es hingegen möglich, Einschlüsse nachzuweisen. Die **Abbildung 6-20** spiegelt eine Übersicht über die untersuchten Späne wieder und zudem zeigt es eine Nahaufnahme einer Spanaußenseite. Bei genauer Inspektion der Schnittfläche lassen sich deutliche Riefen erkennen.

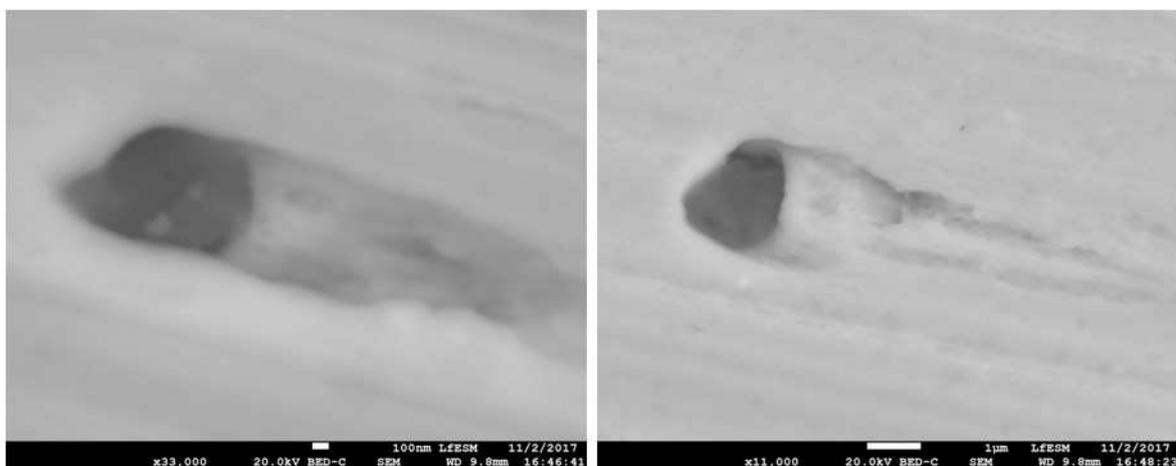


Übersichtsaufnahme

Nahaufnahme

Abbildung 6-20: Übersicht- und Nahaufnahme der Späne.

Bei den während der Untersuchung der Außenseite der Späne gefundenen Einschlüsse handelt es sich um Al-Oxide und (Al, Ca, Mg)-Oxide. (**Abbildung 6-21**). An den detektierten Oxiden kann keine plastische Verformung identifiziert werden. Allerdings ist immer eine deutliche Furche zu den nichtmetallischen Einschlüssen ersichtlich, diese entstand vermutlich durch das Mitschleifen der oxidischen Partikel während des Schneidvorganges. Eine andere Erklärung dafür wäre ebenso, dass die Furche die Kavität eines ursprünglichen CaS repräsentiert. Da während des Zerspanungsprozesses ein auf Wasserbasis hergestelltes Kühlschmiermittel Verwendung fand und CaS-Einschlüsse wasserlöslich sind, können sie auf Grund dessen während der Untersuchung nicht mehr aufgefunden werden.



Al-Oxid

(Al,Ca,Mg)-Oxid

Abbildung 6-21: Einschlüsse auf der Spanaußenseite.

Um einen Eindruck über die beeinflussten Bereiche des Spanquerschnittes zu erhalten, erfolgt zudem auch eine Untersuchung der Späne durch die Anfertigung eines Schliffes. Zwei Übersichtsaufnahmen der geschnittenen Späne sind in **Abbildung 6-22** zu sehen. An den Spänen lässt sich die glatte Außenseite (Schnittfläche) und die aufgeschuppte Innenseite erkennen.

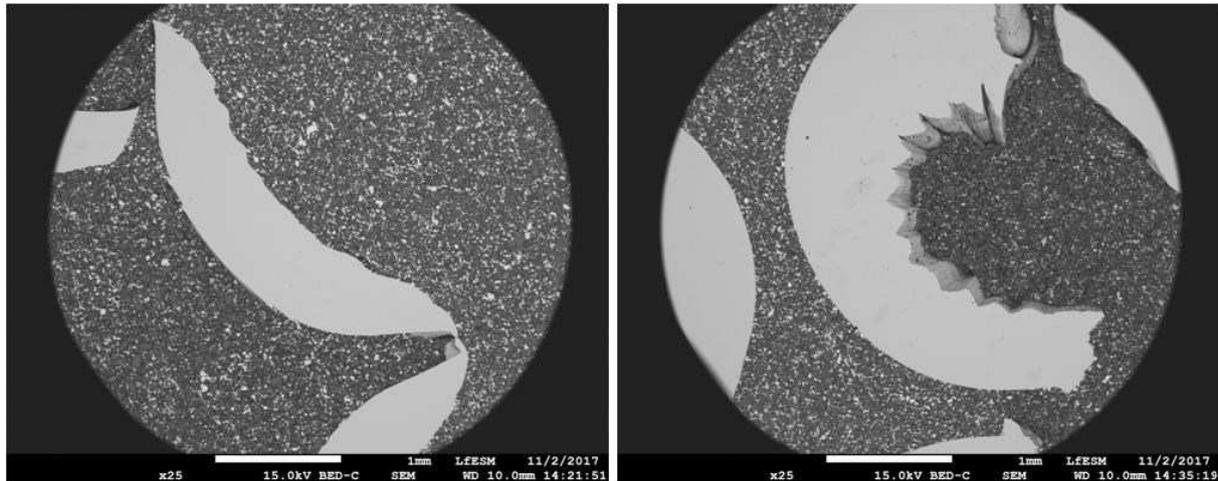
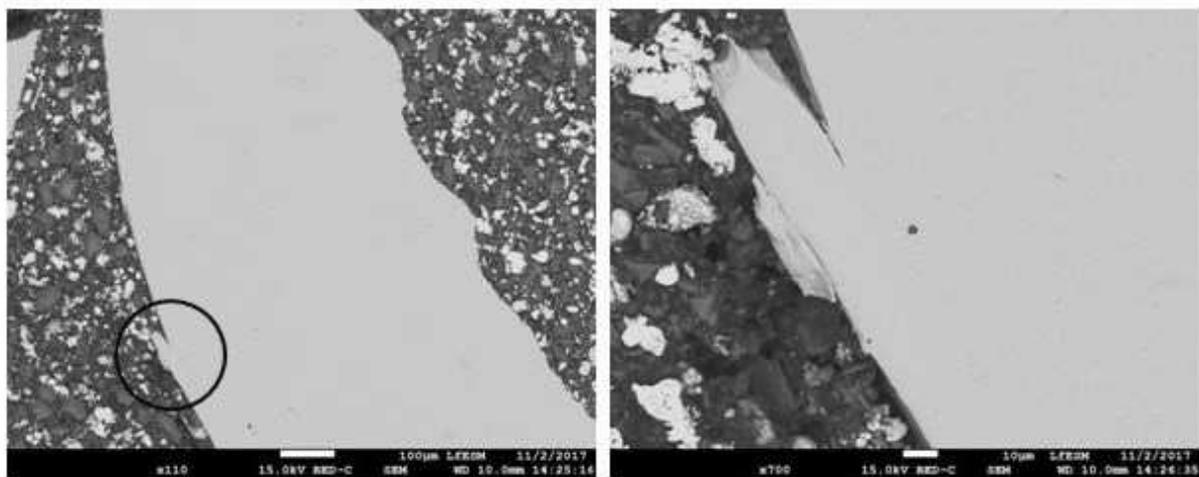


Abbildung 6-22: Übersichtsaufnahmen der Späne.

Die Überprüfung der Schnittflächen nach Einschlüssen führt zum Auffinden von mehreren Einschlüssen im Spanquerschnitt. Die **Abbildung 6-23** zeigt einen detektierten Einschluss in der Nähe der Spanaußenseite (Schnittfläche). Der schwarze Kreis in der Übersichtsaufnahme gibt die Position des in der Nahaufnahme illustrierten Einschlusses an. In der Nahaufnahme ist erkennbar, dass sich der Einschluss in einer Entfernung von ca. 20 μm von der Schnittfläche befindet. Bei genauer Betrachtung des Einschlusses kann keine Beeinflussung des NME durch die Zerspanung identifiziert werden (**Abbildung 6-24**).



Übersichtsaufnahme

Nahaufnahme

Abbildung 6-23: Einschluss auf der Spanaußenseite.

Das Elementmapping des Einschlusses aus **Abbildung 6-23** ist in **Abbildung 6-24** ersichtlich. Es kann festgestellt werden, dass es sich bei dem detektierten nichtmetallischen Partikel um ein (Al, Ca, Mg)-Oxid handelt.

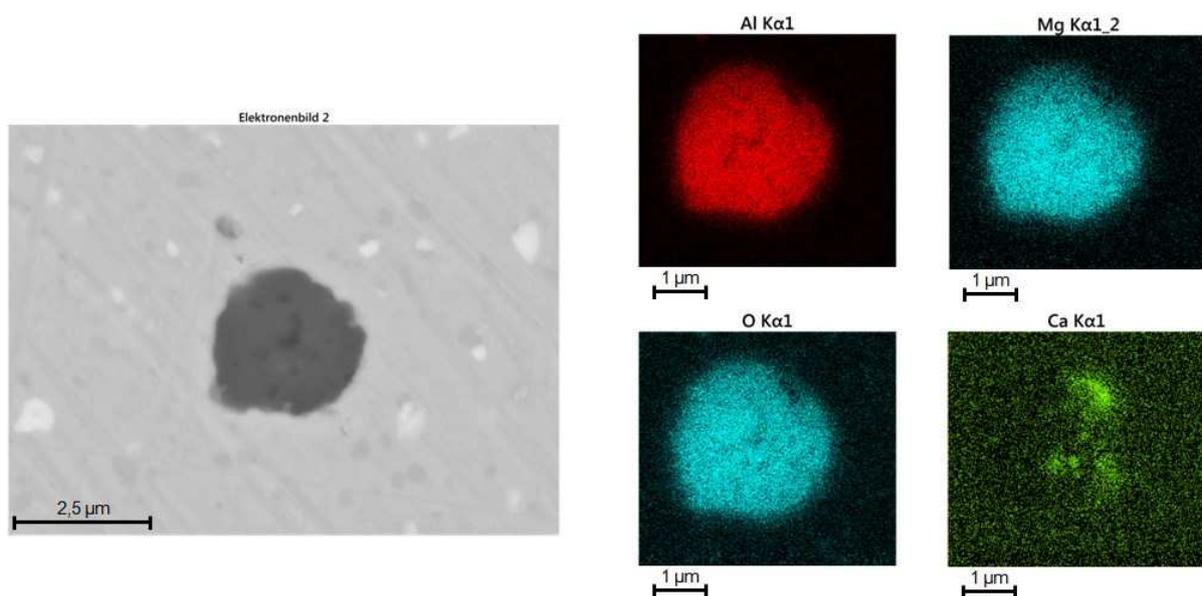
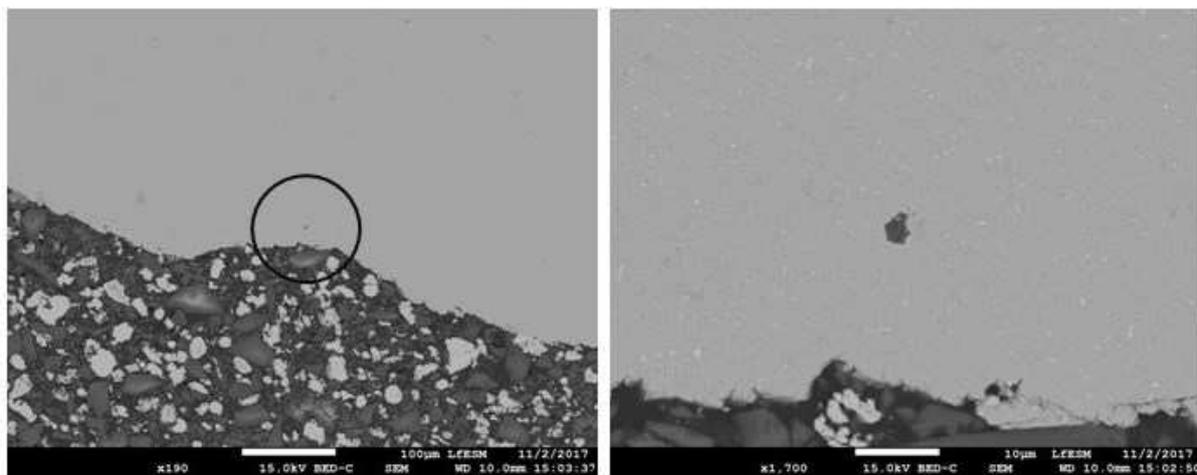


Abbildung 6-24: Elementmapping des Einschlusses nahe an der Schnittfläche.

Der detektierte NME in der Nähe der aufgeschuppten Spanoberfläche ist in der **Abbildung 6-25** dargestellt. Der in der Übersichtsaufnahme markierte Kreis gibt die Lage des in der Nahaufnahme illustrierten Einschlusses wieder. Der Einschluss befindet sich etwa 20 µm von der Spaninnenseite entfernt.



Übersichtsaufnahme

Nahaufnahme

Abbildung 6-25: Einschluss auf der Spaninnenseite.

Wie die **Abbildung 6-26** zeigt, kann an dem detektierten Einschluss keine Beeinflussung durch die Zerspanung entdeckt werden. Das Elementmapping des NME führt zur Erkenntnis, dass es sich bei dem detektierten nichtmetallischen Partikel um ein (Al, Ca, Mg)-Oxisulfid handelt.

