

***Einflussanalyse der Veränderung  
magnetischer Oberflächeneigenschaften  
ferromagnetischer Werkstoffe  
durch spanende Bearbeitung  
am Beispiel des Fräsens von Vergütungsstahl***

Dissertation

zur Erlangung des Grades

des Doktors der Ingenieurwissenschaften

der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät

der Universität des Saarlandes

von

Kirsten Trapp

Saarbrücken

2017

Tag des Kolloquiums: 18. Mai 2018

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Guido Kickelbick

Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Mücklich

Vorsitz: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber

Akad. Mitarbeiter: PD Dr.-Ing. Dr. Anne Jung

## **Kurzzusammenfassung**

Bei der Anwendung spanender Fertigungsverfahren können Werkstücke aus metallischen Werkstoffen ihre magnetischen Eigenschaften verändern. Diese Magnetisierung kann Auswirkungen auf nachfolgende Fertigungsschritte und den Gebrauch der Teile haben, zum Beispiel durch anhaftende metallische Späne oder kleine Partikel am Werkstück. Ein besserer Kenntnisstand der Mechanismen, die bei der spanenden Bearbeitung die magnetischen Felder der Werkstücke verändern, ist Voraussetzung, um die hohen Ansprüche der Qualitätssicherung für bearbeitete Bauteile oder ganze Bauteilgruppen zu erreichen. Diese magnetischen Änderungen werden neben der unmittelbaren Wirkung äußerer Magnetfelder auf Veränderungen im Gefüge der bearbeiteten Werkstücke zurückgeführt. Ein weiterer Aspekt ist die Prozesskette sowie der Zustand des Ausgangsmaterials. Die experimentellen Untersuchungen umfassen Versuche beim spanenden Fertigungsverfahren Fräsen mit anschließenden zerstörungsfreien Untersuchungen.

Damit wird ein Beitrag zum Verständnis des Entstehens von magnetischen Veränderungen durch mechanische Bearbeitung geleistet. Es werden im Besonderen die Einflüsse aus der Geometrie der Bearbeitung, der Charge des Materials sowie den Technologieparametern des Verfahrens auf das Magnetisierungsverhalten des Werkstücks betrachtet. Die Ergebnisse hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen den magnetischen Eigenschaften eines Werkstücks und der Bearbeitung führt zu einem optimierten Vorgehen bei der Prozesskettenplanung.

## **Abstract**

Machining of ferromagnetic materials often changes their magnetic fields. This can lead to a contamination of the workpiece surface because of attracted particles, which will influence further processing and application. A better understanding of the mechanisms in machining processes leading to magnetic fields is a prerequisite to meet high cleanliness demands of the machined parts and the quality of the assemblies. Causes for these changes of the magnetic fields are seen in the direct impact of external magnetic fields as well as in changes of the microstructure of the machined workpieces. Other aspects are the process chain and the initial state of the material. The experimental investigations are made by milling and subsequent non-destructive testing.

It is discussed which effects have to be examined to get a better understanding of the mechanisms. The test arrangement is explained and the systematic proceeding in investigating the impacts is exemplified by test series, where process parameters of a milling operation have been varied and resulting surface changes and magnetic characteristics have been analyzed. This paper focuses on the effects of changes in the geometry, of changing process parameters and of disparities between batches of the material on the change of the magnetic surface characteristics. The findings concerning the correlation of magnetic characteristics of a workpiece and the machining lead to an optimized approach to the planning of process chains.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS.....</b>	<b>I</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>IV</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>1 EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
1.1    MOTIVATION .....	1
1.2    ZIEL UND VORGEHENSKONZEPT.....	5
1.3    HYPOTHESEN .....	7
<b>2 GRUNDLAGEN UND STAND DER ERKENNTNISSE .....</b>	<b>8</b>
2.1    BAUTEILREINHEIT UND OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT.....	8
2.2    SPANBILDUNG .....	11
2.3    FERROMAGNETISCHE WERKSTOFFE.....	15
2.4    ÄNDERUNG MAGNETISCHER EIGENSCHAFTEN UNTER DEM ASPEKT DER SPANENDEN BEARBEITUNG .....	21
<b>3 WERKSTOFFCHARAKTERISIERUNG.....</b>	<b>26</b>
3.1    WERKSTOFFAUSWAHL.....	26
3.2    ANALYSEMETHODEN .....	27
3.2.1    Metallographie.....	27
3.2.2    Elektronenrückstreuung .....	27
3.2.3    Magnetische Eigenschaften .....	27
3.2.4    Magnetische Kraftmikroskopie .....	28
3.2.5    Hall-Sensor.....	28
3.3    WERKSTOFFBESCHREIBUNGEN.....	29
3.3.1    Werkstoff- und Chargenübersicht.....	29
3.3.2    Vergütungsstahl 1.7225 .....	29
3.3.3    Wälzlagerstahl 1.3505.....	34
3.3.4    Kaltarbeitsstahl 1.2080.....	36
3.4    MAGNETISCHE EIGENSCHAFTEN .....	37
3.4.1    Vergütungsstahl 1.7225 .....	37
3.4.2    Wälzlagerstahl 1.3505.....	39
3.5    ÄNDERUNG DER MAGNETISCHEN DOMÄNEN.....	41
<b>4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG.....</b>	<b>44</b>
4.1    VORGEHENSWEISE .....	44
4.2    VERSUCHSTECHNIK .....	47
4.3    ABLAUF DER MESSUNGEN .....	48
4.4    UNTERSUCHUNGEN DES ÄUßEREN MAGNETFELDES .....	49
4.5    UNTERSUCHUNGEN VON VERÄNDERUNGEN AN DER WERKZEUGSCHNEIDE .....	50
4.6    VERSUCHSPANUNG .....	51
<b>5 UNTERSUCHUNGEN AM MODELLSYSTEM.....</b>	<b>56</b>
5.1    ZUSAMMENHANG MAGNETISCHER EIGENSCHAFTSÄNDERUNGEN UND VERFORMUNG ...	56
5.1.1    Theoretischer Hintergrund.....	56
5.1.2    Versuche unter Zug- und Druckbelastung .....	58

<b>6</b>	<b>EINFLUSS DES LEGIERUNGSELEMENTS SCHWEFEL .....</b>	<b>62</b>
<b>7</b>	<b>EIGENSCHAFTSÄNDERUNGEN DURCH SPANENDE BEARBEITUNG .....</b>	<b>64</b>
7.1	ÜBERBLICK UND DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE .....	64
7.1.1	Parameter- und Werkstoffvergleich.....	64
7.1.2	Vergleich der Oberflächengüte.....	66
7.1.3	Variation Schnittiefe .....	67
7.1.4	Variation des Vorschubs .....	70
7.1.5	Variation der Bearbeitungsrichtung.....	71
7.2	VARIATION DER PROZESSFÜHRUNG .....	76
7.3	VERÄNDERUNG ENTLANG DER SCHNITTBEWEGUNG.....	78
<b>8</b>	<b>DISKUSSION .....</b>	<b>82</b>
8.1	EINFLUSS VON ÄUßEREN FELDERN AUF DIE ÄNDERUNG DER MAGNETISCHEN EIGENSCHAFTEN.....	82
8.2	EINFLUSS DER SPANENTSTEHUNG AUF DIE ÄNDERUNG DER MAGNETISCHEN EIGENSCHAFTEN.....	83
8.3	EINFLUSS DES MATERIALVERHALTENS UND DES MATERIALGEDÄCHTNISSES AUF DIE ÄNDERUNG DER MAGNETISCHEN EIGENSCHAFTEN .....	85
<b>9</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>86</b>
<b>10</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>88</b>

**ABKÜRZUNGS- und SYMBOLVERZEICHNIS**

<b>Zeichen</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Einheit</b>
-	Winkel	°
⊥	Bearbeitungsrichtung senkrecht zur Walzrichtung	
∥	Bearbeitungsrichtung parallel zur Walzrichtung	
$\mu$	Permeabilität	-
$\mu_{\max}$	materialspezifische Permeabilität	-
$\mu_r$	relative Permeabilität	-
$a$	Kantenlänge	$\mu\text{m}$
$A$	Fläche	$\text{m}^2$
$a$	Partikellänge	m
$a_e$	Fräsbreite/ Eingriffsbreite	mm
$a_p$	axiale Schnitttiefe	mm
$b$	Spanungsbreite	mm
$B$	Breite des Werkstücks	mm
$B$	magnetische Flussdichte	T
$B_{\max}$	maximal gemessene magnetische Flussdichte	T
$B_R$	Remanenzinduktion	T
$B_s$	Sättigungsinduktion	T
$B_x$	magnetische Flussdichte in X-Richtung	T
$B_y$	magnetische Flussdichte in Y-Richtung	T
$B_z$	magnetische Flussdichte in Z-Richtung	T
$d$	Durchmesser	mm
DoE	Design of Experiments / statistische Versuchsplanung	
EBSD	Electron Backscatter Diffraction	
ENTM	entmagnetisiert vor der Bearbeitung	
$F$	resultierende Kraft	N
$f$	Vorschub	mm
$F_a$	Aktivkraft	N
$F_c$	Schnittkraft	N

<b>Zeichen</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Einheit</b>
$F_{CN}$	Schnittnormalkraft	N
$F_f$	Vorschubkraft	N
$F_G$	Gravitationskraft	N
$F_M$	magnetisch anhaftende Kraft	N
$F_p$	Passivkraft	N
$f_z$	Vorschub je Zahn	mm
$g$	Gravitationskonstante (9,81)	m/s <sup>2</sup>
$H$	magnetische Feldstärke	A/cm
$H_c$	Koerzitivfeldstärke	A/cm
$H_{cB}$	Koerzitivfeldstärke	T
$H_{cj}$	Feldstärke	A/cm
$H_{eff}$	effektive Feldstärke	A/cm
$H_\omega$	magnetische Feldstärke	A/cm
IPF	Inverse Pole Figure	
$\vartheta$	Temperatur	°C
$J_{ex}$	Austauschintegral	
$J_{max}$	maximale magnetische Polarisation	
$J_s$	Sättigungspolarisation	
$k_{c1,1}$	spezifische Schnittkraft	N/mm <sup>2</sup>
$k_i$	spezifische Kraftkomponente	
$\kappa_p$	Werkzeug-Einstellwinkel	°
$l$	Eingriffslänge	mm
$L$	Länge des Werkstücks	mm
LSM	Laser-Scanning Mikroskop	
$M$	Magnetisierung	
$\mu_0$	magnetische Permeabilität ( $4\pi \cdot 10^{-7}$ )	kg m/A <sup>2</sup> s <sup>2</sup>
MMM	Metal Magnet Memory Method	
$M_s$	Sättigungsmagnetisierung	
$n$	Drehzahl	min <sup>-1</sup>
NEM	nicht entmagnetisiert vor der Bearbeitung	

<b>Zeichen</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Einheit</b>
PW	parallel zur Walzrichtung	
$\rho$	Dichte (Stahl: 7850)	kg/m <sup>3</sup>
R <sub>a</sub>	arithmetische Rautiefe	
r <sub>a</sub>	atomarer Radius	
r <sub>a</sub> / r <sub>3d</sub>	interatomarer Abstand zum Radius	
REM	Rasterelektronen Mikroskop	
R <sub>max</sub>	maximale Rautiefe	
R <sub>z</sub>	gemittelte Rautiefe	
SW	senkrecht zur Walzrichtung	
U <sub>HX</sub>	Spannungsmessung in Abhängigkeit der Koerzitivfeldstärke in X-Richtung	V
U <sub>HY</sub>	Spannungsmessung in Abhängigkeit der Koerzitivfeldstärke in Y-Richtung	V
V	Volumen	m <sup>3</sup>
v <sub>c</sub>	Schnittgeschwindigkeit	m/min
VDA	Verband deutscher Automobilindustrie	
v <sub>f</sub>	Vorschubgeschwindigkeit	m/min
X	Breite Werkstück	mm
Y	Länge Werkstück	mm
z	Zähnezahl	-
ZTU	Zeit Temperatur Umwandlung	
NEM	nicht entmagnetisiert vor der Bearbeitung	

**ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

Abbildung 1-1: Betrachtung der Prozesskette als Gesamtsystem mit seinen Einzelprozessen, angelehnt an [6]..... 1

Abbildung 1-2: Beispiele aus dem Labor zur Anhaftung von Partikeln nach der Bearbeitung sowohl an Werkstücken als auch an Werkzeugen ..... 2

Abbildung 1-3: Theoretisch zur Anhaftung notwendige magnetische Flussdichte im Verhältnis zur Partikelgröße eines idealisierten kubischen Stahlpartikels [13] ..... 3

Abbildung 1-4: Zusammenhang der Änderung der magnetischen Eigenschaften entlang der Prozesskette ..... 5

Abbildung 2-1: Darstellung des Aufwands für die Reinigung gegenüber steigender Sauberkeit abhängig von den tolerierten Partikelgrößen [2] ..... 9

Abbildung 2-2: Zusammenspiel der gegenseitig abhängigen Einflussgrößen auf das Ergebnis des Zerspanprozesses, angelehnt an Byrne [15, 37, 38] ..... 12

Abbildung 2-3: Beispielhafte Wärme- und Temperaturverteilung in Werkstück, Span und Werkzeug bei der Stahlzerspannung angelehnt an [40] ..... 12

Abbildung 2-4: Zusammenhang der in dieser Arbeit auftretenden Schnittparameter im Verhältnis Werkstück zu Werkzeug..... 13

Abbildung 2-5: Abhängigkeiten der Zerspankraftkomponenten zu Vorschub, Schnittgeschwindigkeit, Einstellwinkel und Schnitttiefe [40] ..... 14

Abbildung 2-6: Parallelstellung der Elementarmomente der Atome [45] ..... 15

Abbildung 2-7: Bethe-Slater-Kurve zeigt die Abhängigkeit der Austauschenergie vom Verhältnis des inter-atomaren Abstandes zum Radius der un abgeschlossenen Elektronenschale nach [47]..... 16

Abbildung 2-8: Domänenstruktur eines ferromagnetischen Materials ohne und mit Einfluss eines steigenden, externen, magnetischen Feldes nach [47, 49]..... 17

Abbildung 2-9: Beispiel für Hysterese- und Neukurve (Anstieg von 0 auf  $B_s$ ) sowie Koerzitivfeldstärke  $H_c$  nach Cullity [47] ..... 18

Abbildung 2-10: Allgemeine Beschreibung der Hysterese in Bezug auf unterschiedliche Werkstoffgruppen nach Ashcroft [53] ..... 20

Abbildung 2-11: Einteilung der magnetischen Materialien in Abhängigkeit von der Koerzitivfeldstärke und Sättigungspolarisation nach [54] ..... 20

Abbildung 2-12: Veränderung der magnetischen Auswirkung bei Einspannung der Werkstücke von innen oder außen nach [15]..... 22

Abbildung 2-13: Änderung der Hysterese des gleichen Werkstoffs direkt nach dem magnetischen Glühen und nach Glüh- und Zerspanprozess, nach [15] ..... 22

Abbildung 2-14: Ergebnis einer Hallsensor Messung für den Werkstoff 16 MnCr 5 in x- Richtung (oben) und y- Richtung (unten) vor der Bearbeitung (linke Seite) und nach der Bearbeitung (rechte Seite) bei folgenden Parametern: Schnitttiefe 1 mm, Schnittgeschwindigkeit 276 m/min, Messung erfolgte 1h nach der Zerspannung [64, 66] ..... 25

Abbildung 3-1: Lage der zu untersuchenden Proben zur Analyse im Laser Scanning Mikroskop (LSM), Raster Elektronen Mikroskop (REM) und Electron Backscatter Diffraction (EBSD) sowohl parallel als auch senkrecht zur Walzrichtung .....	26
Abbildung 3-2: Setup der MFM Messungen [80].....	28
Abbildung 3-3: Gesamtüberblick zur Werkstoffcharakterisierung des Materials 1.7225_Charge A parallel zur Walzrichtung .....	30
Abbildung 3-4: Gesamtüberblick zur Werkstoffcharakterisierung des Materials 1.7225_Charge B parallel zur Walzrichtung .....	31
Abbildung 3-5: ZTU Schaubild für kontinuierliches Abkühlen des Werkstoffs 1.7225 [94] .....	33
Abbildung 3-6: Phasenanteile der Chargen A und B des Werkstoffs 1.7225 .....	34
Abbildung 3-7: Gesamtüberblick zur Charakterisierung des Werkstoffs 1.3505_Charge C .....	35
Abbildung 3-8: Hysteresekurven des Werkstoff 1.7225 Charge A (a), Charge B (b).....	37
Abbildung 3-9: Ausschnitt der Hysteresekurven des Werkstoff 1.7225 Charge A (a), Charge B (b) im Bereich von $B \pm 2$ mT .....	38
Abbildung 3-10: Werkstoff 1.3505 Charge C (a) und Charge II (b).....	39
Abbildung 3-11: Darstellung zur Orientierung der Lage der MFM Messung zur Bearbeitungsposition und links das bearbeitete Werkstück .....	41
Abbildung 4-1: Ablaufschema der Versuchsdurchführung für alle Werkstoffe.....	46
Abbildung 4-2: Ansicht des Messaufbaus zur Messung der magnetischen Induktion [13].....	47
Abbildung 4-3: Abhängigkeit der Messwerte vom Abstand des Sensors zur zu vermessenden Oberfläche [13].....	48
Abbildung 4-4: Fräsmaschine MAHO 600E2 (a) mit Garant 45°Fräskopf mit fünf Cermet-Wendeschneidplatten des Typs SDHW0903 (Cu7725), Messposition 1 und 2 (b) .....	49
Abbildung 4-5: Anhaftungen nach der Zerspanung an einem Sägeblatt im Labor (a); verwendete Wendeschneidplatte CU7225 nach ISO Norm SDHW0903 (b) .....	50
Abbildung 4-6: Darstellung zur Betrachtung der Bearbeitungsverhältnisse, Geometrie in Bezug auf die Bearbeitungsrichtung sowie die Walzrichtung des Werkstoffs aus dem Ausgangsmaterial.....	51
Abbildung 4-7: Beschreibung der Eingriffsverhältnisse zwischen Bearbeitungs- und Walzrichtung II Bearbeitungsrichtung parallel zur Walzrichtung, L x B in mm 200 x 60 (a) $\perp$ Bearbeitung senkrecht zur Walzrichtung L x B in mm 200 x 60 (b) $\perp$ Bearbeitung senkrecht zur Walzrichtung L x B in mm 60 x 40 (c).....	52
Abbildung 4-8: Haupteffektediagramm für den Werkstoff 1.7225 bei der Auswertung der Mittelwerte nach der Bearbeitung .....	54
Abbildung 4-9: Ergebnisse der DoE Auswertung zur Wechselwirkungsanalyse der Chargen A und B des Werkstoffs 1.7225 sowohl für die Parameteranalyse als auch des Chargenvergleichs [65] .....	55
Abbildung 5-1: Lastspannungsabhängigkeit der Hystereseschleife (oben) und der Barkhausen-Rausch-Profilkurve (unten) [49].....	56

Abbildung 5-2: Orientierung der Domänen mit steigender Spannung nach [105] ..... 57

Abbildung 5-3: Einspannbereich der Zugproben Charge B (a), Darstellung der Gefügestände  
Zugprobe Charge A (b) und Grundwerkstoff Charge A (c) ..... 58

Abbildung 5-4: Vergleich der Zugproben beispielhaft Werkstoff 1.7225\_Charge A vor Zugbelastung,  
nach Entmagnetisierung (a); nach Zugbelastung (b) ..... 59

Abbildung 5-5: Vergleich der Zugproben nach Zugbelastung des Werkstoffs 1.7225\_Charge B (c) .. 60

Abbildung 5-6: Intensität der magnetischen Flussdichte über der Probenoberfläche vor und nach der  
Einspannung mit Sägeschliff zur Druckausübung in X-Richtung , links Charge A parallel zur  
Walzrichtung(PW) (a), Charge B parallel zur Walzrichtung(PW) (b) des Werkstoffs 1.7225 ..... 61

Abbildung 6-1: Spanbildungszone mit Markierung und Beschreibung der Parameter ..... 62

Abbildung 6-2: vergleichende Darstellung der Späne für den Werkstoff 1.7225 Chargenvergleich (a) –  
(b) bei gleichen Parametern ..... 63

Abbildung 7-1: Vergleich des Ausgangszustand für Werkstücke der Größe 60 x 40 mm bei jeweils  
gleichen Prozessparametern der Bearbeitung pro Werkstück durch Auftrag der maximalen  
Betragswerte der magnetischen Flussdichte, NEM - nicht entmagnetisiert, ENTM - entmagnetisiert . 65

Abbildung 7-2: Vergleich der Oberflächengüte bei gleicher Parameterauswahl des Werkstoffs 1.7225  
im entmagnetisierten (ENTM) und nicht-entmagnetisiertem (NEM) Zustand. .... 66

Abbildung 7-3: Vergleich der Oberflächenscans des Spanvolumens von 2 mm in 4 x 0,5 mm Schritten  
zu direkter Schnitttiefe von 2 mm bei einer Intensitätsskala von -1,5 – 1,5 *mT*..... 67

Abbildung 7-4: Variation des Gesamtabtrags durch Einzelprozessbearbeitung im Vergleich zum  
Gesamtabtrag..... 68

Abbildung 7-5: Darstellung beispielhaft für die parallele Bearbeitung des Werkstoffs 1.7225 Charge A  
und Charge B, bei einer Schnitttiefe von 0,5 mm (A) und 1 mm (B), einer Drehzahl von 625 min<sup>-1</sup> und  
einem Vorschub pro Zahn von 0,15 mm ..... 69

Abbildung 7-6: Vergleich der magnetischen Flussdichte bei Variation der Vorschubgeschwindigkeit,  
aufbauend auf [13]..... 70

Abbildung 7-7: Darstellung beispielhaft für die parallele Bearbeitung des Werkstoffs 1.7225 Charge A,  
bei einer Schnitttiefe von 1 mm, einer Drehzahl von 625 min<sup>-1</sup> und einem Vorschub pro Zahn von  
0,05 mm, entmagnetisiert (a), bearbeitet (b) [65] ..... 72

Abbildung 7-8: Darstellung beispielhaft für die senkrechte Bearbeitung des Werkstoffs  
1.7225\_Charge A, bei einer Schnitttiefe von 0,5 mm, einer Drehzahl von 625 min<sup>-1</sup> und einem  
Vorschub pro Zahn von 0,05 mm [65] ..... 73

Abbildung 7-9: Vergleich der senkrechten (a) und parallelen (b) Bearbeitung des Werkstoffs 1.7225  
Charge A und Charge B, bei identischen Prozessparametern; senkrechte Bearbeitungsrichtung zur  
Walzrichtung, angelehnt an [66] (c)..... 74

Abbildung 7-10: Oberflächenscan in Y-Richtung mit deckender Bearbeitungsreihenfolge beim  
Fräsvorgang mit dem Messerkopf Durchmesser 80 mm(c), angelehnt an [66] ..... 75

Abbildung 7-11: Auswirkung der Anpassung der Prozessführung durch Entmagnetisierung vor der  
Fertigung und ohne Entmagnetisierung ..... 76

Abbildung 7-12: Maximaler Betrag der gemessenen magnetischen Flussdichte im Chargenvergleich für den Werkstoff 1.7225 nach der Bearbeitung im Fall Option 1 nicht entmagnetisiert (NEM) und Option 2 entmagnetisiert (ENTM ) vor der Bearbeitung ..... 77

Abbildung 7-12: Vergleichende Darstellung der Feldverteilung der magnetischen Flussdichte für den Werkstoff 1.7225 Charge A bei folgenden Prozessparametern Bearbeitungsrichtung: II; n: 833 min<sup>-1</sup>; v<sub>f</sub>: 625 mm/min; a<sub>p</sub>: 1mm ..... 77

Abbildung 7-13: Spannungslänge der Frässpur in Abhängigkeit von dem Betrag der magnetischen Flussdichte auf der Oberfläche (a) passend zu den Frässpuren in blau auf der Werkstückoberfläche (b) und in Korrelation mit der Intensität der magnetischen Flussdichte in mT in X-Richtung (c) ..... 78

Abbildung 7-14: Betrachtung des Betrags der magnetischen Flussdichte bei fortlaufenden Frässpuren wenn der Schneideneingriff zunächst noch von der Strirnseite, Frässpuren 10 - 20 und dann vom Randbereich des Werkstücks erfolgt ab Frässpur 21 ..... 79

Abbildung 7-15: Betrag der magnetischen Flussdichte entlang der Spannungslänge, im Diagramm als Frässpur in mm (rot, blau und grüne Spur) in Bezug zur Lage der Frässpur und in Korrelation zum Oberflächenscan des Betrags in diesem Bereich ..... 80

Abbildung 7-16: Vergleich der magnetischen Flussdichte bei ausgerichteter Frässpur in der Anfangszone des Werkstücks ..... 81

Abbildung 9-1: Anhaftungen nach Zerspanung an einer Werkstückoberfläche durch magnetische Kräfte durch umliegenden Prozessverunreinigungen, Abrieb, Schleifstaub in Umgebung oder ähnlichem ..... 86

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1-1: Effekt der Anhaftung in Abhängigkeit des magnetischen Feldes angelehnt an [12].....	3
Tabelle 3-1: Herstellerangaben zur Gerätegenauigkeit des THM1176-LF gilt für ein Messfeldvolumen von 6 x 3.4 x 3 mm und einem Winkelfehler von 0.2° .....	28
Tabelle 3-2: Übersicht der verwendeten Werkstoffe und der zugehörigen Chargenbeschreibung .....	29
Tabelle 3-3: Chemische Zusammensetzung des Werkstoffs 1.7225 der verwendeten Chargen.....	30
Tabelle 3-4: Vergleich der metallographischen Schlibfbilder des Laser-Scanning Mikroskops parallel und senkrecht zur Walzrichtung der Chargen A und B des Werkstoffs 1.7225 bei 100-facher Vergrößerung .....	32
Tabelle 3-5: Vergleich der EBSD Korndurchmesserauswertung in $\mu\text{m}$ senkrecht zur Walzrichtung der Chargen A und B des Werkstoffs 1.7225 .....	33
Tabelle 3-6: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Chargen des Werkstoffs 1.3505; k.A. keine Angabe aufgrund des geringen Anteils möglich .....	35
Tabelle 3-7: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Chargen des Werkstoffs 1.2080; k.A. keine Angabe aufgrund des geringen Anteils möglich .....	36
Tabelle 3-8: Vergleich der Hystereseergebnisse des Werkstoffs 1.7225 .....	38
Tabelle 3-9: Vergleich der Hystereseergebnisse des Werkstoffs 1.3505 .....	40
Tabelle 3-10: MFM Aufnahmen in der Gegenüberstellung des Werkstoff 1.7225 und des Zustands der Bearbeitung .....	41
Tabelle 3-11: <i>Matlab</i> -Auswertung der Hall-Sensor-Messung des Werkstoffs 1.7225 im Vergleich des Zustands der Bearbeitung, Probenlage mittig .....	42
Tabelle 3-12: MFM Aufnahmen in der Gegenüberstellung des Werkstoffs 1.3505 und des Zustands der Bearbeitung .....	43
Tabelle 3-13: <i>Matlab</i> -Auswertung der Hall-Sensor-Messung der Werkstoffs 1.3505 im Vergleich des Zustands der Bearbeitung, Probenlage mittig .....	43
Tabelle 4-1: Beschreibung der Einflüsse auf die Änderung der magnetischen Eigenschaften, angepasst aus [13] .....	44
Tabelle 4-2: Untersuchungskonzepte am Gesamt- und Modellsystem .....	45
Tabelle 4-3: Ergebnisse der Messungen an der Maschine an zwei Messpositionen im Vergleich Leerlauf zu Vorschubbewegung.....	49
Tabelle 4-4: Messungen an Wendeschneidplatte an der Spanfläche in einem Untersuchungszyklus beim Vergleich der Zerspanung des Spanvolumens von 4x 0,5 mm zu 1x 2 mm .....	50
Tabelle 4-5: Gesamtüberblick der Versuchsdurchführung in Abhängigkeit der Werkstoff und Parameterkombination sowie der Probengröße.....	53
Tabelle 7-1: Überblick über alle Versuchsreihen der maximalen bzw. der gemittelten magnetischen Flussdichte sowohl als Betrag $B$ als auch in Z-Richtung $B_z$ in Abhängigkeit von Versuchsdurchführung, Werkstoff und Parameterkombination sowie der Probengröße und dem Entmagnetisierungszustand .....	64

---

Tabelle 7-2: Vergleich der Oberflächengüte nach der Zerspanung des Werkstoffs 1.7225 bei gleichen Prozessparametern $v_f$ : $600 \text{ m min}^{-1}$ , $n$ : $800 \text{ min}^{-1}$ , $a_p$ : $1 \text{ mm}$ im Chargenvergleich .....	66
Tabelle 7-3: Mittelwert der Betragswerte der magnetischen Flussdichte $B$ in $mT$ sowie das gemessene Maximum und Minimum auf dem jeweiligen Werkstück .....	68
Tabelle 7-4: maximal gemessene Flussdichte je Werkstück des Werkstoffs 1.7225_Charge A vor und nach der Bearbeitung und im Vergleich bei Variation der Vorschubgeschwindigkeit .....	71

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

„Die starke Beeinflussung der Prozesskette durch Verschmutzungen, die während des Durchlaufs eines Werkstückes durch die einzelnen Bearbeitungsschritte an der Werkstückoberfläche entstehen, spiegelt sich sowohl in der Ausprägung des Einzelprozesses, ..., als auch in der fertigungstechnologischen Organisation der Prozesskette wider.“ [1] Die Aktualität dieser Aussage zeigt sich auch in der letzten Überarbeitung des VDA-Bands 19 [2], die erneut verdeutlicht, dass Bauteilreinheit sowohl ein Qualitäts- als auch ein Kostenfaktor ist und dass die Thematik der technischen Sauberkeit in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen hat. Im Zuge steigender Energiekosten gewinnt parallel dazu auch der ressourcenschonende Betrieb von Fertigungslinien seit Jahren zunehmend an Bedeutung, daher rücken auch Themen wie die industrielle Teilereinigung als Kostenfaktor in den Mittelpunkt der Betrachtung. Es gibt vielfältige Möglichkeiten im Umfeld der Maschine und der Prozesse, Energie und Ressourcen einzusparen. Grundsätzlich sind Prozessoptimierungen neben neuen Technologien und alternativen Antrieben wichtige Bausteine der Energie- und Ressourcenschonung. Die Schulung und Sensibilisierung der Mitarbeiter muss dabei die technologischen Maßnahmen begleiten. [3, 4]

Die Teilereinigung zielt vor allem auf die Beseitigung von Verunreinigungen an Werkstückoberflächen, deren Auftreten auf sehr unterschiedliche Ursachen zurückzuführen sein kann. Daher ist die Betrachtung der Prozesskette als Gesamtsystem unabdingbar, jedoch auch der Einzelprozess mit seinen Einflüssen auf das Bauteil und die Folgeprozesse müssen betrachtet werden. [5, 6] Denn wenn Probleme auftreten, gilt es den Einzelprozess zu beeinflussen, siehe Abbildung 1-1.

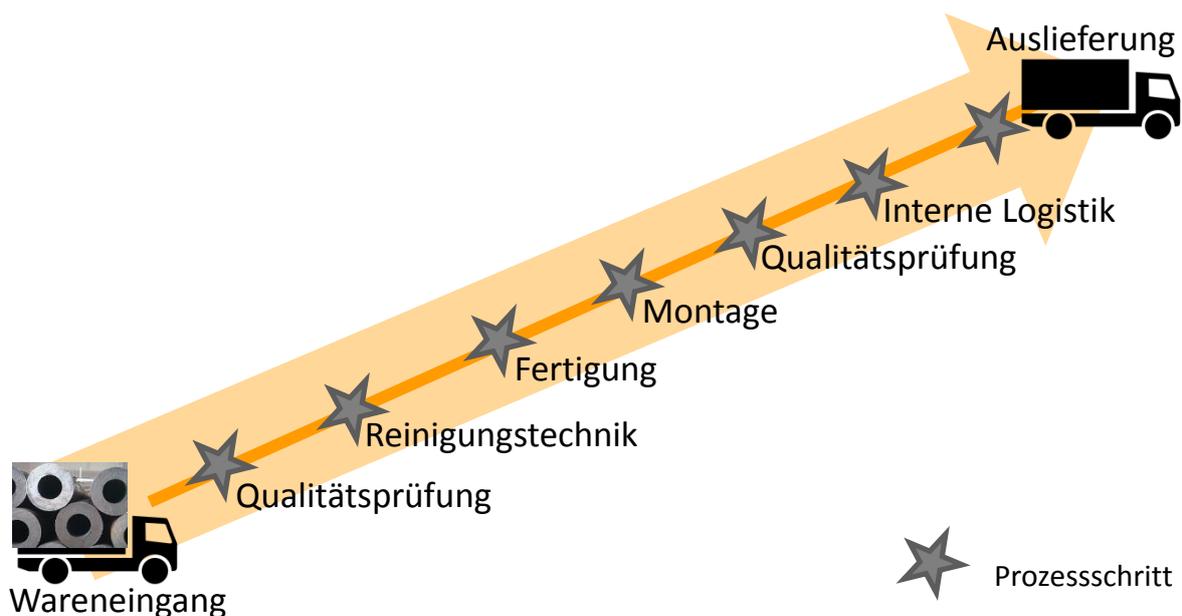
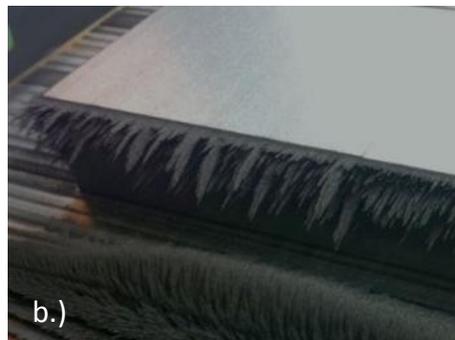
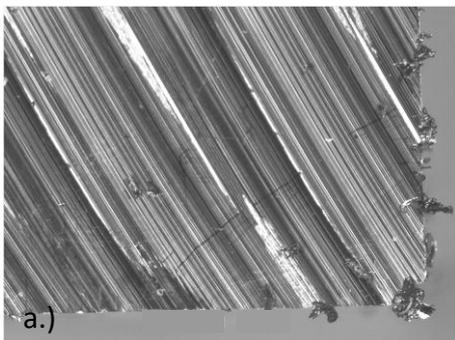


Abbildung 1-1: Betrachtung der Prozesskette als Gesamtsystem mit seinen Einzelprozessen, angelehnt an [6]

Eine wesentliche Ursache für die Anhaftung von Spänen an Bauteilen und Werkzeugen als ein Beitrag zur Verschmutzung sind magnetische Kräfte, die zum Teil erst durch die Veränderung der magnetischen Eigenschaften der Bauteile bei der spanenden Bearbeitung entstehen. Abbildung 1-2 zeigt Beispiele aus dem Labor zur Anhaftung von Partikeln nach der Bearbeitung sowohl an Werkstücken als auch an Werkzeugen. Diese Veränderung der Magnetisierung kann Auswirkungen auf nachfolgende Fertigungs- und Montageschritte sowie den Gebrauch der Teile haben, z.B. durch anhaftende Verunreinigungen oder anteiliger Verlust ihrer magnetischen Eigenschaften. Als Ursachen dieser Magnetisierung sind neben der unmittelbaren Wirkung äußerer Magnetfelder auch Einflüsse durch den Spanentstehungsprozess während der Bearbeitung von Bedeutung. Allgemein wird die Änderung der magnetischen Eigenschaften in spanenden Fertigungsprozessen auf den Einfluss magnetischer Spannsysteme, die Wirkung elektro-magnetischer Felder der Antriebe innerhalb von Werkzeugmaschinen und Veränderungen im Gefüge der bearbeiteten Werkstücke zurückgeführt. [7–11]



- a. gefräste Oberfläche mit anhaftenden Spänen
- b. geschliffene Oberfläche mit anhaftendem Schleifstaub
- c. anhaftende Partikel aus Umgebung an bearbeitetem Bauteil
- d. anhaftender Span an Werkstückoberfläche
- e. Sägeblatt mit anhaftenden Spänen



Abbildung 1-2: Beispiele aus dem Labor zur Anhaftung von Partikeln nach der Bearbeitung sowohl an Werkstücken als auch an Werkzeugen

Selbst schwache magnetische Felder, mit Flussdichten unter  $1\text{ mT}$ , können zu Partikelanhaftungen führen. Bereiche kleiner als  $0,1\text{ mT}$  bezeichnet man als entmagnetisiert. Schon  $0,3\text{ mT}$  reichen aus, um Schleifstaub zu binden. Mit einer magnetischen Flussdichte von  $1\text{ mT}$  entstehen Kräfte, die zur Anhaftung von Spänen ausreichen, siehe Tabelle 1-1. Die aufgeführten Effekte der Anhaftung, d.h. die möglichen Partikelgrößen, machen deutlich, dass eine Vernachlässigung nicht möglich ist. Die aufgezeigten magnetischen Felder spiegeln auch den Bereich der magnetischen Felder wider, die bei der spanenden Bearbeitung zu finden sind. In Abbildung 1-3 wird dies durch die theoretische Betrachtung der zur Anhaftung notwendigen magnetischen Flussdichte  $B$  in  $\text{mT}$  in Abhängigkeit von der Kantenlänge eines idealisierten kubischen Partikels dargestellt.

Tabelle 1-1: Effekt der Anhaftung in Abhängigkeit des magnetischen Feldes angelehnt an [12]

Magnetisches Feld	Magnetisierungsgrad	Anhaftungseffekt/ Partikelgröße
> 5 mT	magnetisch	
2 mT	Restmagnetismus	
1,2 mT		Kleinteile
1 mT	leicht magnetisch	Späne
0,3 mT		Schleifstaub
0,1 mT	entmagnetisiert	

Magnetische Felder bis zu einer Stärke von  $1,5\text{ mT}$  führen nach der theoretischen Berechnung zu Anhaftungen von idealisierten Partikeln mit einer Kantenlänge von bis zu  $10\text{ }\mu\text{m}$ , die Berechnung ist in ANHANG A zu finden.

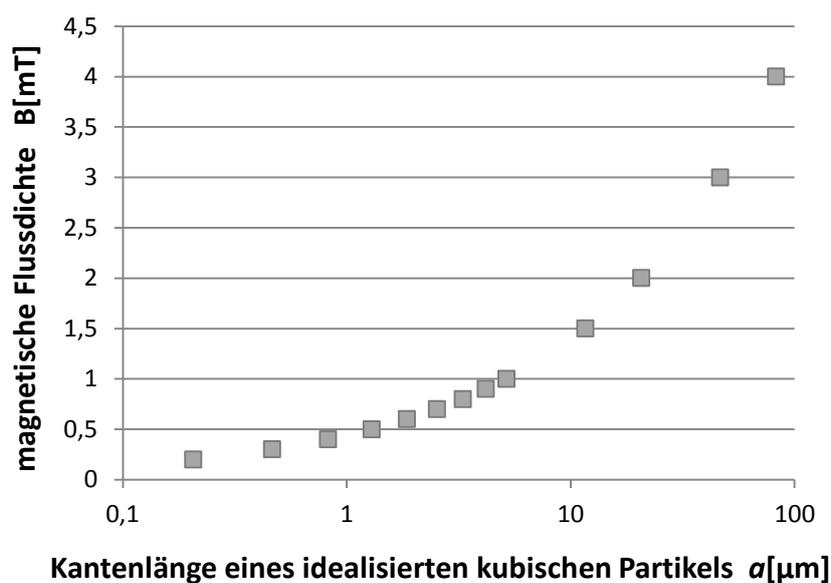


Abbildung 1-3: Theoretisch zur Anhaftung notwendige magnetische Flussdichte im Verhältnis zur Partikelgröße eines idealisierten kubischen Stahlpartikels [13]

Da im realen Prozess die Partikel bei gleichem Volumen eine deutlich größere Kantenlänge haben und häufig zur Agglomeration neigen, sind Anhaftungen fast schon zwingend zu erwarten und durch sie Störungen bzw. Beeinflussungen in den weiterführenden Prozessschritten möglich. Die Einführung eines Grenzwerts für den unkritischen Restmagnetismus vor dem Reinigungsschritt ist eine sinnvolle Konsequenz. Beispielsweise lautet dieser Grenzwert im Bereich medienberührter Komponenten für Dieseleinspritzsysteme  $2,5 \text{ Gau\ss}$  nach dem VDA-Band 19 zur Prüfung der Technischen Sauberkeit [2], dies entspricht  $0,25 \text{ mT}$ .

## 1.2 Ziel und Vorgehenskonzept

Durch die vorliegende Arbeit soll ein Beitrag zum Verständnis der Veränderung von magnetischen Oberflächeneigenschaften bei der spanenden Bearbeitung ferromagnetischer Werkstoffe geleistet werden. Dabei werden im Besonderen die Zusammenhänge zwischen Methodik der Untersuchung, Einfluss des Versuchsaufbaus sowie der Einfluss des Werkstoffs und seines Ausgangszustandes betrachtet. Beim Versuchsaufbau ist unter anderem der Abstand zwischen Sensor und Oberfläche kritisch. Bei der Werkstoffauswahl werden Chargenschwankungen, Magnetisierungszustand des Ausgangsmaterials und Magnetisierungsverhalten des Werkstücks berücksichtigt. Dazu werden die Einflussmöglichkeiten systematisch untersucht und wiederum Steuerungsmöglichkeiten zur Beherrschung der Einflüsse aufgezeigt. An drei Stahlsorten mit unterschiedlichen Chromgehalten werden gezielt bei der spanenden Bearbeitung Einflussparameter bestimmt und durch Variierung der jeweilige einzelne Einfluss untersucht. Fräsen bietet sich aufgrund der guten Wiederholbarkeit definierter Prozessbedingungen als spanendes Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide an. In der Arbeit wird das Stirnkopffräsen untersucht, um möglichst gleichmäßige Oberflächen zu erzeugen und diese zur Messung der magnetischen Eigenschaften mit zerstörungsfreien Prüfverfahren zu charakterisieren. Auch die Einflüsse der Rahmenbedingungen, die zum Teil durch qualifizierte Messungen belegt sind, werden in der Arbeit betrachtet.

Zur Darstellung der Zusammenhänge zeigt Abbildung 1-4 die Sicht entlang der Prozesskette. Dies bedeutet, dass Werkstoffeigenschaften und Geometrieänderungen parallel zur Prozesskette dokumentiert werden.

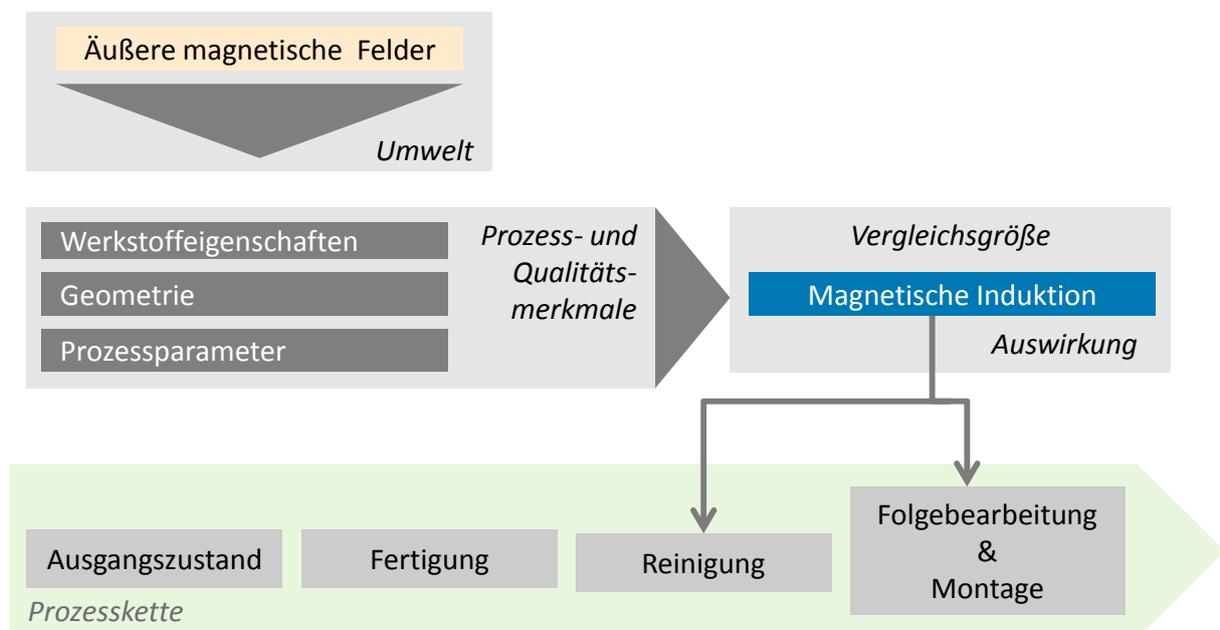


Abbildung 1-4: Zusammenhang der Änderung der magnetischen Eigenschaften entlang der Prozesskette

---

Die Prozessparameter der Bearbeitung werden als veränderbares Merkmal neben den Parametern wie Temperaturfeldern und äußeren magnetischen Feldern betrachtet. Die magnetische Induktion gilt als Vergleichsgröße entlang der Prozesskette, da sie, je nach Höhe der Änderung, die Art der Reinigung und die folgenden Prozessschritte, wie weitere Bearbeitungsverfahren und Montage, beeinflussen kann. Ziel der Arbeit ist es, die Prozess- und Qualitätsmerkmale unter dem Aspekt der Vergleichsgröße zu analysieren sowie Wechselwirkungen und Mechanismen zu verstehen.

### 1.3 Hypothesen

Die experimentellen Untersuchungen umfassen Versuche beim spanenden Fertigungsverfahren Fräsen mit vorausgehenden und anschließenden zerstörungsfreien Messungen. Aus den in der Literatur beschriebenen Zusammenhängen zeigt sich, dass bei der mechanischen Bearbeitung auch äußere Magnetfelder zur Magnetisierung von Werkstücken führen können. Insbesondere betrifft dies die Wirkung von magnetischen Spannsystemen, von elektromagnetischen Feldern der Antriebe in den Maschinen und des Erdmagnetfelds [14]. Darüber hinaus wird die plastische Verformung des Gefüges als Ursache für die Magnetisierung benannt [15].

Eine weitere mögliche Ursache für das Auftreten von Magnetfeldern nach dem Zerspanprozess ist der magnetoelastische Effekt, auch bekannt als Villari-Effekt oder umgekehrte Magnetostriktion. [16–19] In ferromagnetischen Materialien bewirkt jede Magnetisierungsänderung eine Längenänderung des Werkstücks, im selben Maße führt auch jede Längenänderung zu einer Magnetisierungsänderung [20, 21]. Die Ursache für solche Längenänderungen können Eigenspannungsänderungen sein, die durch die mechanische Bearbeitung in das Werkstück eingebracht werden.

Auch durch die lokale thermische Belastung bei der Bearbeitung können lokale Eigenspannungen verursacht werden, welche ihrerseits zu Magnetfeldänderungen in der Probe führen [20].

Somit lassen sich zusammenfassend folgende Aspekte hervorheben, die eine Veränderung der magnetischen Eigenschaften verursachen können:

- Äußere Felder
- Spanentstehung
- Materialverhalten und Materialgedächtnis

Daraus leitet sich für die Arbeit ein Vorgehen ab, das zum einen auf empirischen Untersuchungen mittels statistischer Versuchsplanung am Gesamtsystem basiert und zum anderen auf Untersuchungen am Modellsystem, das übertragbare Ergebnisse zur Weiterführung der Thematik erzielen soll.