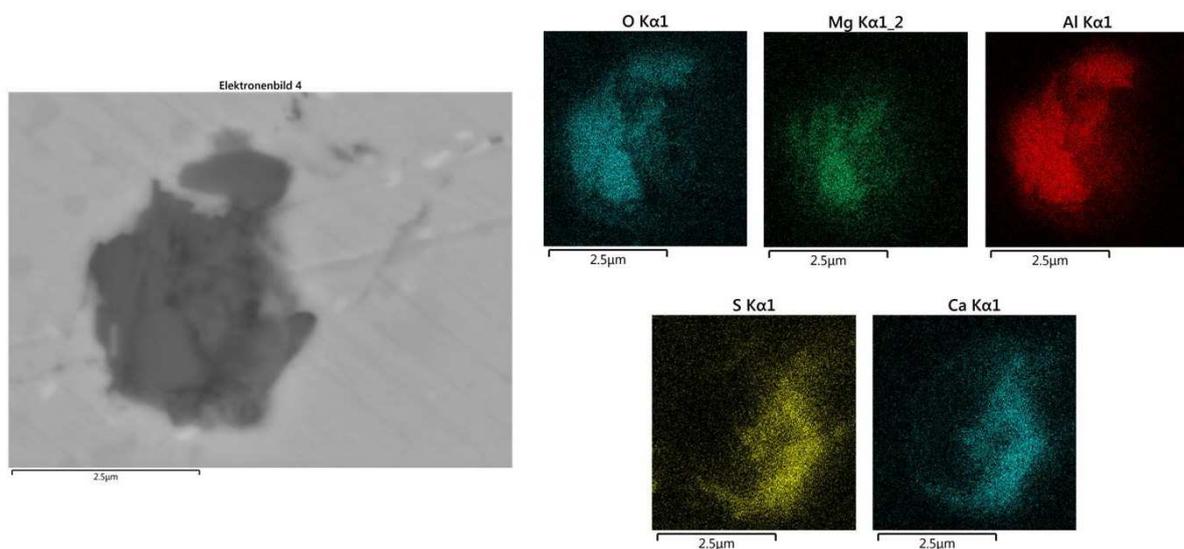


Abbildung 6-26: Elementmapping des Einschlusses nahe an der Spaninnenseite.

6.6 Metallographische Charakteristika der Stahlchargen

Das Gefüge der Chargen besteht aus einem weichgeglühten Bainit, beispielhaft dargestellt für den Querschliff der Charge X in **Abbildung 6-27**.

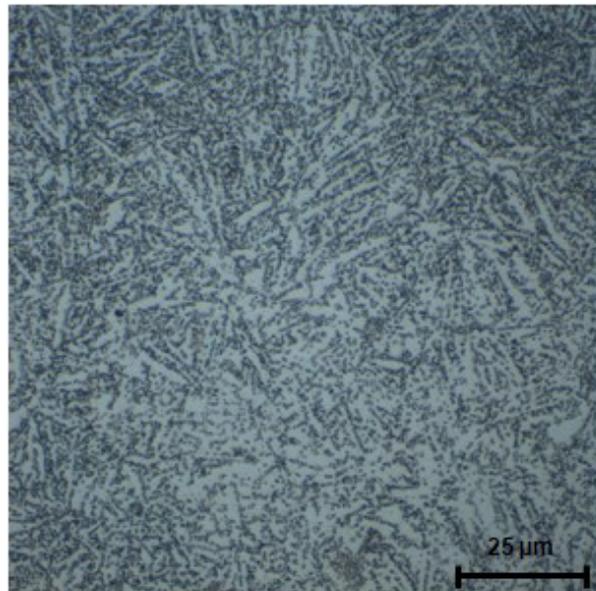
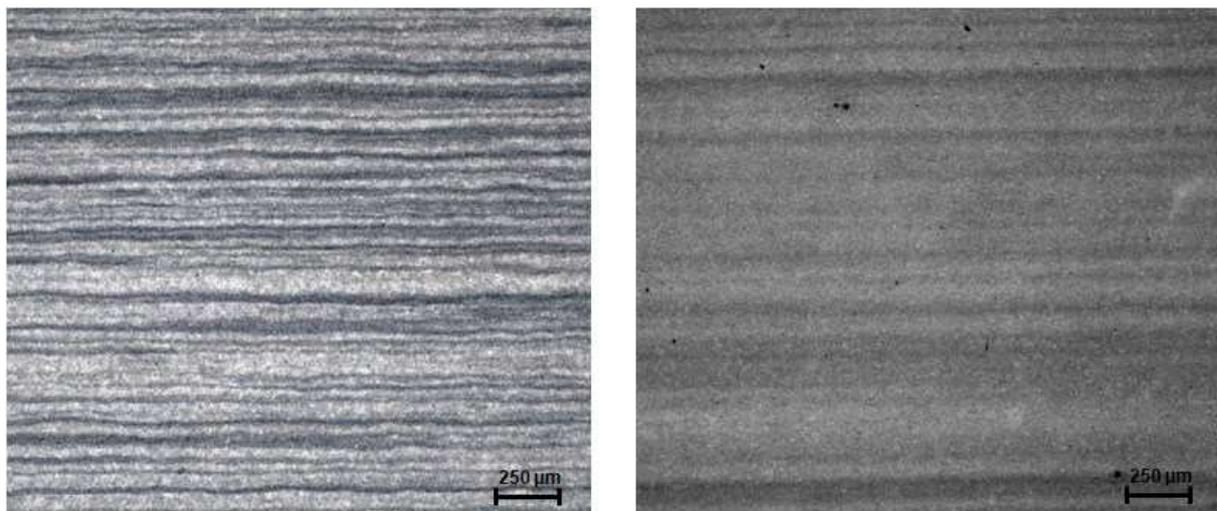


Abbildung 6-27: Bainitgefüge der Charge X im Querschliff (1000x).

Da bei den Zerspanungstests zwischen den Chargen V und X die größte Abweichung hinsichtlich zerspantem Volumen zu beobachten war, sind in der **Abbildung 6-28** die geätzten Längsschliffe der Charge X und V dargestellt. Im direkten Vergleich der beiden Schliffe kann festgestellt werden, dass die Charge X ein gröberes Gefüge als die Charge V aufweist.

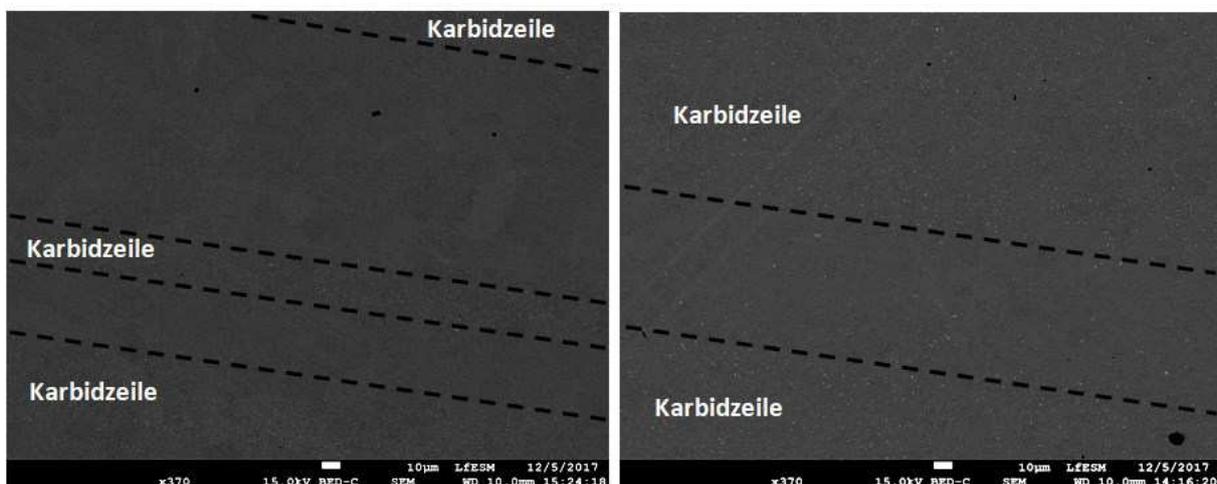


Charge V

Charge X

Abbildung 6-28: Geätzte Längsschliffe der Charge X und V (50x).

Die Erforschung der Karbidstruktur der Charge V und X ist in der **Abbildung 6-29** illustriert. Beide Chargen weisen eine homogene Karbidstruktur auf. Jedoch fällt auf, dass die Karbidzeilen in der Charge V eine geringere Breite als in der Charge X aufweisen.

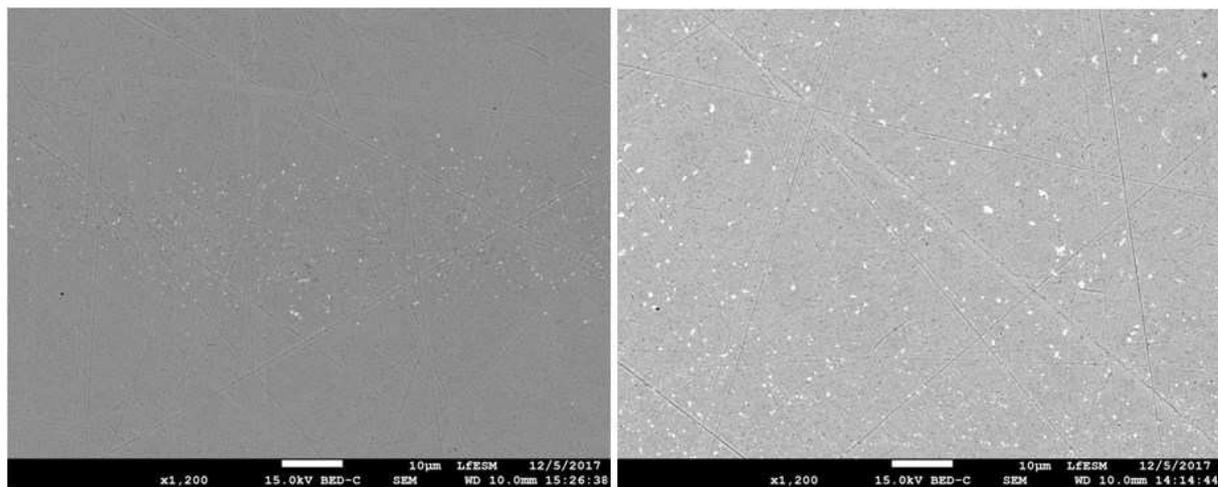


Charge V

Charge X

Abbildung 6-29: Karbidstruktur der Charge V und X (370x).

Abbildung 6-30 zeigt sowohl eine Detailaufnahme der Karbidstruktur der Charge V als auch der Charge X. Es ist erkennbar, dass die Charge V feinere Karbide als die Charge X aufweist.



Charge V

Charge X

Abbildung 6-30: Karbidstruktur der Charge V und X (1200x).

Die Ergebnisse der durchgeführten Härtemessung der drei Chargen kann der **Tabelle 6-XI** entnommen werden. Die gemittelten Härtewerte der drei Chargen weichen nur geringfügig voneinander ab. Die größte Härte weist die Charge X und die geringste die Charge V auf.

Tabelle 6-XI: Gemittelte Härtewerte der drei Chargen.

Charge	Härtewert [HV ₂₀]
V	210 ± 5
W	216 ± 4
X	218 ± 4

7 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Teil der Arbeit werden die durch die Zerspanungsversuche erhaltenen Ergebnisse diskutiert und Erklärungen für während der Arbeit aufgetretenen Auffälligkeiten gegeben.

7.1 Diskussion der Zerspanungsergebnisse

Die Ergebnisse der Zerspanungstests weisen eine eindeutige Konsistenz auf, sind also dementsprechend repräsentativ. Die sehr geringen Abweichungen der zerspannten Volumen bei gleichen Versuchsparametern aber unterschiedlicher Charge können nicht der Werkstoffcharge zugerechnet werden. Dies ist begründet durch das Fehlen der Tendenz, wonach sich eine Charge besser zerspanen lässt als die Andere. Die großen absoluten Abweichungen zwischen den Chargen bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten können dadurch erklärt werden, dass sich aufgrund des hohen zerspannten Volumens auch naturgemäß größere Unterschiede einstellen. Die relative Abweichung entspricht im Gegensatz zu den absoluten Werten etwa den Versuchen mit niedrigen Schnittgeschwindigkeiten.

Zusätzlich hat die automatisierte REM-EDX-Messung keine signifikanten Unterschiede in der Einschlusslandschaft der drei Chargen gezeigt, was sich auch in den Zerspanungsergebnissen wieder spiegelt.

Die unterschiedlichen zerspannten Volumen der Versuche mit gleichen Schnittparametern aber unterschiedlicher Charge können möglicherweise durch folgende Ursachen entstanden sein:

- **Einfluss des Zerspanungstechnikers:**

Die Bestimmung der Verschleißmarkenbreite einer Wendeschneidplatte erfolgt visuell mittels Mikroskop und ist bei manchen Wendeschneidplatten nicht eindeutig messbar. Je nach Einschätzung des Zerspanungstechnikers wird mit der WSP noch ein weiteres Teil zerspannt oder nicht.

- **Einfluss der Werkstoffcharge:**

Die Chargen weisen wie in **Abbildung 6-28** illustriert unterschiedliche Umformgrade (Karbidzeilen) auf. Zusätzlich zeigt die Härtemessung der Chargen, dass sich die Härtegrade nur gering voneinander unterscheiden. Ebenso kann ein Unterschied hinsichtlich der Karbidstrukturen in den drei Chargen entdeckt werden, ersichtlich in **Abbildung 6-29** und **Abbildung 6-30**.

Ein eindeutiger Einfluss der Werkstoffcharge auf das Zerspanungsergebnis ist nicht feststellbar.

- **Einfluss der Wendeschneidplatte:**

Bei der Produktion von Wendeschneidplatten können Abweichungen hinsichtlich der Geometrie der WSP auftreten. Diese beeinflussen möglicherweise das Zerspanungsergebnis. Da die verwendeten WSPs einer besonderen Kontrolle mit engsten Toleranzen unterzogen wurden, kann der Einfluss durch die Schwankung der Wendeschneidplattengeometrie ausgeschlossen werden.

Die Ähnlichkeit der Ergebnisse bei gleichen Schnittparametern aber unterschiedlicher Wendeschneidplattengeometrie führt zu der Erkenntnis, dass bei gewissen Schnittbedingungen die Wendeschneidplattengeometrie eine untergeordnete Rolle für das mögliche zerspannte Volumen hat.