## 2 Grundlagen und Stand der Erkenntnisse

### 2.1 Bauteilreinheit und Oberflächenbeschaffenheit

Die Prozessüberwachung ist in der industriellen Fertigung ein wesentlicher Bestandteil zur Sicherstellung der Produkteigenschaften und auch im wissenschaftlichen Kontext ein zentraler Ausgangspunkt umfangreicher Forschungsansätze. Bauteilreinheit und Oberflächenbeschaffenheit sind im Allgemeinen Bestandteile der Prozessüberwachung. Der Begriff der ‚Oberflächenbeschaffenheit‘, international bekannt unter dem Begriff der ‚Surface Integrity‘, wurde in den 1960er Jahren von Field und Kahles als der verbesserte Zustand einer Oberfläche beschrieben, die durch Bearbeitungsprozesse oder andere Oberflächenerzeugungsoperationen dargestellt wird [22, 23]. Bellows und Tischler identifizieren zwei Aspekte der Oberflächenbeschaffenheit als Oberflächentopographie und als Oberflächenmetallurgie. Der erste Aspekt ist stark beeinflusst u.a. durch die Geometrie. Im Bereich der Oberflächenmetallurgie wird von Effekten gesprochen, die ein Prozess unterhalb der sichtbaren Oberfläche bewirkt. Durch diese Effekte veränderte Materialzonen können sich zum einen im Eigenspannungszustand vom darunterliegenden Material unterscheiden oder sich durch eine Veränderung in der Kornstruktur auszeichnen. Die Literatur unterscheidet unter anderem zwischen folgenden Effektmechanismen: mechanisch, metallurgisch, chemisch, thermisch und elektrisch. In diesem Zusammenhang sind hier besonders die Ursachen für die Oberflächenveränderungen in der Materialentfernung zu finden. Als metallurgischer Modus wird die Transformation der Phasen verstanden, die unter anderem durch hohe Temperaturfelder bzw. Temperaturgradienten im Prozess bewirkt wird. Die mechanische Belastung oberhalb der plastischen Deformationsgrenze während des Materialabtrags kann Verursacher des elektrischen Modus sein, der die Änderung der magnetischen Eigenschaften zur Folge hat. Chemische Reaktionen und anschließende Aufnahme der Reaktionsprodukte in die neu entstandene Oberfläche können auch eine Ursache sein. [24]

Schmidt führt in seiner Arbeit zum Thema der Reinigungstechnik und deren Einordnung als Prozessschritt in die Fertigungsfolge auf, dass dem Zerspanprozess eine wesentliche Ursachenrolle bei der Bauteilreinheit zufällt, sowohl auf mikro- als auch auf makroskopischer Ebene. „Die starke Beeinflussung der Prozesskette durch Verschmutzungen, die während des Durchlaufs eines Werkstückes durch die einzelnen Bearbeitungsschritte an der Werkstückoberfläche entstehen, spiegelt sich sowohl in der Ausprägung des Einzelprozesses, ..., als auch in der fertigungstechnologischen Organisation der Prozesskette wider.“ [1] Byrne und Scholta zeigen Anfang der 1990er Jahre auf, dass das Thema der Prozessüberwachung sowohl weiterer Forschungs- als auch Entwicklungsarbeit bedürfe und es auch zu geregelten Anforderungen und Vorschriften führen werde [25, 26]. Diese prognostizierten Arbeiten sind heute tatsächlich in Regelwerken umgesetzt, unter anderem mit der VDA-Band 19 im Bereich der Automobil- und Automobilzuliefererindustrie [2]. Einige besonders erwähnenswerte Arbeiten in diesem Zusammenhang sind die von Mauren

und von Jung. Mauren beschreibt in seiner Situationsanalyse die Einflüsse des Roh- teils sowie der einzelnen Arbeitsabläufe bis hin zur Bewertung der Zerspanbarkeit und des Werkzeugverschleißes [27]. Ein praxis- und prozessnahes Optimierungsmodell zur systematischen, kontinuierlichen Verbesserung komplexer industrieller Prozesse hat Jung aufgestellt [28].

Im Abschlussbericht des Verbundforschungsprojekts ‚Spansauber‘ werden nicht nur die verschiedenartigen Einflüsse von Fertigungsprozessen beleuchtet, sondern auch aufgezeigt, dass bereits durch kleinste Partikel die Funktionsfähigkeit von Bauteilen negativ beeinträchtigt werden kann. In den letzten Jahren wird beobachtet, dass betroffene Systeme nicht erst am Ende ihrer Lebensdauer aufgrund von Verschleiß, z.B. durch abrasiven Feinabrieb, ausfallen, sondern bereits sehr früh oder schon beim Erststart versagen. Verantwortlich sind für diesen Ausfall sehr häufig einzelne „große“ Partikel ( $> 50 \mu\text{m}$ ). „Neben der Größe von Partikeln wird hauptsächlich deren Härte als kritisches Kriterium genannt; an erster Stelle mit dem höchsten Schädigungspotential stehen dabei Metallpartikel aus dem Fertigungsprozess; dies können Späne oder gelöste Grate aus der Bearbeitung sein.“ Die Analyse der Entgrat- und Reinigungsergebnisse erfolgt meist optisch qualitativ. Beeinträchtigungen des Reinigungsergebnisses werden maßgeblich auf Magnetismus der zu reinigenden Bauteile, Adhäsion sowie Fett- und Ölanhaftungen zurückgeführt. [29]

Der Aufwand der Reinigung mit dem Ziel der Entfernung kleinerer Verunreinigungen aufgrund der steigenden Sauberkeitsanforderung ist in Abbildung 2-1 dargestellt. Die Abbildung macht deutlich, dass der Aufwand exponentiell ansteigt. Koblenzer beschreibt in seinem Artikel die notwendige Berücksichtigung der technischen Sauberkeit gleichrangig zum Beispiel mit Maßhaltigkeit und Materialgüte und somit als ebenso wichtigen Bestandteil bei der Betrachtung des Gesamtprozesses. [6] Aus seiner Sicht ist dies bisher zu kurz gekommen. Sind die Ursachen der Verunreinigung bekannt, dann ist die Auswahl von geeigneten Reinigungsanlagen, die sinnvoll eingesetzt werden können, sehr gut möglich.

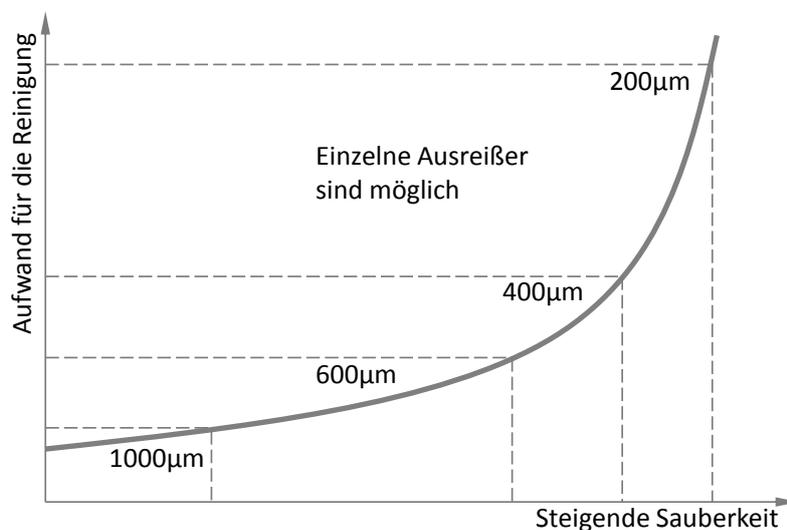


Abbildung 2-1: Darstellung des Aufwands für die Reinigung gegenüber steigender Sauberkeit abhängig von den tolerierten Partikelgrößen [2]

Dies ist jedoch häufig nicht der Fall. Im Rahmen einer 2012 durchgeführten Studie des ZIM Nemo Programms zum Thema „Nassrein“ gaben 60 % der Befragten an, dass Ihnen die Ursache und Art der Verschmutzung unbekannt ist [6, 30]. Daraus ist zu erkennen, dass mit der Erforschung von Ursachen ein großes Verbesserungspotential erschlossen werden kann, v.a. im Bereich von partikulären Sauberkeitsanforderungen  $> 150 \mu\text{m}$ . Mittlerweile wird die Einführung eines „Industrial Cleaning Managements“ angeregt. [6] Dies erfordert eine durchgehende Analyse und Bewertung aller reinheitsbeeinflussenden Faktoren in allen Prozessschritten. In der daraus resultierenden verbesserten Prozesskenntnis wird auch ein Wertschöpfungspotential gesehen. Die Analyse von Einflüssen sollte sowohl die Materialeigenschaften als auch die Prozessfolge und die einzelnen Bearbeitungsschritte einbeziehen, hier z.B. Gratbildung und magnetische Einwirkung berücksichtigen. Auch der Materialfluss als solches und das Handling von Bauteilen in der Prozessfolge, d.h. Transport und Lagerung sind zu bewerten.

Auch Eyrisch et al. zeigen auf, dass spanend bearbeitete Werkstücke stets einen Grad der Verschmutzung aufweisen, der zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit von Bauteilen führen kann. Die Ursachen sind häufig bereits in vorangegangenen Bearbeitungsschritten zu finden. Insbesondere bei Bauteilen aus Stahl kommt ein weiterer Aspekt hinzu, die magnetische Anhaftung von Partikeln am Bauteil. [14] Weigert identifiziert vielfältige Aspekte, die bei der Feinreinigung eine Rolle spielen. Anlagenseitig sind dies Prozessbedingungen wie Filtration, partikelfreie Wasch- und Spülbäder sowie die Umgebungsbedingungen. Bauteilseitig werden die Güte der Werkstückoberfläche und Entgratung sowie magnetische Eigenschaften benannt. Für die Reinigungsaufgabe gilt, je kleiner die zu entfernenden Partikel sind, desto stärker wird der Reinigungsvorgang durch magnetische Einflüsse beeinträchtigt. Negative Effekte bei der Reinigung sind schon bei einer Partikelgröße ab  $100 \mu\text{m}$  und einer magnetischen Feldstärke  $H = 5 \text{ A/cm}$  bzw. magnetischen Flussdichte  $B \approx 0,628 \text{ mT}$  und der relativen Permeabilität von  $\mu_R = 1$  vorhanden. Die Metallpartikel erfahren eine zu hohe Anziehungskraft und das bloße Abspülen hat ein unbefriedigendes Ergebnis zur Folge. Metallspäne größer als  $250 \mu\text{m}$  bewegen sich beim Entmagnetisieren mit dem wechselnden Magnetfeld und behalten dadurch teilweise ihre magnetischen Eigenschaften. [31]

## 2.2 Spanbildung

Die Fertigung von metallischen Bauteilen wird in den überwiegenden Fällen durch Materialabtrag von einem Grundkörper umgesetzt. Diese lokale Verminderung des Materialzusammenhalts wird der Gruppe 3 – Trennen – der DIN 8580 zugeordnet. Die trennenden Fertigungsverfahren werden durch die Norm in weitere Unterkategorien eingeteilt [32]. Eine weitere Unterscheidung wird verfeinert in DIN 8589 zwischen Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide und Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide. Unter Spanen wird ein Trennvorgang verstanden, bei dem „von einem Werkstück mit Hilfe der Schneiden eines Werkzeugs Werkstoffschichten in Form von Spänen zur Änderung der Werkstückform und (oder) Werkstückoberfläche mechanisch abgetrennt werden“ [33 - 34]. Genutzt werden bei der Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide Werkzeuge, deren Schneidenzahl, Schneidkeilgeometrien und die Lage der Schneiden zum Werkstück bestimmt sind. Als typische Verfahren dieser Unterkategorie lassen sich Fräsen, Drehen und Bohren nennen. Bei der Zerspanung mit geometrisch unbestimmter Schneide sind dagegen weder die Schneidenzahlen, noch die Geometrie der Schneidteile oder die Lage der Schneiden zum Werkstück bekannt und näher beschreibbar. Verfahren wie Schleifen, Honen und Läppen stellen Vertreter dieser Untergruppe dar.

Eines der am häufigsten eingesetzten Verfahren ist das Fräsen. Bei diesem Verfahren ruht das Werkstück und das meist mehrschneidige, rotierende Werkzeug wird über das Werkstück geführt, um dort eine ebene Fläche zu erzeugen. Die Lage der Rotationsachse und -richtung relativ zur Vorschubrichtung kennzeichnet die Unterscheidung der Verfahren in Stirnfräsen und Umfangsfräsen. Beim Stirnfräsen steht die Rotationsachse senkrecht zur erzeugten Oberfläche, während beim Umfangsfräsen die Rotationsachse parallel zur erzeugten Oberfläche liegt. Weiterhin unterscheidet man in beiden Verfahren nach Gleichlauf und Gegenlauf. Im Gegenlauf ist die Schnittrichtung entgegen der Vorschubbewegung, im Gleichlauf verläuft die Schnittrichtung mit der Vorschubbewegung. [35, 36] Der Spanbildungsprozess entsteht aus der Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeugschneide. Die dabei auftretenden Prozesskräfte bewirken lokale, elastische und plastische Deformationen des Werkstücks, die zur Entstehung des Spans führen. Die Spanbildung und die Prozesskräfte werden maßgeblich beeinflusst von den geometrischen Verhältnissen an der Kontaktstelle zwischen Werkzeug und Werkstück sowie den Relativgeschwindigkeiten in allen drei Raumrichtungen. [35 - 37]

Die drei Haupteinflussgrößen auf die Oberflächeneigenschaften bei der spanenden Bearbeitung fasst Byrne schematisch in Span, Werkstoff und Werkzeug zusammen. [37 - 39] Angelehnt daran zeigt Abbildung 2-2 die drei Bereiche Span, Werkstück und Werkzeug sowie die zugehörigen Einflussfaktoren, deren Zusammenspiel den Zerspanprozess charakterisiert. Dies bedeutet, dass jede Veränderungen an einer Stelle, z.B. der Relativgeschwindigkeit, der Werkstückbeschaffenheit oder der Werkzeuggeometrie zu Änderungen der resultierenden Oberfläche führen.

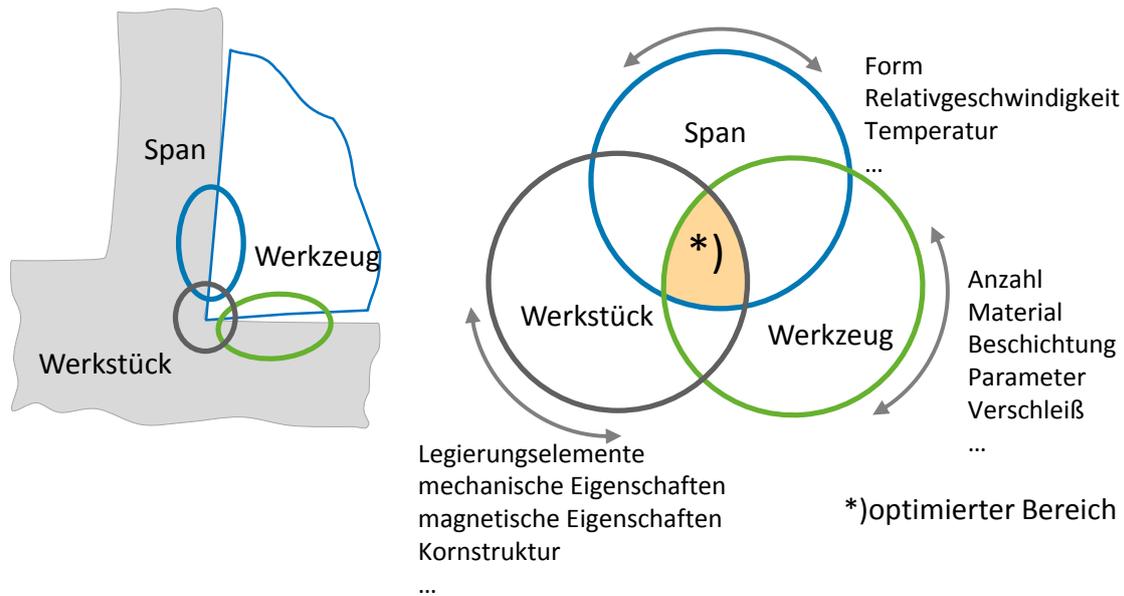


Abbildung 2-2: Zusammenspiel der gegenseitig abhängigen Einflussgrößen auf das Ergebnis des Zerspanprozesses, angelehnt an Byrne [15, 37, 38]

Die Schnittmenge beschreibt den Bereich der optimierten Einflussfaktorenkombinationen, mit denen der angestrebte Oberflächenzustand erzielt werden kann. Im Sinne der Prozesskette charakterisiert sich dieser nicht nur durch die Oberflächengüte, ergänzt wird er durch Oberflächeneigenschaften, u.a. Härte, Eigenspannungen und magnetische Eigenschaften. Die Temperaturveränderung im Spanprozess steht im Zusammenhang mit dem Spanfluss, der Werkstoffdeformation sowie dem Werkzeugverschleiß. Abbildung 2-3 zeigt einen idealisierten Schneidkeil zur Darstellung der Zusammenhänge Spanfläche und Freifläche, d.h. dem größten Bereich der Reibung und Temperatur, mit dem daraus entstehenden Temperaturverlauf im Werkstück [40].

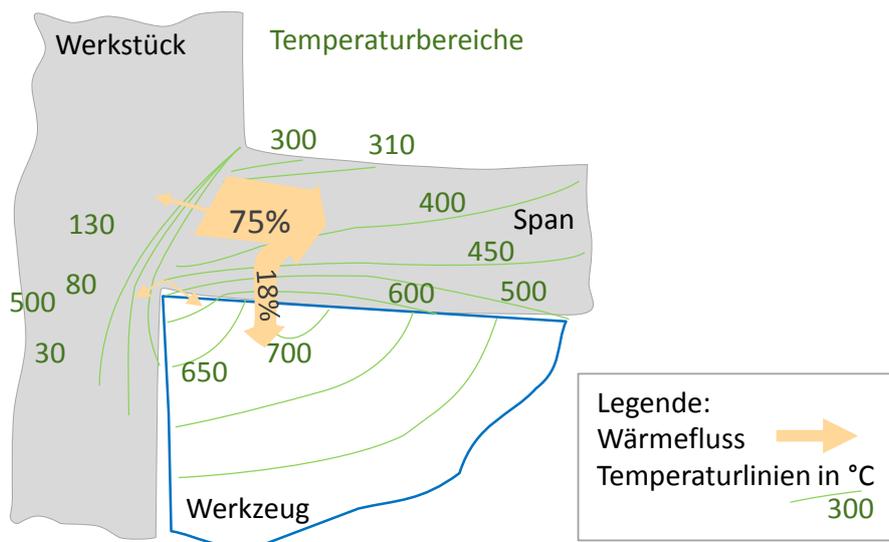


Abbildung 2-3: Beispielhafte Wärme- und Temperaturverteilung in Werkstück, Span und Werkzeug bei der Stahlzerspannung angelehnt an [40]

Die Temperaturen in der Spanbildungszone werden ganz wesentlich bestimmt durch die Schnittgeschwindigkeit und durch den Wärmeabfluss über Wärmeleitung und Konvektion. Der größte Teil der mechanischen Energie wird in der Scherzone umgesetzt und fließt als Wärme in den Span ab, ein kleiner Teil wird in die Spanfläche des Werkzeugs übertragen und nur der restliche Anteil verteilt sich im Werkstück. Höhere Geschwindigkeiten führen zu höheren Spanbildungstemperaturen, da die aus der Relativbewegung resultierenden Kräfte an der Kontaktstelle zwischen Werkstück und Werkzeug steigen und die Materialverformung schneller ablaufen muss. Diese Kräfte werden durch die Werkstückstoffeigenschaften, die Werkzeuggeometrie und die Prozessparameter des eingesetzten Verfahrens bestimmt. Mit höheren Temperaturen ist für die meisten Stähle typischerweise auch eine höhere Verformbarkeit verbunden. Da jedoch im Allgemeinen eine metallurgische Veränderung an der resultierenden Oberfläche unerwünscht und der Wärmeabfluss begrenzt ist, kann die Schnittgeschwindigkeit nicht beliebig hoch gewählt werden.

Der Zusammenhang des Schneideneingriffs der in dieser Arbeit verwendeten Schneide in das Werkstück wird im ANHANG B gezeigt. Es ist die Schneide vom Typ *CU2552* zu erkennen, mit ihren spezifischen Eingriffswinkel von  $20^\circ$  und der Drehung von  $-13^\circ$  zur Werkstückoberfläche, im Werkzeugschaft sitzt die Platte in einem Winkel von  $45^\circ$ .

Abbildung 2-4 zeigt am Beispiel des in den folgenden Versuchen genutzten Verfahrens, dem symmetrischen Stirnplanfräsen im Gleichlauf, den Zusammenhang der Parameter. Das zu bearbeitende Werkstück, das Werkzeug sowie die Eingriffsverhältnisse werden schematisch abgebildet. Der Durchmesser  $d$  des Werkzeugs sowie die Eingriffsbreite  $a_e$  sind dargestellt. Sowohl die Drehzahl  $n$  als auch Vorschub-  $v_f$  und Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  sind zu sehen. Die Oberfläche wird hierbei durch die Nebenschneide produziert.

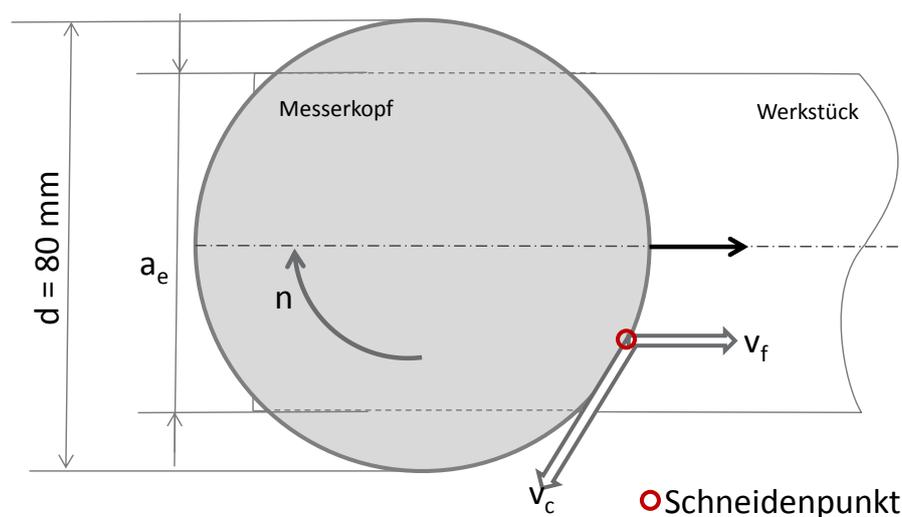


Abbildung 2-4: Zusammenhang der in dieser Arbeit auftretenden Schnittparameter im Verhältnis Werkstück zu Werkzeug

Die resultierende Kraft an einer Schneide ergibt sich aus der Aktiv- und der Passivkraft nach DIN 6584 [41]

$$\vec{F} = \vec{F}_a + \vec{F}_p \quad (1)$$

Wobei die Aktivkraft sich aus der Schnittkraft und aus der Vorschubkraft ergibt

$$F_a = F_c + F_{cN} \text{ oder } F_f \quad (2)$$

Allgemein gilt für die Kraftkomponenten

$$|\vec{F}_i| = k_i b |\vec{h}| \quad \text{mit } i = c, c_n \text{ oder } p \quad (3)$$

Eine Abschätzung ist über Kennwerte aus dem Drehprozess für die spezifischen Kraftkomponenten Werte  $k_i$  zulässig. [36] Beim Stirnplanfräsen ist die spezifische Schnittkraft etwas geringer als beim Umfangsplanfräsen, da durch den gleichzeitigen Eingriff mehrerer Schneiden ein ruhigerer Lauf des Fräskopfs entsteht und die Schneidenbelastung sehr gleichmäßig erfolgt [42]. Entscheidende Parameter im Prozess sind sowohl die Fräsbreite  $a_e$ , die axiale Schnitttiefe  $a_p$ , Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  sowie die Zähnezahl  $z$ . Des Weiteren spielen die Drehzahl  $n$ , der Vorschub je Zahn  $f_z$  und die Vorschubgeschwindigkeit  $v_f$  eine Rolle. Abbildung 2-5 beschreibt die Abhängigkeiten der Zerspankraftkomponenten zu Vorschub, Schnittgeschwindigkeit und Einstellwinkel sowie der Schnitttiefe. Unter anderem ist deutlich zu erkennen, dass mit steigenden Parametern die Kräfte sich stark ändern.

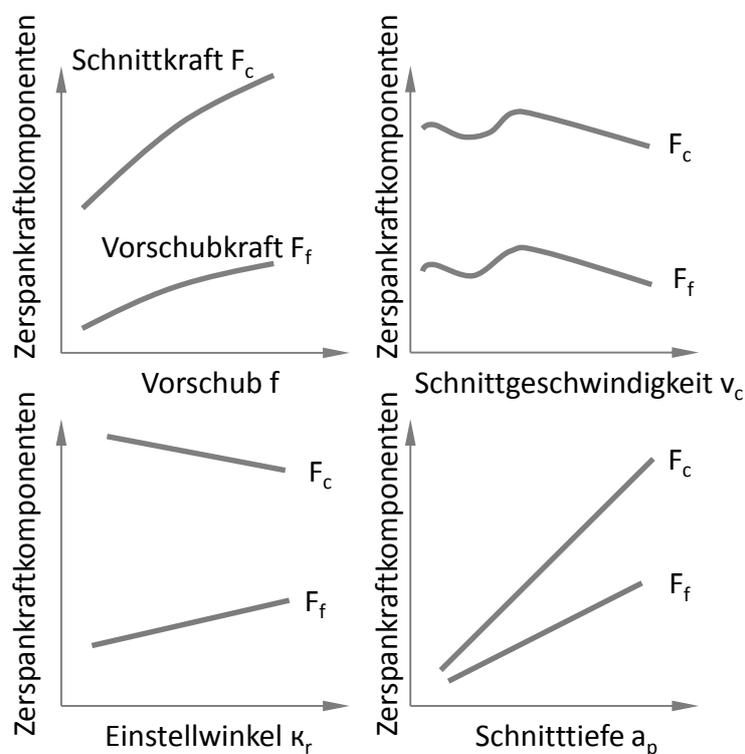


Abbildung 2-5: Abhängigkeiten der Zerspankraftkomponenten zu Vorschub, Schnittgeschwindigkeit, Einstellwinkel und Schnitttiefe [40]

### 2.3 Ferromagnetische Werkstoffe

Ferromagnetische Werkstoffe zeichnen sich durch ihre Fähigkeit der spontanen Magnetisierung aus. Sie besitzen ohne ein äußeres Magnetfeld im makroskopischen Kristallbereich eine homogene Magnetisierung. Durch die sehr starke Wechselwirkung zwischen den Elementarmomenten hat das magnetische Moment jeden Atoms die Tendenz, sich parallel zu den Momenten seiner Nachbarn zu stellen. [43, 44]

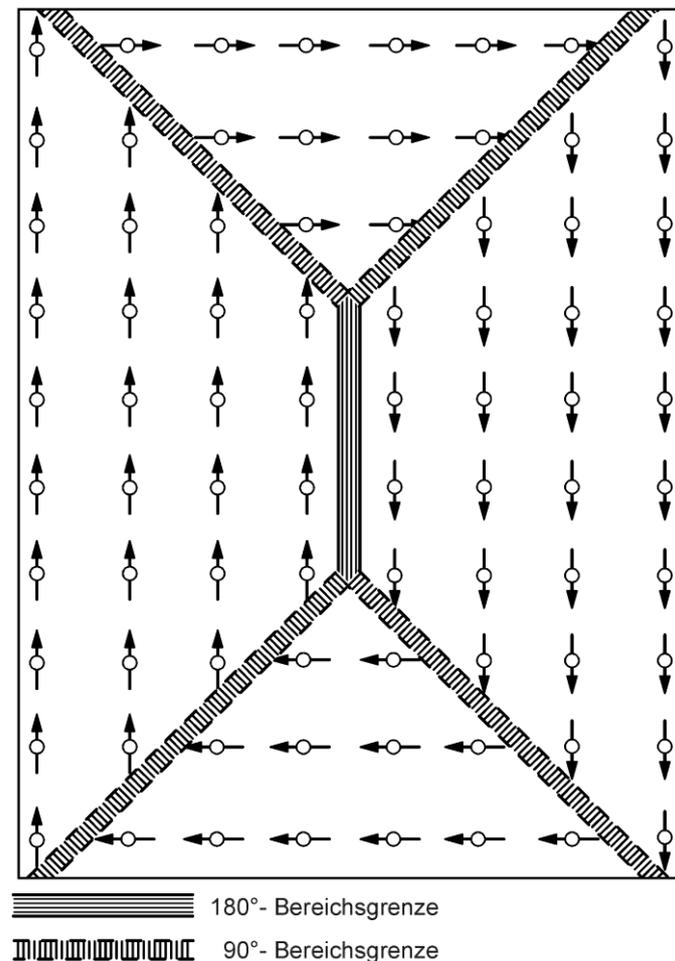


Abbildung 2-6: Parallelstellung der Elementarmomente der Atome [45]

Bei Gegenwart eines äußeren Feldes  $H$  wirkt auf das magnetische Moment eines Atoms die effektive Feldstärke  $H_{eff}$ . Die Verantwortung für die spontanen Magnetisierungen trägt die Austauschwechselwirkung der Atome und die damit zusammenhängende Energie [46]. Sie ist bestrebt, die atomaren Spins und somit auch die magnetischen Momente in ferromagnetischen Materialien parallel zueinander auszurichten. Durch die parallel ausgerichteten Spins entsteht so ein Zustand minimaler Energie. Dies lässt sich durch Betrachtung der Gesamtenergie eines ferromagnetischen Materials erläutern. Die Gesamtenergie setzt sich aus mehreren Teilenergien zusammen. Eine der darin enthaltenen Teilenergien stellt die Austauschenergie dar. Diese wiederum ist abhängig von dem Verhältnis des Atomabstandes zu dem Radius der un abgeschlossenen Elektronenschale.

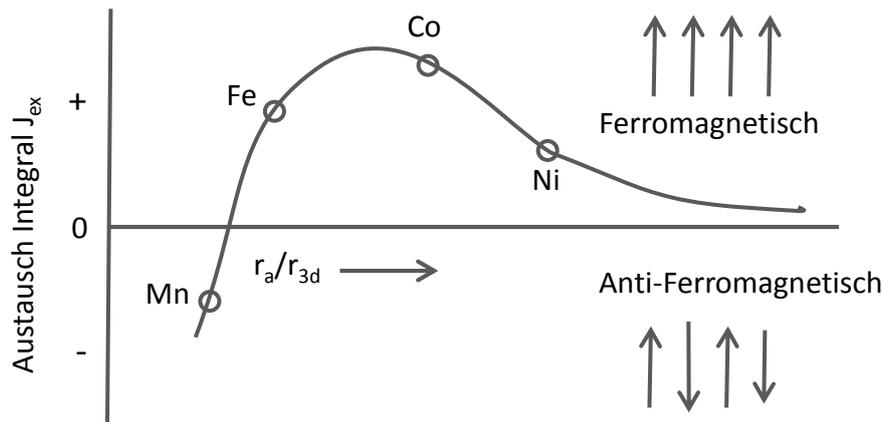


Abbildung 2-7: Bethe-Slater-Kurve zeigt die Abhängigkeit der Austauschenergie vom Verhältnis des inter-atomaren Abstandes zum Radius der ungeschlossenen Elektronenschale nach [47]

Die Abhängigkeit wird in der Bethe-Slater-Kurve gezeigt [47]. Im Bereich des Maximums der Bethe-Slater-Kurve ist die Austauschenergie groß genug, um die Ausrichtung der Spins in der Art zu beeinflussen, dass sie sich parallel ausrichten. Bei größer werdenden Atomabständen ist der Einfluss der Austauschenergie zu gering für eine Beeinflussung der Spins. Im Gegensatz dazu tauschen sich die Atome der äußeren, ungeschlossenen Schale bei geringerem Atomabstand ständig untereinander aus. Laut dem Pauli-Prinzip sind sie dadurch gezwungen, unterschiedliche Spins anzunehmen. Ein derartiges Verhalten wird als antiferromagnetisch bezeichnet. Der Vollständigkeit halber sei hier erwähnt, dass sich die Gesamtenergie eines Ferromagneten zusätzlich noch aus der Anisotropieenergie, einigen makroskopischen Energieanteilen und thermischen Energien zusammensetzt. Die Anisotropieenergie berücksichtigt die Kristallgitterstruktur, die die Magnetisierung in eine bestimmte Richtung begünstigen kann. Diese günstigen Magnetisierungsrichtungen werden als leichte Magnetisierungsrichtungen bezeichnet. Die makroskopischen Energieanteile repräsentieren Energieanteile, die durch vorhandene Streufelder und externe Magnetfelder oder durch elastische Wechselwirkungen wie Spannungen und Magnetostriktion entstehen können. Zu den thermischen Energien sei hier nur so viel gesagt, dass grundsätzlich alle magnetischen Prozesse nur unterhalb der Curie-Temperatur vorhanden sind. Durch Phasenübergänge verlieren Werkstoffe über dieser Temperatur ihre magnetischen Eigenschaften. Für eine nähere Betrachtung der thermischen Energien wäre eine umfangreiche thermodynamische Analyse notwendig, auf die an dieser Stelle verzichtet wird.

Ferromagnetische Werkstoffe weisen eine charakteristische Domänenstruktur auf, [47, 48]. Die magnetischen Domänen, auch Weiß'sche Bezirke genannt, bilden sich durch die Wechselwirkungen zwischen den Atomen in den Kristallbereichen mit gleichgerichteter Magnetisierung aus und haben eine Ausdehnung von 1 bis 100  $\mu\text{m}$  [47]. Sie werden voneinander durch sogenannte Blochwände getrennt. Die zugehörigen Bloch-Wände haben eine Ausdehnung von ca. 50 bis 100 nm. Für Eisenwerkstoffe unterscheidet man als Modelvorstellung zwei Arten von Bloch-Wänden. Die 90°-Bloch-Wände, bei denen die Magnetisierungsvektoren zweier benachbarter

Domänen senkrecht zueinander ausgerichtet sind, und die  $180^\circ$ -Bloch-Wände, deren zugehörige Nachbardomänen antiparallel ausgerichtet sind, siehe Abbildung 2-8. Die  $180^\circ$ -Bloch-Wände sind im Gegensatz zu den  $90^\circ$ -Bloch-Wänden leichter beweglich, da sie Eigenspannungsfelder mit kurzer Reichweite besitzen. Im unmagnetisierten Zustand sind die Bereiche gleichgerichteter Magnetisierung so verteilt, dass sie sich makroskopisch zu Null kompensieren. Beim Anlegen eines äußeren Magnetfeldes  $H$  wachsen die Bereiche mit annähernd paralleler Orientierung des Magnetfeldes auf Kosten der anderen Bereiche durch Verschiebung der Blochwände, auf Kosten der anders orientierten Bereiche. Bei weiter steigender Magnetisierung finden solange Drehprozesse statt, bis die Magnetisierungsvektoren der Domänen parallel zum von außen angelegten Magnetfeld sind. Dieser Zustand wird als magnetische Sättigung bezeichnet.

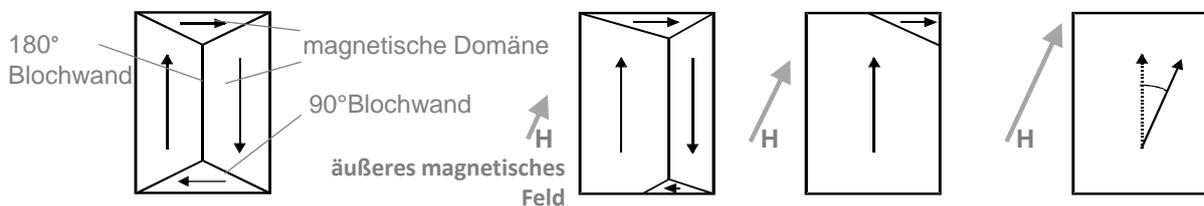


Abbildung 2-8: Domänenstruktur eines ferromagnetischen Materials ohne und mit Einfluss eines steigenden, externen, magnetischen Feldes nach [47, 49]

Die Magnetisierung ausgehend vom unmagnetisierten Zustand folgt dabei der sogenannten Neukurve. Ihr Verlauf ist nicht linear. Zunächst ein beschleunigter Anstieg der sich abflacht und in eine Sättigung übergeht. Im unmagnetischen Zustand sind die Weiß'schen Bezirke so angeordnet, dass sich die Magnetisierungsvektoren ausgleichen. Durch ein angelegtes Feld  $H$  kommt es im Werkstoff zur Zunahme einer makroskopischen Flussdichte und zu Wandverschiebungen. Allgemein entspricht die Flussdichte  $B$  der Anzahl magnetischer Feldlinien je Flächeneinheit quer zur Feldrichtung. [45] Bei zeitlich periodischer Ummagnetisierung reagiert ein ferromagnetisches Material mit einem Hystereseverlauf von der magnetischen Flussdichte über der Feldstärke. Diese sogenannte Hystereseurve ist eine materialspezifische Eigenschaft, ihre Entstehung wird im Folgenden näher erläutert. Abbildung 2-9 zeigt eine Hysterese- und Neukurve. [43, 47]

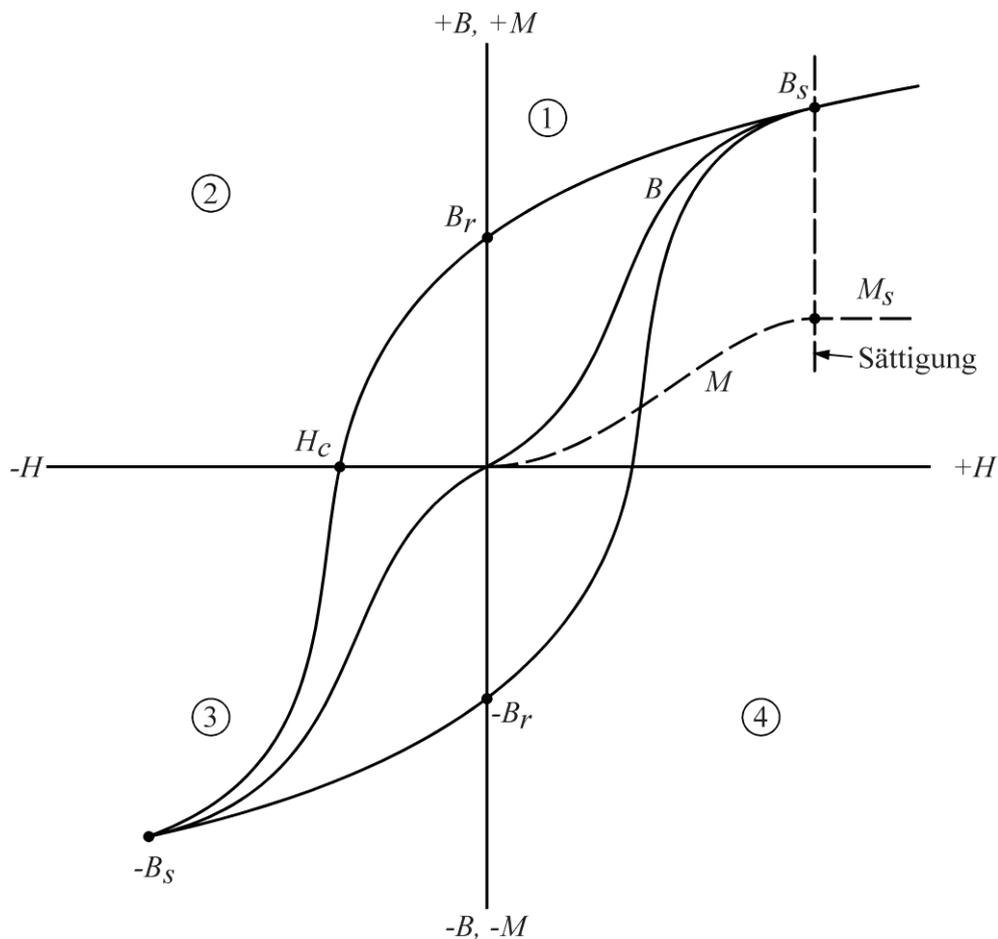


Abbildung 2-9: Beispiel für Hysterese- und Neukurve (Anstieg von 0 auf  $B_s$ ) sowie Koerzitivfeldstärke  $H_c$  nach Cullity [47]

Die Hysteresekurven eines ferromagnetischen Materials werden bei einer gleichbleibenden, periodischen Wechselfeldmagnetisierung nach der erstmaligen Aufmagnetisierung, die entlang der den Koordinatenursprung schneidenden Neukurve verläuft, jede Periode einmal durchlaufen. Der Verlauf der Hysterese beziehungsweise der Ummagnetisierung des ferromagnetischen Materials lässt sich in mehrere Bereiche aufteilen. Zu Beginn der Magnetisierung, also bei einem noch geringen, externen Magnetfeldanteil, breiten sich zunächst die Domänen aus, deren Magnetisierungsvektor Komponenten der Ausrichtung des externen Magnetfeldes aufweist. Das Wachsen dieser Domänen erfolgt durch Bloch-Wand-Bewegungen. Als erstes bewegen sich die  $180^\circ$ -Bloch-Wände, da diese leichter beweglich sind. Die Bewegung dieser  $180^\circ$ -Bloch-Wände erfolgt reversibel. Im weiteren Verlauf der Ummagnetisierung steigt das externe Magnetfeld weiter an, was zu einer zusätzlichen Bewegung der  $90^\circ$ -Bloch-Wände führt. Die Bewegung der beiden Bloch-Wand-Typen erfolgt in diesem Bereich der Hysterese irreversibel. Im darauffolgenden, so genannten Kniebereich der Hysterese, werden hauptsächlich nur noch  $90^\circ$ -Bloch-Wände durch die Einwirkung des externen Magnetfeldes irreversibel verschoben. Nach dem Kniebereich der Hysterese folgt der letzte Teilbereich, in dem aufgrund des externen Magnetfeldes nur noch Drehprozesse auf das ferromagnetische Material einwirken. In diesem Bereich verursacht das noch steigende externe Magnetfeld eine Ausrichtung der magnetischen Momente in Richtung der externen

Magnetisierung. Im Bereich der Sättigung sind die Drehprozesse abgeschlossen und die Magnetisierungsvektoren des Ferromagneten entsprechend parallel zur Magnetisierungsrichtung des externen Magnetfeldes ausgerichtet. In diesem Zustand verhält sich das ferromagnetische Material modellhaft wie eine Domäne mit der Ausrichtung ihres Magnetisierungsvektors entsprechend dem des externen Magnetfeldes. Durch Umkehrung der Magnetisierungsrichtung des externen Feldes nach der Sättigung wird ebenfalls eine Umkehrung des soeben beschriebenen Ablaufs der Bloch-Wand-Bewegungen und der Drehprozesse verursacht.

Durchläuft die Umkehrung den Nullpunkt bezüglich der Feldstärke, so bleibt in der ferromagnetischen Probe eine Remanenz-Flussdichte  $B_R$  zurück. Dieser Restmagnetisierungsanteil wird erst durch den Einfluss eines entgegen gesetzten magnetischen Feldes einer bestimmten Größe  $H_C$  aufgehoben. Diese magnetische Feldstärke wird Koerzitivfeldstärke  $H_C$  genannt. Im Allgemeinen ist die Koerzitivfeldstärke von weichmagnetischen Werkstoffen durch die räumliche Amplitudenschwankung der magnetischen Anisotropieenergie geregelt. Die Domänenwandverschiebung gilt als ein wichtiger Mechanismus der technischen Magnetisierung. Die Amplitudenschwankung entspricht ungefähr der sechsfachen Korngröße. Die Bewegungen der Blochwände laufen bei dem kompletten Magnetisierungsvorgang nicht stetig, sondern sprunghaft ab. Dies ist auf die Wechselwirkung der Bloch-Wände mit der vorhandenen Mikrostruktur des Ferromagneten zurückzuführen. Die Bloch-Wand-Bewegungen werden durch vorhandene Gitterdefekte gestoppt beziehungsweise aufgehalten (pinning), bis der Einfluss des externen Magnetfeldes zu groß ist. Bis zu diesem Zeitpunkt stellen die Gitterdefekte wie Korngrenzen, Versetzungen und Ausscheidungen ein energetisches Minimum für die Bloch-Wände dar. Der Einfluss des externen Magnetfeldes ist dann zu groß, wenn das energetische Minimum von dem externen Feld überwunden wurde [43, 47, 49]. Dadurch entsteht ein sprunghaftes Losreißen der Bloch-Wände. Dieses Losreißen der Bloch-Wände wird als Barkhausen-Sprung bezeichnet. [20, 49–52]

Innerhalb der ferromagnetischen Werkstoffe kann man eine weitere Unterteilung vornehmen. Als weichmagnetische Werkstoffe werden Werkstoffe bezeichnet mit leichter Magnetisier- bzw. Unmagnetisierbarkeit, d.h. einer geringen Koerzitivfeldstärke. Dagegen spricht man von hartmagnetischen Werkstoffen bei einer hohen Koerzitivfeldstärke. Abbildung 2-10 zeigt den Unterschied im Verlauf der Hysteresekurven auf sowie in Abbildung 2-11 eine Übersicht der typischen Werkstoffe zur Unterscheidung der hart- und weichmagnetischen Einteilung.

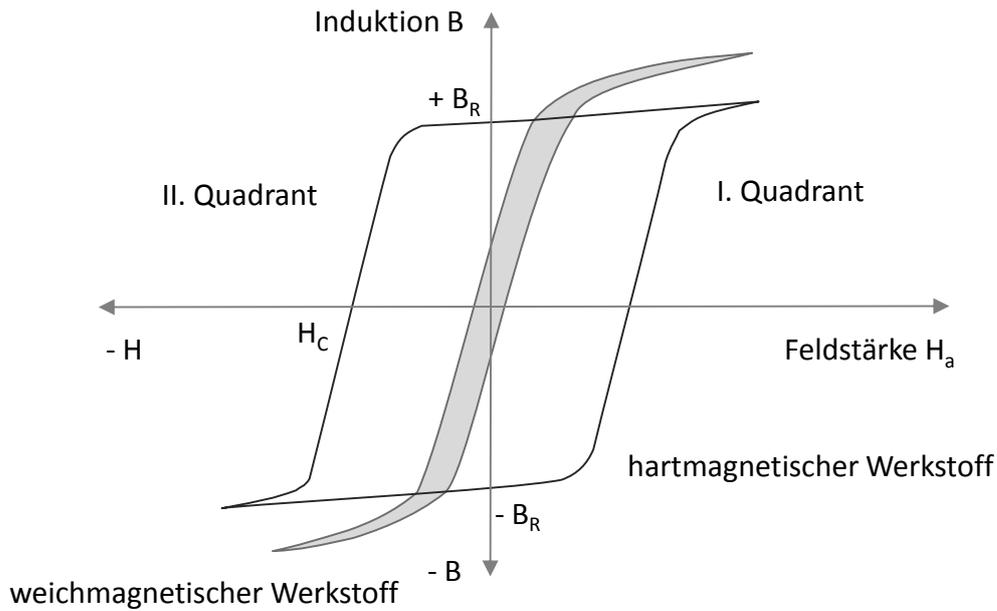


Abbildung 2-10: Allgemeine Beschreibung der Hysterese in Bezug auf unterschiedliche Werkstoffgruppen nach Ashcroft [53]

Es wird deutlich, dass der Zustand von ferromagnetischen Werkstoffen bei der Beschreibung seiner magnetischen Eigenschaften stark von seiner Vorgeschichte abhängt, die als Materialgedächtnis hinterlegt ist.

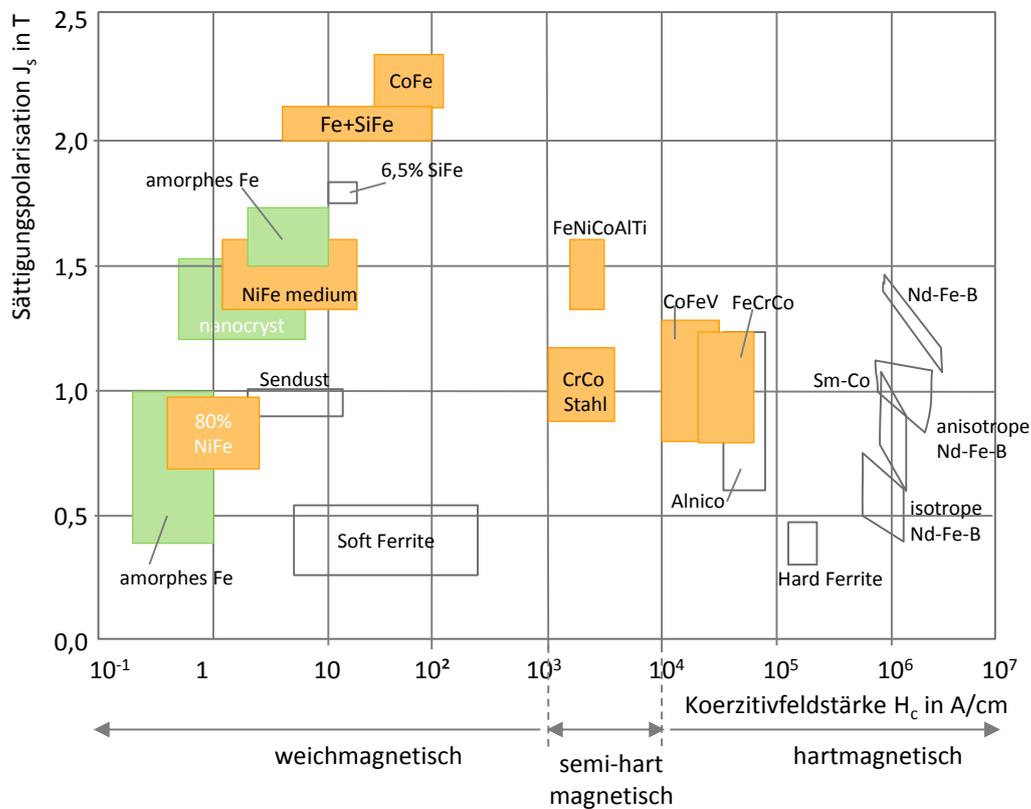


Abbildung 2-11: Einteilung der magnetischen Materialien in Abhängigkeit von der Koerzitivfeldstärke und Sättigungspolarisation nach [54]

## 2.4 Änderung magnetischer Eigenschaften unter dem Aspekt der spanenden Bearbeitung

Die Änderung der magnetischen Oberflächeneigenschaften ist als Nebeneffekt bei der spanenden Bearbeitung lange bekannt, vor allem unter den Maschinenbedienern. Wissenschaftlich wird er seit den 70er Jahren beschrieben und die Auswirkungen auf den Prozess bewertet. Mit der Änderung von Härte- und Eigenspannungskennwerten, die durch die thermischen Einflüsse bei der spanenden Bearbeitung hervorgerufen werden, beschäftigt sich Schreiber [55]. Den Einfluss der spanenden Bearbeitung greift eine Gruppe von Wissenschaftlern aus Berlin auf. Spur et al beschreiben die Beeinflussung der Bearbeitung und die damit verbundene Veränderung der magnetischen Eigenschaften des Bauteils. [56] Özhan befasst sich mit dem Verfahren Fräsen und dessen Auswirkungen, vor allem dem Verlust der magnetischen Eigenschaften des Werkstoffs durch die Bearbeitung [57, 58] sowie in einer weiteren Veröffentlichung auch mit der Zerspanung mit unbestimmter Schneide [59]. Özhan beschreibt, dass die Veränderung, das heißt die Magnetisierung erst bei sehr viel größeren Feldstärken einsetzt und auch ohne äußeres Feld erhalten bleibt. Die Beeinträchtigung begründet er mit der Magnetostriktion. [58] Die Grundlagenuntersuchungen zur Klärung der physikalischen Effekte zur Beweglichkeit der magnetischen Bezirke haben in den frühen 1900er Weiss, Bitter und später Zehler gelegt. [60, 61, 62]

Byrne untersucht in vergleichenden Studien die Auswirkung der Verfahren mit bestimmter Schneide bei verschiedenen Prozessparametern mit Bezug auf die Änderung der magnetischen Eigenschaften. Der Fokus liegt auf dem Verlust der magnetischen Eigenschaften, die den späteren Einsatz der Werkstücke einschränkt. Er verändert jeweils einen Parameter, so dass die Betrachtung der Wechselwirkung nicht beobachtet wird. Jedoch wird der Einfluss der Einhaltung der Form und Maßtoleranz in Abhängigkeit von der Prozessführung betrachtet. Es ergeben sich gegenläufige Ergebnisse bei der Einspannung der Werkstücke von außen oder innen, siehe Abbildung 2-12. [15]

Beim Drehen mit steigender Schnittgeschwindigkeit nimmt die magnetische Flussdichte  $B_{max}$  zu, hingegen sinkt sie beim Bohren mit steigender Schnittgeschwindigkeit. Dies zeigt, dass die Auswirkungen sehr stark verfahrensspezifisch variieren und nicht verallgemeinert werden können. Grundsätzlich lässt sich aber das Fazit ziehen, dass bei der spanenden Bearbeitung darauf zu achten ist, dass die magnetischen und chemischen Belastungen nicht zu unzulässigen Änderungen der magnetischen Bauteileigenschaften führen. Dieser Umstand erfordert Kenntnisse über die Auswirkungen des Fertigungsverfahrens und der Einstellparameter auf das Bauteilverhalten [15]. Die Versuche wurden an weichmagnetischen Werkstoffen mit hohem Nickelanteil durchgeführt [15, 58]

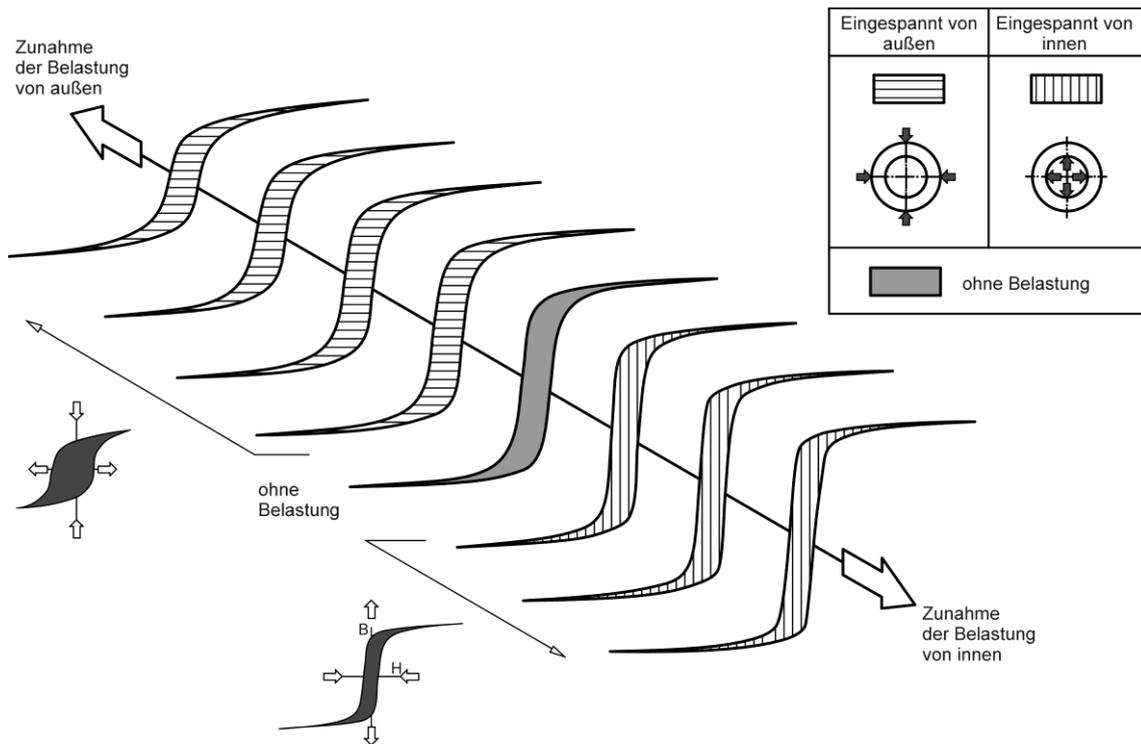


Abbildung 2-12: Veränderung der magnetischen Auswirkung bei Einspannung der Werkstücke von innen oder außen nach [15]

Byrne beschreibt, dass bei allen formgebenden Fertigungsverfahren in Abhängigkeit von der dabei entstehenden Gefügeänderung eine Änderung der weichmagnetischen Bauteileigenschaften erfolgt. Die verursachten Gefügeänderungen lassen sich nur durch Glühprozesse beseitigen, von Byrne als magnetisch gegläht bezeichnet. Dies hat Einbußen bei der geometrischen Genauigkeit zur Folge. [15] Abbildung 2-13 beschreibt die Abhängigkeit.

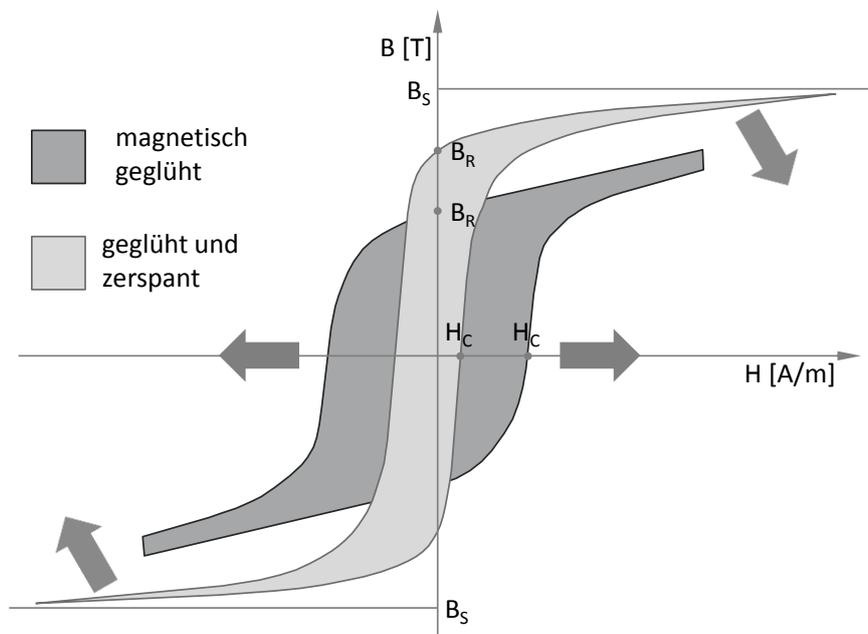


Abbildung 2-13: Änderung der Hysterese des gleichen Werkstoffs direkt nach dem magnetischen Glühen und nach Glüh- und Zerspanprozess, nach [15]

Ferromagnetische Teile können entweder durch Magnetfelder in Fertigungseinrichtungen, aus Antriebsmotoren oder Spannvorrichtungen resultierend, oder auch durch von spanender Bearbeitung hervorgerufene Gefügeveränderungen wie Verformungen oder Härteprozesse magnetisch werden. [11] Damit beschreibt Grimm, dass auch der Einfluss der Umgebung bei der spanenden Bearbeitung eine große Rolle spielt. Eine ständige Weiterentwicklung unter anderem auch im Bereich von Spannsystemen ist daher notwendig, um aufgrund gesteigerten Sicherheitsdenkens im Sinne der Prozesssicherheit und steigender Genauigkeitsansprüche an das Endprodukt den Prozess zu stärken. Für viele anspruchsvolle Bauelemente aus Stahl ist die magnetische Neutralität eine unbedingte Voraussetzung, daher ist eine nachträgliche Behandlung dieser Teile mit Wechselstrom-Entmagnetisiergeräten seiner Ansicht nach unumgänglich. Grimm beschreibt, dass die Magnetspanntechnik viele Lösungsmöglichkeiten bietet, u.a. durch die Weiterentwicklung magnetischer Einspannsysteme, die durch eine eingebaute elektronische Umpol-Steuereinheit die Möglichkeit besitzen, durch Umpolung des magnetischen Spannungsfeldes den Restmagnetismus im Spannmagneten sowie auch im aufgespannten Werkstück abzubauen [11]. Wiederum ist der Einfluss, den ein solches System auf das Material und damit das Materialgedächtnis hat, nicht zu vernachlässigen. Daher sind physikalische Vorgänge des Magnetisierens und Entmagnetisierens besonders zu beachten, wenn qualitätsgerecht gefertigt werden soll.

Eyrich et al. beschreiben, dass spanend bearbeitete Werkstücke stets einen Grad der Verschmutzung aufweisen, der zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit von Bauteilen führen kann. Unter Einhaltung eines gesetzten Prozessablaufs mit der von ihnen angewendeten Methodik zeigen sie die Änderungen nach der Bearbeitung auf. Zunächst werden die Werkstücke thermisch entmagnetisiert, anschließend mit einem Hall-Sensor vermessen, gefolgt von der spanenden Bearbeitung und einer erneuten Hall-Sensor-Untersuchung. [14]

Vor der Bearbeitung wird bei den Werkstücken eine magnetische Flussdichte von ca.  $0,15 \text{ mT}$  durchschnittlich auf der Oberfläche gemessen und nach der Bearbeitung von  $0,22 \text{ mT}$  im Maximum. Aus Sicht von Eyrich können damit die Versuchsbauteile als unmagnetisch angesehen werden. Dies widerspricht der genannten Definition der Einteilung der Abhängigkeit der Anhaftung, Tabelle 1-1 [12], die eine Entmagnetisierung erst ab  $0,1 \text{ mT}$  sieht. Eyrich bezieht sich auf Weigert, der erst ab einer magnetischen Flussstärke von  $2,5 \text{ mT}$  bis zu  $440 \text{ mT}$  bezogen auf Partikelgrößen von max.  $100 \mu\text{m}$  einen negativen Effekt bei der Reinigung eines Bauteils sieht [31]. Daher führt Eyrich weitere Versuchsreihen mit veränderten Prozessparametern durch, um große Umformgrade zu erzielen und somit eine möglichst große plastische Verformung zu erreichen. Hier wird der Bezug zur Spanzipfeltheorie von Brammertz und Opitz hergestellt.[63] Die Wahl der Parametersätze zielt darauf ab, geringe Spannbildung und starkes Quetschen des Materials zu erzeugen. Dazu werden die Versuche bei geringen Vorschüben von  $0,002 \text{ mm}$  und hohen Schnittgeschwindigkeiten von  $315 \text{ m/min}$  verwendet. Die Versuche zeigen, dass ein Großteil des Materials lediglich gequetscht und nicht abgetrennt wird. Die Änderung der magneti-

schen Flussdichte beträgt im Mittel  $0,75 \text{ Gau\ss}$ , dies entspricht einer Erhöhung von  $0,15 \text{ mT}$  auf  $0,225 \text{ mT}$ , die maximale Änderung betrug an der Bauteilkante  $2,5 \text{ Gau\ss}$ , d.h. von  $0,15 \text{ mT}$  auf  $0,4 \text{ mT}$ . Dabei kommen sie zu dem Schluss, dass eine Beeinflussung der magnetischen Eigenschaften durch die spanende Bearbeitung zwar vorhanden, aber für das Anhaften von Verunreinigungen zu gering ist. Daraus leiten sie ab, dass das Anhaften von Spänen durch die Änderung der magnetischen Oberflächeneigenschaften eher seine Ursachen im Umfeld der spanenden Bearbeitung zu suchen sind als im Zerspanprozess selbst. [14, 64]

Dagegen weisen erste eigene Untersuchungen mit typischen Parametern für eine gute Spanbildung am Lehrstuhl darauf hin, dass die Variierung der Parameter Einfluss auf die Höhe der magnetischen Flussdichte hat und ein wiederkehrendes Muster und eine Materialabhängigkeit zu erkennen ist. [65, 66, 67] Als Einflussfaktoren werden auch hier externe magnetische Felder genannt, wie das elektromagnetische Feld aus der Maschinenumgebung, das Erdmagnetfeld oder eine magnetische Werkstückeinspannung. Auch die duktile, plastische Verformung des Werkstückes in der Randzone stellt einen Einflussfaktor zur Änderung der magnetischen Eigenschaften dar. Weiterhin spielen auch die thermische Beeinflussung des Werkstoffes während des Zerspanprozesses sowie der Villari-Effekt eine Rolle bei der Änderung der magnetischen Eigenschaften. Abbildung 2-14 zeigt für die magnetische Flussdichte in Y-Richtung ein Schachbrettmuster in +/- Bereiche über die gesamte gescannte Oberfläche. In Richtung der x-Komponente der magnetischen Flussdichte ist an den Stirnseiten des Werkstücks kaum ein magnetisches Feld messbar.

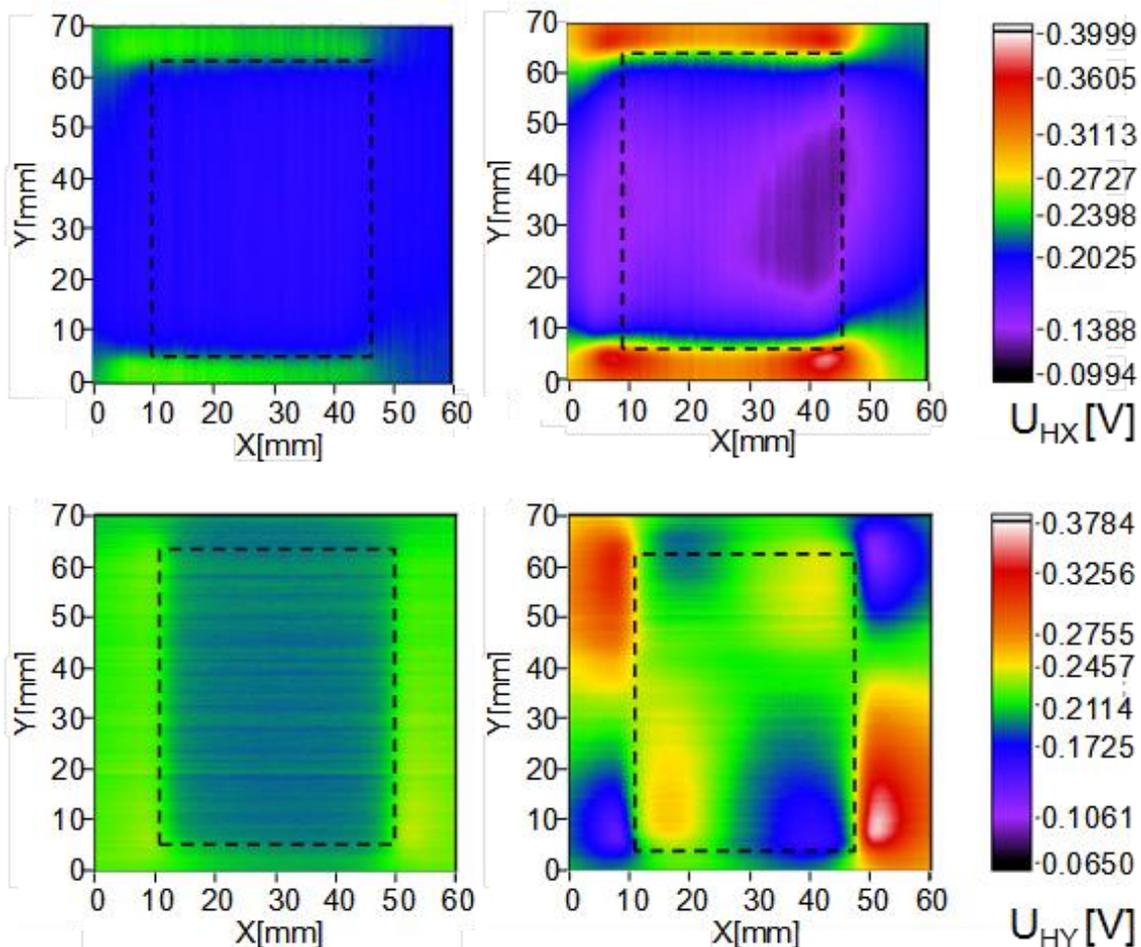


Abbildung 2-14: Ergebnis einer Hallsensor Messung für den Werkstoff 16 MnCr 5 in x- Richtung (oben) und y- Richtung (unten) vor der Bearbeitung (linke Seite) und nach der Bearbeitung (rechte Seite) bei folgenden Parametern: Schnitttiefe 1 mm, Schnittgeschwindigkeit 276 m/min, Messung erfolgte 1h nach der Zerspanung [65, 67]

Im Bereich der Elektroblechherstellung werden Änderungen des magnetischen Verhaltens aufgrund der mechanischen Deformation beschrieben, die zu einem Verlust der magnetischen Eigenschaften führen und damit die spätere Einsetzbarkeit des Produkts beeinflussen. Unter anderem beschreibt Johnston, dass der deformierte Bereich des Materials gegenüber dem Grundmaterial eine veränderte, in seinem Sinne fehlerhafte Magnetisierung aufweist [68]. Den Bezug zwischen Einflüssen aus der Bearbeitung und den daraus resultierenden Veränderungen der magnetischen Eigenschaften stellen auch Siebert, Harstick und andere auf der Konferenz für Magnetismus und Metallurgie dar. [69–72]

### 3 Werkstoffcharakterisierung

#### 3.1 Werkstoffauswahl

Die Auswahl der Werkstoffvarianten ist nach Voruntersuchungen verschiedener Stähle [65] auf ferromagnetische Werkstoffe mit unterschiedlichen Chromgehalten erfolgt. Untersucht werden ein Vergütungs- und ein Wälzlagerstahl. Zum Vergleich des Chargeneinflusses werden zwei Chargen des Werkstoffs 1.7225 sowie zwei Chargen des Werkstoffs 1.3505 herangezogen. Die Beschreibung der Werkstoffe erfolgt mit Hilfe unterschiedlicher Methoden, u.a. werden metallographische Untersuchungen sowohl parallel als auch senkrecht zur Walzrichtung des Werkstoffs vorgenommen, siehe Abbildung 3-1. Weiterhin erfolgt eine chemische Analyse der Materialien sowie für den Chargenvergleich des Werkstoffs 1.7225 eine Analyse der Phasenanteile. Weitere Möglichkeiten der methodischen Beschreibung werden genutzt, u.a. Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Elektronenrückstreubeugung, engl. Electron Backscatter Diffraction (EBSD). Zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften wird die jeweilige Hysterese des Materials ermittelt und die material-spezifische Permeabilität aufgenommen sowie Untersuchungen der Rasterkraftmikroskopie durchgeführt.

Abbildung 3-1 zeigt die Probenentnahme aus dem Material zur Werkstoffbeschreibung. Es ist zu erkennen, dass sowohl parallel als auch senkrecht zur Walzrichtung Untersuchungen vorgenommen werden.

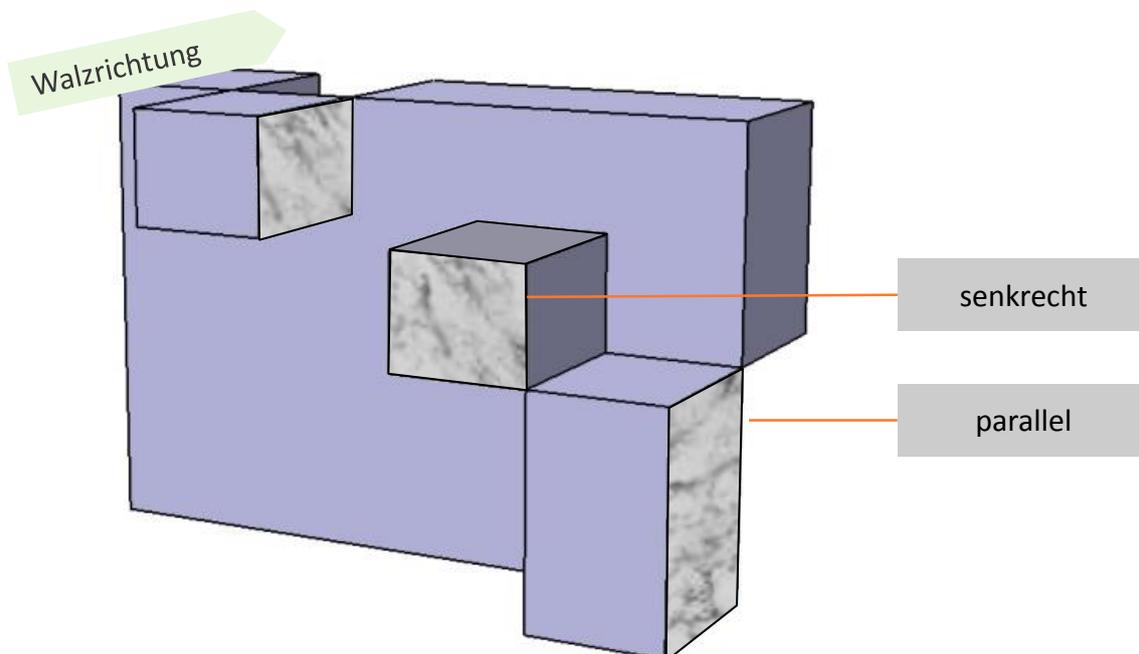


Abbildung 3-1: Lage der zu untersuchenden Proben zur Analyse im Laser Scanning Mikroskop (LSM), Raster Elektronen Mikroskop (REM) und Electron Backscatter Diffraction (EBSD) sowohl parallel als auch senkrecht zur Walzrichtung

## 3.2 Analysemethoden

### 3.2.1 Metallographie

Die metallographische Untersuchung von Werkstoffen bietet eine gute Basis, um in einer flächigen Ansicht erste charakteristische Merkmale zu erfassen. Im vorliegenden Fall wurden die Schliffe im lehrstuhleigenen Labor durchgeführt. Die einzelnen Schritte sind im ANHANG B zu finden.

### 3.2.2 Elektronenrückstreubeugung

Die Elektronenrückstreubeugung oder auch Electron Backscatter Diffraction (EBSD) steht für ein Verfahren zur Untersuchung von Kristallstrukturen und Kornorientierungen im Rasterelektronenmikroskop (REM). EBSD dient als anwendungsrelevante Methode zur Beschreibung von Kornstrukturen bei ferromagnetischen Materialien sowohl als Bulk- oder Dünnschicht-Material. Da die magnetischen Eigenschaften abhängen von der Orientierung, Größe und Form der Kristallite ist deren Charakterisierung für die weiteren Untersuchungen relevant. [73–75] Das Funktionsprinzip beruht auf der Erzeugung von Kikuchi-Linien. Diese entstehen durch Beugung rückgestreuter Elektronen an den Netzebenen einer massiven Probe. Der einfallende Primärelektronenstrahl streut an den Atomen der Probe und es entsteht eine divergente Quelle in der Probe, die dazu üblicherweise in einem Winkel von  $70^\circ$  eingespannt wird. Treffen Elektronen so auf die Gitterflächen, dass die Bragg-Bedingung erfüllt ist, führt dies zu einer konstruktiven Interferenz. Eine solche Verstärkung entsteht nun für alle Gitterflächen im Kristall. Das entstehende Beugungsbild spiegelt alle Winkelbeziehungen, d.h. auch die Kristallsymmetrie wider. Das so entstehende Beugungsbild wird mit Hilfe eines Phosphorschirms aufgenommen. [73, 74, 76, 77] Automatisierte EBSD Scans sind in Form von Maps, hier vor allem so genannten Inverse Pole Figure (IPF) - Maps zu finden. Zusätzlich werden Korngrößenhistogramme ausgelesen. Der Einsatz der Methode ist in den letzten Jahren stark angestiegen, wenn man als Basis die Anzahl der Veröffentlichungen wählt, die sowohl zur Beschreibung der Mikrostruktur von Materialien, [77] als auch zur Entwicklung der Scans selbst [78, 79] angefertigt wurden. Die hier durchgeführten Untersuchungen wurden am Lehrstuhl für Funktionswerkstoffe<sup>1</sup> vorgenommen.

### 3.2.3 Magnetische Eigenschaften

Die Beschreibungen der magnetischen Eigenschaften erfolgen durch Aufnahme der Hysteresekurven. Die Messungen erfolgten auf einem Hysteresegraph vom Typ Remagraph bei der Firma Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH<sup>2</sup>. Hierbei handelt es sich um ein Messgerät zur Bestimmung der quasistationären (DC) Messung nach IEC 60404-4, DIN EN 60404-4, ASTM A773, bei der die Hysteresekurve mit Neukurve gemessen wird und typische magnetische Eigenschaften ausgewertet

---

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Funktionswerkstoffe Prof. Dr.-Ing. Frank Mücklich, Universität des Saarlandes

<sup>2</sup> Hysteresmessung bei der Firma Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH Köln

werden. Die Permeabilität  $\mu$  ist eine materialspezifische Kenngröße die eine vergleichende Auswertung der Werkstoffe bzw. der Chargen ermöglicht. Die Proben müssen eine Minimallänge von  $90\text{ mm}$  haben. Der maximale Durchmesser der Probe (Vierkantstab oder Rundprobe) darf  $12\text{ mm}$  nicht überschreiten. Proben der genannten Geometrie werden während der Messung in einem Messjoch magnetisiert. Die maximale Aussteuerung beträgt hierbei ca.  $55\text{ kA/m}$  [80].

### 3.2.4 Magnetische Kraftmikroskopie

Die magnetische Kraftmikroskopie (MFM) ist eine hochauflösende Methode zur Untersuchung von Materialien. Der verwendete Aufbau wird in Abbildung 3-2 gezeigt. Eine magnetisierte Nadel ist an einem Hebel befestigt, so dass sie senkrecht zur untersuchten Oberfläche steht. Sie wird in einem definierten Raster über die Oberfläche einer Materialprobe geführt. Die Auslenkung der Nadel wird durch einen Laserstrahl gemessen, der von einem am Hebel montierten Spiegel reflektiert wird. Die Oberflächentopographie, in diesem Fall das magnetische Feld der Oberfläche, lenkt die Spitze der Nadel und bewirkt eine Bewegung des reflektierten Laserstrahls im Fotodetektor. Das somit erzeugte Bild ist sehr hochauflösend.

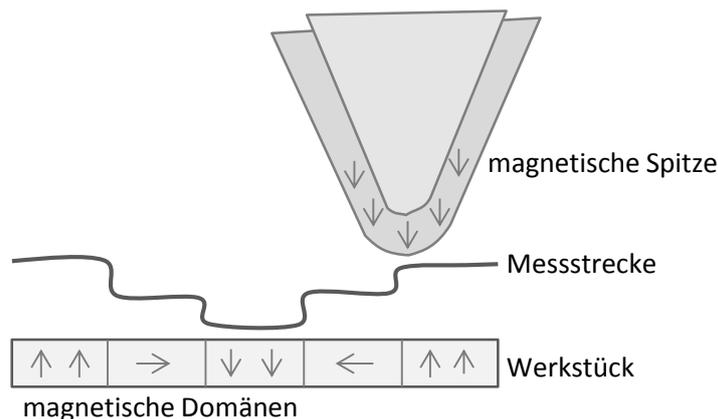


Abbildung 3-2: Setup der MFM Messungen [81]

### 3.2.5 Hall-Sensor

Die Messung der magnetischen Flussdichte nach der Bearbeitung erfolgt mit einem Hall-Sensor der Firma *metrolab* Typ THM 1176-Low Field. Der Hall-Sensor nutzt den Halleffekt aus. Senkrecht zur Stromrichtung wird an einem stromdurchflossenen Leiter ein Magnetfeld angelegt, somit wirkt auf jeden Ladungsträger die Lorentz-Kraft. Durch diese Kraft erfolgt eine Ablenkung senkrecht zur Bewegungsrichtung auf jeden Ladungsträger. Es entsteht ein Querfeld, das der Lorentz-Kraft entgegenwirkt. Die dem Querfeld entsprechende Querspannung, auch Hallspannung genannt, wird aufgezeichnet und ist proportional zur magnetischen Flussdichte. [82–84]

Tabelle 3-1: Herstellerangaben zur Gerätegenauigkeit des THM1176-LF gilt für ein Messfeldvolumen von  $6 \times 3.4 \times 3\text{ mm}$  und einem Winkelfehler von  $0.2^\circ$

Messbereich	Genauigkeit	Auflösung
8 mT	$\pm 20\ \mu\text{T}$	$\pm 2\ \mu\text{T}$

### 3.3 Werkstoffbeschreibungen

#### 3.3.1 Werkstoff- und Chargenübersicht

Tabelle 3-2 gibt einen ersten Überblick über die verwendeten Werkstoffe mit den zugehörigen Chargen und Bezeichnungen. Neben dem Vergütungsstahl 1.7225 ist der Wälzlagerstahl 1.3505 sowie für ergänzende Untersuchungen der Stahl 1.2080 verwendet.

Tabelle 3-2: Übersicht der verwendeten Werkstoffe und der zugehörigen Chargenbeschreibung

Werkstoff	Chargenbezeichnung	Verwendung und Untersuchung
1.7225	A	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chemische Analyse</li> <li>- Metallographie</li> <li>- EBSD Messung</li> <li>- Phasenanteile</li> <li>- Hysterese</li> <li>- MFM Messung</li> </ul>
	B	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chemische Analyse</li> <li>- Metallographie</li> <li>- EBSD Messung</li> <li>- Phasenanteile</li> <li>- Hysterese</li> </ul>
1.3505	C	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chemische Analyse</li> <li>- Metallographie</li> <li>- EBSD Messung</li> <li>- Hysterese</li> <li>- MFM Messung</li> </ul>
	II	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chemische Analyse</li> <li>- Metallographie</li> <li>- Hysterese</li> </ul>
1.2080	X	ergänzende Untersuchungen

#### 3.3.2 Vergütungsstahl 1.7225

Der Werkstoff 42CrMo4 nach DIN-Bezeichnung zu finden unter der Werkstoffnummer 1.7225 gehört zu der Werkstoffgruppe legierter Vergütungsstähle nach EN 10083-3. Er zeichnet sich durch seine sehr gute Bearbeitbarkeit aus, z.B. beim Drehen, Fräsen, Bohren. Des Weiteren ist der Werkstoff zum späteren Härten und Vergüten bestens geeignet. Die Einsatzbereiche sind Teile mit hoher Beanspruchung, die eine hohe Zähigkeit benötigen, im Maschinen- und Fahrzeugbau wie Achsen, Bolzen, Spindeln, Getriebewellen, Zahnräder etc. Durch Vergütung kann er eine Festigkeit von 750 – 1300 N/mm<sup>2</sup> erreichen. Die chemische Analyse wurde vom Analyselabor der Saarstahl AG durchgeführt und hat für die beiden Chargen folgende Gewichtsanteile ergeben, siehe Tabelle 3-3.

Tabelle 3-3: Chemische Zusammensetzung des Werkstoffs 1.7225 der verwendeten Chargen

In Gew.-%	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	B	Cu	Ca	N2
Norm – Analyse <sup>[1]</sup>	0,38 - 0,45	max. 0,40	0,60 - 0,90	max. 0,025	max. 0,035	0,90 - 1,20	0,15 - 0,30	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Charge A	0,415	0,240	0,767	0,0175	0,0072	1,060	0,167	0,062	0,011	0,0003	0,160	0,0030	0,0098
Charge B	0,424	0,210	0,783	0,0131	0,0220	1,030	0,188	0,077	0,013	0,0003	0,164	0,0033	0,0091

<sup>[1]</sup> nach DIN EN 10083-3:2007-1: Dr. Sommer Werkstoffdatenblatt 42CrMo4 Stand 29.06.2012

Zu erkennen ist, dass die beiden Chargen im Normbereich liegen, sich in der Zusammensetzung aber unterscheiden. Vor allem im Bereich des Schwefelgehalts, A: 0,0072 Gew.% und B: 0,0131 Gew.% ist eine Abweichung zu erkennen. Der Phosphorgehalt unterscheidet sich für die Chargen im Bereich, A: 0,0175 Gew.% und B: 0,0131 Gew.%. Ein höherer Schwefelgehalt führt zu einer besseren Zerspanbarkeit durch gleichmäßige Verteilung der Sulfide [85]. Die mechanischen Eigenschaften werden negativ beeinflusst, u.a. durch eine Verminderung der Duktilität. [85, 86] Nickel erhöht bei Vergütungsstählen die Zähigkeit, weiterhin wirkt das Element als kornfeinend und begünstigt eine Erstarrung nach dem stabilen Eisen-Kohlenstoff Diagramm [86]. Der Einfluss einzelner Legierungselemente im Zusammenhang mit der Auswirkung auf die magnetischen Eigenschaften wird unter anderem bei einzelnen Stahlherstellern und Lieferanten aufgezeigt. Schwefel hat hiernach keine direkte Auswirkung [87].

Die Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4 geben einen Gesamtüberblick über die Gefügemerkmale parallel zur Walzrichtung der jeweiligen Chargen des Werkstoffs 1.7225.

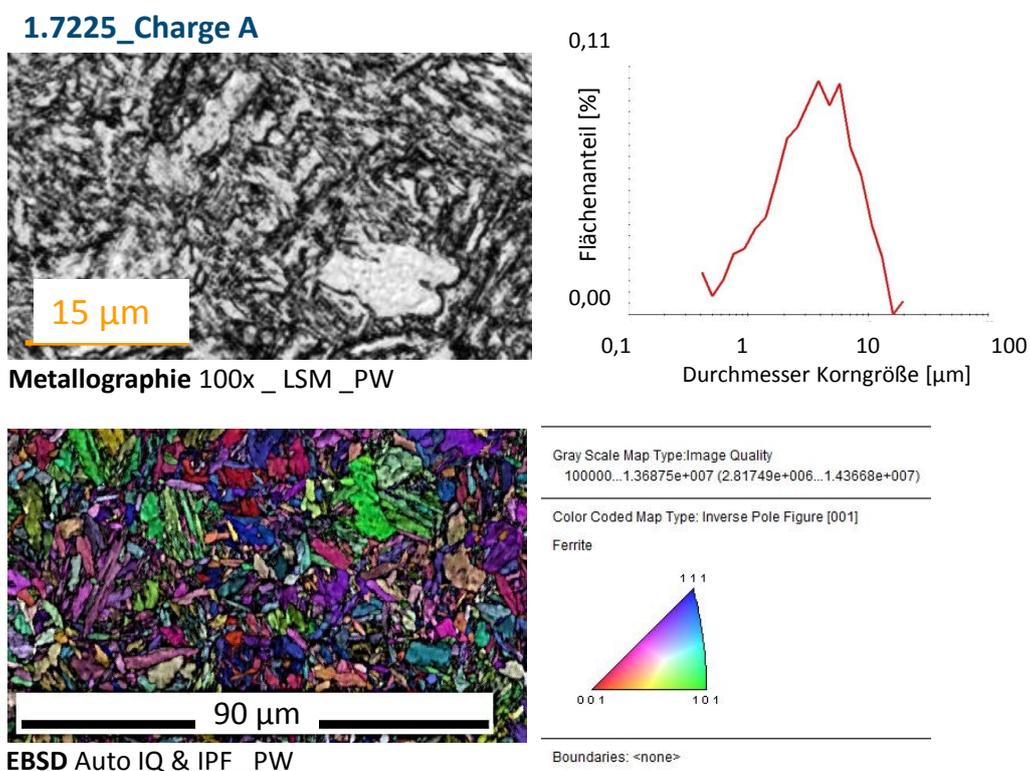


Abbildung 3-3: Gesamtüberblick zur Werkstoffcharakterisierung des Materials 1.7225\_Charge A parallel zur Walzrichtung

Neben der chemischen Analyse ist eine Untersuchung der metallographischen Strukturen sowie der Kornstrukturen zur Orientierung anhand der farbkodierten stereographischen Dreiecke sinnvoll. Auch die Auswertung der Korngrößenverteilung unterstützt den Vergleich der beiden Chargen. In der Abbildung 3-3 ist das Schlifffbild des Grundgefüges der metallographischen Untersuchung parallel zur Walzrichtung zu sehen. Es sind die Kornstrukturen durch die hell-dunkel Unterscheidung zu erkennen. Die EBSD Auswertung zeigt durch Abgleich des farblich kodierten Abgleichs auf ferritischer Basis die Richtung der Kornstrukturen an. Es gibt eine hohe Orientierung mit der Tendenz Richtung [111] lila und [101] grüne Bereiche. Bei der graphischen Auswertung wird der Flächenanteil in Abhängigkeit der Korngrößen aufgetragen. Es ergibt sich eine Verteilung mit einem doppelten Peak. Der erste ist bei ca. 3  $\mu\text{m}$  und der zweite bei 6  $\mu\text{m}$ . Für die Charge B wurde der gleiche Aufbau der Abbildung gewählt. Die Auswertung des EBSD Scans zeigt eine feinere Kornstruktur auf mit einem höheren Anteil an [101] Richtungen der Körner und beim Flächenanteil mit einer gleichmäßigeren Verteilung, Abbildung 3-4.

### 1.7225\_Charge B

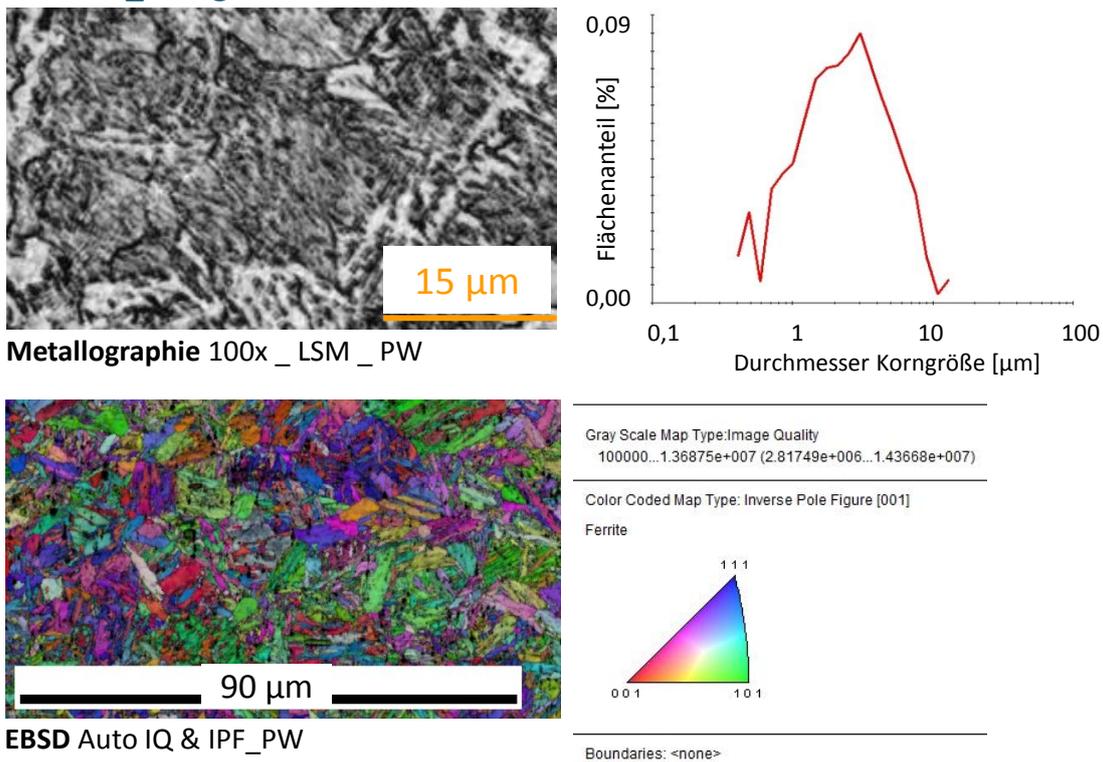
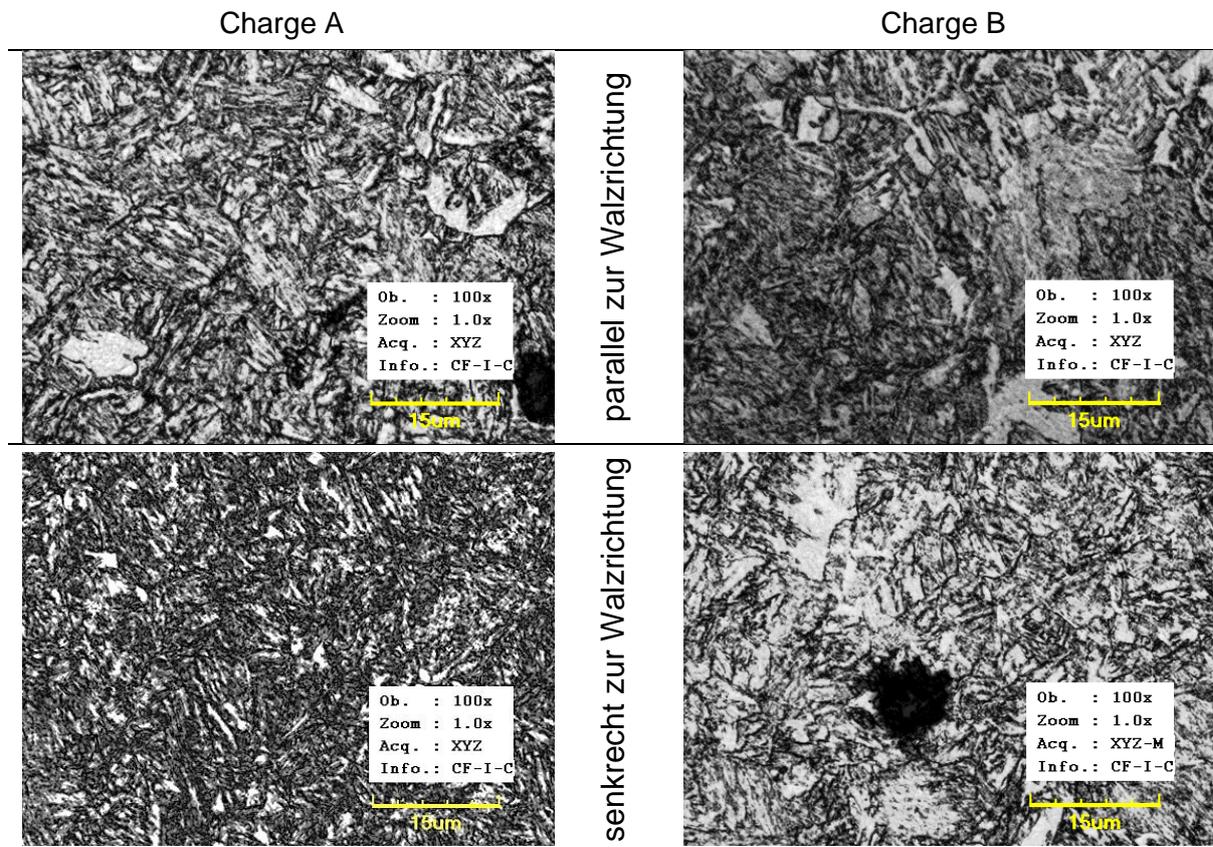


Abbildung 3-4: Gesamtüberblick zur Werkstoffcharakterisierung des Materials 1.7225\_Charge B parallel zur Walzrichtung

Tabelle 3-4: Vergleich der metallographischen Schlibfbilder des Laser-Scanning Mikroskops parallel und senkrecht zur Walzrichtung der Chargen A und B des Werkstoffs 1.7225 bei 100-facher Vergrößerung



Der Vergleich der metallographischen Schlibfbilder, aufgenommen mit dem Laser-Scanning Mikroskop (LSM) der Firma *Olympus* zeigt eine ähnliche Kornstruktur sowohl parallel als auch senkrecht zur Walzrichtung, siehe Tabelle 3-4. Senkrecht sind die Kornstrukturen kürzer. Vor allem werden die Unterschiede der beiden Chargen deutlich. Parallel zur Walzrichtung bilden sich in der Charge B größere Einzelkörner aus, der Anteil der eingelagerten Zementitkörner ist sichtbar und der Werkstoff erscheint weniger homogen.