In der Literatur **Kapitel 3.1.6** werden eine Vielzahl an Verschleißformen beschrieben. Einige von ihnen, sind auch an den während der Arbeit untersuchten verschlissenen Wendeschneidplatten auffindbar. Zu den feststellbaren Verschleißformen zählen Stahlaufschmierungen, Schichtabplatzungen, Freiflächen- und Kolkverschleiß. Des Weiteren weisen manche WSPs eine plastische Verformung der Schneide beziehungsweise Schneidkantenausbrüche auf.

Die Ergebnisse der Zerspanungsversuche kann mit Hilfe einer Skizze, ersichtlich in **Abbildung 7-1**, zusammengefasst werden.

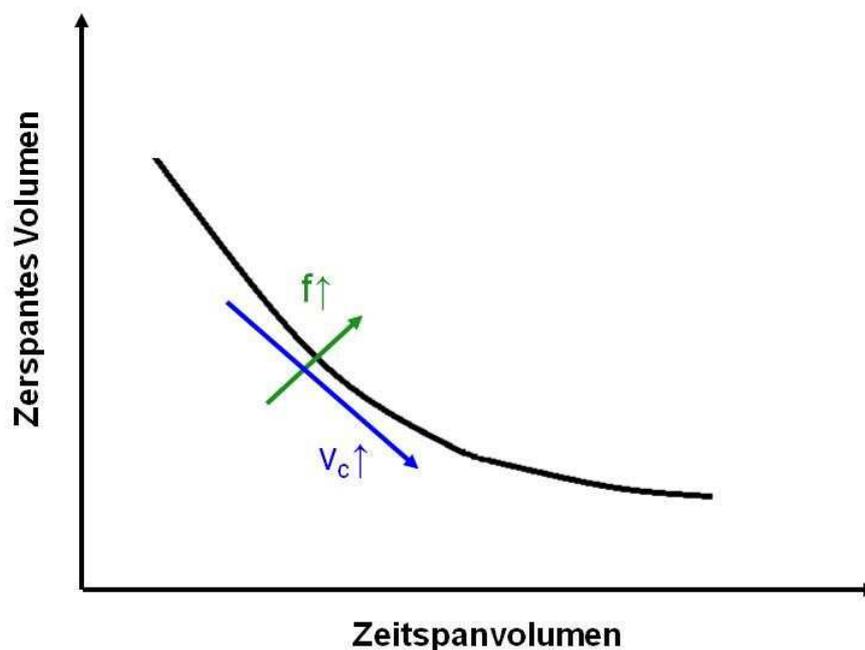


Abbildung 7-1: Zerspantes Volumen in Abhängigkeit des Zeitspanvolumens.

Hierbei lässt sich feststellen, dass die Schnittgeschwindigkeit großen Einfluss auf das zerspannte Volumen hat. So führt deren Steigerung zu einer starken Reduktion des zerspannten Volumens. Beim Vorschub fällt der Einfluss hingegen geringer aus. Dies beschreibt ebenfalls Ingersoll Cutting Tools [32], allerdings wird hierbei der Einfluss von Vorschub und Schnittgeschwindigkeit auf den Verschleiß gezeigt. Jedoch steht das zerspannte Volumen in direktem Zusammenhang zum Verschleiß und kann daher miteinander verglichen werden.

Bei den Schliiffbildern der verschlissenen R58-WSPs lässt sich ein Wandern des Kolkverschleißes feststellen. Dabei bewegt sich der Kolkverschleiß mit steigender Schnittgeschwindigkeit in Richtung der Hauptschneide. Denkena et al. [29] liefern für dieses Phänomen eine Begründung. Bei geringer Schnittgeschwindigkeit kommt es zur Bildung einer Aufbauschneide am Werkzeug. Dies führt zu einer Veränderung der Schneidkeilgeometrie. Der Kolkverschleiß tritt dadurch weiter entfernt von der Hauptschneide auf. Bei hohen Schnittgeschwindigkeiten und daraus resultierenden Temperaturen, welche oberhalb der Rekristallisationstemperaturen des Werkstoffs sind, kommt es während der Umformung zu keiner Kaltverfestigung und in weiterer Folge zu einem Abbau der Aufbauschneide. Diese Begründung wird ebenso mit Hilfe des **Kapitels 4.2** bestätigt. Da hierbei die besondere Adhäsionsneigung des weichgeglühten Werkzeugstahls beschrieben wird, welche wiederum zu einer erhöhten Neigung der Aufbauschneidenbildung führt.

Sowohl bei den R58-WSPs als auch bei den F50-WSPs kann bei bestimmten Schnittwerten eine plastische Verformung der Wendeschneidplatten wahrgenommen werden. Bei den R58-Wendeschneidplatten ist sie bei Vorschüben von über 0,53 mm und bei den F50-WSPs bei allen Wendeschneidplatten, außer der, welche aufgrund eines Ausbruchs ausgeschieden wurde, ersichtlich. Die plastischen Verformungen der beiden WSP-Geometrien weisen gewisse Unterschiede auf. Die Schneide des R58-Werkzeugs ist nur nach unten gedrückt. Hingegen kann bei der F50-WSP festgestellt werden, dass sie sowohl nach unten als auch nach hinten verschoben ist. Laut Klocke et al. [31] entsteht eine plastische Verformung durch hohe Kräfte und hohe Temperaturen. Da für die F50-WSP hohe Schnittgeschwindigkeiten Anwendung finden, kann darauf geschlossen werden, dass die hohe Schnittgeschwindigkeit ebenfalls eine hohe Temperatur zur Folge hat. Die berechneten resultierenden Kräfte sind hingegen um einiges geringer als bei den R58-WSPs, ersichtlich in **Abbildung 5-6**. Daher kann die Annahme getroffen werden, dass bei der F50-WSP die hohe Temperatur an der Schneide die plastische Verformung verursacht. Dagegen führen die gewählten Schnittparameter der R58-WSP zu hohen Schnittkräften. Da die R58-WSP-Versuche geringe Schnittgeschwindigkeiten und daher einer geringere Temperatur aufweisen, bestimmt hierbei die hohe Schnittkraft das Entstehen der plastischen Verformung.

Die detaillierte REM-EDX-Untersuchung des Schliffes einer besonders stark verschlissenen Wendeschneidplatte zeigte zum einen die typischen Verschleißformen, die von Klocke et al. [31] beschrieben wurden. Zusätzlich waren auch noch Poren, welche durch die plastische Verformung der Wendeschneidplatte entstanden, auffindbar. Ebenso ist bei hoher Vergrößerung erkennbar, dass sich in der durch Kolkverschleiß auftretenden Mulde Rauigkeitsspitzen von Mischkarbiden befinden. Diese weisen eine höhere Härte als das Wolframkarbid auf und halten daher dem Verschleiß länger stand.

An den Digitalmikroskopbildern der verschlissenen F50-WSPs und mancher M50-WSPs konnte mit steigender Schnittgeschwindigkeit eine Veränderung des Freiflächenverschleißes beobachtet werden. So wechselte der gleichmäßig entlang der Hauptschneide verlaufende Freiflächenverschleiß zu einem Freiflächenverschleiß, dessen Maximum sich an der Position, an welcher die Hauptschneide in den Schneidenradius übergeht, befindet. Diese Änderung ist vermutlich durch die plastische Verformung der Schneide begründet, die zudem eine Änderung der Werkzeuggeometrie zur Folge hat.

7.2 Diskussion der Ergebnisse von der automatisierten REM-EDX-Analyse

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die gemessenen Reinheitsgrade der drei Chargen nur geringfügig voneinander abweichen. Dies kann mit den hohen Anforderungen an die Herstellung und an den engen Toleranzgrenzen für hochlegierte Werkzeugstähle begründet werden. Die geringen Unterschiede hinsichtlich Reinheitsgrad der verschiedenen Chargen spiegeln sich ebenfalls in den Ergebnissen der Zerspanungstests wieder, in welchen kein signifikanter Einfluss der verschiedenen Chargen auf das Zerspanungsergebnis auffindbar ist. Daher kann festgestellt werden, dass die mittels automatisierter REM-EDX-Messung erhaltenen Ergebnisse plausibel sind.

Die häufigsten detektierten Einschlüsse sind Sulfide und Oxisulfide, diese entstanden vermutlich durch die Desoxidation oder die Entschwefelung. Beim häufigsten Oxisulfid handelt es sich um ein (Al, Ca, Mg)-Oxisulfid und bei den Sulfiden um das Ca-Sulfid. MnS, welche sich laut Jäniche et al. [33] und Kiessling et al. [4] positiv auf die Zerspanung auswirken, konnten nicht aufgefunden werden. Weiters lässt sich auch nur eine geringe Anzahl an harten Oxiden in den Stahlchargen detektieren. Jäniche et al. [33], Kiessling et al. [4] und Bejjani et al. [39] beschreiben, dass die meisten Oxide im relevanten Temperaturbereich der Zerspanung keine Verformbarkeit aufweisen, hierzu zählt zum Beispiel das Aluminiumoxid. Durch dessen geringe Verformbarkeit und hohe Härte ist es einer der Hauptverursacher für den abrasiven Verschleiß an der Freifläche. Auch diese Einschlussart nimmt mengenmäßig in den Chargen nur eine untergeordnete Rolle ein.

Der detaillierte Vergleich der drei Chargen hinsichtlich der enthaltenen Einschlusstypen zeigt, dass die Charge X im Gegensatz zu V und W keine Nb-haltigen Einschlüsse besitzt. Niob findet hauptsächlich als klassisches Mikrolegierungselement für die thermomechanische Behandlung Anwendung.

Die Betrachtung der Ergebnisse aus der automatisierten REM-EDX-Messung führt zur weiteren Erkenntnis, dass sich für die allgemeine Beurteilung der Einschlüsse und der Beurteilung der Einschlussdichte der Querschliff am besten eignet. Dies wird mit der Tatsache begründet, dass die Ergebnisse innerhalb der Chargen, also innerhalb der drei gemessenen Proben, am geringsten von einander abweichen. Jedoch beurteilt der Querschliff nur einen Querschnitt durch einen mittels Walzen gestreckten Einschluss. Der Längsschliff eignet sich hingegen besser für die Bestimmung der komplexen

Zusammensetzung der Einschlüsse, da der gestreckte Einschluss in Längsrichtung geschnitten wird und dadurch seine Mehrphasigkeit besser zum Ausdruck kommt. Nachteil des Längsschliffes ist jedoch, dass die Werte des Einschlussgehaltes und der Einschlussanzahl mit den Proben einer Charge stark variieren. Grund hierfür ist zum einen die geringere Schnittwahrscheinlichkeit im Längsschliff und zum anderen werden weniger Einschlüsse gemessen, was eine erhöhte statistische Streuung der Ergebnisse zur Folge hat.

Die Untersuchung der zerspannten Späne mittels REM-EDX-Messung hinsichtlich einer Beeinflussung der nichtmetallischen Einschlüsse im Werkstoff während der Zerspanung führte zur Erkenntnis, dass die detektierten Einschlüsse in den Spänen weder eine thermische noch eine mechanische Beeinflussung aufweisen. Diese NME befinden sich etwa 20 µm weit weg von der Außenseite der Späne. Bei den detektierten und beurteilten Einschlüssen handelt es sich um Oxide. Zu den Oxiden verläuft eine deutliche Furche, diese ist vermutlich durch das Mitschleifen der oxidischen Partikel während des Schneidvorganges entstanden. Eine andere Erklärung dafür wäre ebenso, dass die Furche die Kavität eines ursprünglichen CaS repräsentiert. Da während des Zerspanungsprozesses ein auf Wasserbasis hergestelltes Kühlschmiermittel Verwendung fand und CaS-Einschlüsse wasserlöslich sind, können sie auf Grund dessen während der Untersuchung nicht mehr aufgefunden werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war die Bestimmung des Reinheitsgrads verschiedener Stahlchargen eines Warmarbeitsstahls und die Beurteilung des Einflusses der gemessenen Reinheitsgrade auf die Zerspanbarkeit der Chargen.

Da in der Literatur hauptsächlich die Zerspanbarkeit von Standardstahlgüten untersucht und der Hauptgruppe der Warmarbeitsstähle bis jetzt nur sehr wenige Forschungsarbeiten gewidmet wurde, gibt es wenige Informationen über die Zerspanbarkeit des X38CrMoV5-1 Warmarbeitsstahls. Da diese Stahlgüte für Kunden der Ceratizit GmbH von Wichtigkeit ist, sollte durch diese Arbeit ein besseres Verständnis für dessen Zerspanbarkeit ausgearbeitet werden. Ein weiteres Ziel bestand in der Festlegung der Schliffart, welche sich am besten für die Beurteilung des Reinheitsgrads eignet.

Zu Beginn der Arbeit wurde eine detaillierte Literaturstudie durchgeführt, die sowohl den Themenbereich der Zerspannung als auch das Thema des Reinheitsgrads behandelt. Der praktische Teil bestand aus zwei großen Tätigkeitsbereichen. Zum einen aus den Zerspanungsversuchen auf einer CNC Drehmaschine mit nachfolgender Verschleißuntersuchung und zum anderen aus der Charakterisierung der verschiedenen Chargen im Quer- und Längsschliff, welche sowohl eine automatisierte REM-EDX-Analyse, als auch eine metallographische Untersuchung beinhaltete. Bei den Zerspanungsversuchen kamen drei verschiedene Wendeschneitplattentypen zum Einsatz, für jede einzelne Geometrie fand eine darauf abgestimmte Schnittparametermatrix Anwendung. Sämtliche Versuche wurden in weiterer Folge für alle drei Stahlchargen durchgeführt. Anschließend erfolgte eine detaillierte Verschleißuntersuchung der verschlissenen Wendeschneidplatten mittels Digitalmikroskop, welche ebenso die Untersuchung von Wendeschneidplattenschliffen beinhaltete. Zusätzlich ist der Schliff einer besonders stark verschlissenen Wendeschneidplatte mit Hilfe einer REM-EDX-Analyse untersucht worden. Um die Stahlchargen hinsichtlich ihres Reinheitsgrads untersuchen zu können, wurde sowohl eine Längs- als auch eine Querprobe aus dem Wellenrohmaterial entnommen. Die

gewonnenen Proben sind im Anschluss daran einer entsprechenden Präparation zugeführt worden. Danach kam es zu einer Untersuchung der Proben mittels einer automatisierten REM-EDX-Analyse. Die dabei gewonnenen Messdaten wurden mit Hilfe eines institutseigenem Schema ausgewertet und sowohl in Einschlussklassen als auch in die jeweiligen Einschlusstypen eingeteilt. Ebenso erfolgte eine Untersuchung der erzeugten Späne mittels REM-EDX, um den mechanischen und thermischen Einfluss der Zerspanung auf die im Stahl enthaltenen Einschlüsse zu zeigen.