Sehr deutlich wird der Unterschied in den Aufnahmen im Vergleich senkrecht zur Walzrichtung. Die Charge A weist eine überwiegend gleichartige Struktur auf mit geringem Anteil an Sonderkarbiden, die gleichmäßig verteilt vorliegen. Dies begünstigt ein gutes Verhältnis zwischen Zähigkeit zu Festigkeit des Werkstoffs [88]. Es liegt ein deutlicher höherer Anteil an ferritischem Gefüge in der Charge B vor, im Vergleich mit Literaturabbildungen sehen Bereiche nach einem Ansatz eines groben Bainits aus. [89–94] Die flächigen schwarzen Bereiche lassen auf Perlit schließen. [88] Es zeigt, dass die beiden Chargen in unterschiedlichen Wärmebehandlungszuständen vorliegen. Betrachtet man das ZTU Schaubild für kontinuierliches Abkühlen des Stahls 1.7225, siehe Abbildung 3-5, kann man den Rückschluss ziehen, dass die beiden Chargen unterschiedliche Abkühlkurven durchlaufen haben.

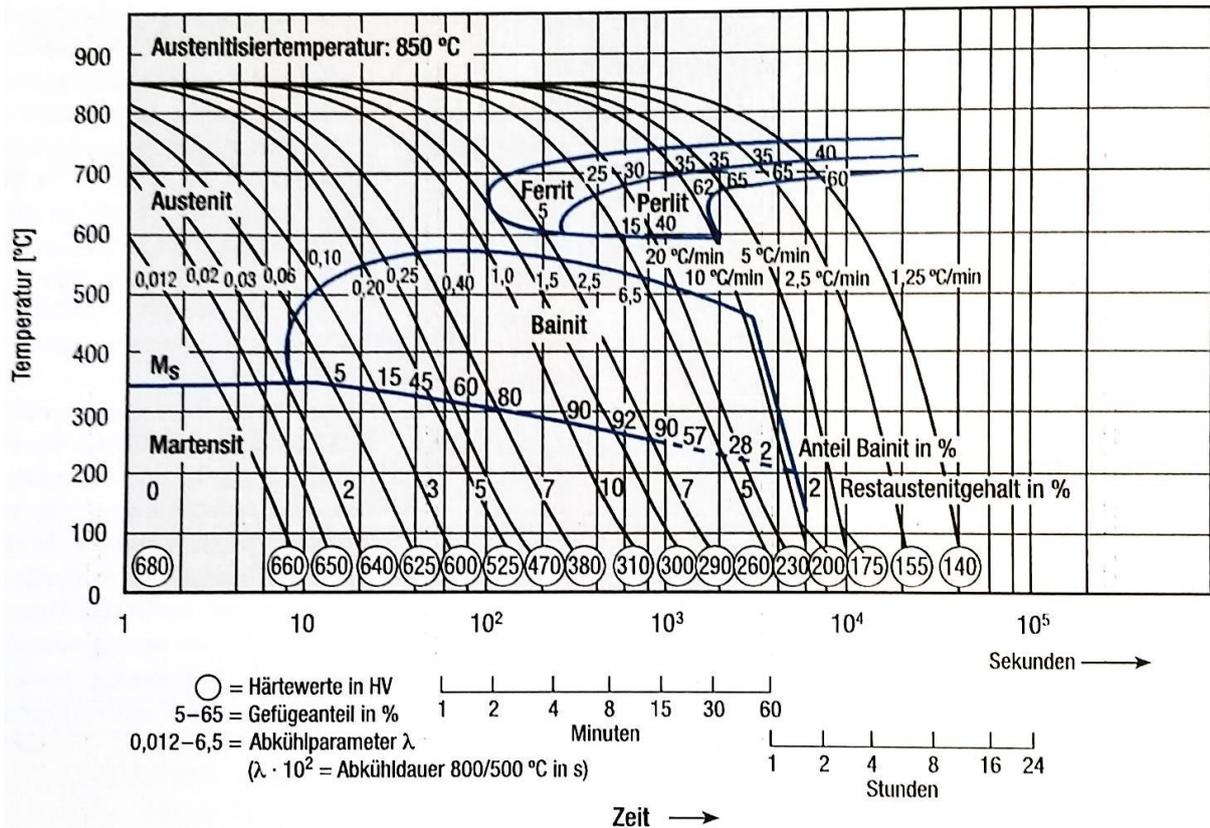
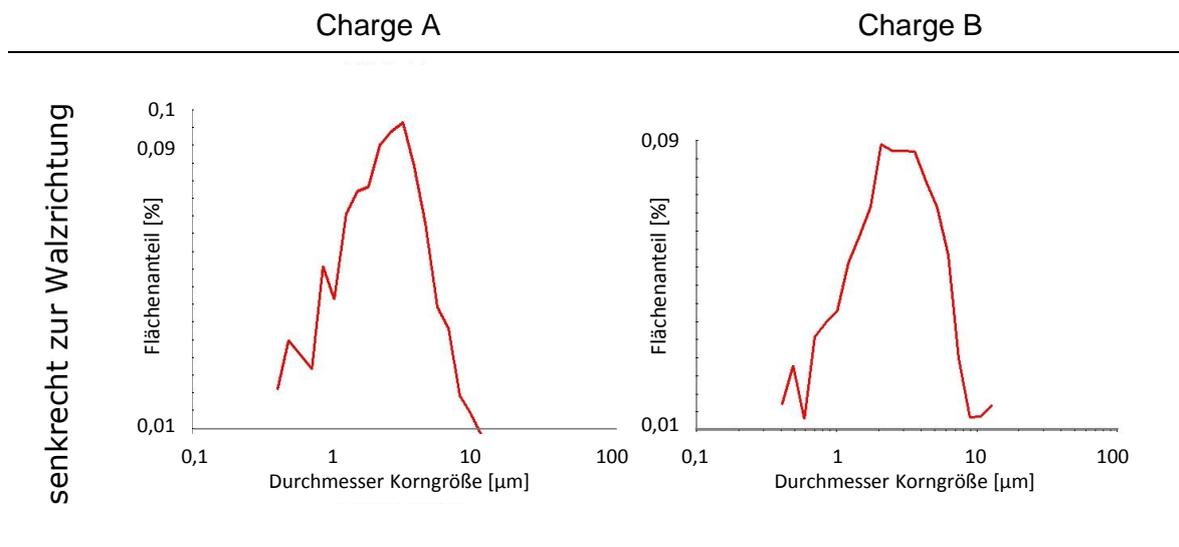


Abbildung 3-5: ZTU Schaubild für kontinuierliches Abkühlen des Werkstoffs 1.7225 [95]

Vergleicht man die Flächenanteile der mittleren Korndurchmesser nach der EBSD-Messung der Chargen A und B senkrecht zur Walzrichtung, so wird ein geringer Unterschied ersichtlich. Der Vergleich der Flächenanteile zeigt für die Charge A ein Maximum bei einem Durchmesser von 3,199  $\mu\text{m}$  mit einem Flächenanteil von 9,6 %.

Tabelle 3-5: Vergleich der EBSD Korndurchmesserauswertung in  $\mu\text{m}$  senkrecht zur Walzrichtung der Chargen A und B des Werkstoffs 1.7225



Bei der Charge B ist das Maximum bei einem Durchmesser von  $2,090 \mu\text{m}$  mit einem Flächenanteil von 8,8 %, jedoch sind weitere Korngrößen mit  $2,507 \mu\text{m}$ ,  $3,007 \mu\text{m}$  und  $3,607 \mu\text{m}$  mit einem Flächenanteil von jeweils 8,7 % vorhanden. Es zeigt sich anhand der Grafiken, dass die am häufigsten vorkommenden Korngrößen in derselben Größenordnung liegen, jedoch die Charge B eine etwas größere Streuung aufweist. Die Gesamtauswertung der EBSD Untersuchungen befindet sich im ANHANG D.

Die Untersuchung der Phasenanteile im kristallinen Bereich unter Röntgenbeugung der Chargen A und B des Werkstoffs 1.7225 zeigen im Vergleich einen fast identischen Kurvenverlauf, siehe Abbildung 3-6. Die Zuordnung der Peaks erfolgt nach der gleichen Systematik wie bei Weber et al und bezogen auf Madsen. [96, 97] Die Abweichungen der beiden Chargen liegen im Bereich ab ca.  $80^\circ$  und somit im Bereich der Richtungen für Eisen [211] und [220] sowie am stärksten im Bereich der Richtung [310].

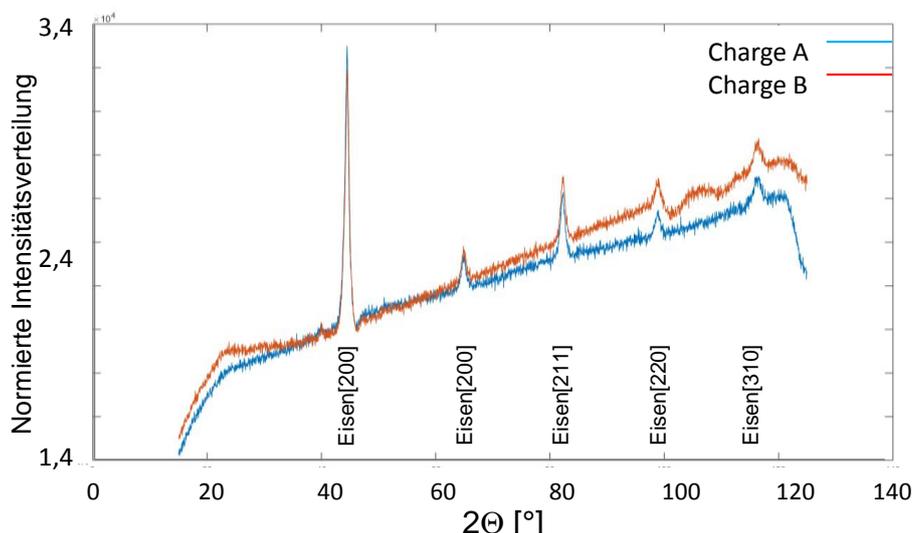


Abbildung 3-6: Phasenanteile der Chargen A und B des Werkstoffs 1.7225 <sup>3</sup>

### 3.3.3 Wälzlagerstahl 1.3505

Der Werkstoff 100 Cr 6, nach DIN-Bezeichnung zu finden unter der Werkstoffnummer 1.3505, gehört zu der Werkstoffgruppe Wälzlagerstahl nach EN ISO683-17. Er zeichnet sich durch eine gleichmäßig hohe Härte, gute Verschleißigenschaften und einen guten Reinheitsgrad aus. Die Einsatzbereiche sind Teile mit wechselnder Beanspruchung bei hohen Flächenpressungen, typische Anwendungsfelder sind u.a. Kugel-, Nadel- oder Rollenlager sowie hochbeanspruchte Teile im Maschinen- und Fahrzeugbau. Die chemische Analyse hat für die beiden Chargen folgende Gewichtsanteile ergeben, siehe Tabelle 3-6.

<sup>3</sup> Lehrstuhl für Physikalische Chemie, Universität des Saarlandes

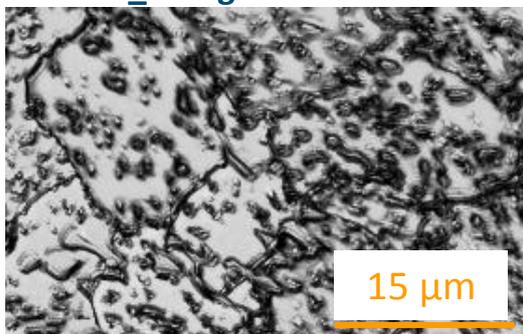
Tabelle 3-6: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Chargen des Werkstoffs 1.3505<sup>4</sup>; k.A. keine Angabe aufgrund des geringen Anteils möglich

In Gew.-%	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Al lös	Cu	N2	C
Norm – Analyse <sup>[1]</sup>	1,00	0,25	0,35	k.A.	k.A.	1,50	0,15 - 0,30	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	1,00
Charge C	0,97	0,23	0,33	0,017	0,0102	1,46	0,033	0,13	0,025	0,025	0,15	0,0116	0,97
Charge II	0,933	0,319	0,376	0,007	0,0040	1,4	k.A.	k.A.	0,001	k.A.	k.A.	k.A.	0,933

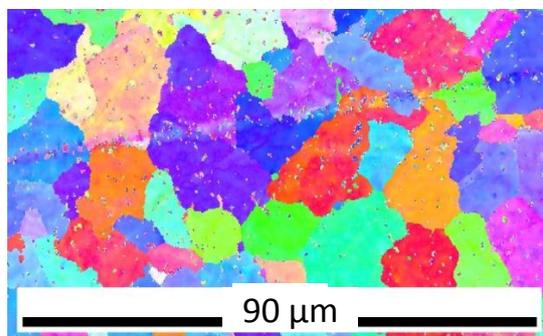
[<sup>1</sup>] nach EN ISO 683-17: saarstahl Werkstoff Datenblatt 2014

Unterschiede zwischen den Chargen werden vor allem ersichtlich im Anteil des Siliziums und des Schwefelgehalts. Charge II weicht deutlich stärker von der Norm-Analyse ab. Abbildung 3-7 zeigt eine Gesamtübersicht der durchgeführten Gefügeuntersuchungen des Werkstoffs 1.3505 Charge C. Die Gefügeabbildung und die EBSD-Untersuchungen sind senkrecht zur Walzrichtung durchgeführt. Das Schlibbild des Grundgefüges ist in der metallographischen Untersuchung oben links zu sehen. Es sind ganz klare Kornstrukturen zu erkennen. Die EBSD Auswertung zeigt durch Abgleich des farblich kodierten Abgleichs auf ferritischer Basis die Richtung der Kornstrukturen an. Es gibt eine hohe Orientierung mit der Tendenz Richtung [111], blau. Bei der Auswertung des Flächenanteils in Abhängigkeit von der Korngröße zeigen sich deutlich größere Korndurchmesser als beim Werkstoff 1.7225 und eine geringe Streuung der Korngrößen mit einem Peak bei ca. 12  $\mu\text{m}$ .

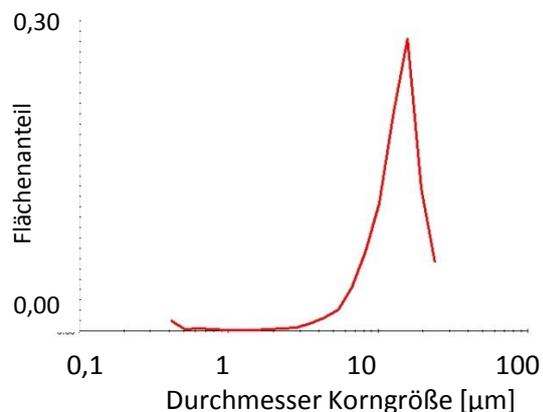
### 1.4303\_Charge C



Metallographie 100x \_ LSM \_ SW



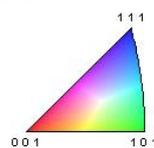
EBSD Auto IPF \_ SW



Gray Scale Map Type: <none>

Color Coded Map Type: Inverse Pole Figure [001]

Ferrite



Boundaries: <none>

Abbildung 3-7: Gesamtüberblick zur Charakterisierung des Werkstoffs 1.3505\_Charge C

<sup>4</sup> Chemische Analyse durchgeführt von der Saarstahl AG Völklingen, 2015

### 3.3.4 Kaltarbeitsstahl 1.2080

Der Werkstoff X210 Cr 12 nach DIN-Bezeichnung zu finden unter der Werkstoffnummer 1.2080 gehört zu der Werkstoffgruppe Rost- und säurebeständigen Stähle. Verwendung findet er durch seinen sehr hohen Widerstand gegen abrasiven und adhäsiven Verschleiß in hochbeanspruchten Schnitt- und Stanzwerkzeugen sowie als Presswerkzeug oder Führungs- und Profilleisten. Die chemische Analyse hat für die Charge folgenden Gewichtsanteil ergeben, siehe Tabelle 3-7.

Tabelle 3-7: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Chargen des Werkstoffs 1.2080<sup>5</sup>; k.A. keine Angabe aufgrund des geringen Anteils möglich

In Gew.-%	C	Cr	Mn	P	S	Si
<b>Richtwerte</b>	1,91 -	11,0 -	0,15 –	Max	Max.	0,10 –
<b>min - max</b> <sup>[1]</sup>	2,20	12,0	0,45	0,03	0,03	0,40

<sup>[1]</sup> Richtwerte: grimm-edelstahlhandel.de Datenblatt 2017

---

<sup>5</sup> Chemische Analyse durchgeführt von der Saarstahl AG Völklingen, 2015

### 3.4 Magnetische Eigenschaften

Zur Bestimmung von Unterschieden im magnetischen Verhalten wurden von den Werkstoffen auch Untersuchungen der Hysteresekurven aufgenommen. Der Vergleich im Einzelnen folgt.

#### 3.4.1 Vergütungsstahl 1.7225

Die Hysteresekurven zeigen den typischen Verlauf eines weichmagnetischen Werkstoffs, siehe Abbildung 3-8.

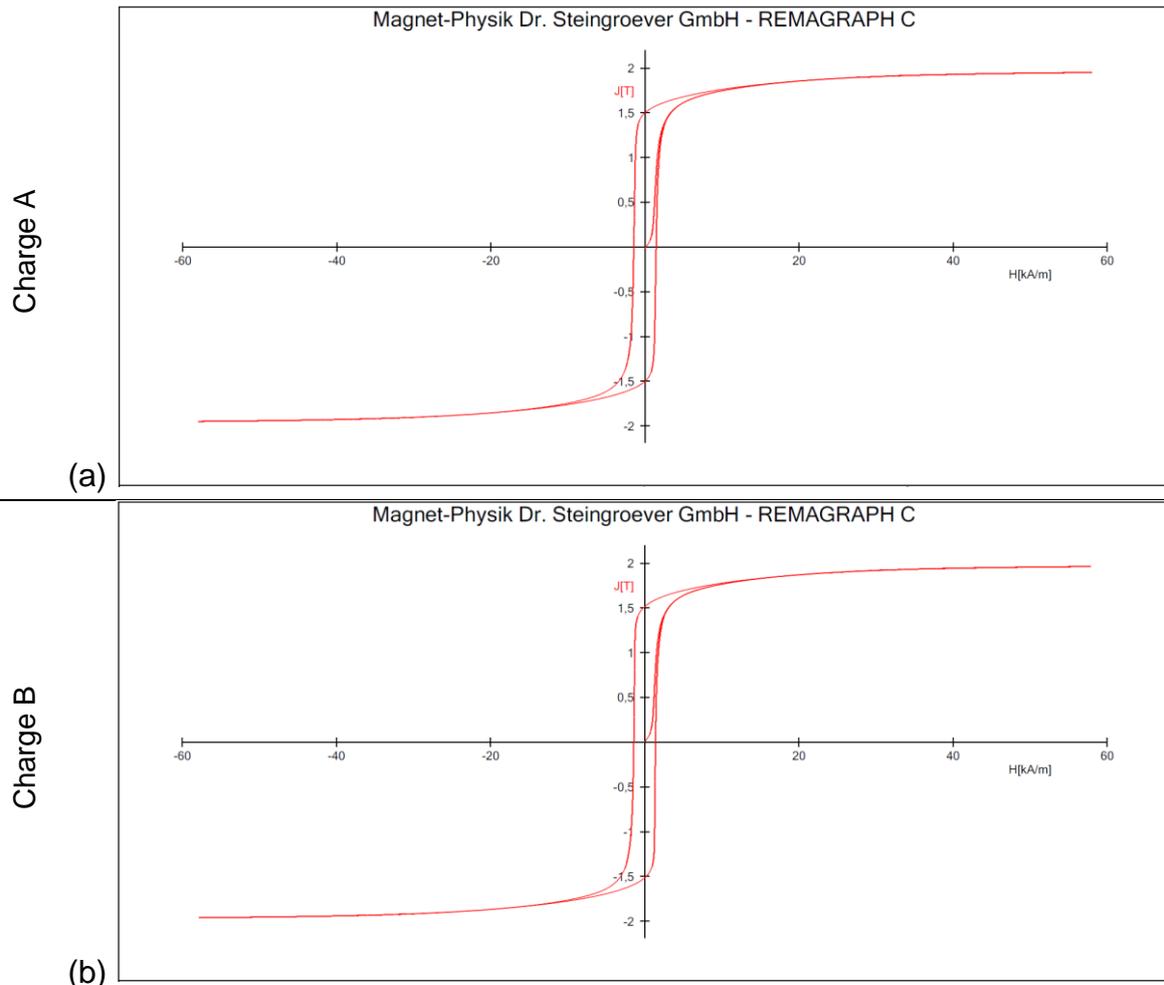


Abbildung 3-8: Hysteresekurven des Werkstoff 1.7225 Charge A (a), Charge B (b)

Bei der Betrachtung des Ausschnitts der Hysteresekurven beider Chargen des Werkstoffs 1.7225 wird deutlich, dass sie keinen Unterschied aufzeigen und jeweils einen gleichen Verlauf der beiden Chargen in den Neu- und Hysteresekurven haben, siehe Abbildung 3-9.

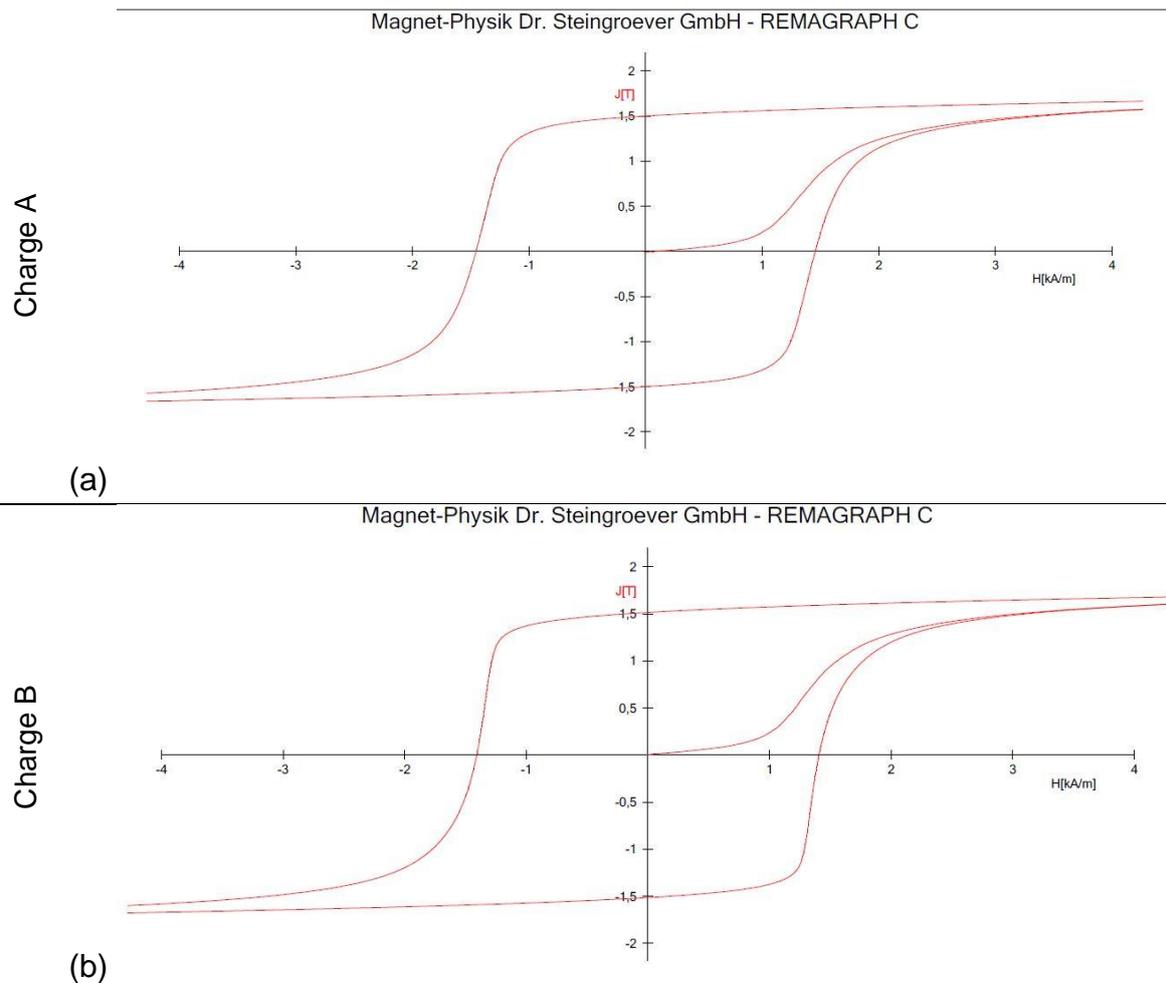


Abbildung 3-9: Ausschnitt der Hysteresekurven des Werkstoff 1.7225  
Charge A (a), Charge B (b) im Bereich von  $B \pm 2$  mT

Die Differenz der Remanenz und der Koerzitivfeldstärke wird in Tabelle 3-8 gegenübergestellt. Die Messergebnisse der Hystereseauswertungen zeigen die minimalen Unterschiede der Chargen und nur der werkstoffspezifische Wert der Permeabilität zeigt einen Unterschied von 5 % zwischen den Chargen A und B des Werkstoffs 1.7225.

Tabelle 3-8: Vergleich der Hystereseergebnisse des Werkstoffs 1.7225

	1.7225 Charge A	1.7225 Charge B
Remanenz $B_r$	1,50 T	1,51 T
Koerzitivfeldstärke $H_{cB}$	1,45 kA/m	1,41 kA/m
Feldstärke $H_{cI}$	1,45 kA/m	1,41 kA/m
materialspezifische Permeabilität $\mu_{max}$	505	528
$H(\mu_{max})$	1,81 kA/m	1,72 kA/m
$H_{max}$	58 kA/m	57,9 kA/m
maximal gemessene magnet.Flussdichte $B_{max}$	2,02 T	2,04 T
maximale magnetische Polarisation $J_{max}$	1,95 T	1,96 T

### 3.4.2 Wälzlagerstahl 1.3505

Der Vergleich der Hysteresekurven zeigt im Verlauf einen Unterschied der Chargen auf, Abbildung 3-10. Der Verlauf der grünen Kurve beschreibt den werkstoffspezifischen Wert der Permeabilität, auch dieser unterscheidet sich deutlich bei den Chargen für den Vergütungsstahl 1.3505, Tabelle 3-9.

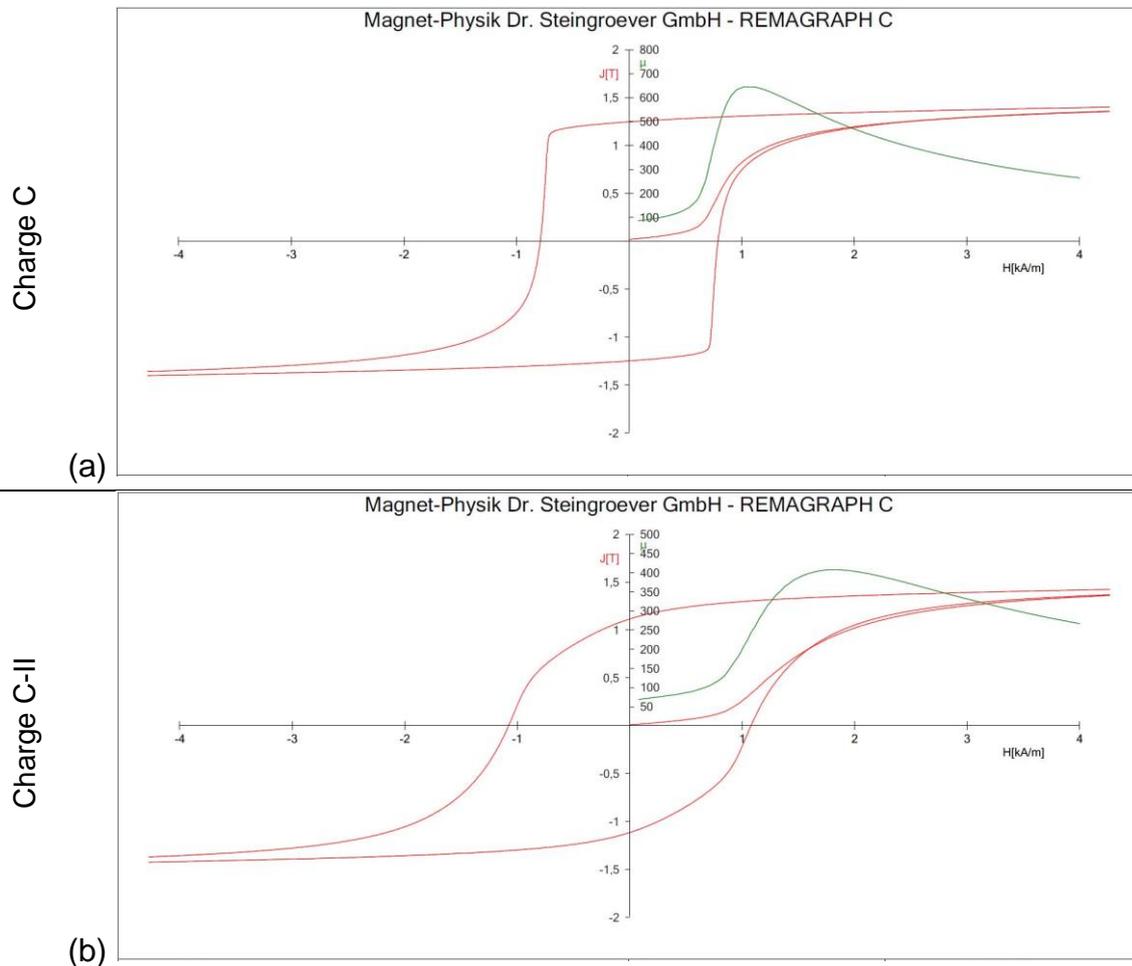


Abbildung 3-10: Werkstoff 1.3505 Charge C (a) und Charge II (b)

Die Tabelle verdeutlicht das unterschiedliche magnetische Verhalten der Chargen besser als der Verlauf es schon andeutet. In der Remanenz ist eine Differenz von 11 % zu erkennen, bei der Koerzitivfeldstärke liegt dies um die 30%. Der material-spezifische Wert bestätigt dies. Somit ist mit einem unterschiedlichen Verhalten bei weiteren Untersuchungen zu rechnen. Die Einflüsse der einzelnen Legierungselemente auf das magnetische Verhalten eines Werkstoffs sind hier zu erkennen. Mit einem höheren Anteil an Mangan bei der Charge II zur Charge C und auch dem Silizium lassen sich die Differenzen erklären. Beide Legierungselemente wirken in hochlegierten Stählen ferritstabilisierend und somit reagiert der Stahl stärker magnetisierend.

Tabelle 3-9: Vergleich der Hystereseergebnisse des Werkstoffs 1.3505

	<b>1.3505 Charge C</b>	<b>1.3505 Charge II</b>
Remanenz $B_r$	1,25 T	1,12 T
Koerzitivfeldstärke $H_{cB}$	0,789 kA/m	1,08 kA/m
Feldstärke $H_{cJ}$	0,789 kA/m	1,08 kA/m
materialspezifische Permeabilität $\mu_{max}$	646	408
$H(\mu_{max})$	1,06 kA/m	1,79 kA/m
$H_{max}$	58,5 kA/m	58,2 kA/m
maximal gemessene magnet. Flussdichte $B_{max}$	1,67 T	1,71 T
maximale magnetische Polarisation $J_{max}$	1,75 T	1,78 T

### 3.5 Änderung der magnetischen Domänen

Zur Untersuchung der Änderung der magnetischen Domänen wurden weitere Untersuchungen der Werkstoffe mit dem MFM durchgeführt, um die Änderung der Orientierung sowie eine Größenänderung der magnetischen Domänen vor und nach der Fräsbearbeitung zu betrachten. Abbildung 3-11 zeigt die Materialprobe und die Positionierung der Messung sowie die Bearbeitungsspur. Um die Position nach der Bearbeitung wieder zu erreichen, wurden Mikroindenter zur Orientierung in die Oberfläche eingebracht.

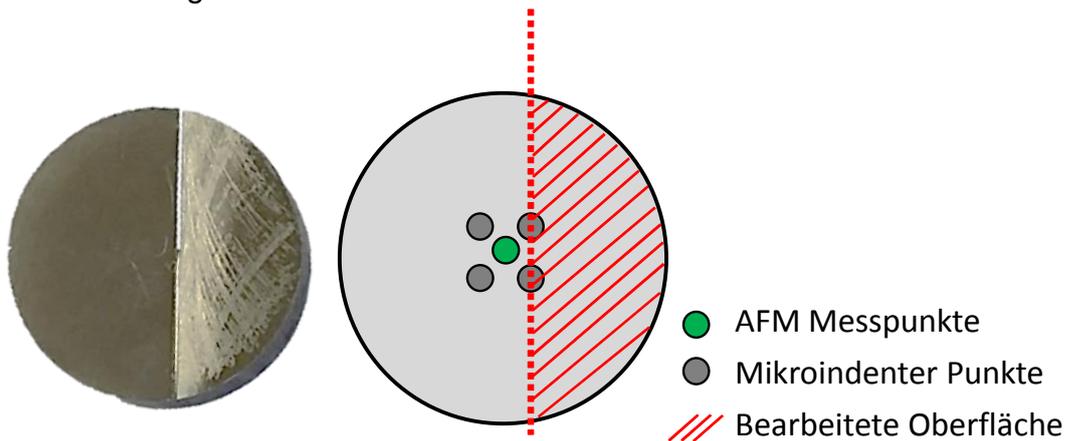
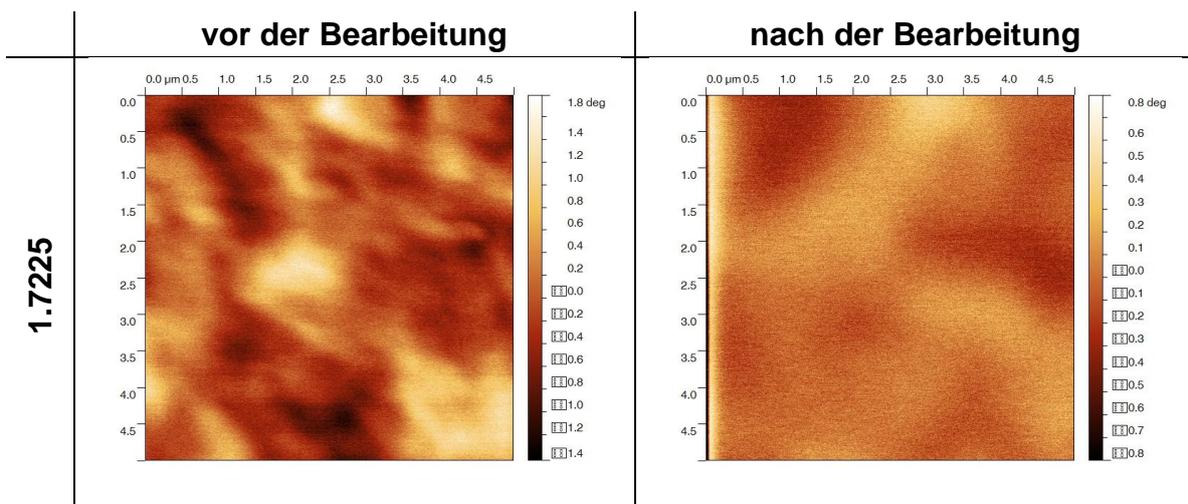


Abbildung 3-11: Darstellung zur Orientierung der Lage der MFM Messung zur Bearbeitungsposition und links das bearbeitete Werkstück <sup>6</sup>

Tabelle 3-10 zeigt in der linken Spalte MFM-Aufnahmen des Ausgangszustands des Werkstoff 1.7225. Gleiche Farben repräsentieren dieselbe homogene Orientierung der Weiß'schen Bezirke.

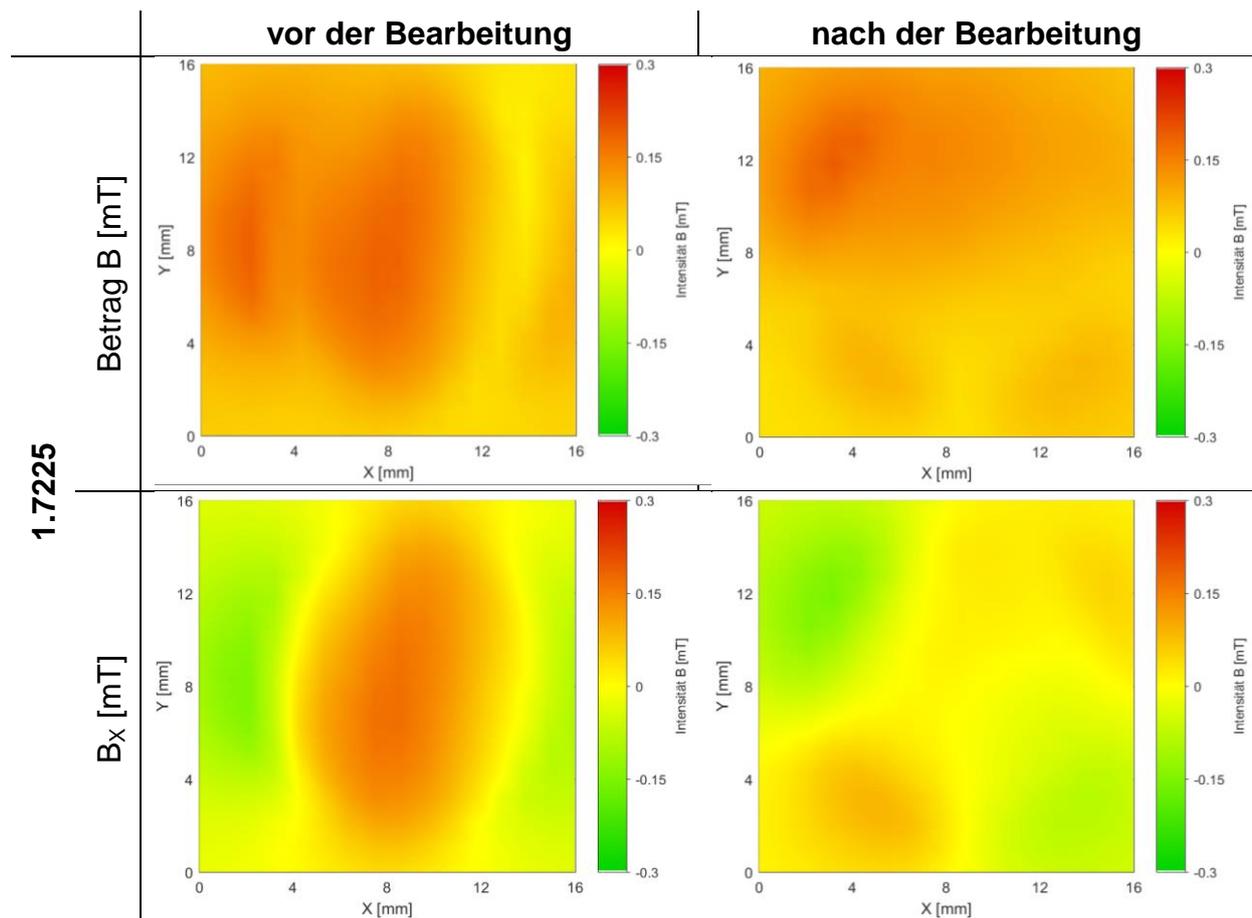
Tabelle 3-10: MFM Aufnahmen in der Gegenüberstellung des Werkstoff 1.7225 und des Zustands der Bearbeitung



<sup>6</sup> Lehrstuhl für Experimentelle Methodik der Werkstoffwissenschaften, Universität des Saarlandes

Die Änderungen der magnetischen Felder durch die Bearbeitung sind in der rechten Spalte deutlich erkennbar. Die Weiß'schen Bezirke homogener Orientierung sind sichtlich nach der Bearbeitung vergrößert. Die untersuchte Position selbst ist nicht bearbeitet, dennoch ist der Einfluss, der durch die angrenzende Bearbeitung ausgeübt wird, hier ersichtlich. Zum Vergleich erfolgt eine Messung der Proben mit einer Hallensensor-Messung flächig über die gesamte Oberfläche, siehe Tabelle 3-11.

Tabelle 3-11: *Matlab*-Auswertung der Hall-Sensor-Messung des Werkstoffs 1.7225 im Vergleich des Zustands der Bearbeitung, Probenlage mittig



Auch für den Werkstoff 1.3505 werden die Untersuchungen mit dem MFM durchgeführt. In Tabelle 3-12 sind die MFM Aufnahmen in der Gegenüberstellung zu sehen. Es wird auch deutlich, dass nach der Bearbeitung eine Verschiebung der angrenzenden Weiß'schen Bezirke stattgefunden hat. Die Bereiche sind vergrößert und in der hell-dunkel Verteilung intensiver zu erkennen. Die Betrachtung der Oberflächen-scans ergibt in Tabelle 3-13 ergibt bei vergleichender Betrachtung sowohl in der Ansicht des Betrags als auch der magnetischen Flussdichte Messung in X-Richtung nur eine leichte Verschiebung der Felder. Hier ist die Auswirkung im Gegensatz zum Werkstoff 1.7225 geringer in X-Richtung ausgeprägt. Auch eine Zunahme der Intensität ist auf den ersten Blick nicht zu erkennen.

Tabelle 3-12: MFM Aufnahmen in der Gegenüberstellung des Werkstoffs 1.3505 und des Zustands der Bearbeitung

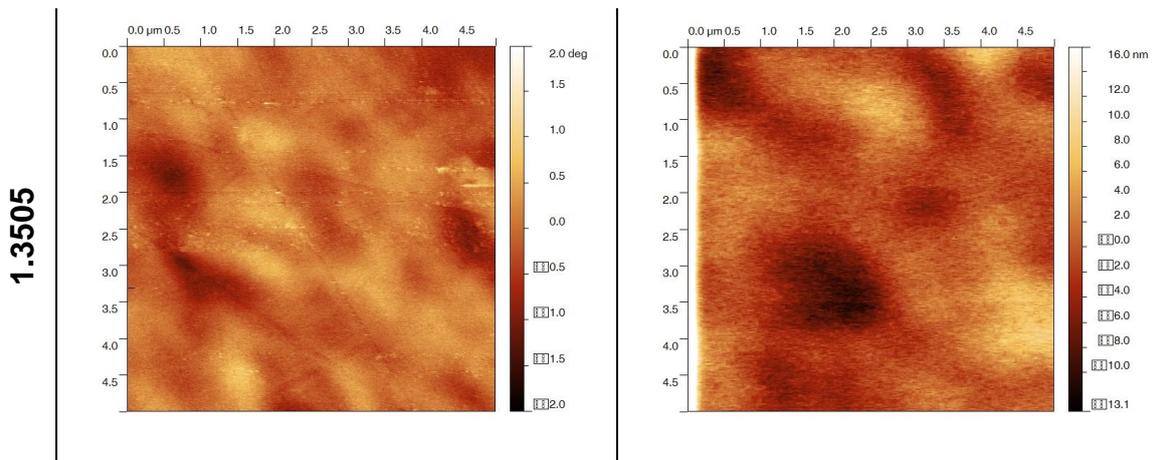
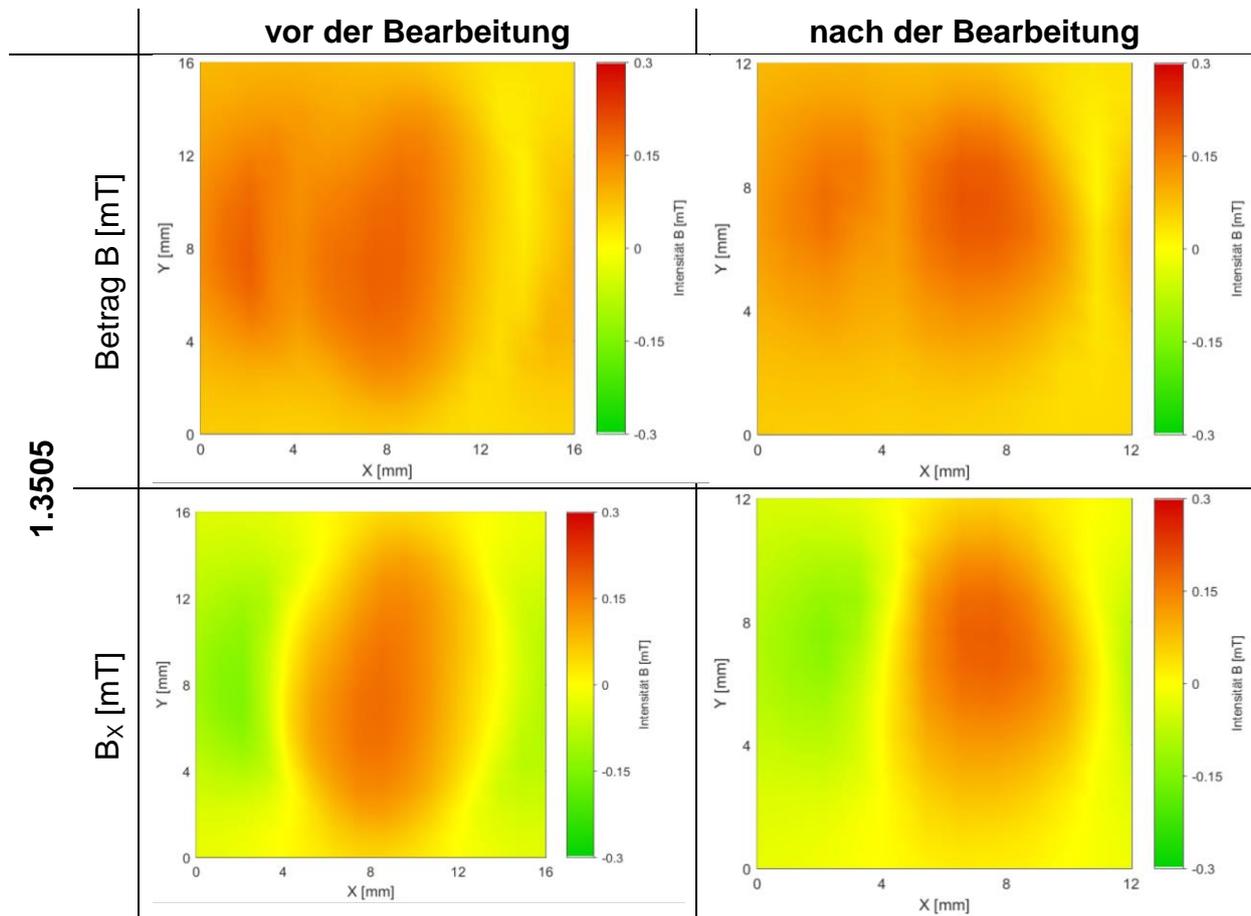


Tabelle 3-13: *Matlab*-Auswertung der Hall-Sensor-Messung der Werkstoffs 1.3505 im Vergleich des Zustands der Bearbeitung, Probenlage mittig



## 4 Versuchsdurchführung

### 4.1 Vorgehensweise

Die Versuchsdurchführung erfordert eine stringente Vorgehensweise und Methodik, um alle beeinflussenden Aspekte zu erfassen. Äußere Felder im Umfeld des Zerspanprozesses, der Werkstoff selber und das Werkstoffgedächtnis sowie die Spanentstehung spannen ein komplexes Netz von Einflussfaktoren auf, das möglichst detailliert in Einzelfaktoren zerlegt werden soll. Betrachtet man Tabelle 4-1 werden die Einflüsse entlang der Prozessschritte im Einzelnen beschrieben. Bei der Betrachtung des Werkstoffs sind sowohl seine Eigenschaften selbst zu sehen, welche Legierungselemente in welchem Gewichtsanteil vorliegen als auch die Charge sowie die bisherigen Geometrieänderungen. Daneben spielen auch das Handling, der Transport sowie die Lagerung des Werkstoffs eine Rolle. Die empfohlene Vorgehensweise hierbei ist die ausführliche Dokumentation und begleitende Messung zur Analyse von beeinflussenden Umgebungseinflüssen.