Durch die Zerspanungstests konnten Ergebnisse erzielt werden, die eine eindeutige Konsistenz aufweisen. Die durch die Zerspanungsversuche bei gleichen Versuchsparametern, aber unterschiedlicher Charge erhaltenen zerspannten Volumen weichen nur sehr geringfügig voneinander ab. Es ist keine Tendenz beobachtbar, wonach sich eine Charge besser zerspanen lässt als die andere.

Zudem zeigten die Zerspanungsergebnisse, dass sich die zerspannten Volumen bei den Versuchen mit gleichen Schnittparametern aber unterschiedlicher Wendeschneidplattengeometrie nur geringfügig voneinander unterscheiden. Daraus kann geschlossen werden, dass bei gewissen Schnittbedingungen die Wendeschneidplattengeometrie eine untergeordnete Rolle für das mögliche zerspannte Volumen hat.

Eine Zusammenfassung der Zerspanungsergebnisse kann der **Abbildung 8-1** entnommen werden. Es ist erkennbar, dass es vier Bereiche gibt, in welchen eine bestimmte Verschleißart vornehmlich an den verschlissenen Wendeschneidplatten auftritt. So lässt sich erkennen, dass bei hohen Vorschüben und geringer Schnittgeschwindigkeit primär eine Plastifizierung an der Schneidenecke der Wendeschneidplatte auftritt. Hierbei ist die Schneide bedingt durch die hohe Schnittkraft nach unten gedrückt (Blauer Bereich). Dies spiegelt sich auch in den Ergebnissen der Schnittkraftberechnungen (**Abbildung 5-6**), wonach diese Schnittparameter zu den größten Schnittkräften führen, wieder. Ein anderes Gebiet zeigt auch eine Plastifizierung der verwendeten Wendeschneidplatte, in diesem Fall ist die Schneide nicht nur nach unten, sondern auch nach hinten gedrückt (Roter Bereich). Dies kann bei allen F50-WSPs und bei der M50-Wendeschneidplatte ab einer Schnittgeschwindigkeit von 300 m/min beobachtet werden. Des Weiteren gibt es bestimmte Schnittparameter, bei der ein großer Ausbruch zum Versagen der Wendeschneidplatte führt (Grauer Bereich). Der Grüne Bereich symbolisiert den Bereich, in dem die Wendeschneidplatten sehr gut funktionieren, es tritt hauptsächlich Freiflächenverschleiß am Werkzeug auf. In diesem Parameterbereich kann die jeweilige Wendeschneidplatte am

besten eingesetzt werden, da der Freiflächenverschleiß sehr gut kontrolliert und vorhergesagt werden kann.

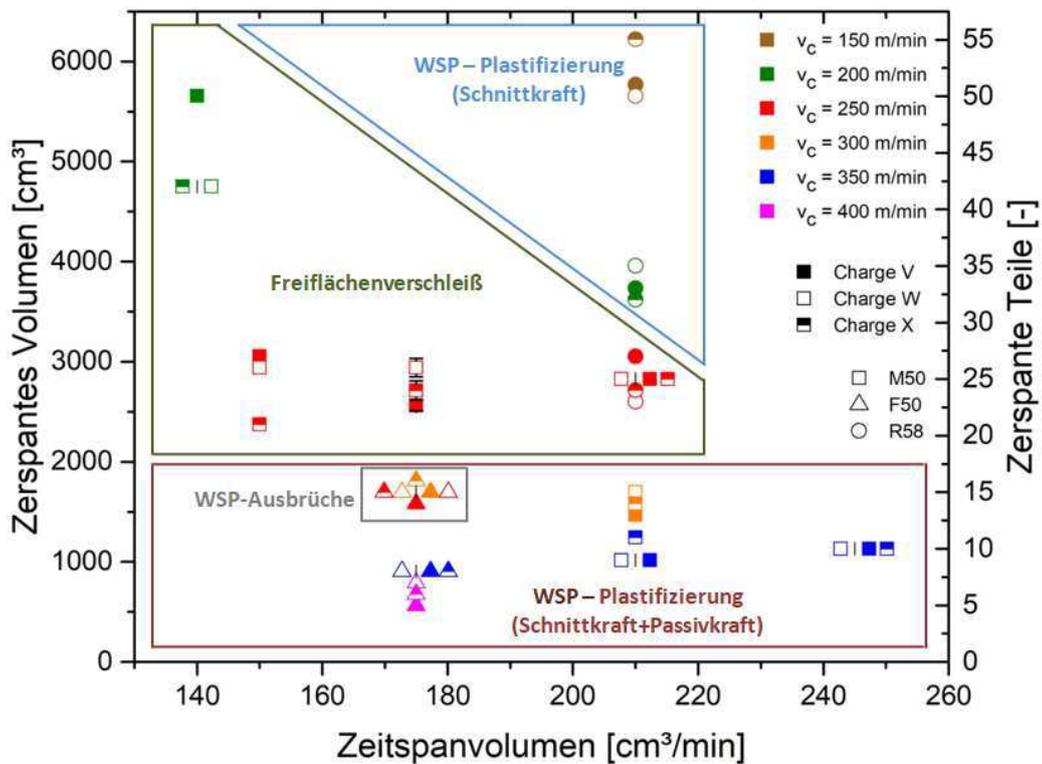


Abbildung 8-1: Zusammenfassung der Zerspanungsergebnisse.

Aufgrund der Ergebnisse aus der REM-EDX-Analyse der verschiedenen Stahlchargen lässt sich feststellen, dass die gemessenen Reinheitsgrade der drei Chargen nur geringfügig voneinander abweichen. Die geringen Unterschiede hinsichtlich Reinheitsgrad der verschiedenen Chargen lassen sich ebenfalls in den Ergebnissen der Zerspanungstests erkennen. Hierbei ist auch kein signifikanter Einfluss der verschiedenen Chargen auf das Zerspanungsergebnis auffindbar.

Die in den Stahlchargen detektierten Einschlüsse gehören größtenteils den Einschlussklassen der Sulfide und Oxisulfide an. Diese bildeten sich höchstwahrscheinlich während der Entschwefelung oder Desoxidation. Beim häufigsten Oxisulfid handelt es sich um das (Al, Ca, Mg)-Oxisulfid und bei den Sulfiden um das Ca-Sulfid. Hingegen lässt sich nur eine geringe Anzahl an harten Oxiden in den Stahlchargen detektieren, welchen eher negative Auswirkungen zugesagt werden. [4,33,39]

Bei der genauen Betrachtung der verschiedenen Einschlusstypen der drei Chargen kann festgestellt werden, dass die Charge X im Gegensatz zu V und W keine Nb-haltigen

Einschlüsse enthält. Niob findet bei der thermomechanischen Behandlung als klassisches Mikrolegierungselement Anwendung.

Die Ergebnisse der automatisierten REM-EDX-Messung führen des Weiteren zur Erkenntnis, dass sich für die allgemeine Beurteilung der Einschlüsse und der Einschlussdichte der Querschliff am besten eignet. Dies ist durch die sehr geringe Abweichung der Ergebnisse zwischen den Proben einer Charge begründet. Allerdings beurteilt der Querschliff nur den Querschnitt eines mittels Walzen gestreckten Einschlusses. Der Längsschliff bietet sich hingegen für die Bestimmung der komplexen Zusammensetzung der Einschlüsse an, da der gestreckte Einschluss längs der Walzrichtung geschnitten und dadurch seine Mehrphasigkeit besser abgebildet wird. Nachteil des Längsschliffes ist jedoch, dass die Werte des Einschlussgehaltes und der Einschlussanzahl der Proben einer Charge stark voneinander abweichen. Der Grund hierfür liegt zum einen in der geringeren Schnittwahrscheinlichkeit im Längsschliff und zum anderen an der geringeren Anzahl an detektierten Einschlüssen, was zu einer erhöhten statistischen Streuung der Ergebnisse führt.

Die mittels REM-EDX-Analyse detektierten Einschlüsse in den Spänen, welche sich etwa 20 µm weit weg von der Außenseite der Späne befanden, weisen weder eine thermische noch eine mechanische Beeinflussung auf. Bei den detektierten und beurteilten Einschlüssen handelt es sich um Oxide. Zu den Oxiden erstreckt sich eine deutliche Furche, diese kann durch das Mitschleifen der oxidischen Partikel während des Zerspanungsvorganges entstanden sein. Eine andere Erklärung dafür wäre, dass es sich bei der Furche um die Kavität eines ursprünglichen CaS handelt. Diese sind jedoch wasserlöslich und können durch das beim Zerspanen verwendete wasserhaltige Kühlschmiermittel aufgelöst worden sein.

Stähle, welche konstante Zerspanungseigenschaften aufweisen, spielen bei der Entwicklung von Zerspanungswerkzeugen eine große Rolle. Der Grund dafür liegt darin, dass dadurch der Einfluss des Materials auf das Zerspanungsergebnis größtenteils ausgeschlossen werden kann und es daher möglich ist, mit Hilfe dieser Stahlgüten, eine Optimierung an bereits bestehenden Werkzeugen beziehungsweise Neuentwicklungen von Werkzeugen durchzuführen. Da der im Zuge der Arbeit untersuchte weichgeglühte X38CrMoV5-1 Warmarbeitsstahl trotz unterschiedlicher Stahlcharge des gleichen Stahlherstellers und trotz unterschiedlicher Hersteller annähernd konstante Zerspanungsergebnisse liefert, eignet er sich besonders gut für die hohen Anforderungen in der Forschung und Entwicklung der Firma Ceratizit GmbH.

Um den Einfluss des Reinheitsgrads auf die Zerspanbarkeit des X38CrMoV5-1 Warmarbeitsstahls noch besser zu verstehen, könnten in der Zukunft Stahlchargen mit derselben Zusammensetzung, aber stark unterschiedlichen Reinheitsgraden untersucht werden. Hierbei würden sich zum Beispiel mittels Elektroschlack-Umschmelzverfahren (ESU) oder mittels Vakuumlichtbogenofen (VLBO) hergestellte Stahlchargen anbieten. Eine Ausweitung der Versuchsparameter und ein Wechsel der Hartmetallsorte hin zu höheren WC-Gehalten könnten ebenfalls interessante Ergebnisse liefern. Eine Veränderung der Beschichtungssysteme wäre ebenso denkbar. Eine weitere zukünftige Tätigkeit, um ein besseres Verständnis für die Zerspanbarkeit des Warmarbeitsstahls zu erhalten, könnten die Zerspanungstests mit dem gleichen Stahl aber unterschiedlichen Wärmebehandlungszustand durchgeführt werden. Zusätzlich besteht noch die Möglichkeit mittels REM-EDX-Analyse die Spanfläche der verschlissenen WSPs auf Rückstände von im Stahl enthaltenen Einschlüsse zu untersuchen.

Literaturverzeichnis

- [1] Bertau, M., A. Müller, P. Fröhlich und M. Katzberg, Industrielle anorganische Chemie, 4. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim u.a., 2013.
- [2] Zhang, L. und B. G. Thomas, State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness, ISIJ Int. 43 (2003), 3, 271–291.
- [3] Ghosh, A., Secondary Steelmaking: Principles and Applications, CRC Press LLC, Boca Raton, 2001.
- [4] Kiessling, R. und N. Lange, Non-metallic inclusions in steel: Part I - IV, United Kingdom. Iron and Steel Institute, London, 1997.
- [5] Europäisches Komitee für Normung, Grundlagen der Reinheitsgradbestimmung nach der neuen Norm DIN EN 10247:2007 "Metallographische Prüfung des Gehaltes nichtmetallischer Einschlüsse in Stählen mit Bildreihen"(DIN EN 10247:2007), Frankfurt, 2007.
- [6] Deutsches Institut für Normung, Mikroskopische Prüfung von Edeltählen auf nichtmetallische Einschlüsse mit Bildreihen(DIN 50 602), Berlin, 1985.
- [7] Winkler, W., J. Angeli und M. Mayr, Automated SEM-EDX Cleanness Analysis and its Application in Metallurgy, BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 152 (2007), 1, 4–9.
- [8] ZHANG, L., Indirect Methods of Detecting and Evaluating Inclusions in Steel-A Review, Journal of Iron and Steel Research, International 13 (2006), 4, 1–8.
- [9] Klocke, F. und K. Gerschwiler, Merkblatt 137 - Zerspanen von Stahl, Düsseldorf, 2008.

- [10] Ånmark, N., Steel characteristics and their link to chip breaking and tool wear in metal cutting, Doctoral Thesis, KTH Royal Institute of Technology, 2016.
- [11] Huemer, K., G. Wolf, A. Sormann und G. Frank, Auswirkungen einer Kalziumbehandlung auf die Entstehung und Zusammensetzung von nichtmetallischen Einschlüssen bei der Erzeugung von aluminiumberuhigten Stählen für Langprodukte, BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 150 (2005), 7, 237–242.
- [12] Lange, K.W., Thermodynamic and kinetic aspects of secondary steelmaking processes, International Materials Reviews (1988), 1, 53–89.
- [13] Holappa, L., M. Hämäläinen, M. Liukkonen und M. Lind, Thermodynamic examination of inclusion modification and precipitation from calcium treatment to solidified steel, Ironmaking & Steelmaking 30 (2013), 2, 111–115.
- [14] Björk, T., M. Pérez-Alonso, J. Albarrán, V. Moorthy, B. Shaw, P. Vogtel und D. Lung, Automated material characterisation for machinability prediction (CHARMA): Final report EUR 27439, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2015.
- [15] Zhang, L. und B. G. Thomas, Inclusion in continuous casting of steel, XXIV National Steelmaking Symposium, Mexico, 2003.
- [16] Holappa, L. E. K. und A. S. Helle, Inclusion Control in High-Performance Steels, Journal of Materials Processing Technology 53 (1995), 177–186.
- [17] Klösch, G., K. Huemer, A. Sormann und G. Frank, Nichtmetallische Einschlüsse in Langprodukten Entstehung, Bestimmung, Auswirkungen – ein Überblick, BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 154 (2009), 1, 27–32.
- [18] Kiessling, R., Non-metallic inclusion in steel: Part V, United Kingdom. Iron and Steel Institute, London, 1989.
- [19] Zaitsev, A. I., A. V. Knyazev, A. V. Amezhnov, A.V. Koldaev und A. B. Stepanov, Effect of Nonmetallic Inclusions and Impurities on the Properties and Quality Characteristics of Round Rolled Product Made of Special Alloyed Steels, Metallurgist 61 (2017), 7, 679–685.
- [20] Mitrofanov, A.V., M.V. Petrova, I.E. Kirillov, I.G. Rodionova, K.A. Udod und N.I. Endel, Factors Affecting Housing and Utilities Pipe Corrosion Resistance, Metallurgist 60 (2016), 1-2, 76–80.

-
- [21] Murakami, Y., *Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions*, Elsevier, Amsterdam, 2002.
- [22] Guan, J., L. Wang, C. Zhang und X. Ma, Effects of non-metallic inclusions on the crack propagation in bearing steel, *Tribology International* 106 (2017), 123–131.
- [23] Ghosh, A., P. Modak, R. Dutta und D. Chakrabarti, Effect of MnS inclusion and crystallographic texture on anisotropy in Charpy impact toughness of low carbon ferritic steel, *Materials Science and Engineering: A* 654 (2016), 298–308.
- [24] Deutsches Institut für Normung, *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*(DIN 8580), 2003.
- [25] Deutsches Institut für Normung, *Fertigungsverfahren Spanen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung; Unterteilung; Begriffe*(DIN 8589-0), 2003.
- [26] Paucksch, E., *Zerspantechnik*, Vieweg Teubner, 2008.
- [27] Dietrich, J., *Praxis der Zerspantechnik: Verfahren, Werkzeuge, Berechnung*, 12. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2016.
- [28] Essig, C.A., *Vorhersage von Spanbruch bei der Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide mit Hilfe schädigungsmechanischer Ansätze*, Dissertation, Aachen, 2010.
- [29] Denkena, B. und H. K. Tönshoff, *Spanen: Grundlagen*, 3. Auflage, Springer, Wiesbaden, 2011.
- [30] Heisel, U., F. Klocke, E. Uhlmann und G. Spur, *Handbuch Spanen und Abtragen*, Carl Hanser Verlag, München, 2014.
- [31] Klocke, F. und W. König, *Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren*, 8. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.
- [32] *Ingersoll Cutting Tools, Technisches Handbuch: Drehen, Stechen & Gewindedrehen*, 2017.
- [33] Jäniche, W., W. Dahl, H.-F. Klärner, W. Pitsch, D. Schauwinhold, W. Schlüter und H. Schmitz, *Werkstoffkunde Stahl: Band 1: Grundlagen*, Springer, Berlin, 1984.
- [34] Ånmark, N., A. Karasev und P.G. Jönsson, The Effect of Different Non-Metallic Inclusions on the Machinability of Steels, *Materials* 8 (2015), 2, 751–783.
- [35] Chandrasekaran, H. und R. M'Saoubi, Improved Machinability in Hard Milling and Strategies for Steel Development, *CIRP Annals* 55 (2006), 1, 93–96.

- [36] Ånmark, N. und T. Björk, Tool Wear in Soft Part Turning of High Performance Steel, *Procedia CIRP* 46 (2016), 484–487.
- [37] Ånmark, N., A. Karasev und P.G. Jönsson, The Influence of Microstructure and Non-Metallic Inclusions on the Machinability of Clean Steels, *steel research international* 88 (2017), 1, 1–8.
- [38] Ånmark, N., S. Lövquist, M. Vosough und T. Björk, The Effect of Cleanliness and Micro Hardness on the Machinability of Carburizing Steel Grades Suitable for Automotive Applications, *steel research international* 87 (2016), 4, 403–412.
- [39] Bejjani, R., M. Collin, T. Thersleff und S. Odelros, Multi-scale study of initial tool wear on textured alumina coating, and the effect of inclusions in low-alloyed steel, *Tribology International* 100 (2016), 204–212.
- [40] Kirsch-Racine, A., A. Bomont-Arzur und M. Confente, Calcium treatment of medium carbon steel grades for machinability enhancement: From the theory to industrial practice, *Rev. Met. Paris* 104 (2007), 12, 591–597.
- [41] Matsui, N. und K. Watari, Wear Reduction of Carbide Tools Observed in Cutting Ca-added Steels for Machine Structural Use, *ISIJ Int.* 46 (2006), 11, 1720–1727.
- [42] Larsson, A. und S. Rупpi, Structure and composition of built-up layers on coated tools during turning of Ca-treated steel, *Materials Science and Engineering: A* 313 (2001), 160–169.
- [43] Chen, Y., Y. Bao, M. Wang, X. Cai, L. Wang und L. Zhao, Superior machinability of steel enhanced with BN and MnS particles, *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials* 23 (2016), 3, 276–282.
- [44] Tanaka, R., Y. Yamane, K. Sekiya, N. Narutaki und T. Shiraga, Machinability of BN free-machining steel in turning, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47 (2007), 12-13, 1971–1977.
- [45] Ceratizit, *Gesamtprogramm Cutting Tools 2016*, 2016.
- [46] Ceratizit, *Programmergänzungen Cutting Tools 2016.2*, 2016.
- [47] Apprich, T., B.H. J. Brenner und T. Liesch und A. Hochstatter, *Tabellenbuch für Zerspantechnik*, 1. Auflage, 2015.

A Ergebnisse Anhang A

A.1 Digitalmikroskopaufnahmen der verschlissenen Wendeschneidplatten

Tabelle A-I: M50 Digitalmikroskopaufnahmen der Hauptschneide 20° verkippt.

Schnittparameter	Charge V	Charge W	Charge X
$v_c = 250$ [m/min] $f = 0,30$ [mm]			
$v_c = 350$ [m/min] $f = 0,30$ [mm]			
$v_c = 200$ [m/min] $f = 0,35$ [mm]			

$v_c = 250$ [m/min]
 $f = 0,35$ [mm]



$v_c = 300$ [m/min]
 $f = 0,35$ [mm]



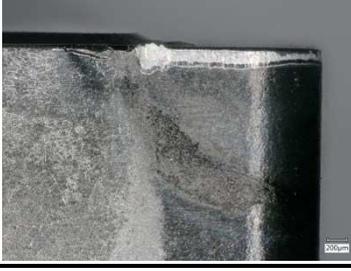
$v_c = 350$ [m/min]
 $f = 0,35$ [mm]



$v_c = 250$ [m/min]
 $f = 0,42$ [mm]



Tabelle A-II: M50 Digitalmikroskopaufnahmen der Hauptfreifläche.

Schnittparameter	Charge V	Charge W	Charge X
$v_c = 250$ [m/min] $f = 0,30$ [mm]			
$v_c = 350$ [m/min] $f = 0,30$ [mm]			
$v_c = 200$ [m/min] $f = 0,35$ [mm]			

$v_c = 250$ [m/min]
 $f = 0,35$ [mm]



$v_c = 300$ [m/min]
 $f = 0,35$ [mm]



$v_c = 350$ [m/min]
 $f = 0,35$ [mm]



$v_c = 250$ [m/min]
 $f = 0,42$ [mm]



Tabelle A-III: R58 Digitalmikroskopaufnahmen der Hauptschneide 20° verkippt.

Schnittparameter	Charge V	Charge W	Charge X
$v_c = 150$ [m/min] $f = 0,70$ [mm]			
$v_c = 200$ [m/min] $f = 0,53$ [mm]			
$v_c = 250$ [m/min] $f = 0,42$ [mm]			

Tabelle A-IV: R58 Digitalmikroskopaufnahmen der Hauptfreifläche.

Schnittparameter	Charge V	Charge W	Charge X
$v_c = 150$ [m/min] $f = 0,70$ [mm]			
$v_c = 200$ [m/min] $f = 0,53$ [mm]			
$v_c = 250$ [m/min] $f = 0,42$ [mm]			

Tabelle A-V: F50 Digitalmikroskopaufnahmen der Hauptschneide 20° verkippt.

Schnittparameter	Charge V	Charge W	Charge X
$v_c = 250$ [m/min] $f = 0,35$ [mm]			
$v_c = 300$ [m/min] $f = 0,29$ [mm]			
$v_c = 350$ [m/min] $f = 0,25$ [mm]			
$v_c = 400$ [m/min] $f = 0,22$ [mm]			

Tabelle A-VI: F50 Digitalmikroskopaufnahmen der Hauptfreifläche.

Schnittparameter	Charge V	Charge W	Charge X
$v_c = 250$ [m/min] $f = 0,35$ [mm]			
$v_c = 300$ [m/min] $f = 0,29$ [mm]			
$v_c = 350$ [m/min] $f = 0,25$ [mm]			
$v_c = 400$ [m/min] $f = 0,22$ [mm]			

A.2 Detaillierte Resultate der automatisierten REM-EDX-Messung

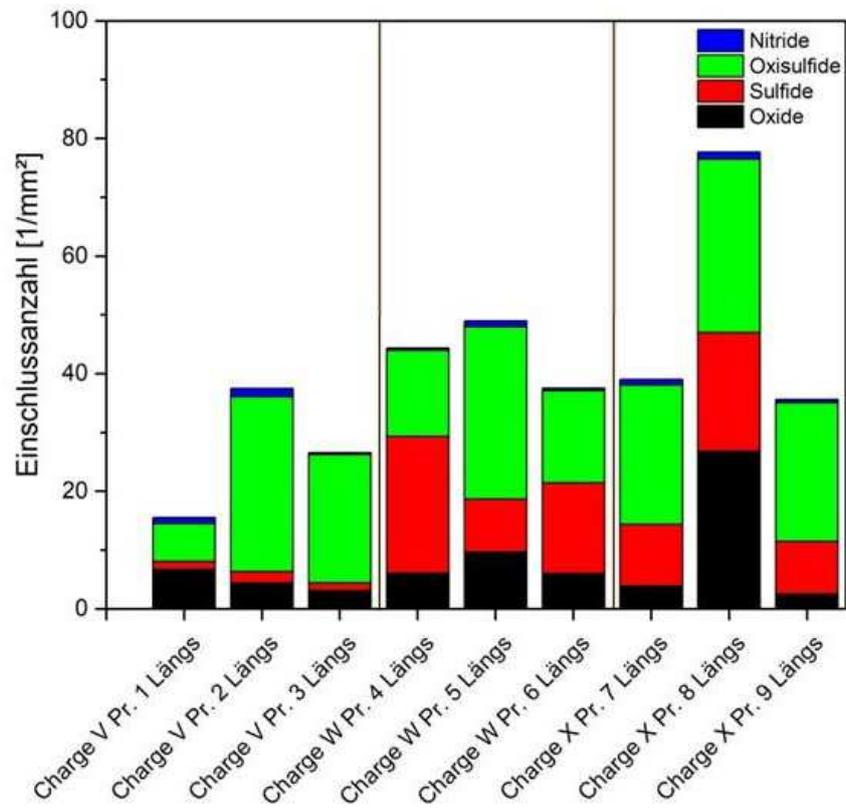


Abbildung A-1: Einschlussanzahl aller Längsproben.

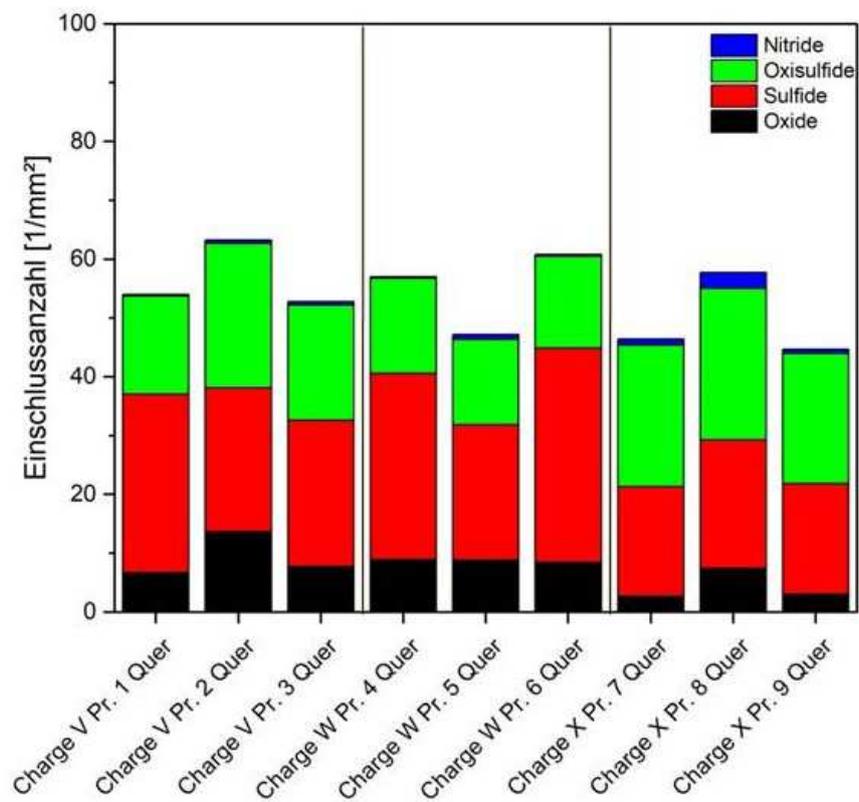


Abbildung A-2: Einschlussanzahl aller Querproben.