Tabelle 4-1: Beschreibung der Einflüsse auf die Änderung der magnetischen Eigenschaften, angepasst aus [13]

Prozessschritte	Einflüsse	Vorgehensweise
<b>Werkstoff</b>	<b>Werkstoff</b> - Legierungselemente - Charge - Geometrieänderung <b>Handling / Transport</b> - Lagerung - Transportsystem - Magnetisches Umfeld	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Werkstoff Datenblätter</li> <li>• Dokumentation</li> <li>• Begleitende Messung zur Analyse von beeinflussenden Randerscheinungen</li> </ul>
<b>Ausgangszustand</b>	<b>Lagerung</b> <b>Art der Werkstückherstellung</b> <b>Handling / Transport</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dokumentation</li> <li>• Begleitende Messung zur Analyse von beeinflussenden Randerscheinungen</li> </ul>
<b>Fertigung (Zerspanung)</b>	<b>Werkzeug</b> <b>Prozessparameter</b> - Kräfte - Geschwindigkeiten - Richtung - Temperaturkontrolle <b>Spannsystem</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dokumentation                              - z.B. externe Felder</li> <li>• Versuchsplanung</li> <li>• Temperaturkontrolle</li> <li>• Messung der magnetischen Eigenschaften</li> </ul>
<b>Prozesskette</b> - <b>Reinigungsprozess</b> - <b>Montage</b> - <b>weitere Bearbeitungsschritte</b>	<b>Art der Reinigung</b> <b>Transport und Lagerung</b> <b>Grenzwerte „Restmagnetismus“</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dokumentation</li> <li>• Begleitende Messung zur Analyse von beeinflussenden Randerscheinungen</li> </ul>

Der Ausgangszustand beschreibt die Lagerung entlang der gesamten Prozesskette sowie die Art der Werkstückherstellung bis zum zu untersuchenden Prozess, in diesem Fall der Zerspanung, dem Handling und Transport entlang der Prozesskette.

Auch hier ist die Kenntnis über die möglichen beeinflussenden Randerscheinungen notwendig. Dies kann durch Dokumentation und Messung erfolgen. Beim Fertigungsschritt Zerspanung selbst stellen die Prozessbedingungen die wesentlichen Einflussfaktoren dar. Die Werkzeuggeometrie und die Prozessparameter definieren den Prozess und die zu erwartenden Kräfte, Temperaturen und Spanentstehungsmechanismen. Auffälligkeiten bei der Bearbeitung sind zu dokumentieren. Achsantrieb und Spannsysteme können zusätzlich äußere Felder in den Prozess einprägen. Die detaillierte Dokumentation der Versuchsbedingungen dient daher nicht nur der Identifikation von Einflussfaktoren. Vielmehr kann sie nutzen, um im Serienprozess Abweichungen von der idealen Situation zu erkennen und Gegenmaßnahmen oder erforderliche Anpassungen in Folgeprozessen, z.B. bei der Reinigung oder Montage, vorzuschlagen, siehe Kapitel 7.2.

Auf Basis der Beschreibung ist das Untersuchungskonzept, siehe Tabelle 4-2 entwickelt worden. Zur Untersuchung von Einflüssen durch Zug- oder Druckbelastungen, die beim Handling, Lagerung oder Zerspanung entstehen können, werden Versuche an zug- und druckbeanspruchten Werkstückproben durchgeführt und die Änderung der magnetischen Oberflächeneigenschaften mit der Vergleichsgröße der magnetischen Induktion beschrieben. Die Ergebnisse in der Spanbildung beschreiben auf der einen Seite den Einfluss des Werkstoffgedächtnisses durch Variierung der Prozessführung. Des Weiteren werden die Einflüsse der einzelnen Bearbeitungsparameter, d.h. des Vorschubs, der Schnitttiefe und der Drehzahl auf die Änderung der magnetischen Eigenschaften unter Betrachtung der Bearbeitungs- zur Walzrichtung analysiert.

Tabelle 4-2: Untersuchungskonzepte am Gesamt- und Modellsystem

<b>Untersuchungen am Modellsystem (Kapitel 5)</b>	<b>Ergebnisse der Spanbildung (Kapitel 7)</b>
Zug- und Druckbeanspruchung in Korrelation zur Änderung der magnetischen Oberflächeneigenschaften	Einflüsse des Werkstoffs, der Geometrie und der Parameter in Bezug zur Änderung der magnetischen Oberflächeneigenschaften
<b>Wechselwirkungen und Mechanismen</b>	

Abbildung 4-1 zeigt das Ablaufschema der Versuchsdurchführung. Nach Anlieferung wird das Stangenmaterial punktuell über Länge und Umfang vermessen. Es werden drei Probentypen hergestellt. Um den Ausgangszustand jeder Werkstoffprobe zu ermitteln, wird mithilfe des verwendeten 3-Achs-Hallsensors des Typs TMH 1179 low field der Firma *metrolab*<sup>7</sup> auf der gesamten Probenoberfläche vollständig gemessen. Eine Sortierung der Proben zur Einteilung der spanenden Bearbeitung ist auf Basis dieser Ergebnisse erfolgt. Proben mit ähnlichem Ausgangszustand werden bei einem Parametersatz bearbeitet, die andere Gruppe wird zunächst entmagnetisiert. Nach der Sortierung und Entmagnetisierung dieses Teils der Proben werden umfangreiche Fräsversuche mit im statistischen Versuchsplan (DoE) festgelegten Prozessparametern durchgeführt. Somit ist es möglich, den Einfluss des Ausgangszustandes zu beobachten.

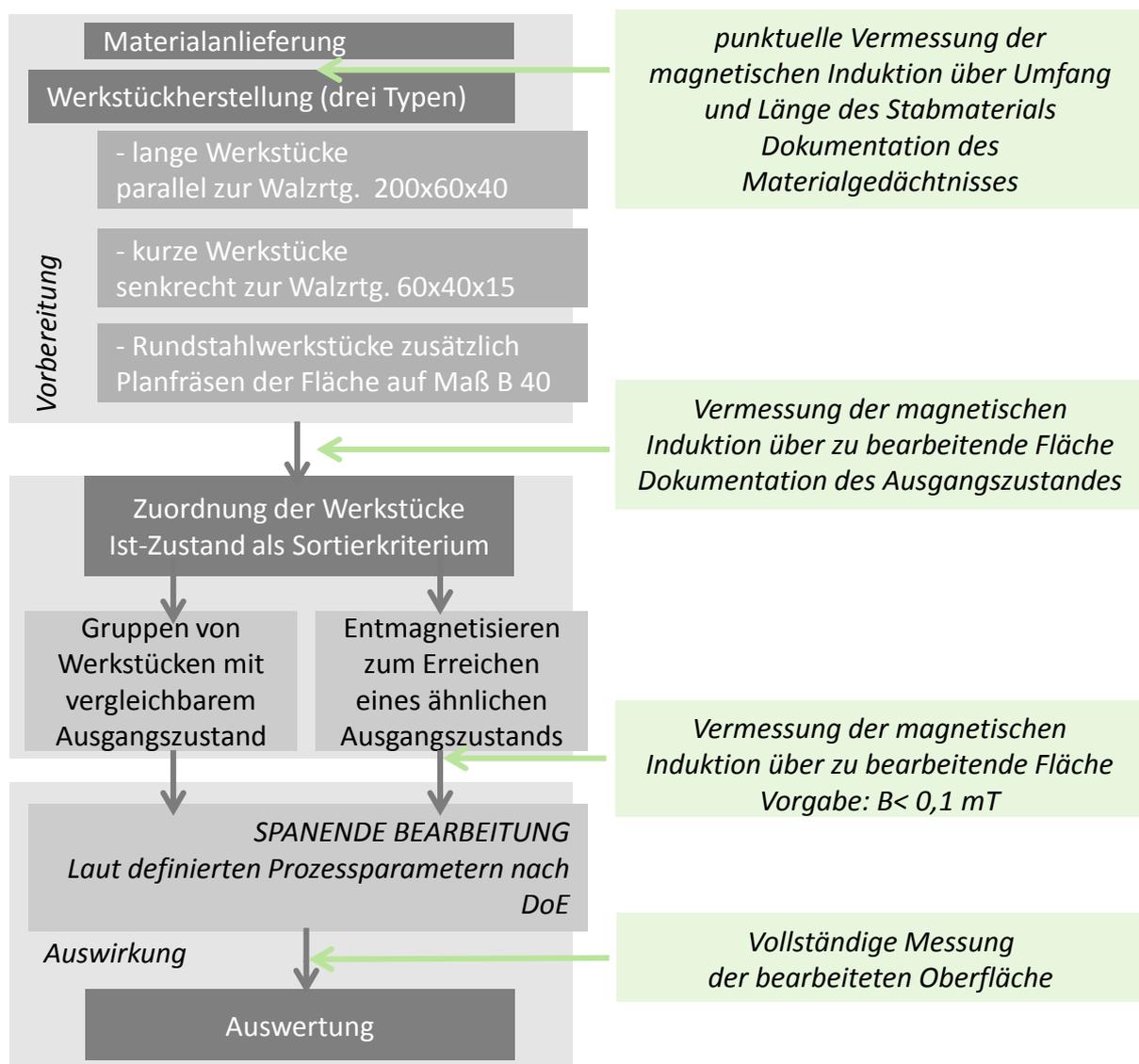


Abbildung 4-1: Ablaufschema der Versuchsdurchführung für alle Werkstoffe

<sup>7</sup> *Metrolab* THM 1176 LF

## 4.2 Versuchstechnik

Die ersten Untersuchungen erfolgten mit einem Magnetometer der Firma *metrolab* THM 1176-low field. Die magnetische Induktion konnte nur punktuell und in einer Achse dokumentiert werden. Es zeigte sich schnell, dass damit die Charakterisierung nicht detailliert genug erfolgen kann. Daher waren der Entwurf und die Realisierung einer automatisierten Messzelle auf der Basis desselben Sensors erforderlich. Damit konnte die Messung der magnetischen Induktion mit dem verwendeten Sensor in alle drei Raumrichtungen und automatisiert über die gesamte Oberfläche erfolgen. Der verwendete Sensor ist mit einer Messgenauigkeit von 1% des gemessenen Wertes von Herstellerseite angegeben und kalibriert. In Abbildung 4-2 ist der Aufbau zu sehen. Zur Entmagnetisierung der Werkstücke wird eine Entmagnetisier-Einheit aufgebaut und ein einheitliches Vorgehen festgelegt, siehe ANHANG G. Eine effiziente Entmagnetisierung ist Voraussetzung, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen. [98] Der Aufbau ist zu sehen in Abbildung 4-2. Die Zerspanung erfolgte auf einer Fräsmaschine des Typs *MAHO* MH 600E2 mit einem 45°-Messerkopf mit einem Durchmesser von 80 mm und fünf Cermet-Schneiden, siehe Abbildung 4-4.

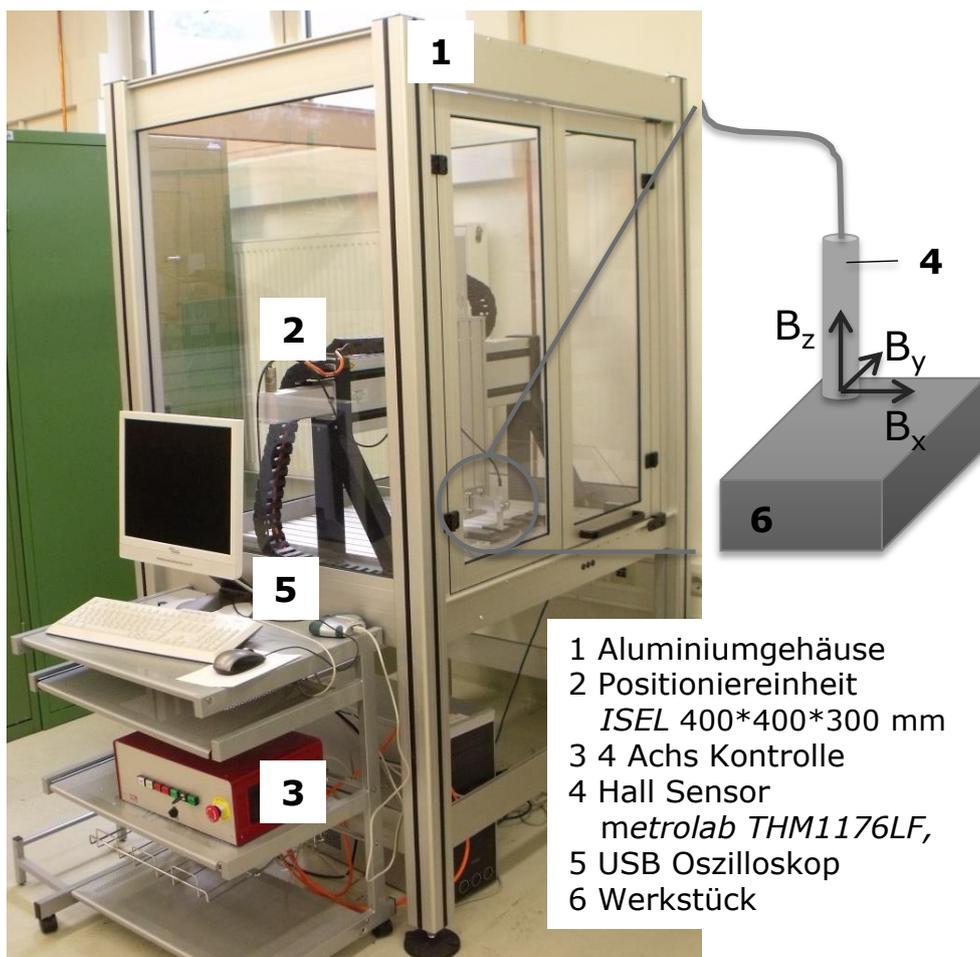


Abbildung 4-2: Ansicht des Messaufbaus zur Messung der magnetischen Induktion [13]

### 4.3 Ablauf der Messungen

Der Abstand zwischen dem Hall-Sensor und der zu untersuchenden Oberfläche ist von großer Bedeutung. Hier liegt ein großes Fehlerpotential der Ergebnisse. Es gibt einen Einfluss der Umgebung unter anderem durch das Erdmagnetfeld und die Wiederholgenauigkeit bei unterschiedlichen Abständen. Nach Herstellerangaben von sogenannten Magnetometern ist aus messtechnischer Sicht neben der Suche eines geeigneten Verfahrens, ein geringer Sensorabstand zur Oberfläche des Bauteils sowie ein korrekter Umgang mit Umgebungsfeldern entscheidend bei der präzisen Bestimmung des sogenannten Restmagnetismus eines Bauteils. [12]

Untersuchungen des Abstands zwischen dem verwendeten Hall-Sensor und der Werkstückoberfläche haben ergeben, dass es notwendig ist, einen möglichst geringen Abstand zwischen Hall-Sensor und Oberfläche zu erreichen, der eine automatisierte Messung noch zulässt. So sind aussagekräftige und reproduzierbare Messwerte zu erhalten. Abbildung 4-3 zeigt auf der linken Seite den Abstand zwischen Sensor und Oberfläche und auf der rechten Seite das Ergebnis eines Vergleichs der mittleren magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit vom Abstand zur Oberfläche. Es ist zu erkennen, dass bei einem Abstand von  $< 0,8 \text{ mm}$  die gemessenen Werte annähernd als konstant betrachtet werden können. Unter anderem haben Su und Chen Versuche zum Abstand zwischen Hall-Sensor und Probe durchgeführt und haben auch aufgezeigt, dass ihre Messwerte am aussagekräftigsten sind, wenn der Abstand zwischen Hall-Sensor und Probe möglichst gering ist. [99]

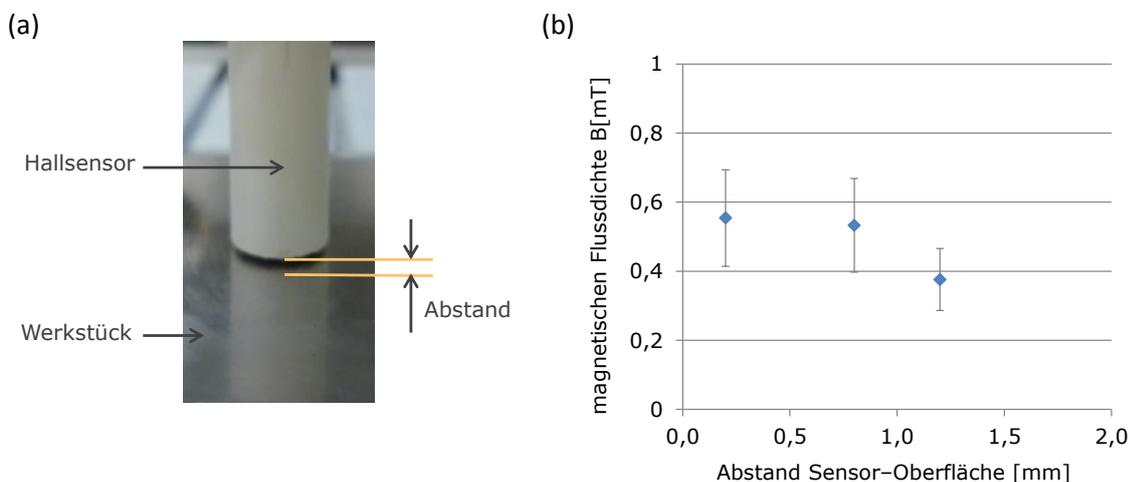


Abbildung 4-3: Abhängigkeit der Messwerte vom Abstand des Sensors zur zu vermessenden Oberfläche [13].

#### 4.4 Untersuchungen des äußeren Magnetfeldes

Auch äußere Magnetfelder, wie sie zum Beispiel durch die Antriebe von Werkzeugmaschinen erzeugt werden, können während der Bearbeitung einen Einfluss auf die Magnetisierung von ferromagnetischen Werkstoffen haben. Die Versuche wurden auf einer Fräsmaschine vom Typ 600E2 der Firma MAHO durchgeführt. Zur Bestimmung des Einflusses des äußeren Feldes der Maschine sind sowohl Messungen im Leerlauf als auch in Vorschubbewegung erfolgt.

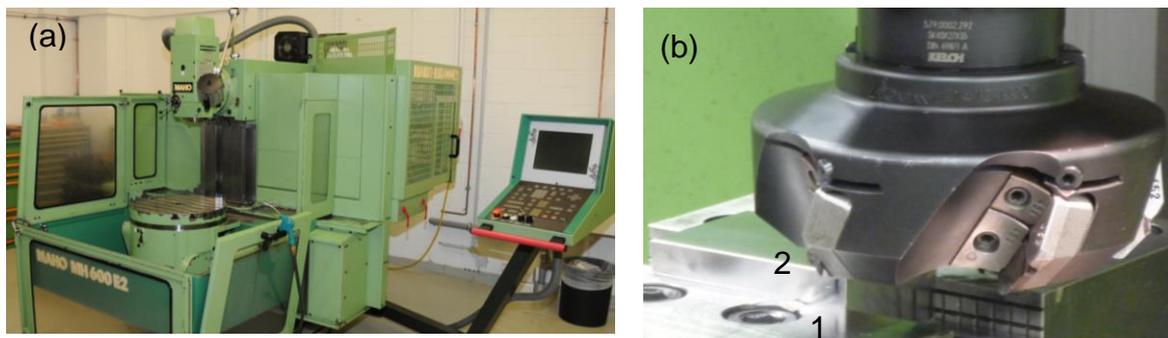


Abbildung 4-4: Fräsmaschine MAHO 600E2 (a) mit Garant 45°Fräskopf mit fünf Cermet-Wendeschneidplatten des Typs SDHW0903 (Cu7725), Messposition 1 und 2 (b)

Tabelle 4-3: Ergebnisse der Messungen an der Maschine an zwei Messpositionen im Vergleich Leerlauf zu Vorschubbewegung

magn. Flussdichte [mT]	Leerlauf		Spindel läuft	Vorschub- bewegung
	1	2	1	2
B	0,1	0,217	0,079	0,127
B <sub>x</sub>	-0,017	0,165	0,035	0,074
B <sub>y</sub>	0,066	-0,061	0,02	0,103
B <sub>z</sub>	0,08	0,128	0,068	0,066

Die Messpositionen sind in die Nähe des Werkzeugs gesetzt, um die Auswirkung auf das Werkstück sowohl vom Werkzeug als auch vom Umfeld zu dokumentieren. Die gemessenen Werte der Flussdichten zeigen auf, dass bei diesem Maschinentyp der Einfluss des äußeren Feldes gering ist. Das heißt, dass das Feld der Maschine selbst also unabhängig von der Position der Bearbeitungsstelle zu betrachten ist. Die aufgenommenen Werte liegen alle im unkritischen, d.h. bis zum bezeichneten entmagnetisierten Bereich. Bei Versuchen auf einem anderen Maschinentyp kann dies andere Auswirkungen haben.

#### 4.5 Untersuchungen von Veränderungen an der Werkzeugschneide

Das eingesetzte Werkzeug wurde schon in Kapitel 2 beschrieben. In der Anwendung ist häufig der Fall anzutreffen, dass Werkzeuge selbst unter der Zerspanung ihre magnetischen Eigenschaften verändern. Abbildung 4-5 (a) zeigt ein typisches Beispiel am Sägeblatt aus dem Labor. Die in den Versuchen zu dieser Arbeit verwendete Wendeschneidplatte zeigt solche Anhaftungen unter keiner der Versuchsbedingungen, Abbildung 4-5 (b).

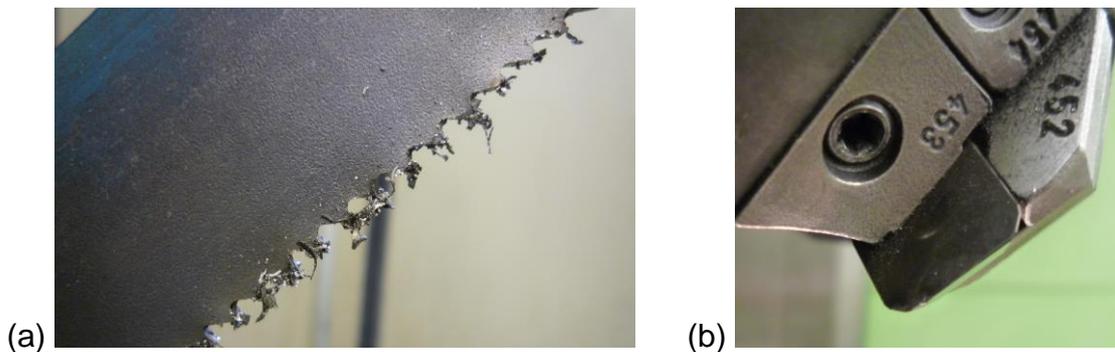


Abbildung 4-5: Anhaftungen nach der Zerspanung an einem Sägeblatt im Labor (a); verwendete Wendeschneidplatte CU7225 nach ISO Norm SDHW0903 (b)

Gemessen wurde dennoch begleitend zu den Versuchen die Veränderung an der Spanfläche der Schneide. Tabelle 4-4 zeigt die Ergebnisse. In allen Untersuchungen konnte eine Tendenz der Zunahme der magnetischen Flussdichte innerhalb eines Versuchsintervalls erkannt werden. Die Änderungen waren jedoch sehr klein innerhalb des Intervalls. Da der Werkzeugverschleiß als Einflussgröße ausgeschlossen werden sollte, wurden regelmäßig neue Schneidplatten verwendet, so dass ein größeres Wachstum der Werkzeugmagnetisierung vermieden wurde.

Tabelle 4-4: Messungen an Wendeschneidplatte an der Spanfläche in einem Untersuchungszyklus beim Vergleich der Zerspanung des Spanvolumens von 4x 0,5 mm zu 1x 2 mm

	magnetische Flussdichte [mT]			
	Betrag $B$	$B_x$	$B_y$	$B_z$
neue Platte	0,0676	-0,0509	-0,0401	0,019
nach 1. Versuch	0,0519	0,05	-0,0066	-0,0117
Versuchsende	0,13	-0,0585	-0,1176	-0,0399

#### 4.6 Versuchsplanung

Die angeführte Versuchsplanung bezieht sich auf die Ergebnisse der Spanbildung in Kapitel 7 und spiegelt nicht die Modellversuche wider. Ziel ist es mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung eine effiziente Planung und Auswertung der geplanten Versuchsreihen mit einem angestrebten geringen Zeit- und Kostenaufwand durchzuführen. Im Rahmen der Arbeit wird die Software *minitab* verwendet. [100, 101]

Dabei wird unterschieden in Werkstücke, die vor der Bearbeitung nicht entmagnetisiert wurden, d.h. mit ihrem eigenen Materialgedächtnis und Eigenschaften in die Bearbeitung gehen, gekennzeichnet mit dem Kürzel NEM – nicht entmagnetisiert. Daneben werden die Werkstücke verwendet, die vor der Bearbeitung auf einen definierten Wert entmagnetisiert werden, gekennzeichnet mit dem Kürzel ENTM - entmagnetisiert.

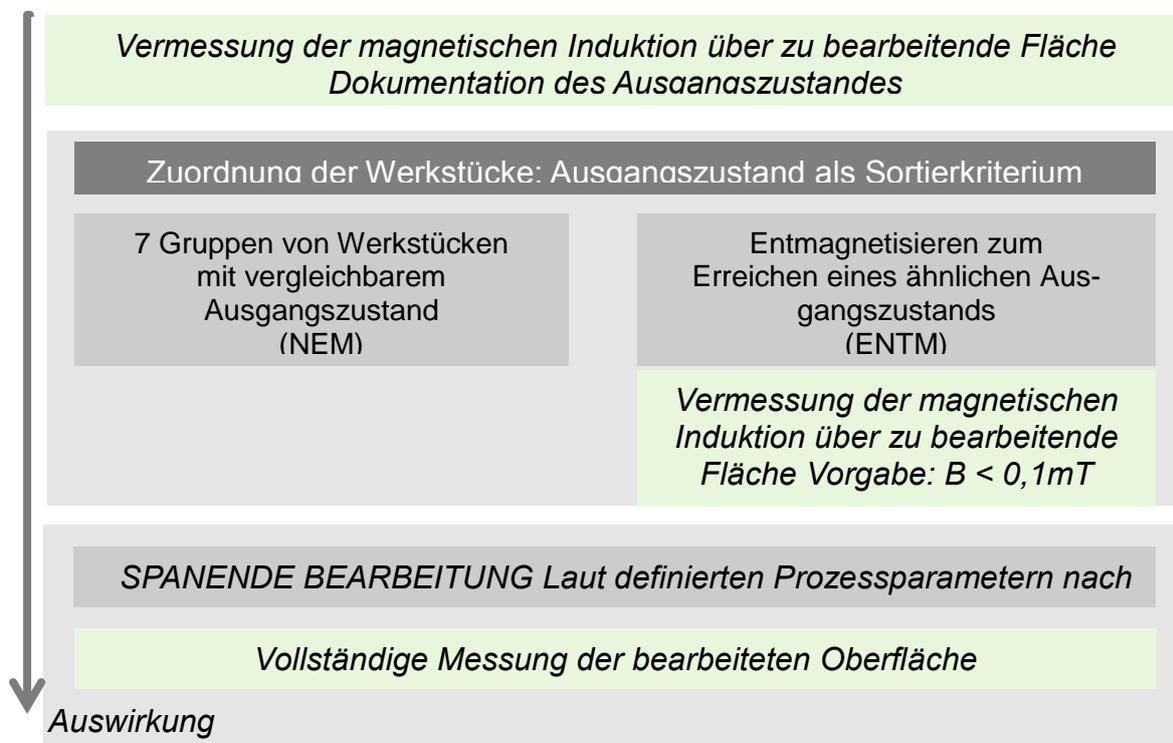


Abbildung 4-6: Darstellung zur Betrachtung der Bearbeitungsverhältnisse, Geometrie in Bezug auf die Bearbeitungsrichtung sowie die Walzrichtung des Werkstoffs aus dem Ausgangsmaterial

Die Auswertung soll die Gewichtung der Parameter, die beim Zerspanvorgang eingesetzt werden, aufzeigen. Neben den bekanntermaßen prozessbestimmenden Faktoren Schnitttiefe, Vorschubgeschwindigkeit und Materialcharge wird eine Wechselwirkungsanalyse angestellt anhand des Einfluss auf die Änderung der magnetischen Eigenschaften im Werkstoff in Bezug auf die magnetische Flussdichte nach der Bearbeitung sowie in Bezug auf den Differenzbetrag der magnetischen Flussdichte vor und nach der Bearbeitung.

Ergänzend beschreibt Abbildung 4-8 die Eingriffsverhältnisse zwischen der Bearbeitungsrichtung zur Walzrichtung. Diese gelten für die Werkstücke der Größe (Länge x Breite) 200 mm x 60 mm. Die Bearbeitung senkrecht zur Walzrichtung erfolgt in drei hintereinander ausgeführten Schritten. Für alle Werkstücke der Größe 60 mm x 40 mm gilt, dass diese in einem Schritt senkrecht zur Walzrichtung bearbeitet sind.

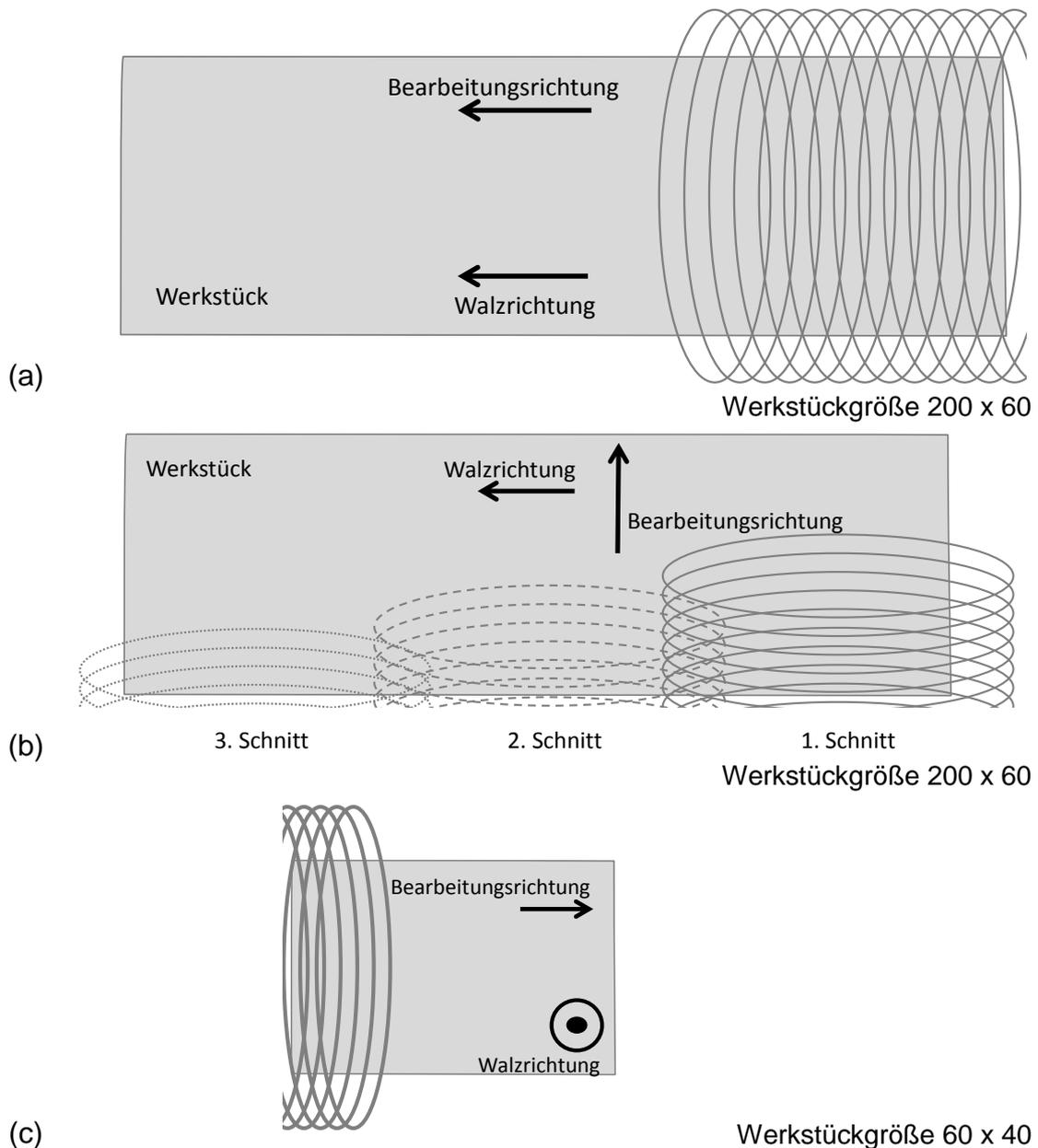


Abbildung 4-7: Beschreibung der Eingriffsverhältnisse zwischen Bearbeitungs- und Walzrichtung

|| Bearbeitungsrichtung parallel zur Walzrichtung, L x B in mm 200 x 60 (a)

⊥ Bearbeitung senkrecht zur Walzrichtung L x B in mm 200 x 60 (b)

⊥ Bearbeitung senkrecht zur Walzrichtung L x B in mm 60 x 40 (c)

Tabelle 4-5 gibt einen Gesamtüberblick über den Umfang der Versuchsdurchführung in Abhängigkeit von der Werkstoff- und Parameterkombination sowie der Probengröße. Die Parameter wurden in einem Spektrum der anwendungsüblichen Werkzeug/Werkstückkombinationen festgelegt.

Tabelle 4-5: Gesamtüberblick der Versuchsdurchführung in Abhängigkeit der Werkstoff und Parameterkombination sowie der Probengröße

		Werkstoff			1.7225		1.3505		1.2080
		Chargenbezeichnung			A	B	C	II*)	X*)
Prozessparameter		$a_p$	n	$v_f$					
Probe LxB	60x40	0,5	800	600	X				
		1	800	600	X	X	X		
		1	800	400	X				
		1	400	300	X				X
	200X60	0,5	416	104			X		X
		0,5	416	312			X		
		0,5	625	156	X	X	X		
		0,5	625	469		X	X		
		0,5	833	208	X				X
		0,5	833	625		X			
		1	416	104			X		
		1	416	312			X		
		1	625	156	X	X	X	X	
		1	625	469	X	X	X		
		1	833	208	X	X			
		1	833	625	X	X			

\*) dient zum Vergleich und zur Verifikation

Die folgenden Ergebnisse zeigen, dass vor allem die Materialcharge einen signifikanten Effekt ausübt sowie die Vorschubgeschwindigkeit, zu sehen als Variation der Drehzahl. Der Einfluss der Schnitttiefe und der Vorschub pro Zahn sind geringer, siehe Abbildung 4-8.

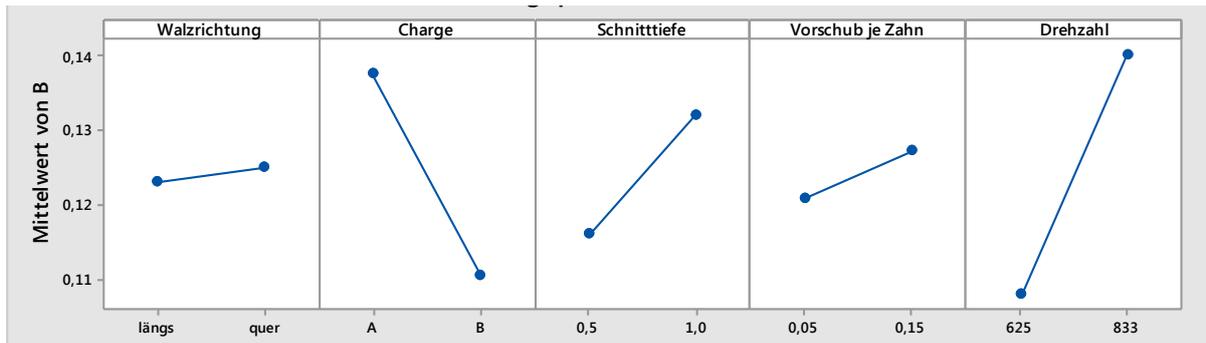
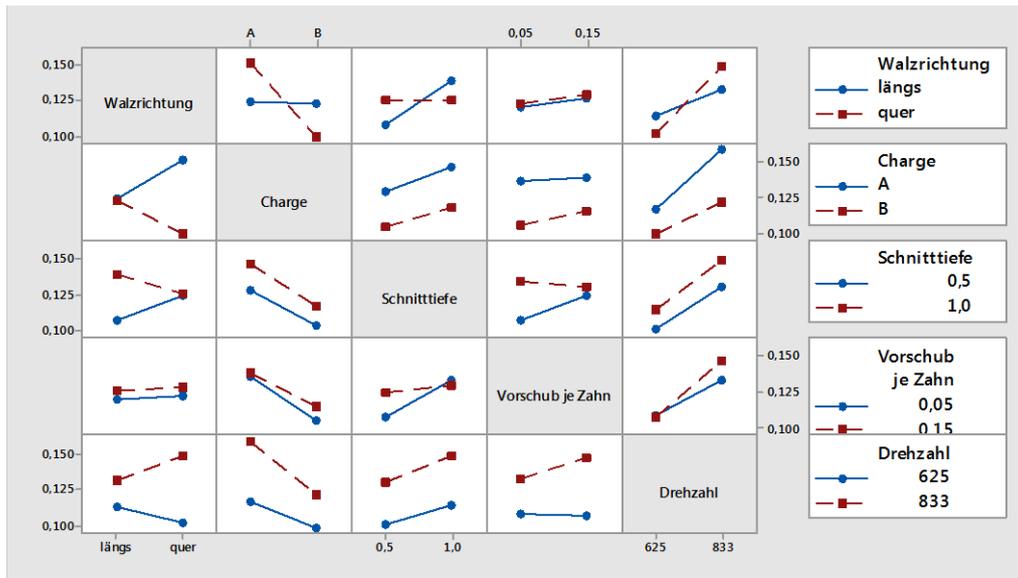
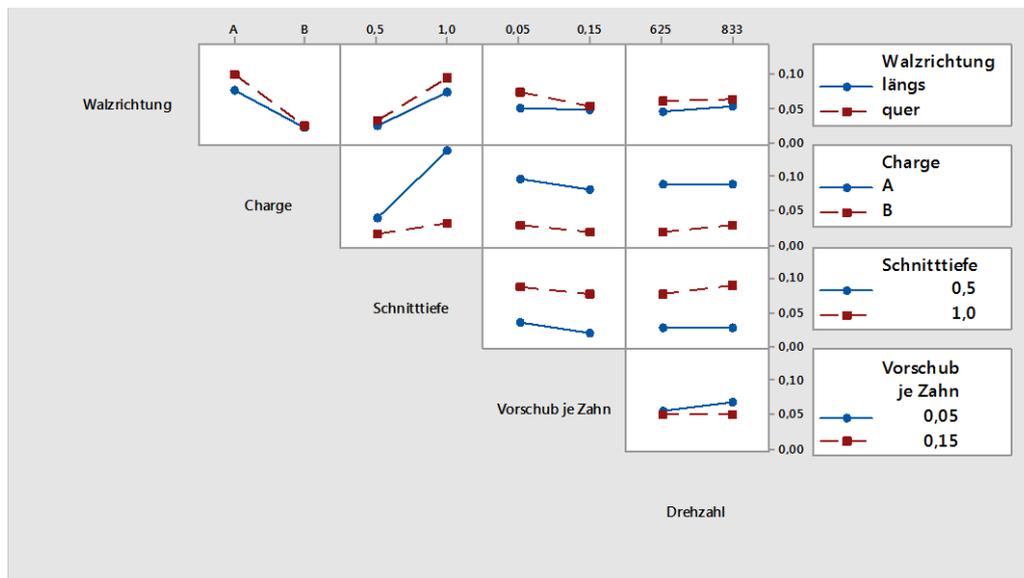


Abbildung 4-8: Haupteffektediagramm für den Werkstoff 1.7225 bei der Auswertung der Mittelwerte nach der Bearbeitung

Bei der Auswertung über die Differenzwerte vor und nach der Bearbeitung, bezeichnet als  $\Delta B$ , zeigt die Auswertung des Haupteffektediagramms dasselbe Ergebnis. Vergleicht man die Wechselwirkungsdiagramme nach der Auswertung über die Datenmittelwert nach der Bearbeitung, hier nur mit  $B$  bezeichnet, Abbildung 4-9 (a) im direkten Vergleich mit den Datenmittelwerten für die Differenzbeträge  $\Delta B$ , Abbildung 4-9 (b), so erkennt man, dass der Einfluss der Walzrichtung in Bezug zur Charge nach der Bearbeitung höhere Effekte aufweist als bei der Betrachtung der Differenzwerte. Die Tendenz, dass die Charge und die Drehzahl den Haupteffekt ausmachen, wird bei beiden Formen der Auswertung deutlich.



(a) Wechselwirkungsdiagramm für B



(b) Wechselwirkungsdiagramm für  $\Delta B$

Abbildung 4-9: Ergebnisse der DoE Auswertung zur Wechselwirkungsanalyse der Chargen A und B des Werkstoffs 1.7225 sowohl für die Parameteranalyse als auch des Chargenvergleichs [66]

## 5 Untersuchungen am Modellsystem

### 5.1 Zusammenhang magnetischer Eigenschaftsänderungen und Verformung

#### 5.1.1 Theoretischer Hintergrund

Bei der Zerspanung herrschen im Werkstück sowohl Zug- als auch Druckkräfte. Der Einfluss von äußerer mechanischer Belastung auf ferromagnetische Werkstoffe ist bekannt als Veränderung der magnetischen Oberflächeneigenschaften. Eine Korrelation zwischen diesen Effekten soll im Rahmen der Untersuchungen am Modellsystem hergestellt werden.

Magnetische Messverfahren zur Bestimmung von Eigenspannungen nutzen abhängig von der Spannungsart, das heißt Zug- oder Druckbelastung, und dem Spannungsbetrag die Amplitudenveränderungen in der Barkhausen-Rausch-Profilkurve, siehe Abbildung 5-1 [49, 102, 103]. Das Mikromagnetische Multi-parameter-Mikrostruktur- und Spannungs-Analyse (3MA) -Verfahren zeigt die Einflüsse von Werkstoffparametern auf die elektromagnetischen Prüfgrößen [49].

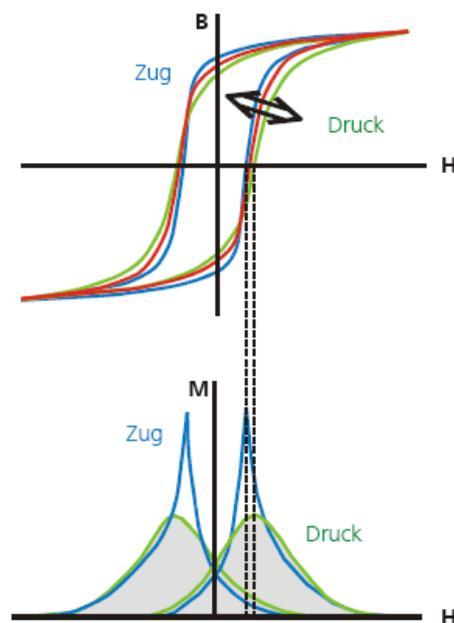


Abbildung 5-1: Lastspannungsabhängigkeit der Hystereseschleife (oben) und der Barkhausen-Rausch-Profilkurve (unten) [49]

Aus der Abbildung ist zu erkennen, dass bei mechanischer Belastung magnetische Signale messbar sind. Dadurch entwickelte in den 90er Jahren Doubov das zerstörungsfreie Prüfverfahren „Metal Magnet Memory Method“ (MMM). Dabei wird die Normal- und Tangentialkomponente des remanenten Magnetfeldes gemessen, um Eigenspannungen oder Gefügeinhomogenitäten sichtbar zu machen. Im Gegensatz zu anderen Messungen zur Spannungsanalyse bietet diese Methode den Vorteil, dass die Messungen zeitlich schneller durchzuführen sind. Da es nicht immer zweifelsfreie Übereinstimmungen zwischen den MMM-Signalen und anderen Mess-

methoden, wie zum Beispiel Ultraschall, gibt, wird die Methode nur zur schnellen und einfachen Überprüfung von großen Bauteilen verwendet. [104]

Auch Su et al. zeigen, dass die Methode in ihrer örtlichen Auflösung nicht immer ausreichend ist [99]. Es werden Proben unter Zug belastet und anschließend mit dem MMM-Verfahren vermessen. Dabei zeigt sich, dass das Maximum beziehungsweise Minimum der Tangentialkomponente mit dem Nulldurchgang der Normalkomponente übereinstimmt. Allerdings stimmen diese nicht immer mit der Einschnürung und dem an dieser Stelle erfolgenden Bruch der Zugprobe überein. [99]

Lihong et al. untersuchen die Korrelation zwischen der Deformation, resultierend aus uniaxialen Zugversuchen, und dem gemessenen magnetischen Signal für drei verschiedene Stähle miteinander. Auch sie benutzen die MMM-Methode, um das Magnetfeld zu messen. Es zeigt sich, dass alle drei Stähle ähnliche Muster aufweisen. Allerdings unterscheiden sich die Messkurven stark in ihrem Betrag. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Kurven im elastischen Bereich jeweils mehrere Maxima und Minima durchlaufen und erst im Bereich der plastischen Deformation nahezu lineare Verläufe annehmen. Erst beim Bruch weicht das Signal wieder stark von diesem nahezu linearen Verlauf ab. [105]

Der Vorgang der Entstehung des nach außen nicht mehr neutralen magnetischen Feldes unter mechanischer Belastung wird sowohl bei Bao et al. als auch bei Lihong beschrieben. Die Domänen, deren magnetische Richtung der Belastungsrichtung ähnelt, drehen sich in die leicht zu magnetisierende Richtung. Im Fall der mechanischen Belastung entspricht dies der Belastungsrichtung. Bei steigender mechanischer Spannung beginnen immer mehr Domänen in ihrer Richtung zu rotieren. Der maximal zu erreichende Zustand ist, wenn alle Domänen sich in die gleiche Richtung gedreht haben, siehe Abbildung 5-2. [105], [106] Zu Beginn liegt eine willkürliche Verteilung der Richtungen der magnetischen Felder in den Domänen im Ausgangszustand vor (a). Diese drehen sich unter der mechanischen Spannung in die leicht zu magnetisierende Richtung (b). Bei weiter steigender Spannung drehen sich die Domänen weiter, bis maximal alle Domänen in die gleiche Richtung zeigen (c).

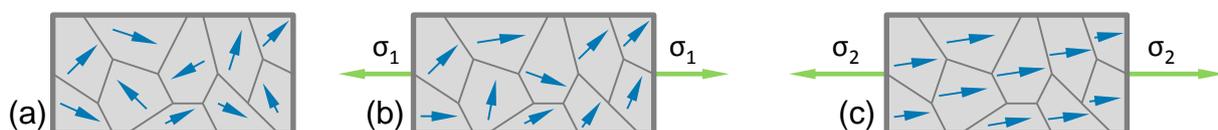


Abbildung 5-2: Orientierung der Domänen mit steigender Spannung nach [106]

Bao und Zhang untersuchen den Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit bei Zugbelastung auf die magnetischen Eigenschaften bei ferromagnetischem Stahl. Sie beschreiben, dass ein Effekt auf das magnetische Feld durch verschiedene Belastungsgeschwindigkeiten sichtbar ist. [107] Die Messung der magnetischen Oberflächeneigenschaften vor der Zugbelastung im Vergleich mit Proben nach der Zugbeanspruchung sind auch ein Aspekt im Rahmen der Arbeit Herter [108].