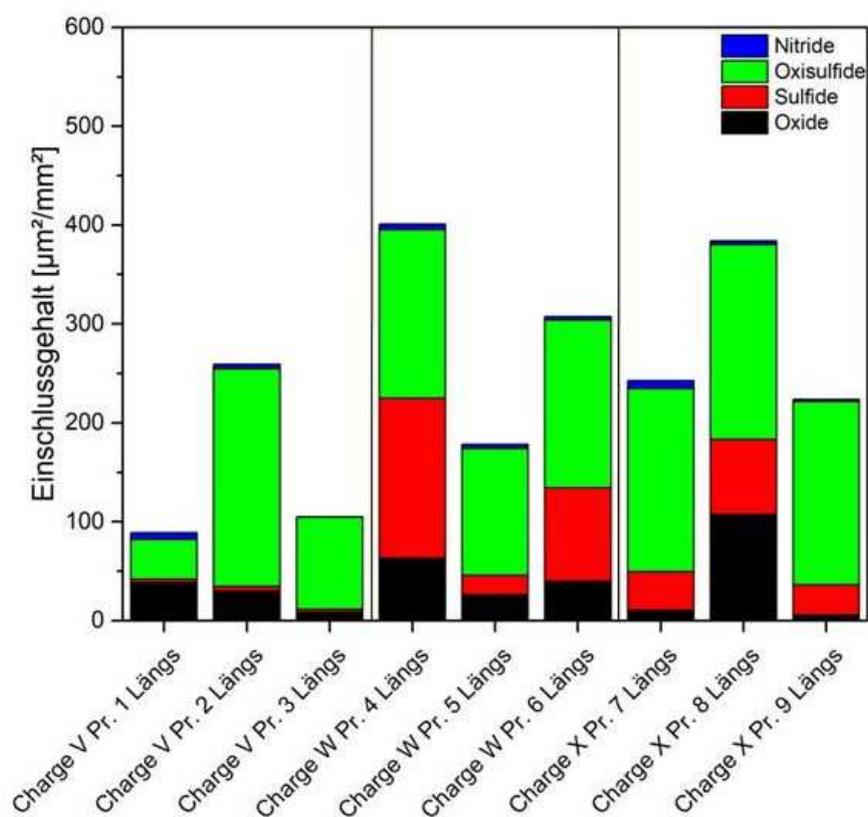


Abbildung A-3: Einschlussgehalt aller Längsproben.

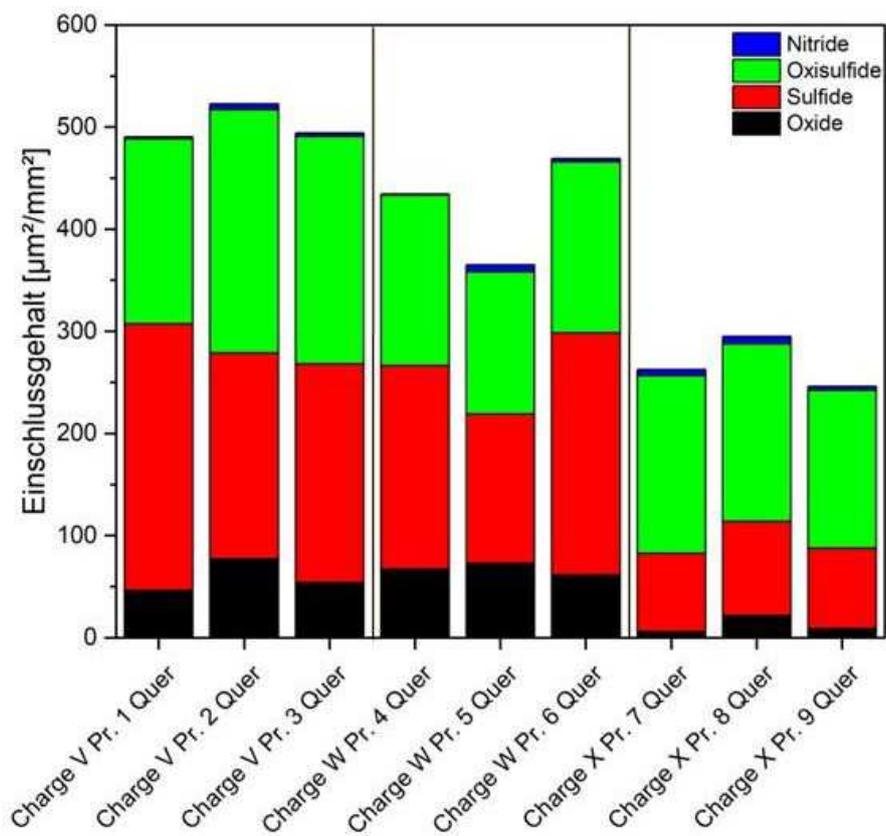


Abbildung A-4: Einschlussgehalt aller Querproben.

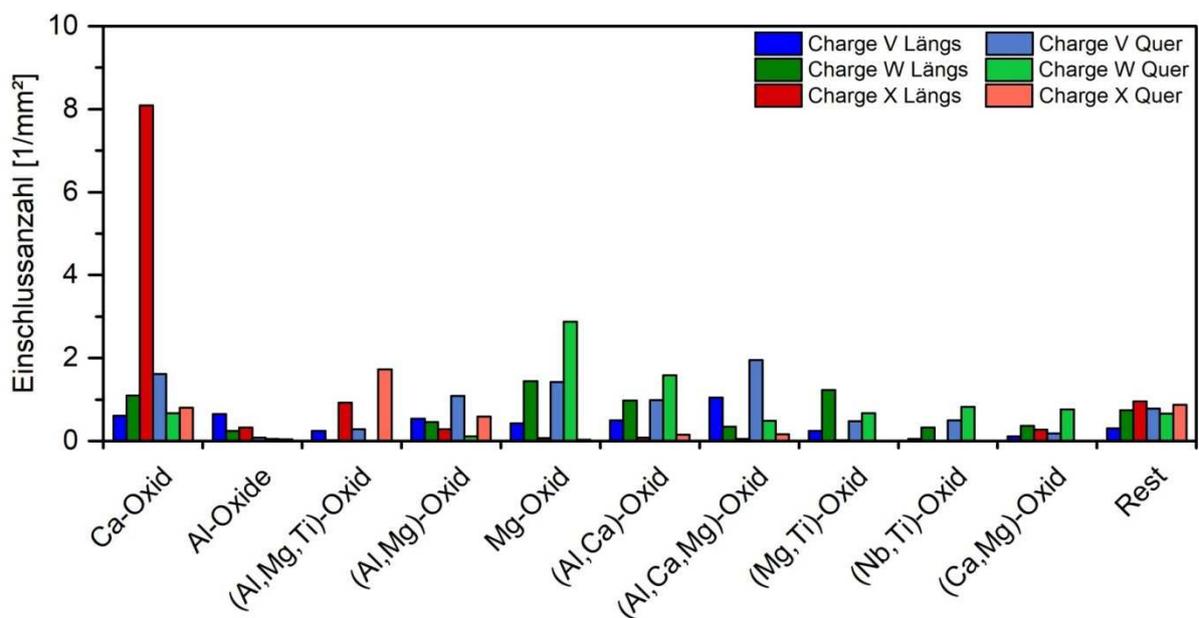


Abbildung A-5: Einschlussanzahl der detektierten Oxide.

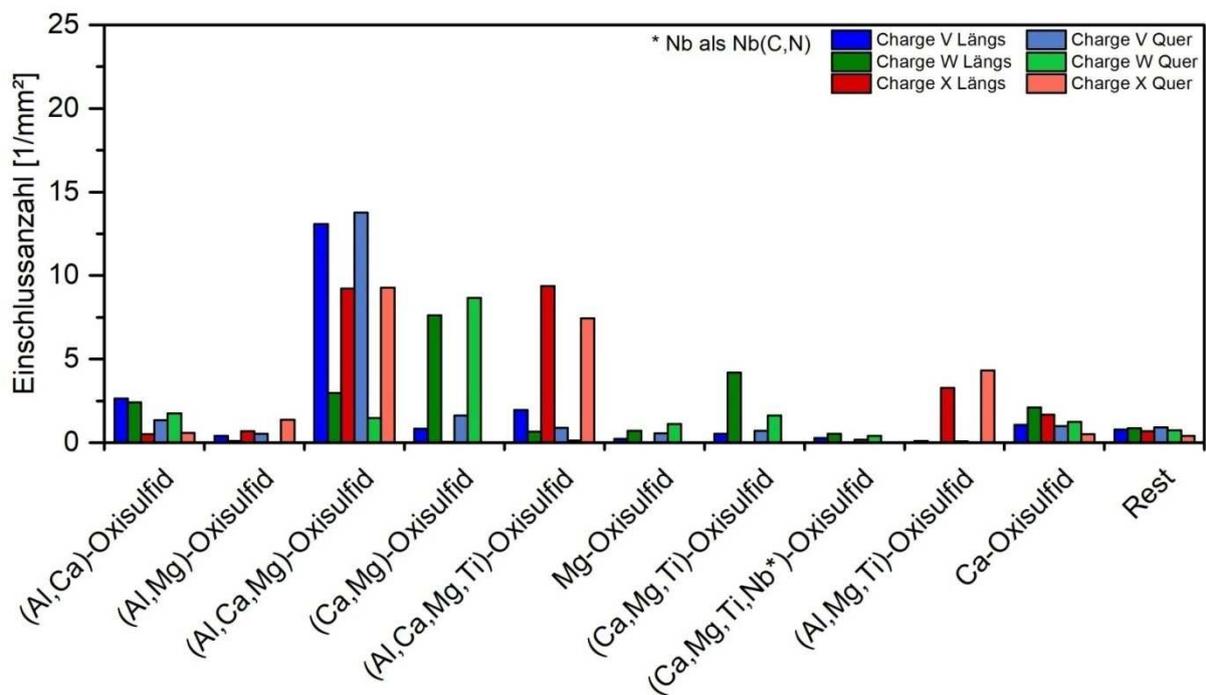


Abbildung A-6: Einschlussanzahl der detektierten Oxisulfide.

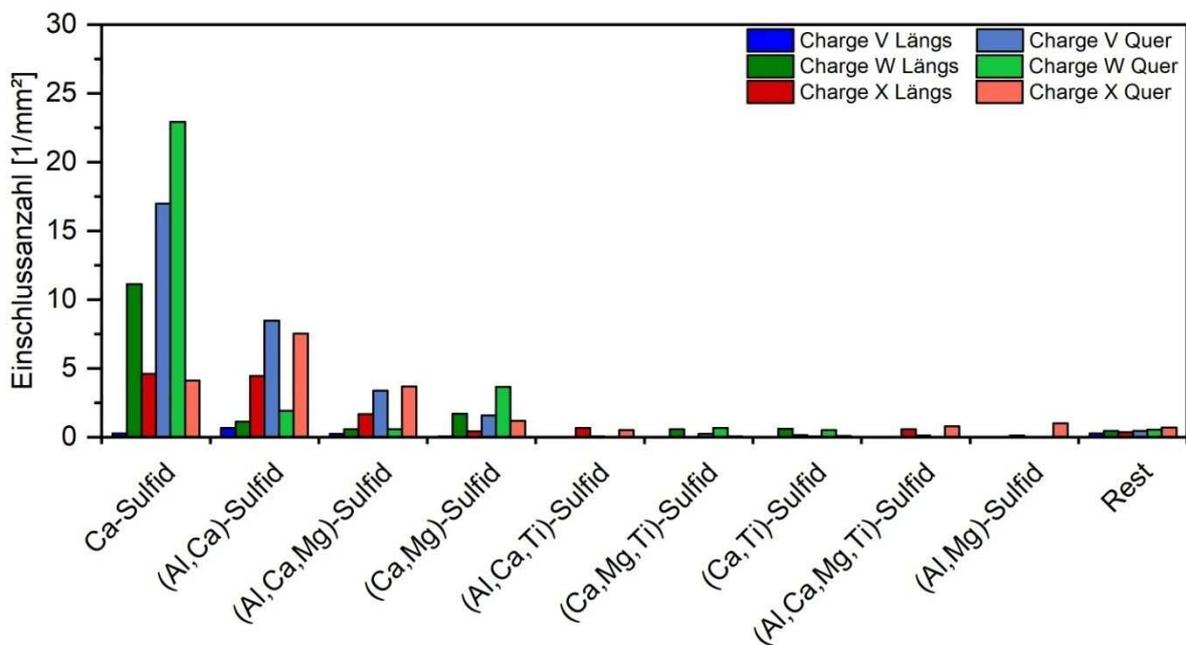


Abbildung A-7: Einschlussanzahl der detektierten Sulfide.

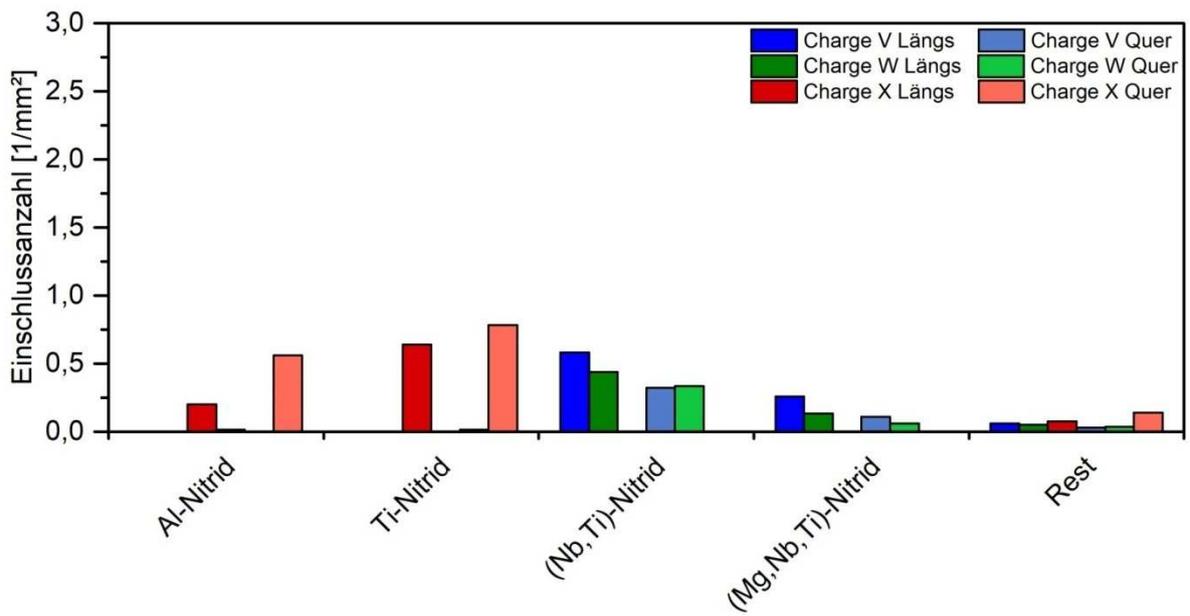


Abbildung A-8: Einschlussanzahl der detektierten Nitride.