### 5.1.2 Versuche unter Zug- und Druckbelastung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Zugversuche bis in den Bereich der plastischen Deformation ausgeführt, um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse der beiden Werkstoffchargen zu erreichen. Die Zugprobenherstellung hat eine thermische Veränderung in der Gefügestruktur hervorgerufen, zu sehen in Abbildung 5-3. Die Messung der magnetischen Oberflächeneigenschaften vor der Zug- beziehungsweise Druckbelastung kann daher nur als vergleichende Untersuchung betrachtet werden.

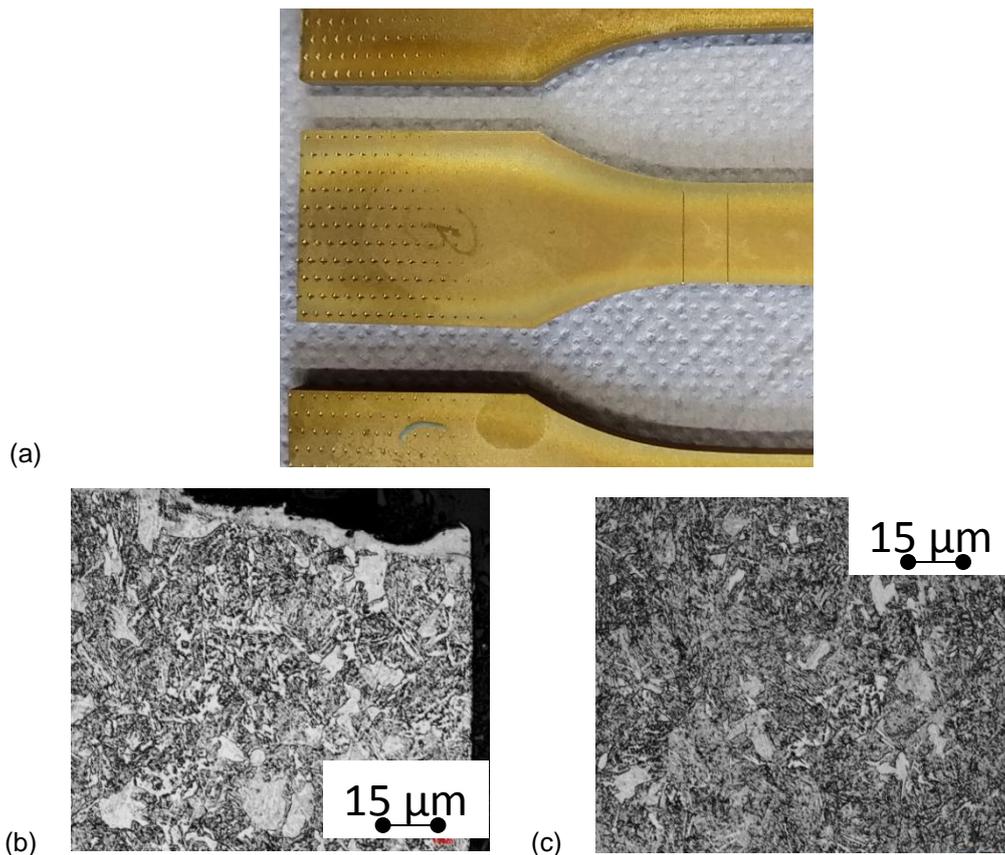


Abbildung 5-3: Einspannbereich der Zugproben Charge B (a),  
Darstellung der Gefügestruktur Zugprobe Charge A (b) und Grundwerkstoff Charge A (c)

In den Abbildungen Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5 sind die Messwerte der magnetischen Flussdichte  $B$  über der ganzen Probenoberfläche dargestellt, gemessen als Anteile der drei Raumrichtungen  $B_x$ ,  $B_y$  und  $B_z$  sowie als Betragsmittelwert  $B$ . Die Ergebnisse der Charge B sind im ANHANG G zu finden.

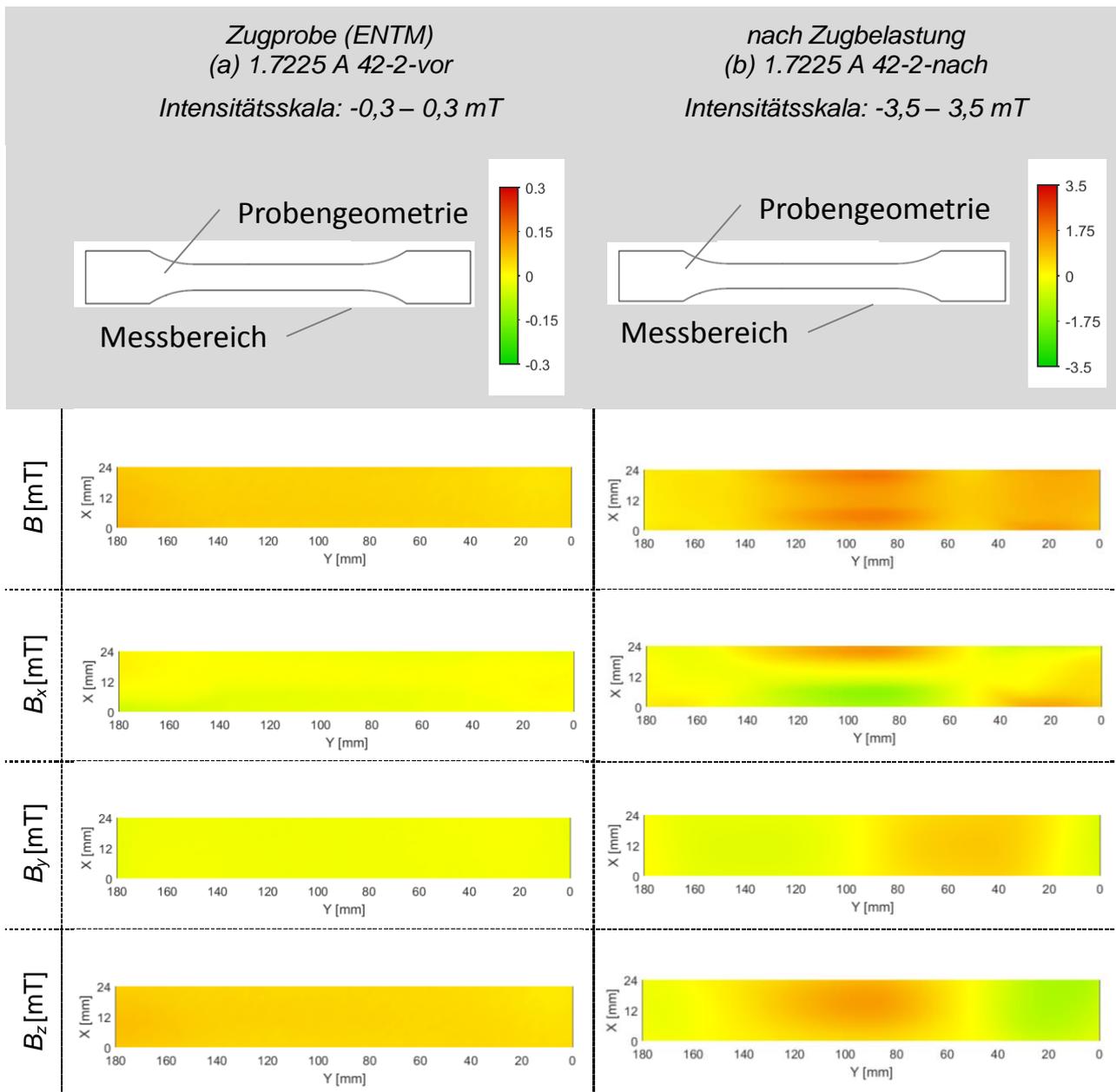


Abbildung 5-4: Vergleich der Zugproben beispielhaft Werkstoff 1.7225\_Charge A vor Zugbelastung, nach Entmagnetisierung (a); nach Zugbelastung (b)

Abbildung 5-4 zeigt im direkten Vergleich die Zugprobe vor und nach der Zugbelastung. Es ist zu erkennen, dass im Bereich der Einspannung der Proben in den Prüfstand eine deutliche Zunahme der magnetischen Flussdichte zu detektieren ist. Diese Änderung entsteht durch eine Druckbelastung, deren Höhe nicht eindeutig zu bestimmen ist, es wird bedienerabhängig Kraft aufgebracht. Ein Vergleich der gemessenen Werte ist nicht mit der Belastungshöhe zu korrelieren.

Die Charge B wird in Abbildung 5-5 nach der Zugbelastung gezeigt. Die Einspannung hinterlässt auch hier die größte Veränderung der magnetischen Flussdichte und auch mit einer höheren Intensität als bei der Charge A. Das Werkstück zeigt einen typischen Verlauf eines Magnetfeldes in Z-Richtung.

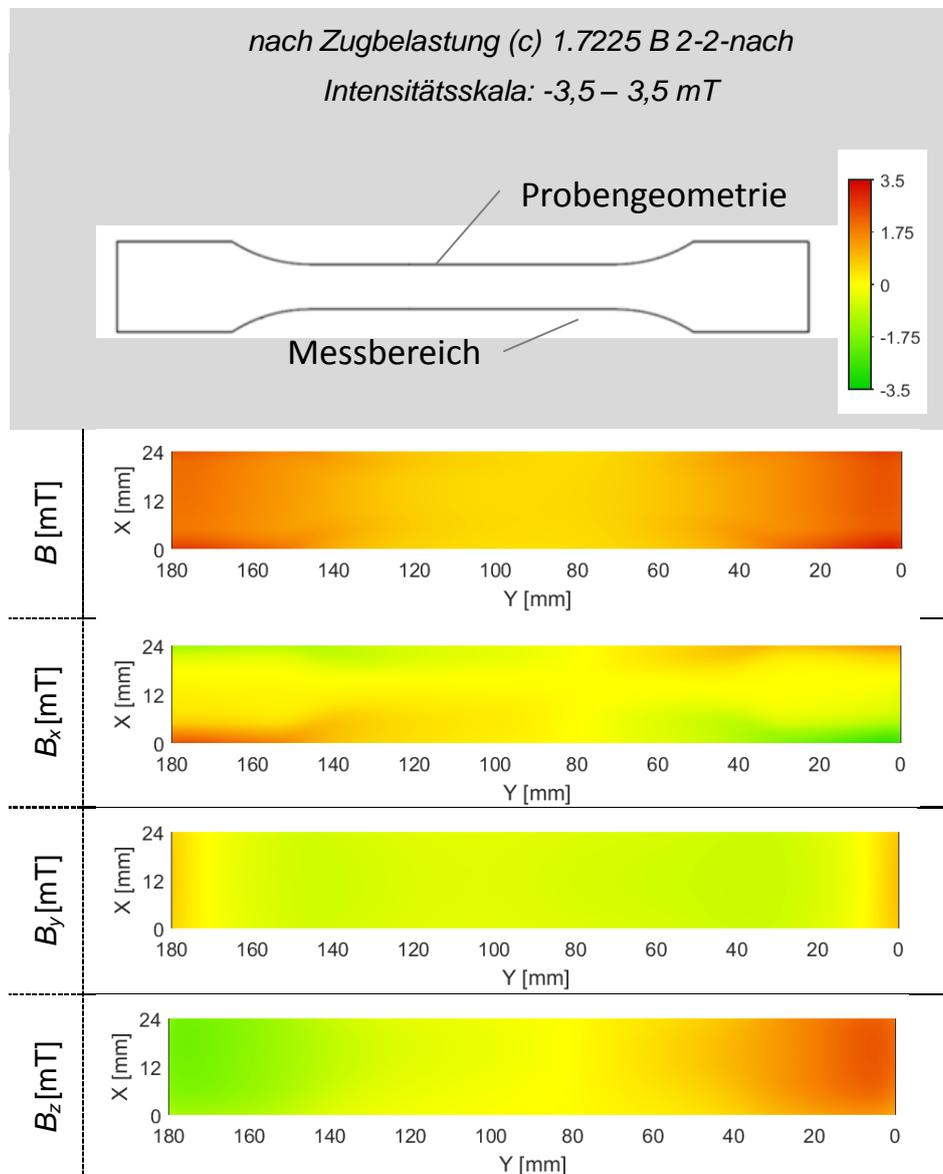


Abbildung 5-5: Vergleich der Zugproben nach Zugbelastung des Werkstoffs 1.7225\_Charge B (c)

Zur Überprüfung dienen Versuche mit vergleichenden Druckproben mit von Hand geführter Sägebearbeitung. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5-6 exemplarisch in  $B_x$ -Richtung nach Entmagnetisierung (oben) und nach Bearbeitung mit seitlicher Einspannung (unten) aufgezeigt. Beim Vergleich der druckbelasteten Proben zeigt sich bei Betrachtung der Oberflächenscans in allen drei Raumrichtungen, eine Veränderung von ‚vor‘ zu ‚nach‘ der Belastung durch eine Verschiebung der Felder und eine Zunahme der magnetischen Flussdichte. Die Messwerte sind im ANHANG G als Mittelwerte im Vergleich zu finden. Die Werte selbst befinden sich im einstelligen  $mT$ -Bereich. Auffällig ist auch hier die Verschiebung der Felder innerhalb des Werkstoffs zu wechselseitigen Polen, die bei Betrachtung der jeweils einwirkenden Kräfte eher

den Druckbelastungen durch die Einspannung als der Druckbelastung durch die Bearbeitung mit dem handgeführten Sägeschliff zugeschrieben werden müssen. Diese Wechslerscheinungen bestätigen die Ergebnisse aus früheren Untersuchungen von Bähre et al [67].

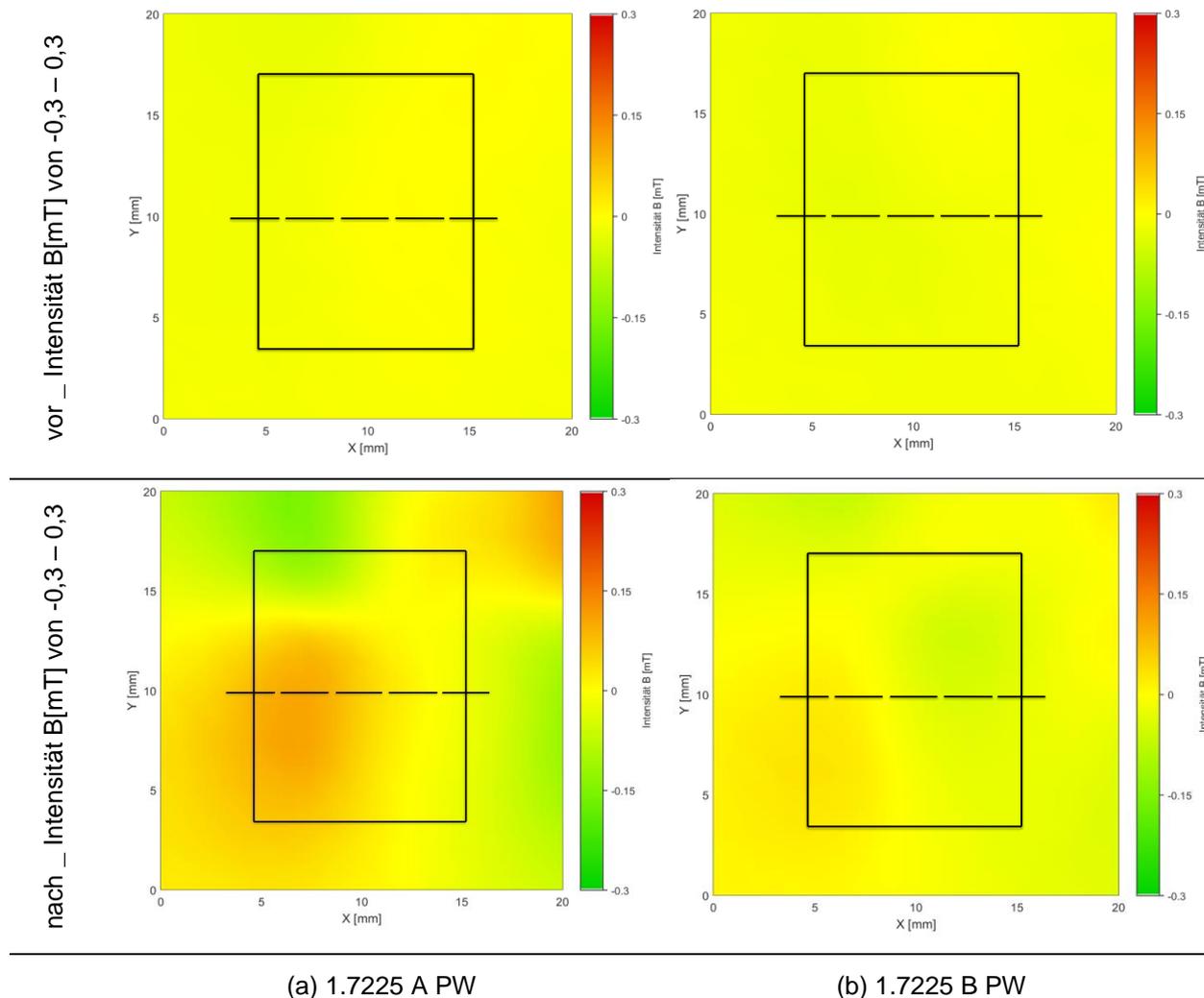


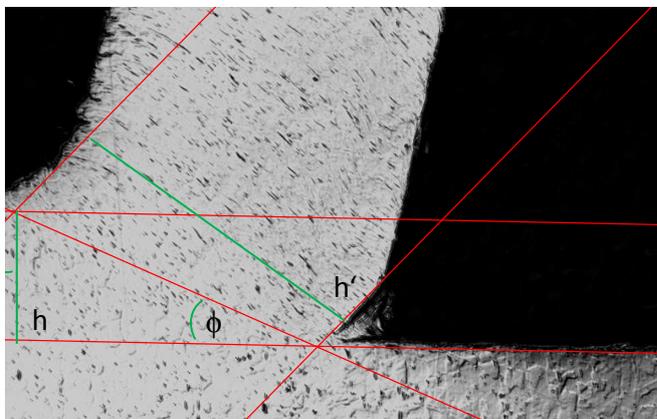
Abbildung 5-6: Intensität der magnetischen Flussdichte über der Probenoberfläche vor und nach der Einspannung mit Sägeschliff zur Druckausübung in X-Richtung, links Charge A parallel zur Walzrichtung(PW) (a), Charge B parallel zur Walzrichtung(PW) (b) des Werkstoffs 1.7225

Als Fazit zeigt sich, dass alle Veränderungen aus den Einspannungen niedriger sind als die gemessenen Einflüsse aus der Bearbeitung selbst. Der Sägeschliff ist zu vernachlässigen, da nicht konkret definierbar und auch keinen realen Prozess darstellt. In Summe sind die Veränderungen durch die Einspannungen im kleinen  $mT$ -Bereich. Es ist davon auszugehen, dass die Druckkraftwirkung der Schneide einen Anteil an der Gesamtveränderung hat, das heißt unter anderem nicht nur die Deformation durch den Abtrag beziehungsweise die Spanbildung.

## 6 Einfluss des Legierungselements Schwefel

Legierungselemente dienen der gezielten Einstellung von Werkstoffeigenschaften schon bei der Stahlerzeugung. Ein steigender Schwefelgehalt führt durch die Entstehung von Sulfidzeilen zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften. Hingegen werden bei Untersuchungen zum Drehen und Tiefbohren schwefelarmer Stähle der Beitrag des Schwefelgehalts und eine gleichmäßige Verteilung der Sulfide im Werkstoff zur besseren Zerspanbarkeit beschrieben. Somit kann schon bei der Stahlherstellung durch die Einstellung geregelter Schwefelgehalte Einfluss auf den Bearbeitungsprozess und somit auf die Oberflächengüte genommen werden. Den Vorteilen im Prozess stehen Nachteile bei den mechanischen Werkstoffeigenschaften gegenüber, die aus dem negativen Einfluss sogenannter Sulfidzeilen entstehen. Der erhöhte Schwefelgehalt vermindert die Reibung an der Werkzeugschneide, was nicht nur die Oberfläche beeinflusst, sondern auch den Werkzeugverschleiß senkt und so die Werkzeugstandzeit erhöht. Außerdem treten bei spanabhebender Bearbeitung durch verfeinerte Mangansulfide günstige Spanformen auf. Das bedeutet bei geringem Schwefelgehalt kommt es zu einer Verschlechterung des Bruchverhaltens der Späne. [85] Dies ändert auch etwas an den auftretenden Kräften während der Bearbeitung. Im Modellversuch werden Spanuntersuchungen jeweils für beide Chargen der Werkstoffe 1.7225 und 1.3505 bei gleichen Prozessbedingungen beim Drehen durchgeführt. Festgelegt wurden folgende Parameter auf der Drehmaschine *Praktikant 160* der Firma *WEILER* mit der Werkzeugschneide *P25M Komet Unisix* mit einem Winkel von  $12^\circ$  bei einem Vorschub von  $0,063\text{ mm}$ , einer Schnittgeschwindigkeit von  $157\text{ m/min}$  und einer Schnitttiefe von  $1,5\text{ mm}$ . In der Literatur ist keine direkte Korrelation zwischen dem Legierungsanteil des Schwefels und der magnetische Materialeigenschaft bekannt [87]. Die Werkstoffe mit höherem Schwefelgehalt in dieser Arbeit weisen auch eine höhere magnetische Materialeigenschaft, gemessene Permeabilität, auf, siehe 3.2.3.

In Abbildung 6-1 ist die Spanbildungszone zu sehen, dargestellt als Spanwurzelaufnahme. Sie beschreibt mit Hilfe des Modells der Scherebene, nach Klocke und anderen, die Berechnung zerspanungsrelevanter Größen.[40]



Ermittlung der Parameter:

$h$  - Spanndicke, Abstand der Oberflächenbezugslinien

$h'$  - Spandicke, im Bereich der Scherebene als grüne Linie

$\phi$  - realer Spanwinkel

Zusammenhang:

größerer Spanwinkel

bewirkt eine geringere Spanstauchung aufgrund eines geringeren Drucks und Reibungswiderstandes des Spans beim Abgleiten

Abbildung 6-1: Spanbildungszone mit Markierung und Beschreibung der Parameter

Die Spanungsdicke  $h$  ergibt sich aus dem orthogonalen Schnitt als Abstand der beiden Oberflächenbezugslinien. Die Spandicke  $h'$  bildet sich durch die primäre Scherzone im Bereich der Schneidkante aus. Die Spanbreite  $b$  beschreibt die reale Breite des Spans im Verlauf, für die beiden Chargen im Vergleich in Abbildung 6-2. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-2 zu sehen. Der Vergleich der Späne zeigt für den Werkstoff 1.7225, dass bei einem höheren Schwefelgehalt die Spanbreite, bezeichnet mit  $b'$  deutlich zunimmt. Die Spandicke  $h'$  ist für den Werkstoff 1.7225 nahezu identisch. Das Spanbild zeigt bei gleichen Parametern die Spanstauchung an und es lässt Rückschlüsse auf den Verformungsgrad unter Bearbeitung zu. Eine unterschiedliche Spandicke und -breite sind eine Bestätigung für unterschiedliche Kräfte im Prozess. Niedrigere Spanbreiten und Spandicken bedeuten höhere spezifische Kräfte, das heißt größere mechanische Belastungen. Diese führen zu höheren magnetischen Veränderungen, wie im umgekehrten Villari-Effekt beschrieben, siehe Kapitel 2.3. Charge A weist schmalere Spanbreiten und Spandicken auf, der Werkstoff wird unter der Bearbeitung stärker belastet. Für die Charge B gilt, dass die Schnitttiefe und die Spandicke annähernd identisch sind. Dies lässt Rückschlüsse zu auf die bessere Zerspanbarkeit des Materials durch den höheren Schwefelgehalt und wie in Kapitel 7.1.2 beschrieben, führt dies zu einer besseren Oberfläche. Es ist mit kleineren Kräften zu rechnen, die einen geringeren Einfluss auf die Änderung der magnetischen Eigenschaften haben.

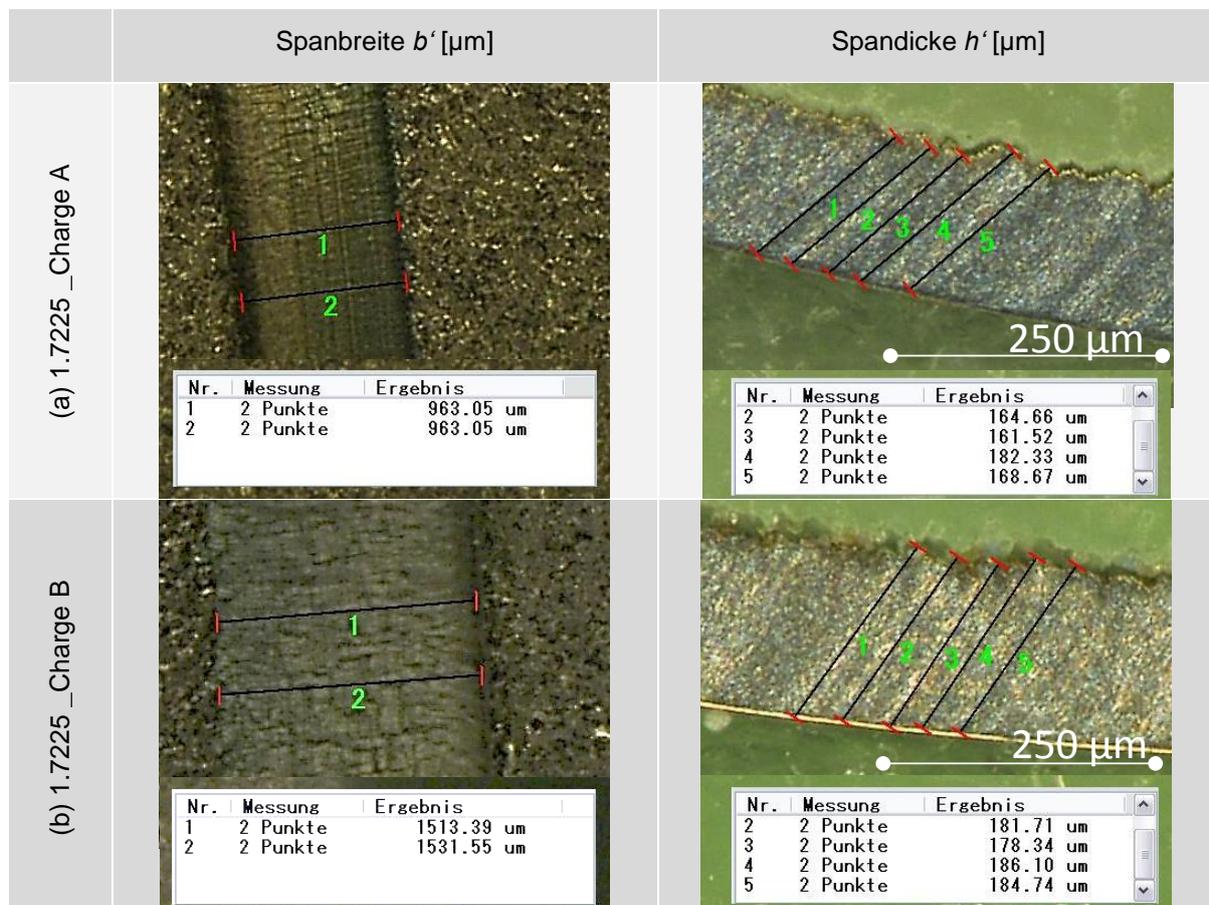


Abbildung 6-2: vergleichende Darstellung der Späne für den Werkstoff 1.7225 Chargenvergleich (a) – (b) bei gleichen Parametern

## 7 Eigenschaftsänderungen durch spanende Bearbeitung

Die Ergebnisse in der Spanbildung sind unterteilt in drei Bereiche. Der erste Abschnitt bietet einen Gesamtüberblick über die maximalen, gemessenen Werte der magnetischen Flussdichte sowohl als Betrag über alle drei Raumrichtungen als auch in Einzelausrichtung. Der Vergleich der Variation der Prozessführung stellt im zweiten Abschnitt den Schwerpunkt dar. Es werden sowohl einzelne Prozessparameter variiert als auch der Vergleich der Bearbeitung parallel oder senkrecht zur Walzrichtung betrachtet. Der dritte Abschnitt beschreibt den Einfluss entlang der Schnittbewegung einer Wendeschneidplatte vergleichend zu Beginn der Bearbeitung und im Eingriff über die gesamte Werkstückbreite.

### 7.1 Überblick und Darstellung der Ergebnisse

#### 7.1.1 Parameter- und Werkstoffvergleich

Der Gesamtüberblick über die maximalen, gemessenen Werte der magnetischen Flussdichte sowohl als Betrag über alle drei Raumrichtungen als auch in Einzelausrichtung stellt den Umfang der Untersuchungen dar. Tabelle 7-1 bezeichnet auf der einen Seite den Werkstoff sowie die verwendeten Chargen als auch die verwendeten Prozessparameter in Abhängigkeit von der Werkstückgröße bei der Bearbeitung. Der Überblick bietet eine erste Einschätzung des Werkstoffeinflusses sowie des Einflusses der Vorbehandlung, das heißt ob das Werkstück direkt weiterverarbeitet oder vor der Bearbeitung entmagnetisiert wird.

Tabelle 7-1: Überblick über alle Versuchsreihen der maximalen bzw. der gemittelten magnetischen Flussdichte sowohl als Betrag  $B$  als auch in Z-Richtung  $B_z$  in Abhängigkeit von Versuchsdurchführung, Werkstoff und Parameterkombination sowie der Probengröße und dem Entmagnetisierungszustand

		Werkstoff				1.7225		1.3505		X12Cr210			
		Chargenbezeichnung				A	B	C	D*)				
Prozessparameter	$a_p$	n	$v_f$	ENTM/ NEM **)	magnetische Flussdichte [mT]								
					$B_z$	B	$B_z$	B	$B_{zmax}$	$B_{max}$	$B_z$	B	
Werkstückgröße LxB in mm	60x40	0,5	800	600	NEM	0,706	0,958						
					ENTM	0,532	0,732						
		1	800	600	NEM	0,715	0,837	0,727	1,041	0,737	0,891		
					ENTM	0,392	0,505	0,406	0,751	0,129	0,130		
		1	800	400	NEM	0,68	0,827						
					ENTM	0,581	0,858						
	1	400	300	NEM	1,02	1,341					0,345	0,408	
				ENTM	0,405	0,627					0,217	0,247	
	200x60	Ausgangszustand, nach Sägen				3,139	3,869	2,258	2,685				
		0,5	416	208								0,154	0,167
					ENTM	1,042	1,191						
		1	625	156			0,552	0,580					
									0,439	0,563			
		1	833	625	ENTM	0,512	0,773	0,366	0,421				
NEM					3,212	4,097	2,180	2,585					

Das komplexe Parameterfeld ist mit den Ergebnissen in Abbildung 7-1 zusammengefasst. Dargestellt ist der Werkstoff- und Parametervergleich der maximalen Betragswerte der magnetischen Flussdichte  $B$  in  $mT$  für Werkstücke der Größe  $60 \times 40$  mm bei jeweils gleichen Prozessparametern pro Werkstück. Zum einen ist zu erkennen, dass es für alle vier Werkstoffe eine Differenz zwischen der Bearbeitung bei denselben Prozessparametern nach Entmagnetisierung und direkter Bearbeitung auf Basis des Ausgangszustands gibt. Beim Werkstoff 1.3505 ist dies mit einer Differenz von  $0,75 mT$  am stärksten ausgeprägt. Bei allen Werten handelt sich um Mittelwerte über die Proben bei gleicher Bearbeitung. Der Einfluss der Prozessparameter ist für den Werkstoff 1.7225 Charge A dargestellt. Bei gleicher Schnitttiefe und Halbierung der Drehzahl und des Vorschubs steigt das Maximum der magnetischen Flussdichte auf einen Wert von  $1,545 mT$  im Vergleich zu den Standardparametern der Werkstoff-Werkzeug-Kombination mit einem Maximum von  $0,871 mT$ .

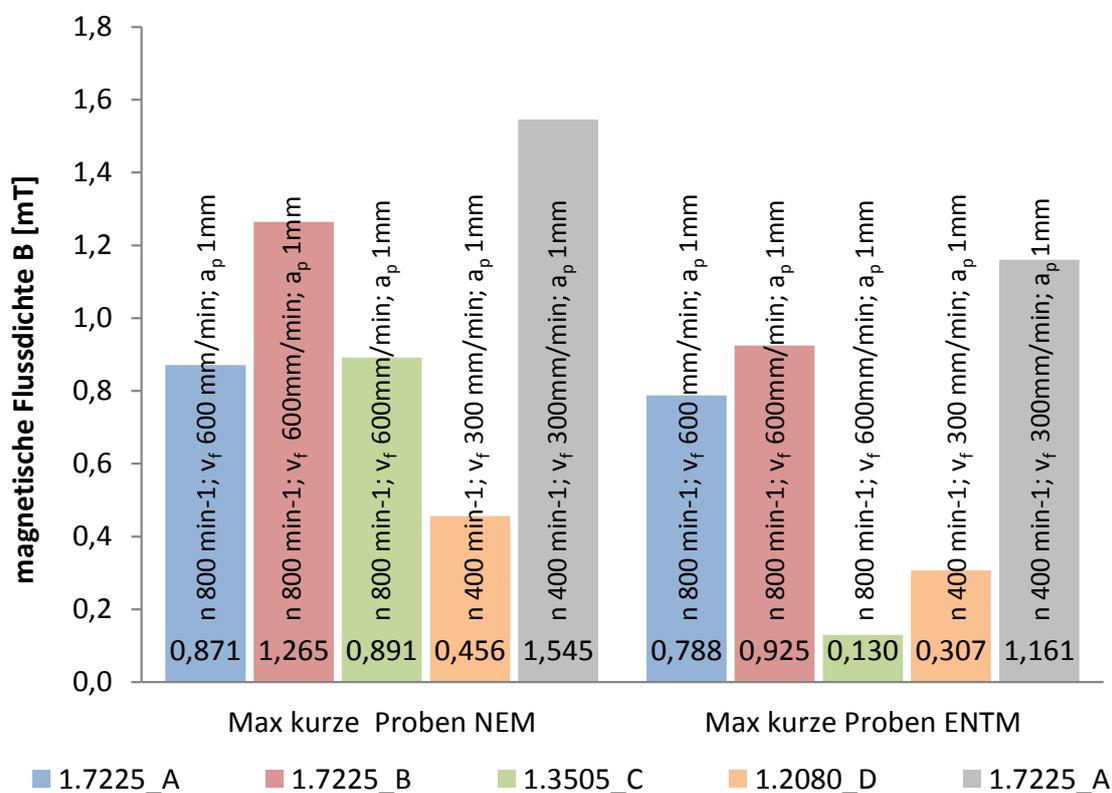


Abbildung 7-1: Vergleich des Ausgangszustand für Werkstücke der Größe  $60 \times 40$  mm bei jeweils gleichen Prozessparametern der Bearbeitung pro Werkstück durch Auftrag der maximalen Betragswerte der magnetischen Flussdichte, NEM - nicht entmagnetisiert, ENTM - entmagnetisiert

Die Prozessparameter ergeben sich aus der Werkstoff-Werkzeug-Kombination, die die Materialeigenschaften wie Härte und Zähigkeit berücksichtigen. Es zeigt sich im Vergleich der Werkstoffe 1.7225 Charge A und 1.2080 Charge D dass sich auch die magnetischen Eigenschaften bei nicht idealen Bearbeitungsparametern der Werkstoff-Werkzeug-Kombination deutlich erhöhen, hier um das 3-fache.

### 7.1.2 Vergleich der Oberflächengüte

Die Zerspanbarkeit und damit verbunden, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, die Oberflächengüte als ein Ergebnis der Spanbildung berücksichtigt den Zusammenhang zwischen Bearbeitungsverfahren, Schneidstoff und Schnittbedingungen [36]. Bei der Betrachtung der Oberflächengüte des Werkstoffs 1.7225 nach der Bearbeitung unter der vergleichenden Berücksichtigung von Chargenzugehörigkeit und magnetischem Ausgangszustand fällt auf, dass im Ausgangszustand kein Unterschied zwischen den Chargen zu erkennen ist. Während nach der Entmagnetisierung der Unterschied zwischen den Chargen groß wird. Bei Charge A ändern sich die Werte zwischen dem Ausgangszustand und entmagnetisiertem Zustand kaum, hingegen sind die Änderungen bei Charge B auffällig. Die Kennzahlen ergeben sich als Mittelwert aus je drei Messungen pro Werkstück bei fünf Werkstücken pro Versuchsreihe. Eine mögliche Erklärung ist bei der Korrelation des Schwefelgehalts in den Chargen zu suchen, siehe Kapitel 6. Der Unterschied liegt bei Charge B dreimal so hoch wie bei Charge A. Durch einen höheren Schwefelgehalt, vermindert sich die Reibung an der Werkzeugschneide, dies kann zu einer besseren Oberflächengüte führen. Tabelle 7-2 und Abbildung 7-2 zeigen dies.

Tabelle 7-2: Vergleich der Oberflächengüte nach der Zerspanung des Werkstoffs 1.7225 bei gleichen Prozessparametern  $v_f$ :  $600 \text{ m min}^{-1}$ ,  $n$ :  $800 \text{ min}^{-1}$ ,  $a_p$ :  $1 \text{ mm}$  im Chargenvergleich

	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]		$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]		$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
<b>A – ENTM</b>	0,883	0,108	5,304	0,644	5,637	0,624
<b>B – ENTM</b>	0,370	0,012	2,042	0,073	2,277	0,257

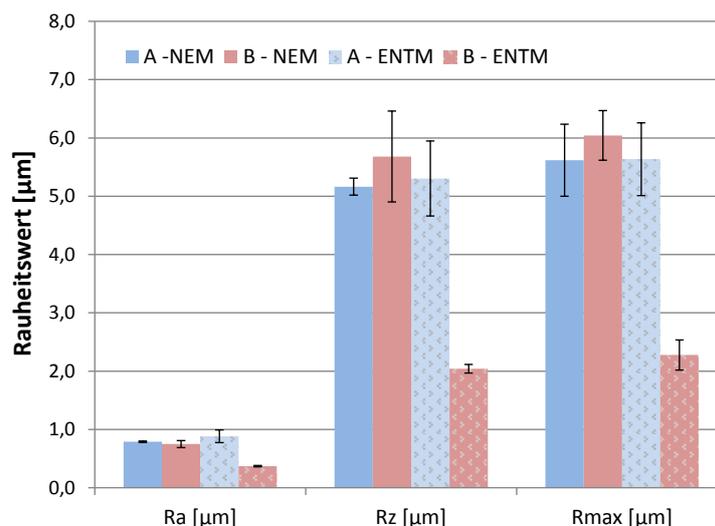


Abbildung 7-2: Vergleich der Oberflächengüte bei gleicher Parameterauswahl des Werkstoffs 1.7225 im entmagnetisierten (ENTM) und nicht-entmagnetisiertem (NEM) Zustand.

### 7.1.3 Variation Schnitttiefe

Bei der Variation der Schnitttiefe zeigt sich sowohl bei Werkstücken der Größe 200 mm x 60 mm als auch der Größe 60 mm x 40 mm, dass mit zunehmendem Spanvolumen die Änderung der magnetischen Flussdichte zunimmt, siehe Abbildung 7-3 und Abbildung 7-4. Tabelle 7-3 zeigt die Messwerte. Zum einen sind die Mittelwerte der magnetischen Flussdichte über der gesamten Oberfläche zu sehen und zum anderen die Minima und Maxima einzelner Messpunkte der negativen oder positiven Magnetfelder auf der Oberfläche.

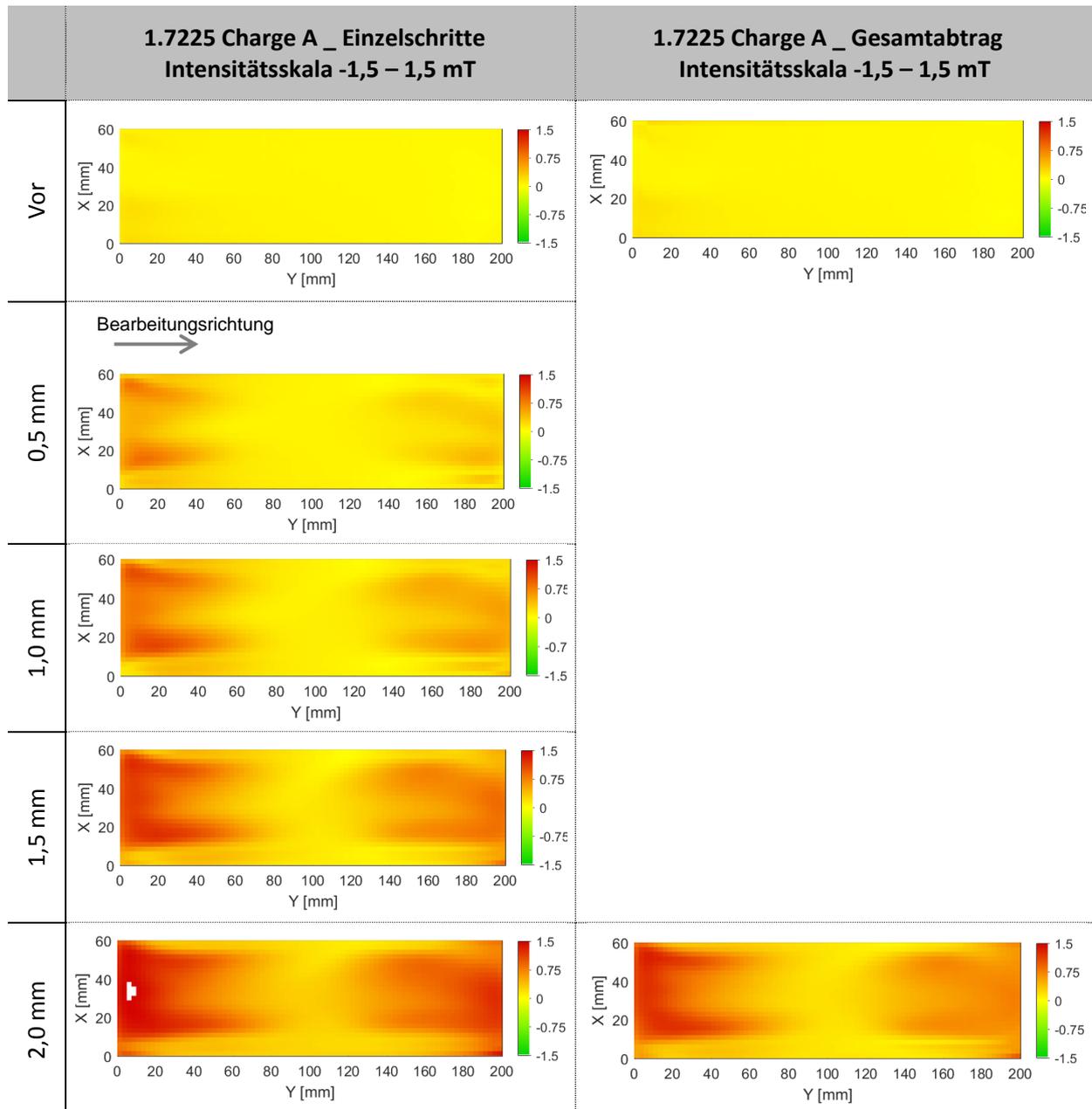


Abbildung 7-3: Vergleich der Oberflächenscans des Spanvolumens von 2 mm in 4 x 0,5 mm Schritten zu direkter Schnitttiefe von 2 mm bei einer Intensitätsskala von -1,5 – 1,5 mT

Abbildung 7-3 stellt in den zweiten Spalten die Oberflächenscans als direkten Vergleich dar. In der rechten Spalte ist die Bearbeitung mit einem hohen Spanvolumen dargestellt, die Schnitttiefe beträgt 2 mm. In der linken Spalte wurde dasselbe

Werkstück in aufeinanderfolgenden Bearbeitungsschritten mit je einer Schnitttiefe von  $0,5\text{ mm}$  bearbeitet. Nach dem letzten Prozessschritt sind somit auch in Summe  $2\text{ mm}$  abgetragen. Es ist zu erkennen, dass neben der Zunahme der magnetischen Flussdichte mit höherem Spanvolumen vor allem das endgültige Spanvolumen den Ausschlag gibt. Der direkte Vergleich der Spalten zeigt einen ähnlichen Verlauf der Intensitäten.

Tabelle 7-3: Mittelwert der Betragswerte der magnetischen Flussdichte  $B$  in  $mT$  sowie das gemessene Maximum und Minimum auf dem jeweiligen Werkstück

Status der Bearbeitung	Schnitttiefe $a_p$	Betrag $B$	gemessenes Maximum	gemessenes Minimum
vor	ENTM	0,063	0,165	-0,082
nach	0,5 mm	0,619	1,077	-1,350
nach	4 x 0,5 mm	0,782	1,312	-1,830
nach	2mm	0,511	1,102	-1,098

Um den Einfluss der Einzelbearbeitung und des Gesamtspanvolumens zu vergleichen, zeigen weiterführende Untersuchungen an Werkstücken der Größe  $60 \times 40\text{ mm}$ , dass die Änderung gemittelt über die gesamte Oberfläche des Werkstücks bei gleichem Gesamtspanvolumen annähernd identisch ist, siehe Abbildung 7-4.

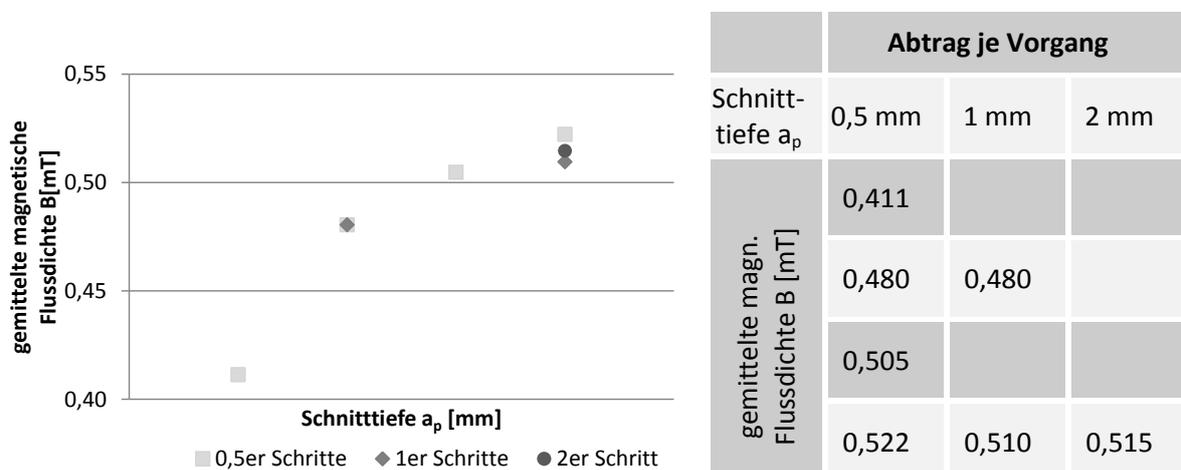


Abbildung 7-4: Variation des Gesamtabtrags durch Einzelprozessbearbeitung im Vergleich zum Gesamtabtrag

Bei Untersuchungen an Werkstücken der Größe  $200\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 40\text{ mm}$  mit identischer Drehzahl und Vorschub pro Zahn, unterschiedlicher Schnitttiefe und bei paralleler Bearbeitungs- in Walzrichtung im Chargenvergleich A und B des Werkstoffs 1.7225 ist in der Abbildung 7-5 zu erkennen, dass die Änderung der magnetischen Eigenschaften bei der Charge A trotz niedrigerem Abtrag nach der Bearbeitung höher liegen. Die Ausprägung der negativen und positiven Felder ist stärker zu erkennen, zu sehen in der dritten Zeile der magnetischen Flussdichte in

X-Richtung. Der Ausgangszustand entmagnetisiert (vor) ist für beide Chargen vergleichbar. Dies entspricht auch den Ergebnissen, die im Rahmen der Oberflächengüte beim Vergleich der Chargen und Einflüsse erkennbar sind, siehe Kapitel 7.1.2.