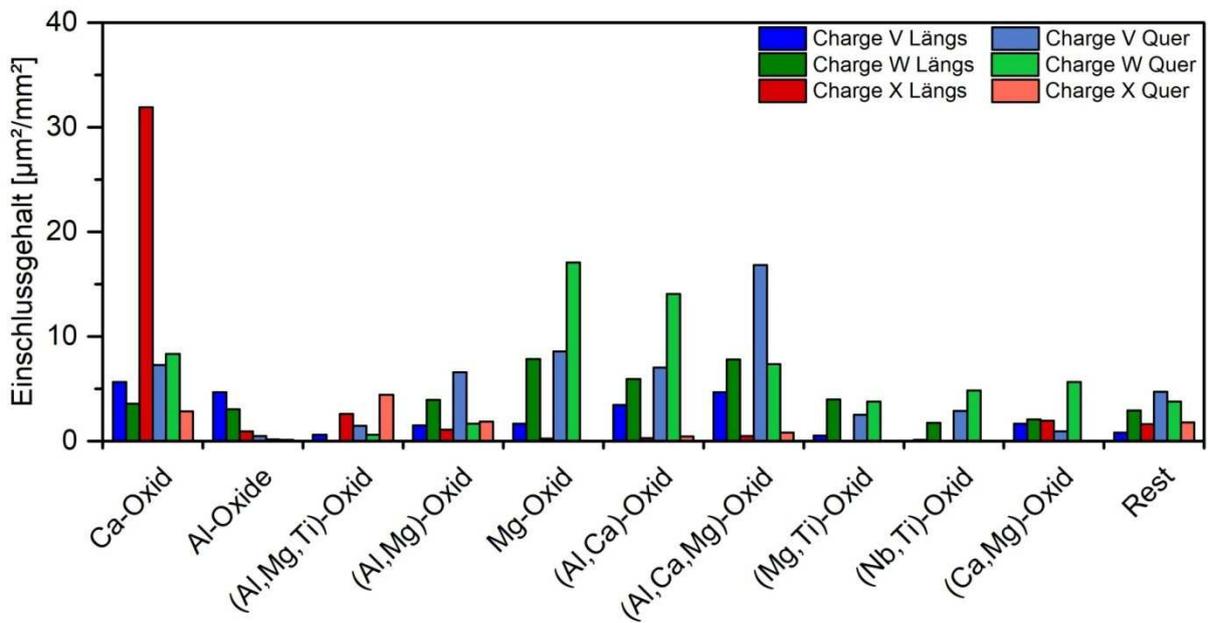


Abbildung A-9: Einschlussgehalt der detektierten Oxide.

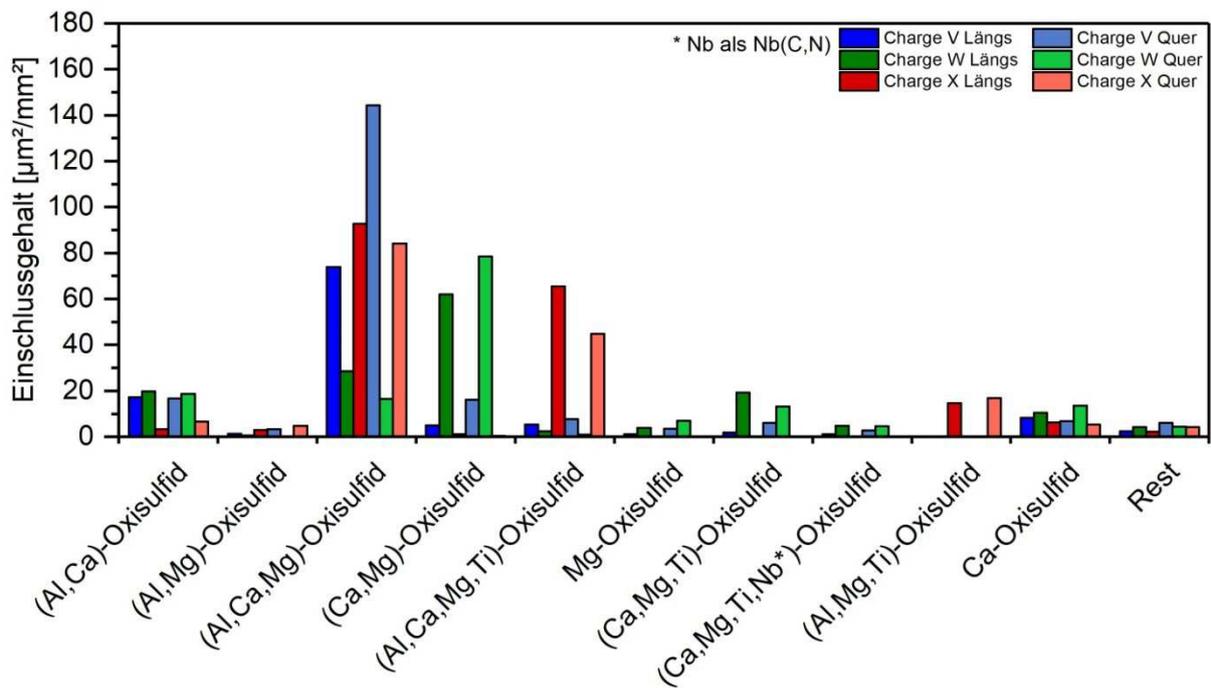


Abbildung A-10: Einschlussgehalt der detektierten Oxisulfide.

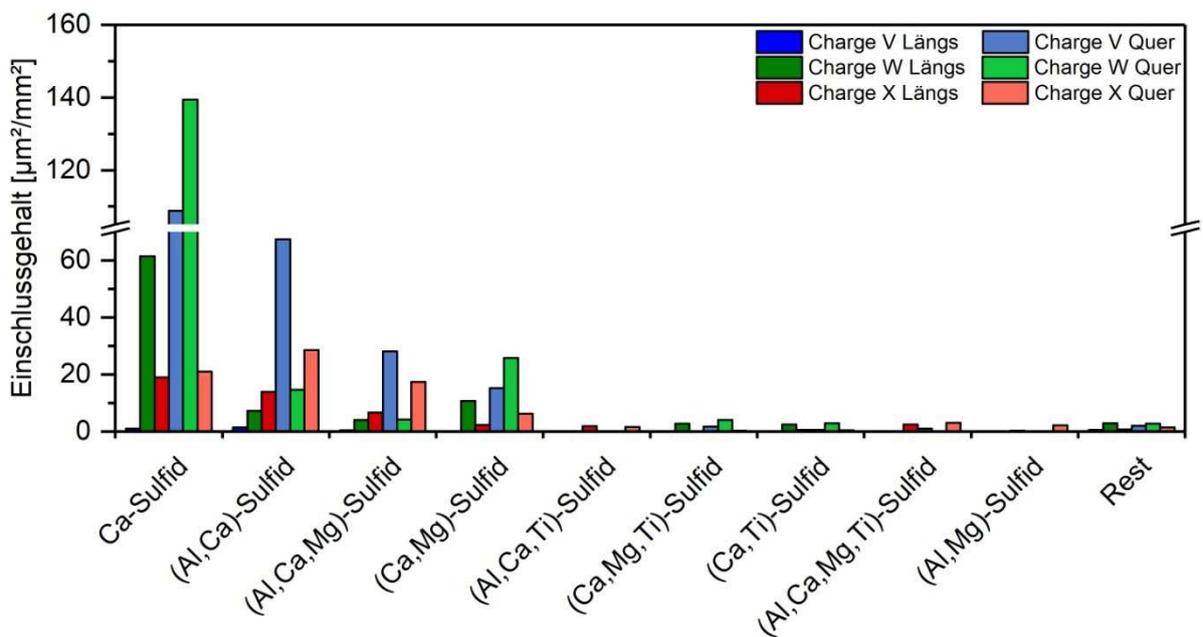


Abbildung A-11: Einschlussgehalt der detektierten Sulfide.

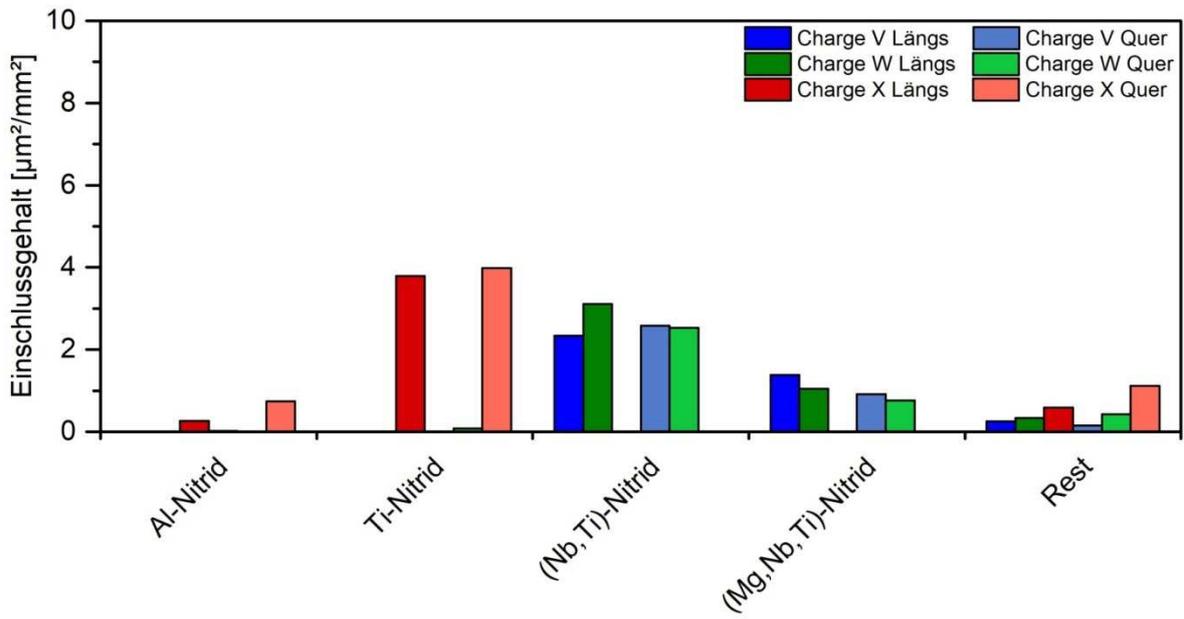


Abbildung A-12: Einschlussgehalt der detektierten Nitride.

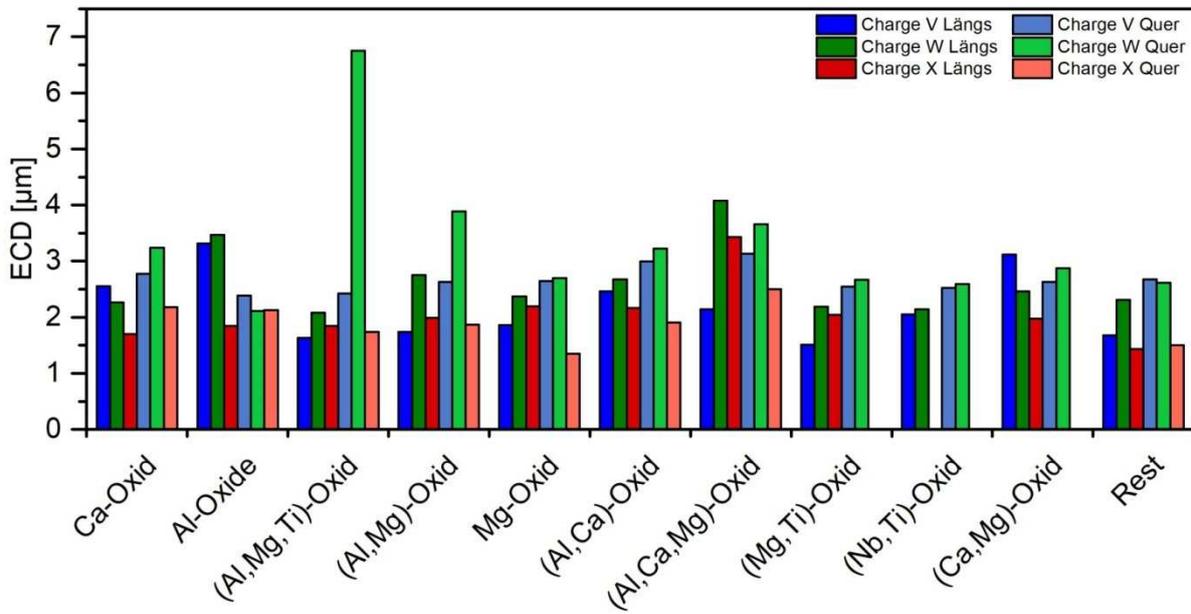


Abbildung A-13: ECD der detektierten Oxide.

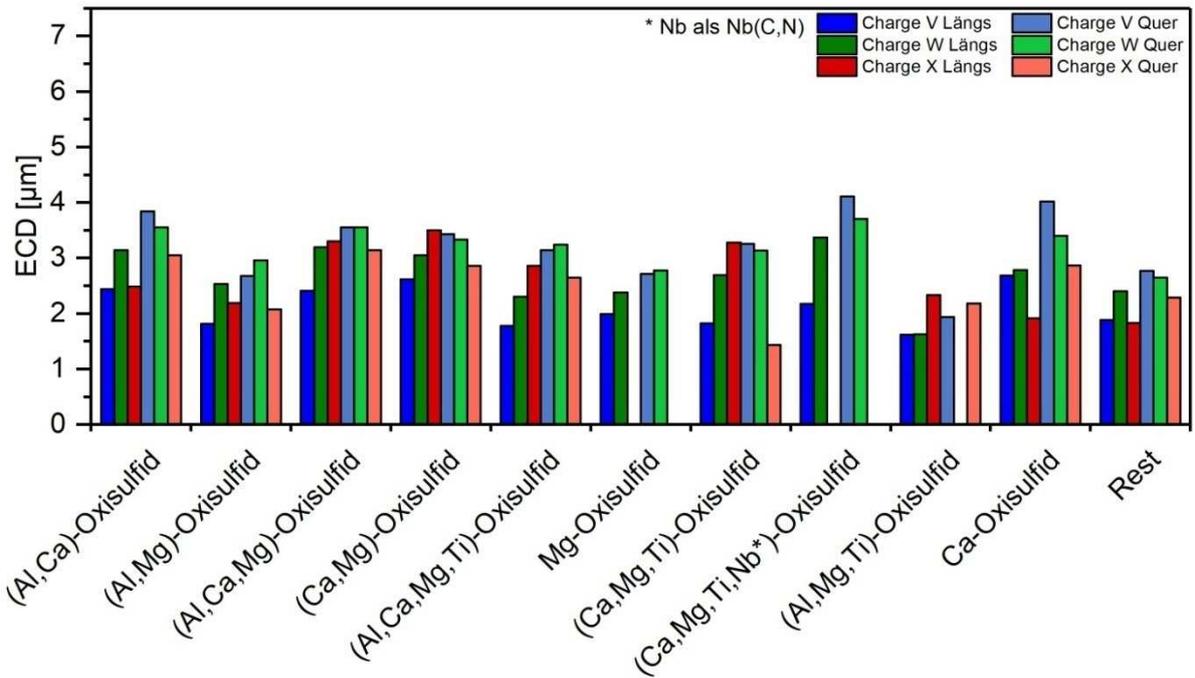


Abbildung A-14: ECD der detektierten Oxisulfide.

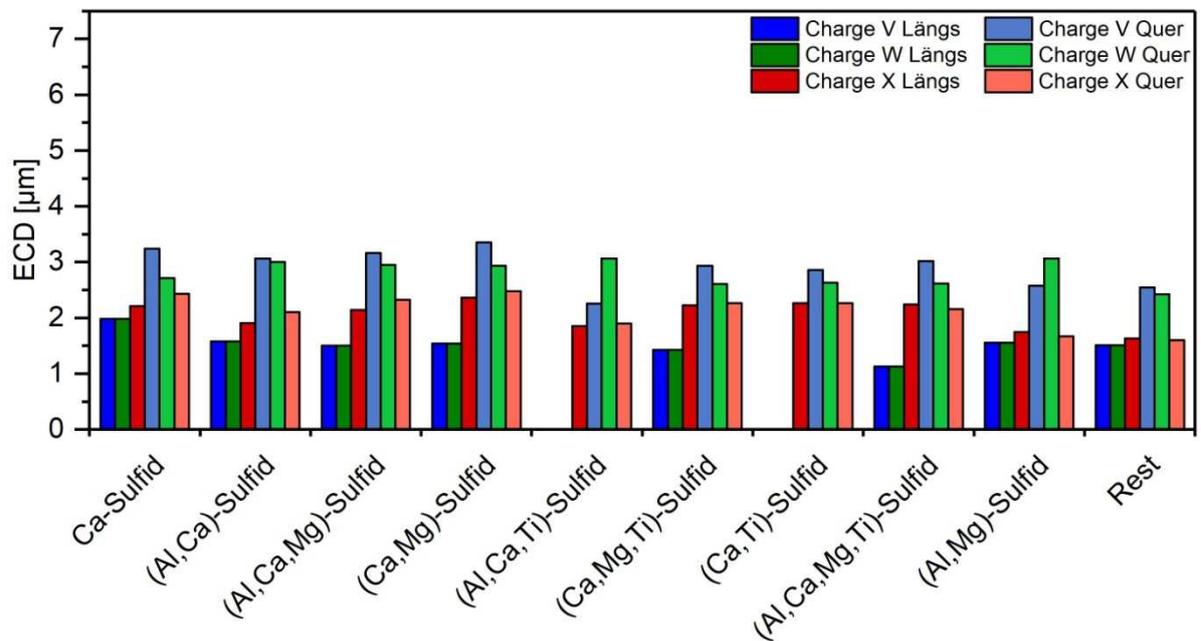


Abbildung A-15: ECD der detektierten Sulfide.

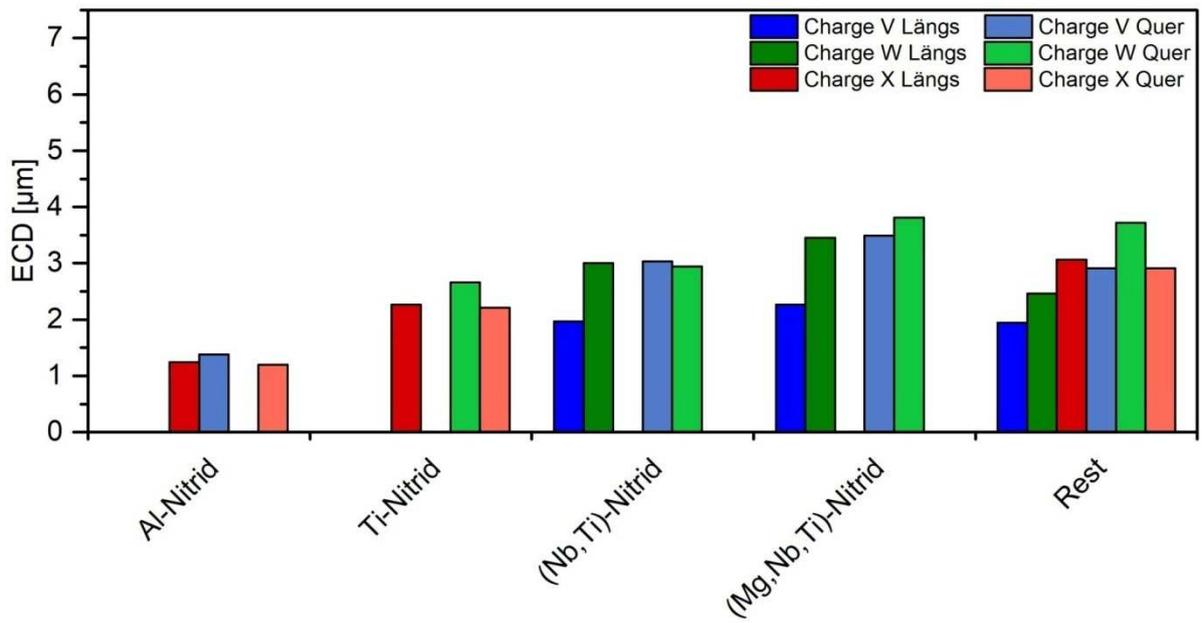


Abbildung A-16: ECD der detektierten Nitride.

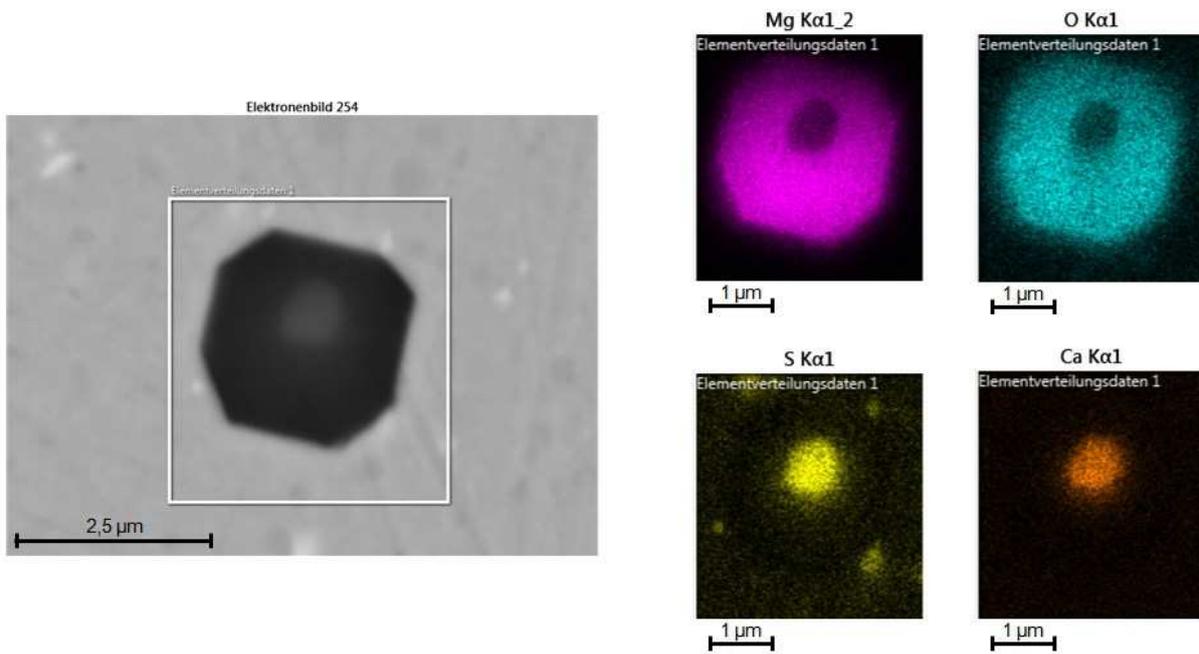


Abbildung A-17: Elementmapping eines (Ca,Mg)-Oxysulfids (Querschliff).

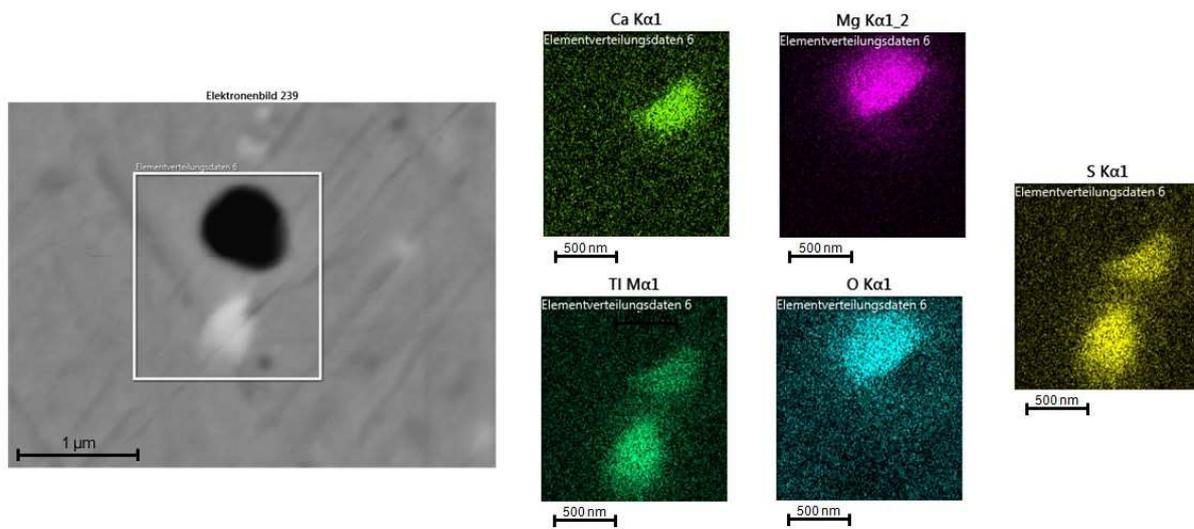


Abbildung A-18: Elementmapping eines (Ca,Mg,Ti)-Oxisulfids (Querschliff).

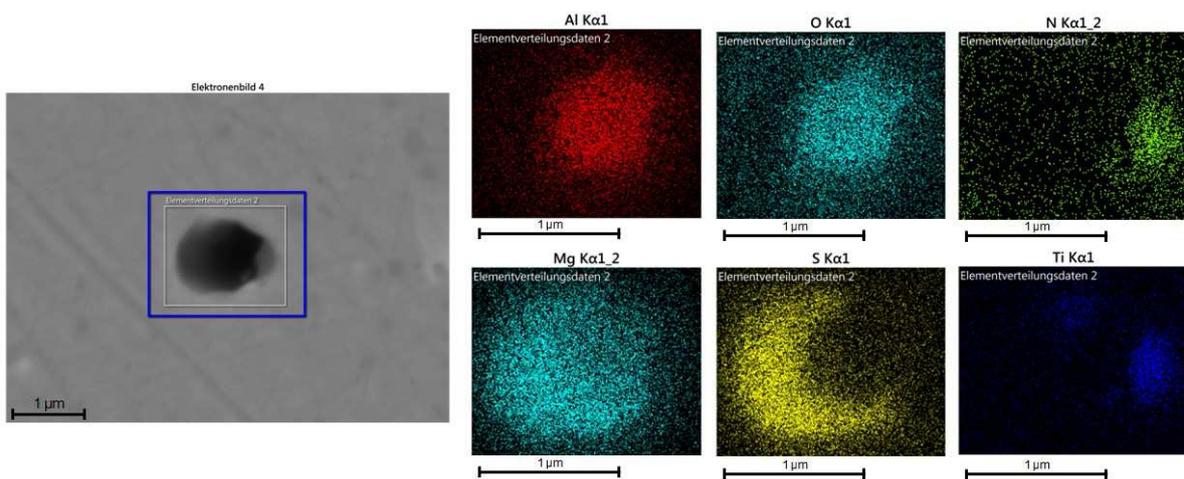


Abbildung A-19: Elementmapping eines (Al,Mg,Ti)-Oxisulfids (Längsschliff).