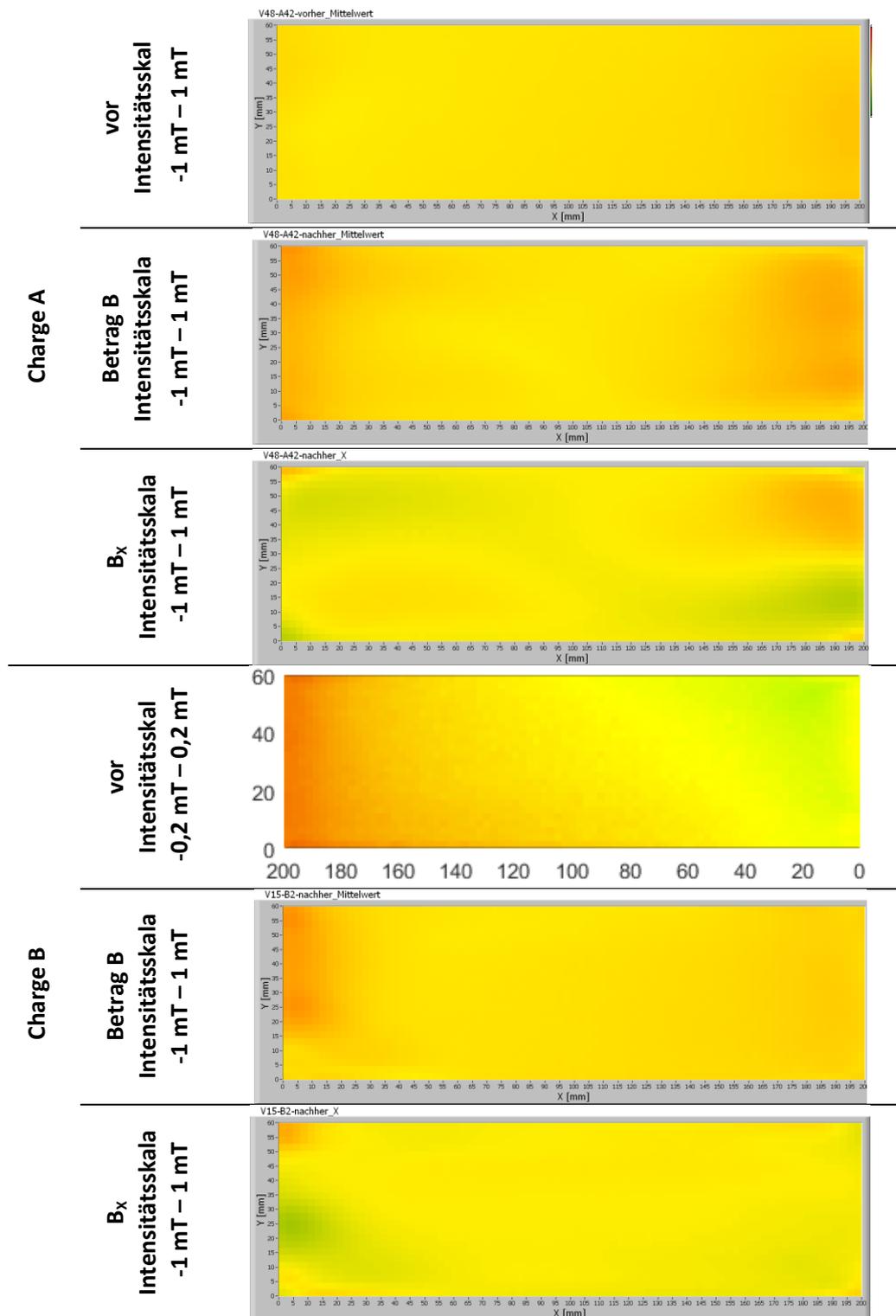


Abbildung 7-5: Darstellung beispielhaft für die parallele Bearbeitung des Werkstoffs 1.7225 Charge A und Charge B, bei einer Schnitttiefe von 0,5 mm (A) und 1 mm (B), einer Drehzahl von  $625 \text{ min}^{-1}$  und einem Vorschub pro Zahn von 0,15 mm

### 7.1.4 Variation des Vorschubs

Eine Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit führt im direkten Vergleich für dieselbe Charge zu einer vernachlässigbaren Erhöhung der mittleren magnetischen Flussdichte, siehe Abbildung 7-6.

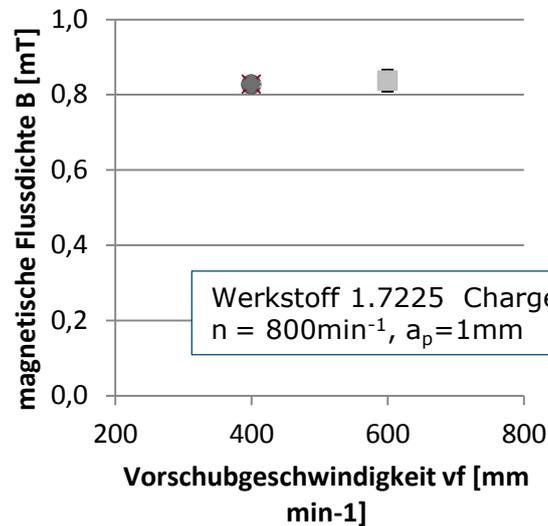


Abbildung 7-6: Vergleich der magnetischen Flussdichte bei Variation der Vorschubgeschwindigkeit, aufbauend auf [13]

Noch deutlicher ist dies im direkten Wertevergleich der Messungen zu erkennen, die Differenzen zwischen dem bearbeiteten und dem Ausgangszustand der Werkstücke liegt für die Vorschubgeschwindigkeit von 400 mm/min bei 0,278 mT. Für die höhere Vorschubgeschwindigkeit ist das Delta sogar geringer, da die Ausgangswerte pro Werkstück höher lagen, in Zahlenwerten ausgedrückt bei 0,224 mT im Schnitt.

$$\Delta B = B_{nach} - B_{vor} \quad (4)$$

In diesen Versuchsreihen ist die Änderung in Tabelle 7-4 zu sehen.

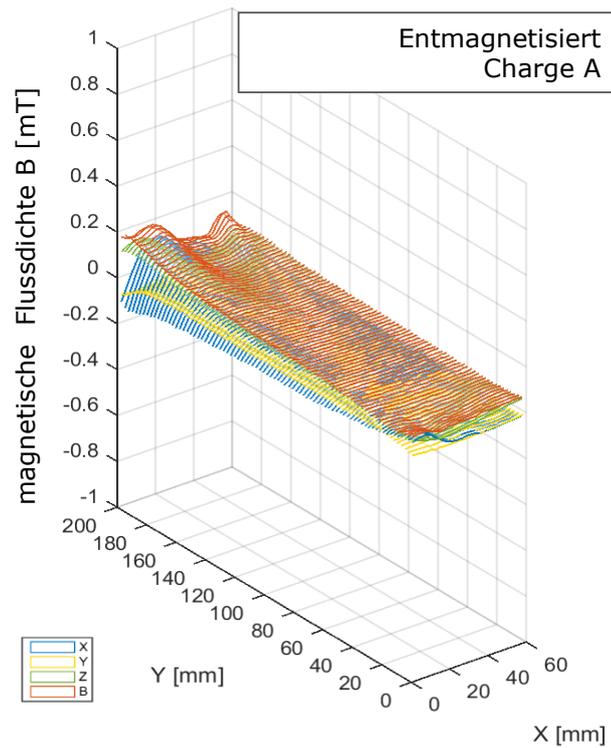
Tabelle 7-4: maximal gemessene Flussdichte je Werkstück des Werkstoffs 1.7225\_Charge A vor und nach der Bearbeitung und im Vergleich bei Variation der Vorschubgeschwindigkeit

mittlere magnetische Flussdichte		vor der Bearbeitung	nach der Bearbeitung
Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 400$ mm/min	Werkstück A7	0,541	0,829
	Werkstück A8	0,557	0,817
	Werkstück A9	0,559	0,840
	Werkstück A11	0,544	0,821
	Werkstück A12	0,546	0,827
	<b>Mittelwert</b>	<b>0,549</b>	<b>0,827</b>
	<b>Standardabweichung</b>	0,007	0,008
	<b><math>\Delta B</math></b>	<b>0,278</b>	
Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 600$ mm/min	Werkstück A16	0,554	0,871
	Werkstück A17	0,642	0,868
	Werkstück A18	0,619	0,835
	Werkstück A19	0,637	0,807
	Werkstück A20	0,634	0,805
	<b>Mittelwert</b>	<b>0,613</b>	<b>0,837</b>
	<b>Standardabweichung</b>	0,032	0,028
	<b><math>\Delta B</math></b>	<b>0,224</b>	

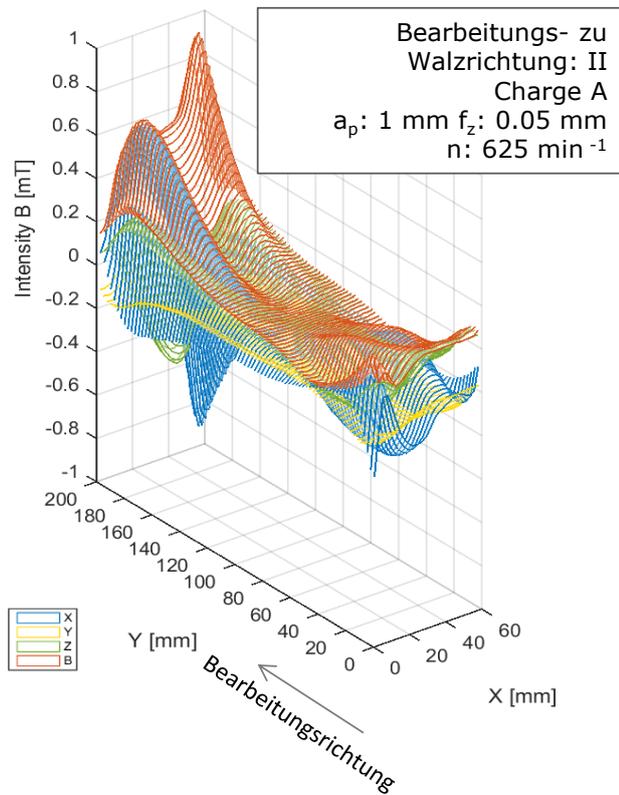
### 7.1.5 Variation der Bearbeitungsrichtung

Bei der Variation der Bearbeitungsrichtung werden vergleichende Untersuchungen zwischen Vorschubrichtung zum einen parallel ( $\parallel$ ) und zum anderen senkrecht ( $\perp$ ) zur Walzrichtung durchgeführt. Die Werkstücke der Größe 200 mm x 60 mm selbst sind dem Ausgangsmaterial entlang der Walzrichtung entnommen. Bei allen Werkstücken sind höhere magnetische Felder an den Randzonen zu erkennen. Dies ist zurückzuführen auf den vorherigen Trennprozess, trotz Entmagnetisierung vor der Bearbeitung. Diese werden bei paralleler Bearbeitung verstärkt durch die Überlagerung der Bearbeitungsrichtung, siehe Abbildung 7-7.

Die Abbildung zeigt den entmagnetisierten Zustand (a) sowohl in alle drei Raumrichtungen als auch als Betrag. Die höchsten Felder sind in X-Richtung, in blau dargestellt, zu erkennen. Das untere Bild (b) zeigt den bearbeiteten Zustand parallel zur Walzrichtung. Es ist eine deutliche Erhöhung an den Randzonen beim Werkzeugaustritt zu finden, hier auch vor allem in X-Richtung.



(a)



(b)

Abbildung 7-7: Darstellung beispielhaft für die parallele Bearbeitung des Werkstoffs 1.7225 Charge A, bei einer Schnitttiefe von 1 mm, einer Drehzahl von 625  $\text{min}^{-1}$  und einem Vorschub pro Zahn von 0,05 mm, entmagnetisiert (a), bearbeitet (b) [66]

Der Vergleich der Abbildung 7-7 und Abbildung 7-8 zeigt die Unterschiede der Auswirkungen zwischen Bearbeitungs- zu Walzrichtung parallel als auch senkrecht zueinander. Bei senkrechter Bearbeitung zeigen sich an den kurzen Seiten keine verstärkten Felder. Dennoch ist der Einfluss der vorbereitenden Schritte auch hier zu erkennen. Dies bestätigt, dass die Vorgeschichte des Werkstücks vorhanden und relevant ist. Durch den Trennprozess werden Vorbelastungen in das Material eingebracht. Ein weiterer Aspekt der beim Vergleich der beiden Abbildungen auffällt, ist das ein höherer Abtrag einen stärkeren Einfluss auf die Veränderung der magnetischen Felder hat, als die Richtung der Bearbeitung, siehe Kapitel 7.1.3.

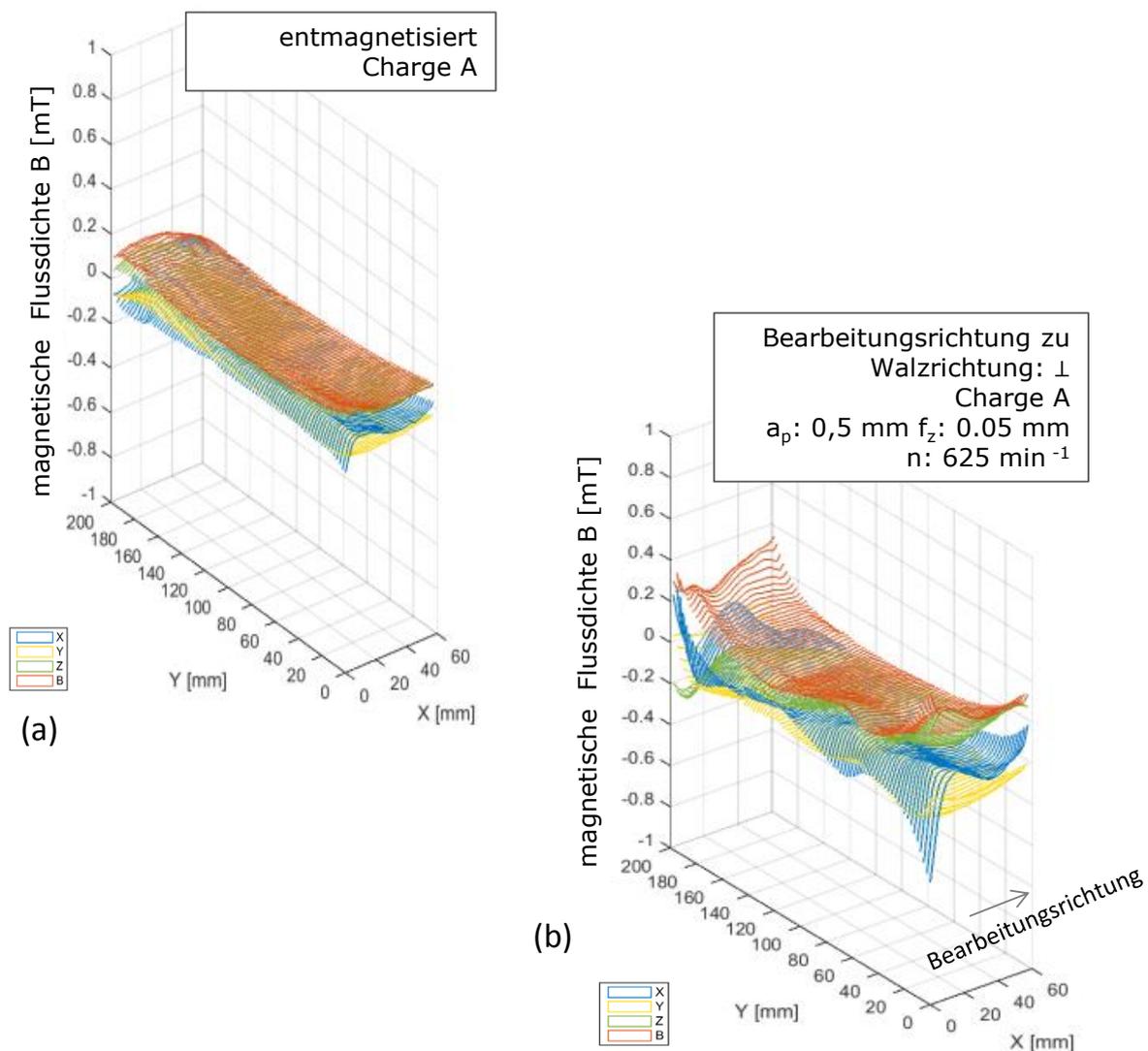
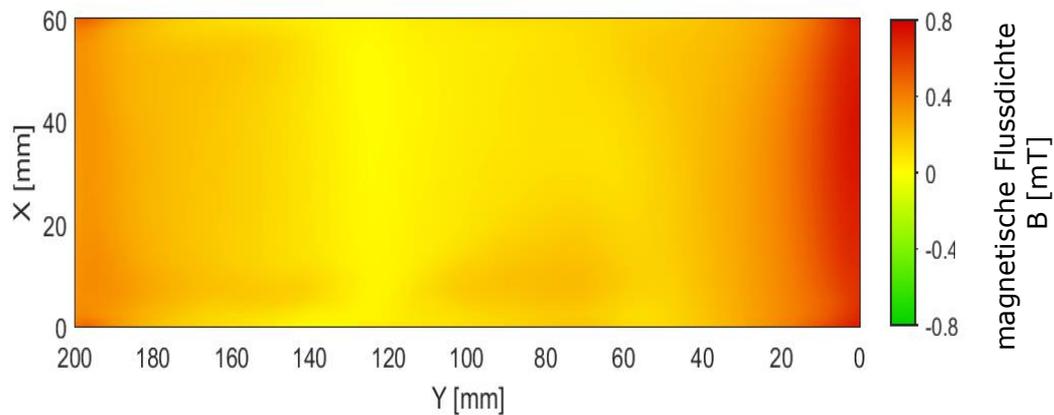
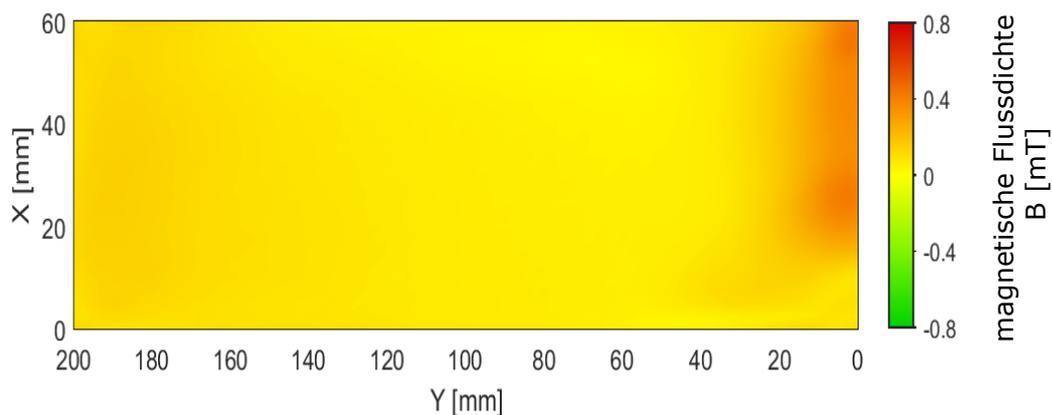


Abbildung 7-8: Darstellung beispielhaft für die senkrechte Bearbeitung des Werkstoffs 1.7225\_Charge A, bei einer Schnitttiefe von 0,5 mm, einer Drehzahl von  $625 \text{ min}^{-1}$  und einem Vorschub pro Zahn von 0,05 mm [66]

Bei vergleichender Betrachtung der Ergebnisse in unterschiedlicher Bearbeitungsrichtung zur Walzrichtung und bei der Bearbeitung mit identischen Prozessparametern der Chargen A und B des Werkstoffs 1.7225 ist in der Abbildung 7-10 zu erkennen, dass die Bearbeitung senkrecht zur Walzrichtung in drei aufeinanderfolgenden Eingriffsschritten erfolgt, aufgezeigt in (a). Der Oberflächenscan des Betrags der magnetischen Flussdichte zeigt erhöhte Felder vor allem in der Trennzone der Ausgangswerkstücke.



(a) Bearbeitungsrichtung zur Walzrichtung:  $\perp$ ; Charge A;  $a_p$ : 1 mm  $f_z$ : 0.15 mm;  $n$ : 625  $\text{min}^{-1}$



(b) Bearbeitungsrichtung zur Walzrichtung:  $\parallel$ ; Charge B;  $a_p$ : 1 mm  $f_z$ : 0.15 mm;  $n$ : 625  $\text{min}^{-1}$

Abbildung 7-9: Vergleich der senkrechten (a) und parallelen (b) Bearbeitung des Werkstoffs 1.7225 Charge A und Charge B, bei identischen Prozessparametern; senkrechte Bearbeitungsrichtung zur Walzrichtung, angelehnt an [66] (c)

Die Ausprägung der senkrechten Bearbeitung ist in  $B_Y$ -Richtung noch deutlicher zu sehen, siehe Abbildung 7-10. Zum Verständnis der Bearbeitungsreihenfolge wird die Überlappung des eingesetzten Werkzeugs schematisch im oberen Teil dargestellt. Das magnetische Feld ist im überlappenden Bereich nahezu null.

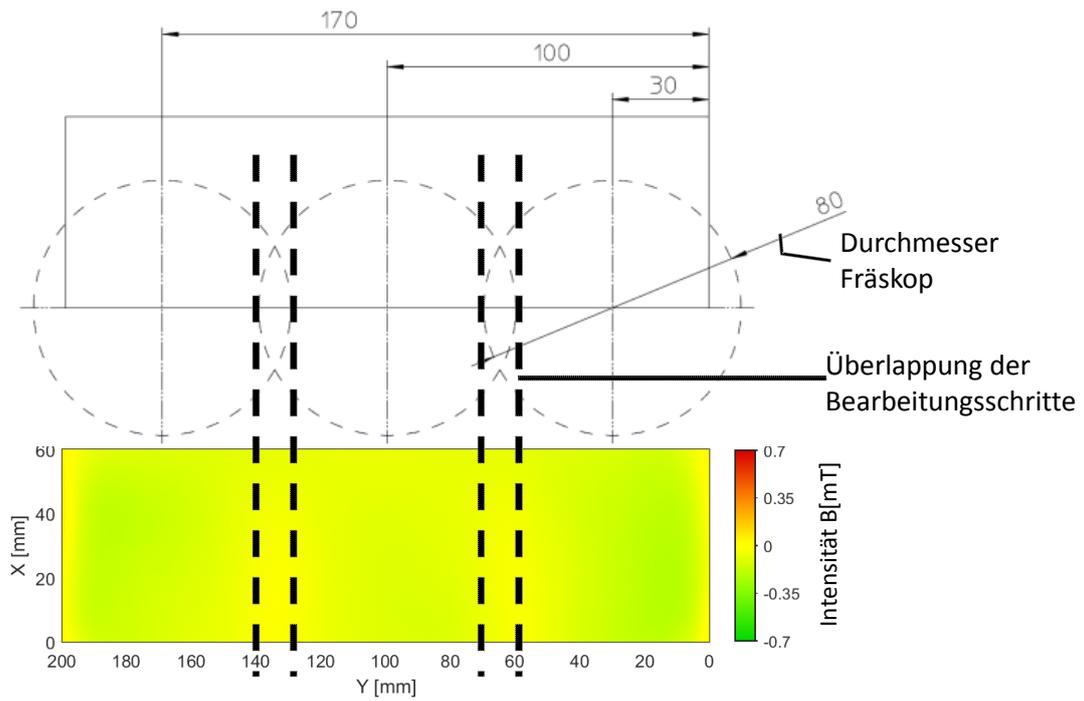


Abbildung 7-10: Oberflächenscan in Y-Richtung mit deckender Bearbeitungsreihenfolge beim Fräsvorgang mit dem Messerkopf Durchmesser 80 mm(c), angelehnt an [66]

## 7.2 Variation der Prozessführung

Der Vergleich der Variation der Prozessführung stellt im zweiten Abschnitt einen weiteren Schwerpunkt dar. Eine Betrachtung der Bearbeitung sowohl als Option 1, dies bedeutet eine direkte Bearbeitung nach dem bisherigen Durchlaufen der Prozesskette. Option 2 unterscheidet sich durch einen ergänzenden Prozessschritt der Entmagnetisierung vor der spanenden Bearbeitung. Diese Erweiterung der Prozesskette stellt aus Sicht der Nutzer einen zusätzlichen Zeit- und Kostenfaktor dar, kann jedoch im Verlauf der Prozesskette durch eine Reduzierung der magnetischen Veränderungen zu Zeit- und Kostenersparnis durch geringere Anhaftungen in den Folgeschritten, wie z.B. der Reinigung führen, u.a. durch vereinfachte Einhaltung von Grenzwerten. Abbildung 7-11 zeigt die Auswirkung durch Anpassung der Prozesskette durch die Optionen auf.

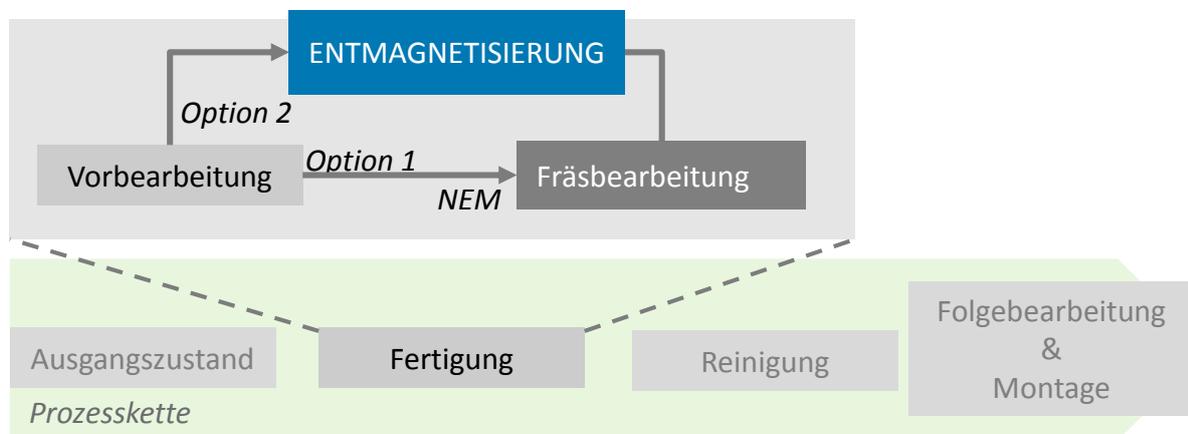


Abbildung 7-11: Auswirkung der Anpassung der Prozessführung durch Entmagnetisierung vor der Fertigung und ohne Entmagnetisierung

Ein erstes Ergebnis bei vergleichender Untersuchung der gleichen Werkstückgrößen unter identischen Prozessparametern zeigt Abbildung 7-12. Bei der spanenden Bearbeitung direkt aus der Prozesskette der Werkstücke folgend, zeigt dass die Änderung des magnetischen Feldes nach der Bearbeitung deutlich über den maximalen Werten liegt, die erreicht werden, wenn die Werkstücke vor der Bearbeitung entmagnetisiert werden. Der Ausgangszustand der Proben hat also starken Einfluss auf das Ergebnis der Änderung im Prozess. Dazu beitragen können Vorbelastung unter anderem der magnetischen Felder oder Eigenspannungen, hervorgerufen unter anderem aus vorherigen Prozess- und Transportschritten oder dem Herstellprozess selbst.

Mit einer gezielten Entmagnetisierung vor der Bearbeitung können die vorhandenen, aus Vorbehandlung oder Transport induzierten, magnetischen Eigenschaften im Materialgedächtnis minimiert werden. Somit kann auch die teilweise in der Literatur vertretene Auffassung, dass die Bearbeitung selbst keine Auswirkungen auf die Änderung der magnetischen Oberflächeneigenschaften hat, widerlegt werden. Denn wenn nur äußere Felder die Änderung der magnetischen Eigenschaften, unter anderem durch Antriebe der Maschine den Werkstoff beeinflussen, kann als Schluss-

folgerung mit dem Entmagnetisieren als weiteren Prozessschritt keine Auswirkung sichtbar werden.

Die durch Legierungsunterschiede hervorgerufenen Chargenunterschiede in den Materialeigenschaften zeigen aber weiterhin eine unterschiedliche Reaktion bei der Veränderung der magnetischen Eigenschaften auf, Abbildung 7-12.

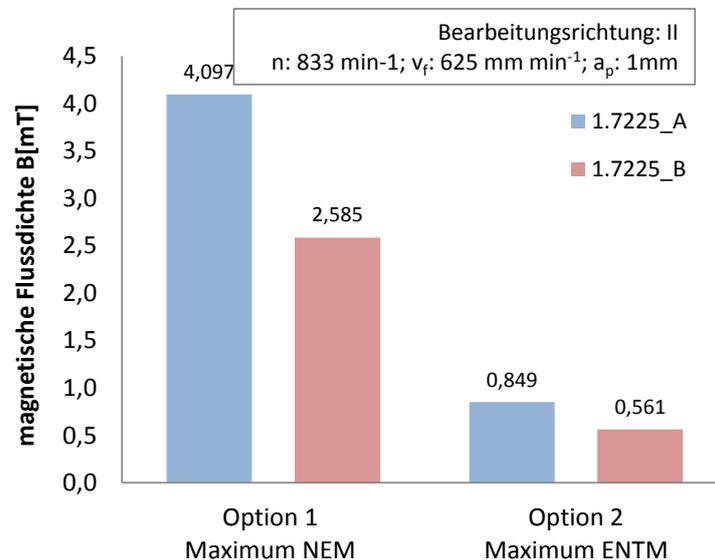


Abbildung 7-12: Maximaler Betrag der gemessenen magnetischen Flussdichte im Chargenvergleich für den Werkstoff 1.7225 nach der Bearbeitung im Fall Option 1 nicht entmagnetisiert (NEM) und Option 2 entmagnetisiert (ENTM) vor der Bearbeitung

In Abbildung 7-13 ist eine vergleichende Darstellung der Feldverteilung der magnetischen Flussdichte für den Werkstoff 1.7225 der Charge A als vergleichender Oberflächenscan der Werkstücke nach unterschiedlicher Prozesskette, Option 1 - NEM – nicht entmagnetisiert und Option 2 - ENTM – entmagnetisiert, dargestellt.

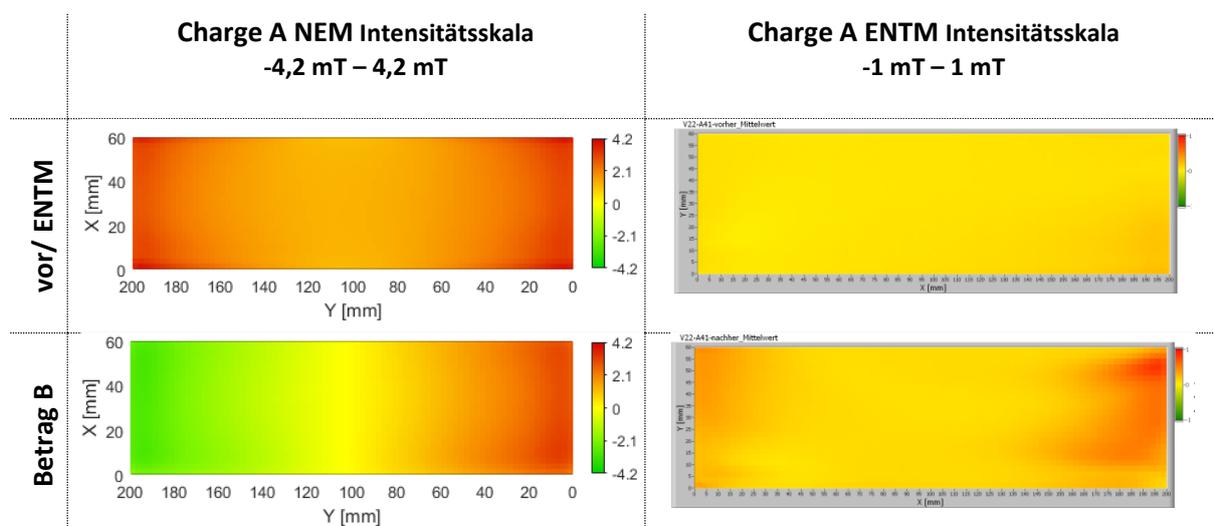


Abbildung 7-13: Vergleichende Darstellung der Feldverteilung der magnetischen Flussdichte für den Werkstoff 1.7225 Charge A bei folgenden Prozessparametern  
Bearbeitungsrichtung: II; n: 833 min<sup>-1</sup>; v<sub>f</sub>: 625 mm/min; a<sub>p</sub>: 1mm

### 7.3 Veränderung entlang der Schnittbewegung

Der vorliegende Abschnitt beschreibt die Änderung der magnetischen Flussdichte entlang der Schnittbewegung einer Werkzeugschneide. Dargestellt ist der Betrag der magnetischen Flussdichte auf der Oberfläche in Abhängigkeit von der Spanungslänge einer Frässpur, Abbildung 7-14(a). Die Korrelation zur Frässpur wird in (b) gezeigt und der Bezug zum Oberflächenscan, in diesem Fall in X-Richtung (c) hergestellt. Zu sehen ist, dass die magnetische Flussdichte zur Mitte des Werkstücks ein Maximum für alle Spanungslängen erreicht.

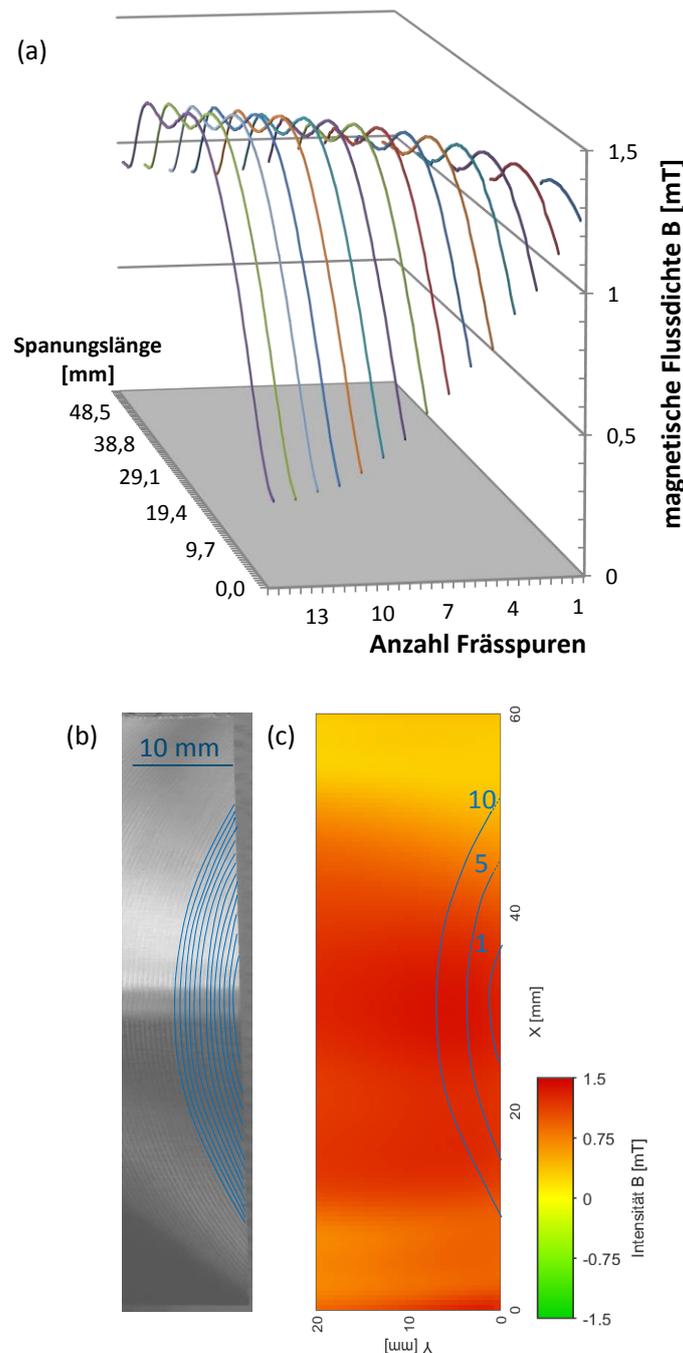


Abbildung 7-14: Spanungslänge der Frässpur in Abhängigkeit von dem Betrag der magnetischen Flussdichte auf der Oberfläche (a) passend zu den Frässpuren in blau auf der Werkstückoberfläche (b) und in Korrelation mit der Intensität der magnetischen Flussdichte in mT in X-Richtung (c)

Bei Betrachtung der fortlaufenden Frässpuren zeigt die nachfolgende Abbildung 7-15 die Veränderung, wenn der Schneideneingriff nicht mehr von der Stirnseite erfolgt sondern über den Randbereich des Werkstücks. Es ist zu erkennen dass sich dann ein kleines Minimum und beim Austritt aus dem Werkstück an der Randzone ein Maximum ausbildet. Mit fortschreitender Anzahl an Ein- und Austritten im Randbereich nimmt dieses Delta zwischen dem Minimum und Maximum zu.

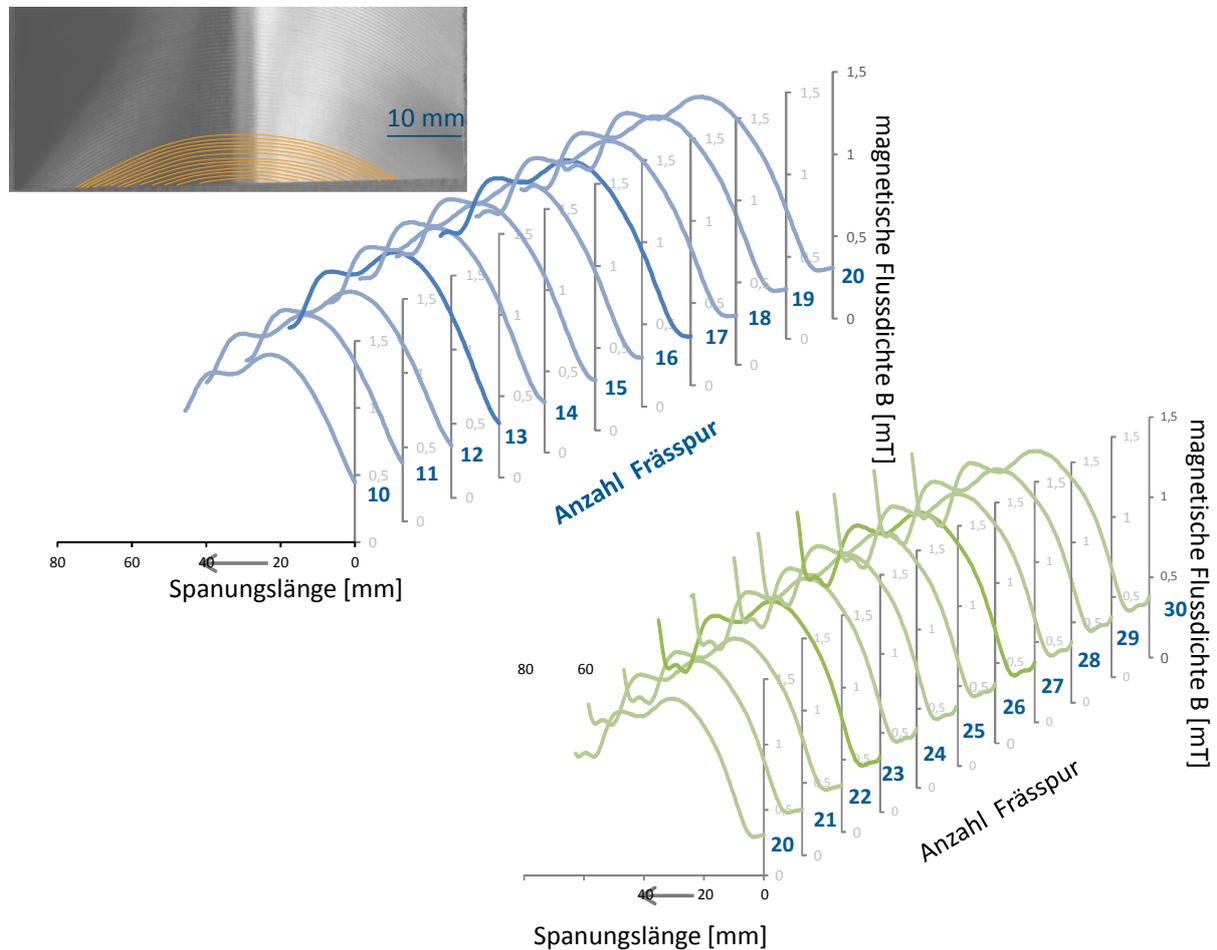


Abbildung 7-15: Betrachtung des Betrags der magnetischen Flussdichte bei fortlaufenden Frässpuren wenn der Schneideneingriff zunächst noch von der Strinnseite, Frässpuren 10 - 20 und dann vom Randbereich des Werkstücks erfolgt ab Frässpur 21

Abbildung 7-16 zeigt den Vergleich des Betrags der magnetischen Flussdichte in Bezug zur Lage der Frässpur. Es ist zu erkennen, dass die Maximalwerte bei den drei vergleichenden Spuren annähernd gleich sind und in der Mitte des Werkstücks liegen. Des Weiteren zeigt es den Anstieg an den Seitenbereichen, auch zu sehen in Oberflächenscan des Betrags. Betrachtet man alle drei Raumrichtungen und den Betrag des Bereichs so werden der Anstieg und die Verteilung der Felder deutlich, siehe Abbildung 7-17.

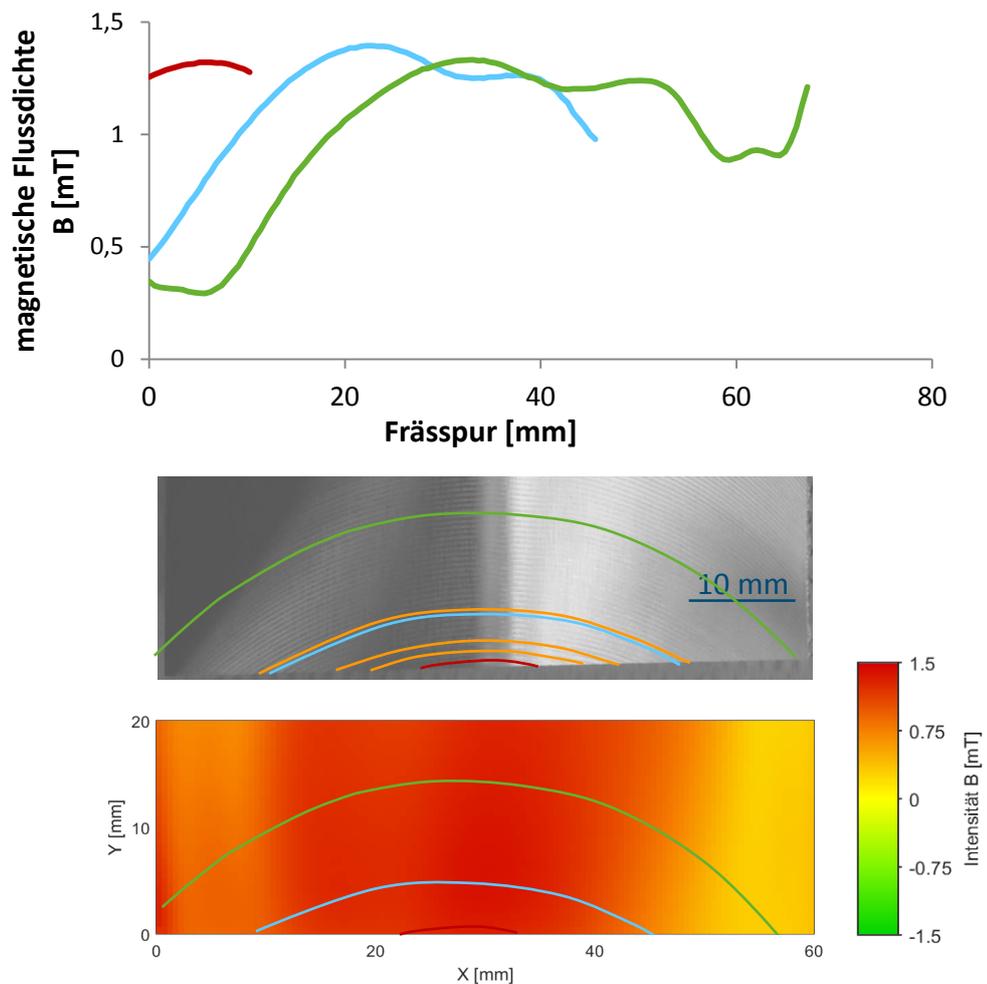


Abbildung 7-16: Betrag der magnetischen Flussdichte entlang der Spanungslänge, im Diagramm als Frässpur in mm (rot, blau und grüne Spur) in Bezug zur Lage der Frässpur und in Korrelation zum Oberflächenscan des Betrags in diesem Bereich

Betrachtet man in Abbildung 7-17 die magnetische Flussdichte im direkten Vergleich bei ausgerichteter Frässpur in den ersten 20 mm des Werkstücks sowohl als Betrag als auch in den einzelnen Messrichtungen ist zu erkennen, dass das Wechselfeld in X-Richtung am stärksten ausgeprägt ist und den Betrag somit auch am stärksten beeinflusst. Die Oberflächenscans zeigen die schmale Seite eines Werkstücks der Maße 200 mm x 60 mm im Querformat. Die Bearbeitung erfolgt parallel zur Walzrichtung.

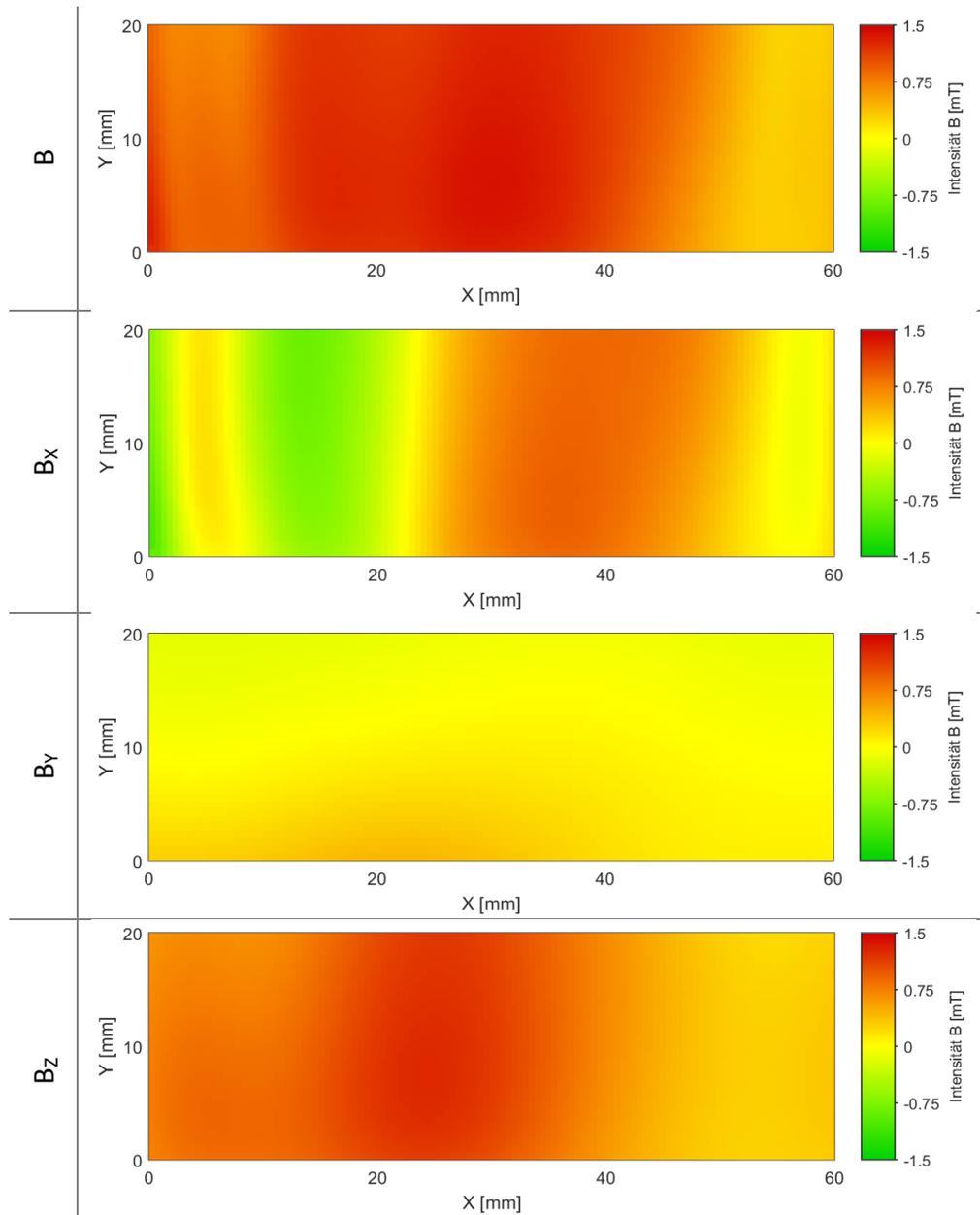


Abbildung 7-17: Vergleich der magnetischen Flussdichte bei ausgerichteter Frässpur in der Anfangszone des Werkstücks

## **8 Diskussion**

### **8.1 Einfluss von äußeren Feldern auf die Änderung der magnetischen Eigenschaften**

Die Wirkung von magnetischen Spannsystemen, von elektromagnetischen Feldern der Antriebe in den Maschinen und des Erdmagnetfelds werden als mögliche Ursache genannt, um die Änderung der magnetischen Eigenschaft von Materialien bei der Zerspanung zu beeinflussen. [11, 14, 64, 81] Die in der Arbeit durchgeführten Versuche sind aufgrund der guten Wiederholbarkeit mit dem Verfahren Stirnkopffräsen mit definierten Prozessbedingungen als spanendes Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide umgesetzt worden. Hiermit sind reproduzierbar gleichmäßige und gut messbare Oberflächen zu erzeugen. Die Einflüsse der Rahmenbedingungen werden in der Arbeit mitbetrachtet, es zeigt sich, dass die Einflüsse der äußeren Felder im Rahmen der durchgeführten Versuche vernachlässigbar sind, siehe Kapitel 4.4. Der Antrieb der genutzten Maschine liegt nicht unmittelbar im Bereich der Bearbeitung. Untersuchungen der Änderungen an der Werkzeugschneide haben ergeben, dass eine leichte Zunahme (Verschleiß und oder Magnetisierung) zu erkennen ist. Diese hat aber nur im geringen Maße Auswirkungen auf die gesamte Änderung der magnetischen Eigenschaften und sind daher ebenfalls vernachlässigbar.

Dass die Einspannung selbst einen Einfluss haben kann, zeigen die Versuche am Modellsystem, siehe Kapitel 5.1.2. Zug- und Druckbelastungen verändern die magnetischen Felder in den Kontaktbereichen der Werkstücke mit der Einspannung. Die Einspannbereiche selbst sind auch im Bereich der Gesamtbetrachtung als zweitrangig zu betrachten.

Es lässt sich mit den eigenen Arbeiten die Aussagen der Literatur nicht bestätigen, aber auch nicht allgemeingültig widerlegen, da durch Verwendung eines magnetischen Spannsystems oder einer anderen Maschinenanlage mit direktem Einfluss des Antriebs und dem entstehenden Wechselfeld auf die Bearbeitungsstelle eine stärkere Einflussnahme vorstellbar ist.

## 8.2 Einfluss der Spanentstehung auf die Änderung der magnetischen Eigenschaften

Der teilweise in der Literatur vertretenen Auffassung, dass die Ursachen für eine Änderung der magnetischen Eigenschaften überwiegend im Umfeld, nämlich den Magnetfeldern der Antriebe und Spannsysteme, zu finden seien, muss auf Basis der erarbeiteten Ergebnisse widersprochen werden. Die Beobachtung der Einflüsse von Parameteränderungen im Zerspanprozess legt zweifelsfrei nahe, dass dieser einen deutlichen Einfluss hat. Auch wurde festgestellt, dass die Änderungen der magnetischen Eigenschaften kritischer zu bewerten sind, als bisher angenommen. Schon weit unter der in der Literatur genannten Größe der magnetischen Flussdichte kann es zu Anhaftungen von Partikeln kommen, die in nachfolgenden Prozessschritten negative Auswirkungen haben können.

Die experimentellen Untersuchungen umfassen Versuche beim spanenden Fertigungsverfahren Fräsen mit vorausgehenden und anschließenden zerstörungsfreien Messungen. Die Auswirkung der Spanentstehung wird in der Literatur sehr uneinheitlich beschrieben. Im Bereich der Zerspanung, von den in dieser Arbeit verwendeten Vergütungsstählen, gibt es zum jetzigen Zeitpunkt noch sehr wenige Veröffentlichungen. Die verfügbaren Untersuchungen aus den 1970er Jahren zeigen jedoch bereits die Veränderung der magnetischen Eigenschaften aus zwei Ursachen auf. Zum einen werden im Bereich der Werkstück-Einspannungen Veränderungen festgestellt. Zum anderen werden unterschiedliche Auswirkungen beim Einsatz verschiedener Verfahren beobachtet, die vor allem zu einem Verlust der magnetischen Eigenschaften führen. [15, 57–59] Dass die erstgenannte Art der Werkstückspannung eine Auswirkung hat, bestätigen auch die Versuche am Modellversuch in dieser Arbeit. Die verfahrensspezifischen Auswirkungen lassen sich jedoch aufgrund der sehr unterschiedlichen Versuchsbedingungen nur schwer mit den eigenen Ergebnissen vergleichen, grundsätzlich zeigen sie aber ebenfalls eine Auswirkung auf die Qualitäts- und Eigenschaftsanforderungen im Prozess.

Die Ergebnisse in der Spanbildung in dieser Arbeit betrachten verschiedene Aspekte. Der erste Abschnitt bietet einen Gesamtüberblick über die maximalen, gemessenen Werte der magnetischen Flussdichte sowohl als Betrag über alle drei Raumrichtungen als auch in Einzelausrichtung. Der Vergleich der Variationen der Prozessführung stellt im zweiten Abschnitt den Schwerpunkt dar. Es werden sowohl einzelne Prozessparameter variiert, als auch der Vergleich der Bearbeitung parallel oder senkrecht zur Walzrichtung betrachtet. Der dritte Abschnitt beschreibt den Einfluss entlang der Schnittbewegung einer Wendeschneidplatte vergleichend zu Beginn der Bearbeitung und im Eingriff über die gesamte Werkstückbreite. Alle drei Abschnitte zeigen eine Beeinflussungsmöglichkeit durch die Parameterwahl auf. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse bei Variation der Schnitttiefe, beziehungsweise des Gesamtspanvolumens auf, dass es pro Werkstück eine maximale mögliche Magnetisierung durch den Zerspanprozess gibt.

---

Die Wärme, die durch die spanende Bearbeitung in die Werkstücke eingebracht wird und Einfluss auf die Änderung der magnetischen Eigenschaften nehmen kann, fällt in diesen Untersuchungen nicht ins Gewicht. In allen Versuchsreihen wurden nach der Bearbeitung keine veränderten Gefügestrukturen vorgefunden. Des Weiteren wurde beim Vergleich der Anlauffarben der entstandenen Späne kein unerwartetes Temperaturniveau erreicht.

### **8.3 Einfluss des Materialverhaltens und des Materialgedächtnisses auf die Änderung der magnetischen Eigenschaften**

In der Literatur zum Thema wurden keine Hinweise auf eine eingehende Betrachtung des Ausgangszustandes der jeweils bearbeiteten Werkstücke gefunden, es wurde offensichtlich davon ausgegangen, dass die Einhaltung der Werkstoffspezifikation eine ausreichende Standardisierung der Versuchsbedingungen erzielt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden jedoch signifikante Einflussgrößen aus der Prozesskette von der Urformung über Transport und Handling bis zur Zerspanung der Werkstücke identifiziert.

Drei Versuchsreihen sollten zur Fragestellung des Ausgangszustandes und des Materialgedächtnisses Aufschluss geben. Der Vergleich von Werkstücken, die im Ausgangszustand bearbeitet wurden mit Werkstücken, die vor der Bearbeitung entmagnetisiert wurden, zeigte den möglichen Einfluss der vorlaufenden Prozesskette. Da die Werkstücke jeweils aus größeren Werkstücken herausgetrennt wurden, bevor sie im Rahmen der Untersuchungen definiert bearbeitet wurden, mussten auch vergleichende Messungen zur Beurteilung des Trennprozesses angestellt werden. Ergänzend wurden chemische Analysen der Werkstoffchargen gemacht, um die Chargenschwankungen zu berücksichtigen.

Alle Werkstoffe waren entsprechend der Werkstoffspezifikation innerhalb der Grenzwerte, jedoch gab es signifikante Unterschiede bei den einzelnen Legierungselementen, unter anderem in den Schwefelgehalten für den Werkstoff 1.7225. Da sich diese auf die Zerspanbarkeit, und dadurch auf die Prozesskräfte und die Spanbildung auswirken, ist eine Rückwirkung auf die Änderung der magnetischen Eigenschaften zu erkennen.

## 9 Zusammenfassung

Bei der Anwendung spanender Fertigungsverfahren können Werkstücke aus metallischen Werkstoffen ihre magnetischen Eigenschaften verändern. Diese Magnetisierungsänderung kann Auswirkungen auf nachfolgende Fertigungsschritte und den Gebrauch der Teile haben, zum Beispiel durch anhaftende metallische Späne oder kleine Partikel am Werkstück. Als ein sehr auffälliges Beispiel für eine verunreinigte Oberfläche wurde ein Werkstück nach der spanenden Bearbeitung mit Schleifstaub in Kontakt gebracht, siehe Abbildung 9-1. Es wird deutlich, dass ein Reinigungsschritt für dieses Werkstück unabdingbar ist, um Qualitäts- und Ergebnisansprüche der möglichen nachfolgenden Prozessschritte zu erreichen.



Abbildung 9-1: Anhaftungen nach Zerspanung an einer Werkstückoberfläche durch magnetische Kräfte durch umliegende Prozessverunreinigungen, Abrieb, Schleifstaub in Umgebung oder ähnlichem

Dazu muss ein solches Bauteil zunächst entmagnetisiert und meist in einem mehrstufigen Prozess, den Vorgaben der Restpartikelgrößen entsprechend, behandelt werden. Wenn diese Art der Anhaftung nicht wie hier abgebildet auf der Oberfläche vorhanden sind, sondern an Verschneidungen, Innenbohrungen oder ähnlichem haften, können diese Reinigungsprozessschritte ihre Wirkung nicht optimal erzielen. Das Potential eines möglichen Ausfalls eines solchen Bauteils ist erkennbar. Ein besseres Verständnis der Mechanismen die im Bearbeitungsschritt zu einer Änderung der magnetischen Materialeigenschaften führen, ist eine Voraussetzung, um die hohen Qualitätsansprüche in der Reinheit von Bauteilen und Bauteilkomponenten zu erreichen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Untersuchungen durchgeführt, um die Möglichkeiten der Einflüsse zu beschreiben und prozessbedingte Änderungen zu erarbeiten. Hypothesen die die magnetischen Oberflächeneigenschaftsänderungen beeinflussen, wurden dabei betrachtet. Äußere Felder, die durch die Maschinen selbst entstehen, sind vorhanden und beeinflussen auch den Prozess. Dennoch ist zu erkennen, sollten sie die Hauptursache sein, wäre eine Beeinflussung durch Prozessparameter irrelevant und auch die unterschiedliche Änderung der magnetischen Eigenschaften bei verschiedenen Werkstoffchargen widerspricht dieser Hypothese. Der Einfluss durch die Spanbildung ist aus den durchgeführten Untersuchungen erkennbar. Eine Veränderung der Parameter führt zu einer unterschiedlichen Veränderung der magnetischen Auswirkung. Da aber in der heutigen Produktion Prozesse und

Parameter sehr strikt vorgegeben sind, unter anderem durch zertifizierte Prozesse und die Abstimmungen mit Kunden und Lieferanten, ist hier bei verstärktem Auftreten von Anhaftungen kaum Einfluss durch Anpassung der Prozessparameter zu nehmen. Hier ist es notwendig Kenntnisse schon im frühen Stadium der Prozessschritte über das Material und die vorherigen Punkte zu nutzen, unter anderem Transport und Anlieferung.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Chargeneinfluss und die Vorgeschichte des Werkstoffs, dass hier definierte Werkstoffgedächtnis durch Handling und Transport eine große Rolle spielen. Dieses lässt sich durch genaue Kenntnis der Unterschiede der Chargen durch Kontrolle der Eingangsprüfung schon nutzen. In den Untersuchungen wird als Beispiel der unterschiedliche Schwefelgehalt des gleichen Werkstoffs weitergehend betrachtet, damit verbunden der Aspekt der besseren Zerspanbarkeit. Dies kann Einfluss auf die entstehenden Prozesskräfte bei der Bearbeitung mit gleichen Parametern haben. Als entscheidender Einfluss auf die Veränderung der magnetischen Eigenschaften bei der spanenden Bearbeitung ferromagnetischer Werkstoff zeigt sich die geänderte Prozessführung. Durch Entmagnetisierung vor dem Zerspanungsschritt wird die Änderung der magnetischen Oberflächeneigenschaften deutlich reduziert, dies ist unabhängig von der Charge, dem Werkstoff und auch der Bearbeitungsrichtung.

Weiterführende Untersuchungen sind notwendig, unter anderem durch Variierung der Werkzeugschneidstoffe und dem bewussten Einsatz von Schneiden mit hohem Verschleiß, um die Ergebnisse auf reale Prozesssituation noch weiterhin zu realisieren. Auch die Einführung von Minimalmengenschmierung ist in diesem Kontext angebracht. Durch die Untersuchungen an den zug- und druckbeanspruchten Proben wird deutlich auch unter Einbezug der Literatur, die magnetischen Oberflächen Untersuchungen mit Eigenspannungsmessungen zu korrelieren. Eine Übertragung auf weitere Verfahren und vor allem die Untersuchungen anderer Oberflächen, zum Beispiel von Innenbohrungen zeigen eine sinnvolle Ergänzung auf.

## 10 Literaturverzeichnis

- [1] SCHMIDT, Jürgen: *Untersuchung zur Reinheit spanend bearbeiteter Oberflächen unter besonderer Berücksichtigung des erzeugenden Prozesses*. Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für Fertigungstechnik. 1996
- [2] VDA: *Band 19 Teil 1 Prüfung der Technischen Sauberkeit : Partikelverunreinigung funktionsrelevanter Automobilteile*. 2. überarbeitete Ausgabe, 2015
- [3] MAFAC: *Energieeffizienz in der wässrigen Teilereinigung*. MAFAC Artikel. In: [www.jot-oberflaeche.de](http://www.jot-oberflaeche.de) 29.08.2016 56, Nr. 08 – Überprüfungsdatum 2016-08-29 2016
- [4] REGENT, Carsten: *Prozeßsicherheit beim Schleifen*. Als Ms. gedr. Düsseldorf : VDI-Verl., (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Fertigungstechnik 512), 1999
- [5] MÜLLER, Roland ; GÖSCHEL, Jana: *Energieeffizienz durch Analyse des Gesamtprozesses : Wirksamkeit alternativer Reinigungsverfahren unter Berücksichtigung der Produktionsprozesskette*. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2011
- [6] KOBLENZER, Gerhard: *Auf dem Weg zum „Industrial Cleaning Management“ : Qualifizierte Oberfläche als wesentliche Produkteigenschaft*. In: *JOT Journal für Oberflächentechnik* 06, Nr. 16, S. 32–34, 2014
- [7] KROUPA, František ; MÁLEK, Zdeněk: *Der Einfluss der Plastischen Verformung durch Kaltwalzen auf die Koerzitivkraft*. In: *Czechoslovak Journal of Physics* 9, Nr. 5, S. 627–637, 1959 URL <https://doi.org/10.1007/BF01556953>
- [8] SHENOY, S. D. ; JOY, P. A. ; ANANTHARAMAN, M. R.: *effect of mechanical milling on the structural, magnetic and dielectric properties of coprecipitated ultrafine zinc ferrit*. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (2004), Nr. 269, S. 217–226. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885303005961>
- [9] SPUR, G.; BYRNE, G.: *SURFACE INTEGRITY IN THE MACHINING OF SOFT MAGNETIC NICKEL-IRON ALLOYS*. In: *Advanced Manufacturing Processes* 1, Nr. 2, S. 159–194, 1986. URL <http://dx.doi.org/10.1080/10426918608953161>
- [10] DÜRR: *Dürr Ecoclean - Feinstreinigung und Restschmutzanforderungen : Realisierungsmöglichkeiten, Aufwand, Grenzen*. URL <http://www.x-technik.com/x-technik/reinigungstechnik/map-symposium/vortrag-duerr.htm>
- [11] GRIMM, Martin: *Magnetische Werkstück-Spannsysteme ergänzen innovative Zerspantechniken*. In: *Maschinenmarkt* 104, Nr. 31, S. 20–23, 1998
- [12] MAURER MAGNETICS AG: *Entmagnetisierer-Einsätze und Dienstleistungen*. URL [http://www.maurermagnetic.ch/008\\_D\\_entmagnetisierservice.html](http://www.maurermagnetic.ch/008_D_entmagnetisierservice.html)
- [13] TRAPP, Kirsten ; KÄFER, Lilliane ; BÄHRE, Dirk: *Effects of Machining Ferromagnetic Materials on Magnetic Property Changes*. In: *Procedia Manufacturing* 1, S. 721–727, 2015

- [14] EYRISCH, Tina ; HIELSCHER, Torsten ; AURICH, Jan C.: *Dem Magnetismus auf der Spur*. In: *Werkstatt und Betrieb WB* 10, S. 70–72, 2009
- [15] BYRNE, Gerald: *Das Zerspanen von weichmagnetischen Werkstoffen*. Berlin, Technische Universität Berlin, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik. 1989
- [16] VILLARI, E.: *Ueber die Aenderungen des magnetischen Moments, welche der Zug und das Hindurchleiten eines galvanischen Stroms in einem Stabe von Stahl oder Eisen hervorbringen*. In: *Annalen der Physik* 202, Nr. 9, S. 87–122, 1865  
URL <http://dx.doi.org/10.1002/andp.18652020906>
- [17] BIENKOWSKI, A. ; KULIKOWSKI, J.: *The Magneto-Elastic Villari Effect in Ferrites*. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 19 (1980), S. 120–122
- [18] DAPINO, M.J ; SMITH, R.C ; CALKINS, F.T ; FLATAU, A.B: *A Magnetoelastic Model for Villari-Effect Magnetostrictive Sensors*, 2010
- [19] DAVINO, D. ; GIUSTINIANI, A. ; VISONE, C.: *Eddy currents induced by Villari-Effect in actual magnetostrictive materials*. In: *Hysteris Modeling and Micromagnetics* (2009)
- [20] PIECH, T.: *Technische Anwendungen der Barkhausenrausch-Erscheinung*. In: *Prace Naukowe Politechniki Szczecinskiej PNPS* 475, 1992
- [21] THEINER, Werner A. ; SCHNEIDER, E.: *Bestimmung von (Eigen-)Spannungen mit magnetischen, magnetoelastischen und laufwegunabhängigen Ultraschall-Verfahren*. [Saarbrücken] : Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der Angewandten Forschung e.V., Inst. f. Zerstörungsfreie Prüfverfahren, 1979 (Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren 790321)
- [22] FIELD, Michael ; KAHLES, J. F.: *The surface integrity of machined-and ground high-strength steels(Surface integrity of machined and ground high strength steels).*, S. 54–77, 1964
- [23] I.S. JAWAHIR ; E. BRINKSMEIER ; R. M'SAOUBI ; D.K. ASPINWALL ; J.C. OUTEIRO ; D. MEYER ; D. UMBRELLO ; A.D. JAYAL: *Surface integrity in material removal processes: Recent advances*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60, Nr. 2, S. 603–626, 2011  
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850611002046>
- [24] BELLOWS, Guy ; TISHLER, Dean N.: *Introduction to Surface Integrity*. Pamphlet 1. 10/1970
- [25] BYRNE, G. ; DORNFELD, D. ; DENKENA, B.: *Advancing Cutting Technology*. In: *CIRP ANNALS* 52/2, S. 483–507, 2003
- [26] BYRNE, G. ; SCHOLTA, E.: *Environmentally Clean Machining Processes — A Strategic Approach*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 42, Nr. 1, S. 471–474, 1993  
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607624883>

- [27] FRANK MAUREN: *Veränderliche Merkmalswerte von Rohteilen in der spanenden Fertigung : Konzept zur systematischen Ermittlung und Berücksichtigung*. Kaiserslautern, TU Kaiserslautern, FBK. Produktionstechnische Berichte aus dem FBK. 04/2008
- [28] JUNG, Dieter: *Praxis- und prozeßnahes Optimierungsmodell (PPO-Modell) zur systematischen, kontinuierlichen Verbesserung komplexer industrieller Prozesse* : Saarbrücken : LFT, Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM, (Schriftenreihe Produktionstechnik: 18) 2000
- [29] AURICH, Jan C.: *SpanSauber : Ergebnisbericht der Untersuchung zur Beherrschung der Sauberkeit von zerspanend hergestellten Bauteilen*. Kaiserslautern, Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation. 2006-10-31. URL [http://www.produktionsforschung.de/verbundprojekte/vp/index.htm?VP\\_ID=2018](http://www.produktionsforschung.de/verbundprojekte/vp/index.htm?VP_ID=2018) – Überprüfungsdatum 2014-05-15
- [30] ZIM-NEMO-PROJEKT: *Qualitätssicherung bei der nasschemischen Reinigung "Nasschemische Reinigung für die Oberflächentechnik*. URL [https://www.wotech-technical-media.de/womag/ausgabe/2013/12/womag\\_12j2013\\_frei.pdf](https://www.wotech-technical-media.de/womag/ausgabe/2013/12/womag_12j2013_frei.pdf)
- [31] WEIGERT, Martin: *Opimierung der Reinigungsleistung Einflussfaktoren, Aufwand und Grenzen*. In: *JOT Journal für Oberflächentechnik* 11, Nr. 40, S. 72–76 , 2000
- [32] DIN 8580. *Fertigungsverfahren Begriffe, Einteilung*
- [33] DIN 8589. *Fertigungsverfahren Spanen - Teil 3: Fräsen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, 2003-09.
- [34] FRITZ, A.H ; SCHULZE, G. ; KÜHN, K.D ; HOFFMEISTER, H.W: *Fertigungstechnik* : Springer, 2010
- [35] DENKENA, Berend ; TÖNSHOFF, H. K.: *Spanen : Grundlagen*. 3., bearb. u. erw. Aufl. Heidelberg, New York : Springer, 2011
- [36] KÖNIG, Wilfried ; KLOCKE, Fritz: *Fertigungsverfahren 1 : Drehen, Fräsen, Bohren*. 5. überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1997
- [37] BYRNE, G.: *A New Approach to the Theoretical Analysis of Surface Generation Mechanisms in Machining*. In: *Annals of the CIRP* 41/1, S. 67–70, 1992
- [38] CIRP HPC 2016 (Hrsg.); BYRNE, Gerald (Mitarb.): *HPC 2016 : Keynote Produktivität versus Robustheit*. Die Entwicklung der HPC in der CIRP-Gemeinschaft. Die Entwicklung der HPC in der CIRP-Gemeinschaft, 2016
- [39] BYRNE, G. ; DORNFELD, D. ; DENKENA, B.: *Advancing Cutting Technology*. In: *5CIRP6 Annals - Manufacturing Technology* 52, Nr. 2, S. 483–507, 2003 URL [//www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607602005](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607602005)
- [40] KLOCKE, Fritz ; KÖNIG, Wilfried: *Fertigungsverfahren 1 : Drehen, Fräsen, Bohren*. 8. Aufl. Berlin : Springer, 2008

- [41] DIN 6584. *Begriffe der Zerspantechnik; Kräfte, Energie, Arbeit, Leistungen*, 1982
- [42] HENGESBACH, Klaus ; KOCH, Fritz ; PYZALLA, Georg ; QUADFLIEG, Walter ; SCHILKE, Werner ; SCHMIDT, Johannes ; STAHLSCHMIDT, Holger: *Fachwissen Metall Grundstufe und Fachstufe 1*. 8. Aufl. : Bildungsverlag EINS, 2007
- [43] KNELLER, Eckart: *Ferromagnetismus : Mit einem Beitrag Quantentheorie und Elektronentheorie des Ferromagnetismus*. [S.l.] : Springer, 2012
- [44] BERKOWITZ, Ami Emanuel ; KNELLER, Eckart: *Magnetism and Metallurgy* BERKOWITZ, A.E (Hrsg.); KNELLER, E. (Hrsg.) : New York : Academic Pr., 1969
- [45] ILSCHNER, B.: *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik : Eigenschaften, Vorgänge, Technologien*. 4. Aufl. Berlin : Springer, 2005
- [46] HEISENBERG, Werner: *Zur Theorie des Ferromagnetismus*. In: *Zeitschrift für Physik* 49, 9-10, S. 619–636, 1928
- [47] CULLITY, Bernard D. ; GRAHAM, Chad D.: *Introduction to Magnetic Materials*. 2nd. Piscataway, NJ, Hoboken, NJ : IEEE Press; Wiley, 2009
- [48] MICHELS, Andreas ; WEISSMÜLLER, Jörg: *Magnetic-field-dependent small-angle neutron scattering on random anisotropy ferromagnets*. In: *Reports on Progress in Physics*, Nr. 5, 2012  
URL <http://iopscience.iop.org/0034-4885/71/6/066501>
- [49] TSCHUNCKY, Ralf: *Sensor- und geräteunabhängige Kalibrierung elektromagnetischer zerstörungsfreier Prüfverfahren zur praxisorientierten Werkstoffcharakterisierung*. Dissertation. 2011
- [50] STIERSTADT, Klaus: *Der Magnetische Barkhausen-Effekt* G. HÖHLER (Hrsg.) : Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1966
- [51] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFVERFAHREN: *Barkhausenrausch und Wirbelstrommikroskop zur orts aufgelösten Werkstoffcharakterisierung: Barkhausenrausch und Wirbelstrommikroskop zur orts aufgelösten Werkstoffcharakterisierung*, 2004.  
URL [www.izfp.fraunhofer.de](http://www.izfp.fraunhofer.de)
- [52] SUZUKI, K. ; ITO, N. ; U.A: *Magnetic domains and annealing-induced anisotropy in nanocrystalline soft magnetic materials*. In: *Journal of applied physics* 103, S. 07 E730-1-3, 2008
- [53] ASHCROFT, Neil W. ; MERMIN, N. David: *Festkörperphysik*. 3. Aufl. München [u.a.] : Oldenbourg, 2007
- [54] HILZINGER, R. ; RODEWALD, W.: *Magnetic Materials : Fundamentals, Products, Properties, Applications*. Erlangen : Publicis Publishing, 2013
- [55] SCHREIBER, E.: *Die Werkstoffbeeinflussung weicher und gehärteter Oberflächenschichten durch spanende Bearbeitung*. In: *VDI Berichte* 256, S. 67–79, 1976

- [56] SPUR, G.: *Beeinflussung weichmagnetischer Werkstoffeigenschaften durch spanende Bearbeitung*. In: *Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e. V.*, S. 85–96, 1983
- [57] ÖZHAN, Feridun ; SPUR, G.: *Fräsen von weichmagnetischen Werkstoffen* 24, 106. Jg., S. 67–68, 1984
- [58] ÖZHAN, Feridun: *Fräsen von weichmagnetischen Werkstoffen*, 1984
- [59] SPUR, G. ; ÖZHAN, F.: *Schleifen und Laeppen von weichmagnetischen Werkstoffen*. In: *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren*, Nr. 52, S. 44–73, 1984
- [60] BITTER, F.: *On Inhomogeneities in the Magnetization of Ferromagnetic Materials*. In: *Phys. Rev* 38, Nr. 10, S. 1903–1905, 1931
- [61] ZEHLER, V.: *Blochwände*. In: *PTB Mitteilungen Fachorgan für Wirtschaft und Wissenschaft Amts- und Mitteilungsblatt der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt* 5, S. 317–325, 1976
- [62] P. WEISS: *Hypothesis of the molecular field and ferromagnetic properties*. In: *Journal of Physics*, Nr. 4, S. 661, 1907
- [63] BRAMMERTZ, Paul-Heinz: *Ursachen für die Form- und Massfehler an feinbearbeiteten Werkstücken*. Aachen, RWTH Aachen, 1960
- [64] TINA EYRISCH: *Optimierung der Herstellung von Vollhartmetallwerkzeugen : Strategie zur Vermeidung von Oberflächenschädigungen*. Kaiserlautern, TU Kaiserslautern, FBK. Dissertation\_Produktionstechnische Berichte aus dem FBK. 03/2009
- [65] BÄHRE, Dirk ; TRAPP, Kirsten ; TSCHUNCKY, Ralf: *Influences on occurrence of magnetism during cutting processes*. In: *International Journal of Automation Technology*, Nr. 5, S. 294–299, 2011
- [66] TRAPP, Kirsten ; HERTER, Franziska ; BAEHRE, Dirk: *Magnetic Property Changes by Machining Ferromagnetic Materials*. In: *Procedia CIRP* 46 (2016), S. 250–253
- [67] BÄHRE, Dirk ; BECKER, Dirk ; TSCHUNCKY, Ralf: *Analysis of Influences on Occurrence of Magnetism during Cutting Processes*. In: *Proceedings of the 4th CIRP HPC 2010*, Nr. 1, S. 19–22, 2010
- [68] JOHNSTON, Gwynne (Hrsg.): *Effects of Stress and Strain on Properties of Fully Processed Electrical Steels : Proceedings / 6th International Conference on Magnetism and Metallurgy, WMM`14*. Cardiff - Wales, June 17th to 19th, 2014. Cardiff : Cardiff University, 2014
- [69] SIEBERT, Rene ; SCHNEIDER, Jurgen ; BEYER, Eckhard: *Manufacturing Related Effects on Magnetic Properties of Electrical Steels : Proceedings / 6th International Conference on Magnetism and Metallurgy, WMM`14*. Cardiff - Wales, June 17th to 19th, 2014. Cardiff, 2014 (4). – Cardiff - Wales, June 17th to 19th, 2014

- [70] HARSTICK, H. (Hrsg.); RIEHEMANN, W. (Hrsg.): *Influence of Cutting on the Magnetic Properties of Electrical Steel : Proceedings / 6th International Conference on Magnetism and Metallurgy, WMM`14*. Cardiff - Wales, June 17th to 19th, 2014. Cardiff : Cardiff University, 2014
- [71] SCHOPPA, Andreas Peter (Hrsg.): *Soft magnetic composite materials - their magnetic properties and applications : Proceedings / 6th International Conference on Magnetism and Metallurgy, WMM`14*. Cardiff - Wales, June 17th to 19th, 2014. Cardiff : Cardiff University, 2014
- [72] SCHOPPA, Andreas Peter: *Einfluss der Be- und Verarbeitung auf die magnetischen Eigenschaften von schlussgeglühtem, nichtkornorientiertem Elektrobund*. Aachen, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, Institut für Werkstoffkunde. Dissertation. 2001-01-05
- [73] KOBLISCHKA-VENEVA, A. ; KOBLISCHKA, M. R. ; MÜCKLICH, F.: *Advanced microstructural analysis of ferrite materials by means of electron backscatter diffraction (EBSD)*. In: *Proceedings of the Joint European Magnetic Symposia 322* , 9–12, S. 1178–1181, 2010  
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885309006908>
- [74] KOBLISCHKA-VENEVA, Anjela ; KOBLISCHKA, Michael R. ; SIMON, Petra ; MÜCKLICH, Frank ; MURAKAMI, Masato: *Electron backscatter diffraction study of polycrystalline YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> ceramics*. In: *Physica C: Superconductivity* 382, 2–3, S. 311–322, 2002  
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921453402012443>
- [75] KOBLISCHKA, Michael Rudolf ; KOBLISCHKA-VENEVA, Anjela ; REDDY, E. S. ; SCHMITZ, Gregor J.: *Analysis of the microstructure of superconducting YBCO foams by means of AFM and EBSD*. In: *Journal of Advanced Ceramics* 3, Nr. 4, S. 317–325, 2014  
URL <http://dx.doi.org/10.1007/s40145-014-0123-z>
- [76] JUNG, Anne: *Offenporige, nanobeschichtete Hybrid-Metallschäume : Herstellung und mechanische Eigenschaften*. Postfach 151141, 66041 Saarbrücken, Universität des Saarlandes. 2011  
URL <http://scidok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2012/4609>
- [77] RANDLE, Valerie: *Electron backscatter diffraction: Strategies for reliable data acquisition and processing*. In: *Materials Characterization* 60, Nr. 9, S. 913–922, 2009  
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044580309001879>
- [78] WRIGHT, Stuart I. ; NOWELL, Matthew M. ; LINDEMAN, Scott P. ; CAMUS, Patrick P. ; GRAEF, Marc De ; JACKSON, Michael A.: *Introduction and comparison of new 5EBSD6 post-processing methodologies*. In: *Ultramicroscopy* 159, Part 1, S. 81–94, 2015  
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304399115300188>

- [79] WRIGHT, Stuart I. ; NOWELL, Matthew M. ; KLOE, René de ; CAMUS, Patrick ; RAMPTON, Travis: *Electron imaging with an EBSD detector*. In: *Ultramicroscopy* 148, S. 132–145, 2014  
URL [//www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304399114001946](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304399114001946)
- [80] MAGNET-PHYSIK DR. STEINGROEVER GMBH; Dr. Steingroever (Mitarb.); Dr. Ross (Mitarb.) : *REMAGRAPH® C - 500 : zur rechnergesteuerten Messung der Hysteresekurven von weichmagnetischen Werkstoffen*. 2008 (Messverfahren der Magnettechnik)
- [81] AGILENT\_2013: <http://www.home.agilent.com/en/pc-1678601/afm-atomic-force-microscope?&cc=DE&lc=ger>. URL <http://www.home.agilent.com/en/pc-1678601/afm-atomic-force-microscope?&cc=DE&lc=ger>
- [82] MESCHÉDE, Dieter (Hrsg.): *Elektromagnetismus: Ladungen und Ströme*. Berlin/Heidelberg : Springer-Verlag, 2006
- [83] PROJEKT ELEKTRONIK: *Messprinzipien : Hall-Sensoren; Fluxgate Sensoren*. Application note PE001. URL [www.projekt-elektronik.de/pdf/PE001%201-1%20Messprinzipien.pdf](http://www.projekt-elektronik.de/pdf/PE001%201-1%20Messprinzipien.pdf)
- [84] HERING, Ekbert: *Sensoren : Funktionsweise und Einsatzgebiete*. 1. Aufl. Wiesbaden : Vieweg, F, 2010
- [85] BIERMANN, Dirk: *Untersuchungen zum Drehen und Tiefbohren schwefelarmer Stähle : Turning and deep hole drilling of high-grade structural steels with minimal sulfur content*. Düsseldorf : Verl. und Vertriebsges., (Forschung für die Praxis P 689), 2009
- [86] REINERT, Uwe ; SCHUBERT, Rüdiger: *Einfluß von Legierungselementen auf die Eigenschaften von Eisenwerkstoffen*
- [87] MAX BAUM STAHL SERVICE: *Technischer Begleiter*. URL [http://www.knauf-interfer.de/deutsch/standorte/max\\_baum\\_duisburg/infomaterial/index.html](http://www.knauf-interfer.de/deutsch/standorte/max_baum_duisburg/infomaterial/index.html)
- [88] DAHL, W.: *Umformtechnik, Plastomechanik und Werkstoffkunde*. Düsseldorf : Verlag Stahleisen, 1993
- [89] METALLOGRAF: *16MnCr5 : Werkstoffnummer 1.7131*. URL <http://www.metallograf.de/start.htm?/werkstoffkartei/7131/7131-g1.htm>
- [90] BERGMANN, Wolfgang: *Werkstofftechnik*. 4. Aufl. München [u.a.] : Hanser, 2009
- [91] DIROSTAHL: *Legierter Einsatzstahl : DIRO-16MnCr5: Legierter Einsatzstahl : DIRO-16MnCr5*
- [92] DOEGE, Eckart ; MEYER-NOLKEMPER, Heinz ; SAEED, Imtiaz: *Fließkurven-Atlas metallischer Werkstoffe* : Hanser Verlag München Wien, 1986
- [93] FUHRMANN, Ernst: *Einführung in die Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung : I: Werkstoffe: Aufbau - Behandlung - Eigenschaften*. 1. Auflage. Renningen : expert-Verlag, 2003

- [94] RAEDT, Hans-Willi: *Gefügezustand*. URL <http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus/volltexte/2002/341/pdf/html/node25.html>
- [95] LIEDTKE, D. ; STIELE, H.: *Wärmebehandlung von Stahl - Randschichthärten*. Düsseldorf, (Merkblatt 236) 2009
- [96] WEBER, Olivier ; WEINMANN, Martin ; NATTER, Harald ; BÄHRE, Dirk: *Electrochemical dissolution of cast iron in NaNO<sub>3</sub> electrolyte*. In: *Journal of Applied Electrochemistry* 45, Nr. 6, S. 591–609, 2015.  
URL <https://doi.org/10.1007/s10800-015-0809-0>
- [97] *Uniting Electron Crystallography and Powder Diffraction*, 2012
- [98] GENOMA: *Das Entmagnetisieren von Werkstücken*. URL <http://www.genoma.de/produktseiten/730000/technische-grundlagen/zt700-das-entmagnetisieren-von-werkstuecken/> – Überprüfungsdatum 2014-06-10
- [99] SU, Hao ; CHEN, Ming: *Experimental and theoretical analysis of metal magnetic memory signals in the stress concentration area of 45# steel under tensile testing*. In: *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* vol. 46 , no. 1, S. pp. 271-280, 2014
- [100] ADDITIVE: *minitab* : additive-net
- [101] SIEBERTZ, Karl ; VAN BEBBER, David ; HOCHKIRCHEN, Thomas: *Statistische Versuchsplanung : Design of Experiments (DoE)*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010
- [102] ALTPETER, I.: *Spannungsmessung und Zementitgehaltsbestimmung in Eisenwerkstoffen mittels dynamischer magnetischer und magnetoelastischer Messgrößen : IZFP Bericht 900111-TW*. Saarbrücken, Universität des Saarlandes. Dissertation. 1990
- [103] ALTPETER, I. ; BECKING, R. ; HARTMANN, S. ; KERN, R.: *Erfassung von thermisch induzierten Eigenspannungen mit temperatur- und lastspannungsabhängigen Barkhausenrauschmessungen*. Saarbrücken, 1997 (IZFP-Bericht Nr. 970136-TW)
- [104] SCHNEIDER, Eckhardt ; DOUBOV, Anatoli: *Zerstörungsfreie Charakterisierung des Eigenspannungszustandes mit der Metall Memory Method (MMM) (2007)* – Überprüfungsdatum 2015-10-04
- [105] LIHONG, Dong ; BINSHI, Xu ; SHIYUN, Dong ; QUNZHI, Chen ; DAN, Wang: *Variation of stress-induced magnetic signals during tensile testing of ferromagnetic steels*. In: *NDT & E International* 41, Nr. 3, S. 184–189, 2008
- [106] BAO, S. ; LOU, H. ; GONG, S.: *Magnetic field variation of a low-carbon steel under tensile stress*. In: *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* 56, Nr. 5, S. 252–263, 2014
- [107] BAO, S. ; ZHANG, D.: *The effect of loading speed on the residual magnetic field of ferromagnetic steels subjected to tensile stress*. In: *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* 57, Nr. 7, S. 401–405, 2015

- 
- [108]HERTER, Franziska: *Einflussanalyse der spanenden Bearbeitung auf magnetische Eigenschaften unter Anwendung der statistischen Versuchsplanung*. Saarbrücken, Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für Fertigungstechnik. Masterthesis. 2015

## ANHANG A

## Berechnung der idealisierten Partikelgröße

$$F_M = \frac{B^2 A}{2\mu_0}$$

$$F_G = \rho V g$$

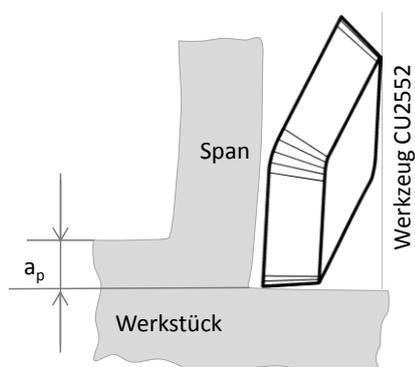
$$F_M \geq F_G$$

$$a = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\rho g \mu_0}$$

Symbol	Beschreibung	Einheit
$F_M$	Magnetisch anhaftende Kraft	[N]
$F_G$	Gravitationskraft	[N]
$\rho$	Dichte (Stahl: 7850)	[kg/m <sup>3</sup> ]
$V$	Volumen	[m <sup>3</sup> ]
$g$	Gravitationskonstante (9,81)	[m/s <sup>2</sup> ]
$B$	magnetische Flussdichte	[T=kg/As <sup>2</sup> ]
$A$	Fläche (a <sup>2</sup> )	[m <sup>2</sup> ]
$\mu_0$	magnetische Permeabilität (4 $\pi$ 10 <sup>-7</sup> )	[kg m/A <sup>2</sup> s <sup>2</sup> ]
$a$	Partikellänge	[m]

## ANHANG B

## Werkzeugeingriff



Zusammenhang Werkzeugeingriff und Eingriffswinkel in den Spanbildungsprozess

## ANHANG C

### Metallographie

#### METALLOGRAPHISCHE PRÄPARATIONSSCHRITTE DER PROBEN

1. Proben abschneiden als Vorbereitung zum Einbetten (bei Proben, die zu groß für die zur Verfügung stehenden Einbettformen waren)
2. Einbetten: in den Einbettformen mit metallographischem Kunststoff (Kaltpolymerisat DEMO-TEC 35, Pulver + Flüssigkeit)
3. Schleifen in einspindeliger Schleif und Poliermaschine Saphir 520 (ATM)
  - i. Hintere, nicht zu untersuchende Seite der eingebetteten Probe mit *CAMEO-Disk* (Körnung 120) schleifen, bis sie plan ist.
  - ii. Zu untersuchende Seite der eingebetteten Probe (Seite, wo der Werkstoff zu sehen ist) nach den folgenden Schritten schleifen

Schritt	Schleifmedium	Körnung	Kraft [N]	Geschwindigkeit [rpm]	Richtung	Zeit [min]
1	SiC-Papier	500	25	150	Gegenlauf	Bis plan
2	SiC-Papier	800	25	150	Gegenlauf	1,5
3	SiC-Papier	1200	25	150	Gegenlauf	1

- Reinigen durch Abspülen unter fließendem Wasser zwischen den einzelnen Schritten

4. Polieren in einspindeliger Schleif und Poliermaschine Saphir 520 (ATM) nach den folgenden Schritten

Schritt	Poliertuch	Diamant-suspension	Dosier-intervall	Kraft [N]	Geschwindigkeit [rpm]	Richtung	Zeit [min]
1	Stahl 6µm	6	alle 40s	25	150	Gleichlauf	4
2	Stahl 3µm	3	alle 30s	25	150	Gleichlauf	3
3	Stahl 1µm	1	alle 30s	25	150	Gleichlauf	2

- Reinigen im Ultraschallbad zwischen den einzelnen Schritten etwa 1 min und anschließend Abspülen unter fließendem Wasser

5. Endpolitur mit OP-S Suspension: „*colloidal Silica-Suspension for final polishing*“

- Poliertuch: Stahl 0.04µm
- Dosierintervall: alle 30s mit Spritze
- Kraft: 25N
- Geschwindigkeit: 150 rpm
- Richtung: Gleichlauf
- Zeit: bis Probe ohne Kratzer

6. Letzte Reinigung und Probe trocknen durch Abblasen der Schliffoberfläche mit gereinigter Druckluft

7. Ätzen

- Ätzmittel: Nitalätzmittel mit 3% Salpetersäure und 97% Ethanol
- Bedingungen: Sekunden bis Minuten, bis geätzt

**ANHANG D**

**Vergleich der EBSD-Korndurchmesserauswertung in  $\mu\text{m}$  senkrecht zur Walzrichtung der Chargen A und B des Werkstoffs 1.7225**

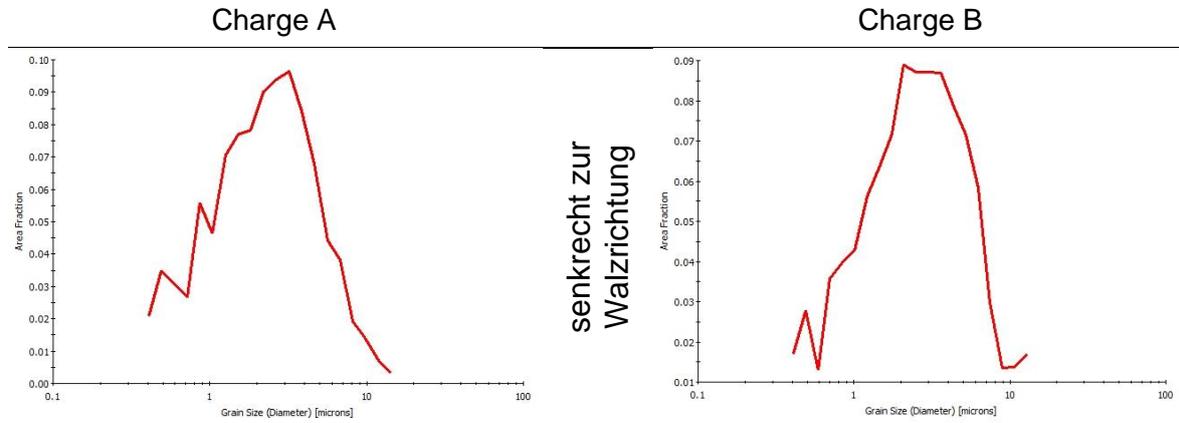


Chart: Grain Size (diameter)

Chart: Grain Size (diameter)

Edge grains included in analysis

Edge grains included in analysis

<u>Diameter [microns]</u>	<u>Area Fraction</u>
0.407704	0.0209786
0.491682	0.0348018
0.592958	0.0307098
0.715095	0.0265167
0.862389	0.0558318
1.04002	0.0465532
1.25424	0.0706854
1.51259	0.0769871
1.82415	0.0784019
2.19989	0.090066
2.65302	0.0938424
3.19948	0.096444
3.85851	0.0841544
4.65327	0.0678197
5.61175	0.0443131
6.76765	0.0382553
8.16163	0.0192518
9.84276	0.0138857
11.8701	0.0072023
14.3151	0.00329895

<u>Diameter [microns]</u>	<u>Area Fraction</u>
0.406608	0.0169256
0.487726	0.0279037
0.585028	0.0128106
0.701741	0.0357157
0.841739	0.0396821
1.00967	0.0427383
1.2111	0.0561668
1.45271	0.0636909
1.74253	0.0718392
2.09016	0.0888849
2.50715	0.0870598
3.00733	0.0871102
3.60729	0.0870305
4.32695	0.0786896
5.19017	0.0714377
6.22562	0.0582467
7.46763	0.0298177
8.95743	0.0135073
10.7444	0.0137584
12.888	0.0169842

Senkrecht zur Walzrichtung

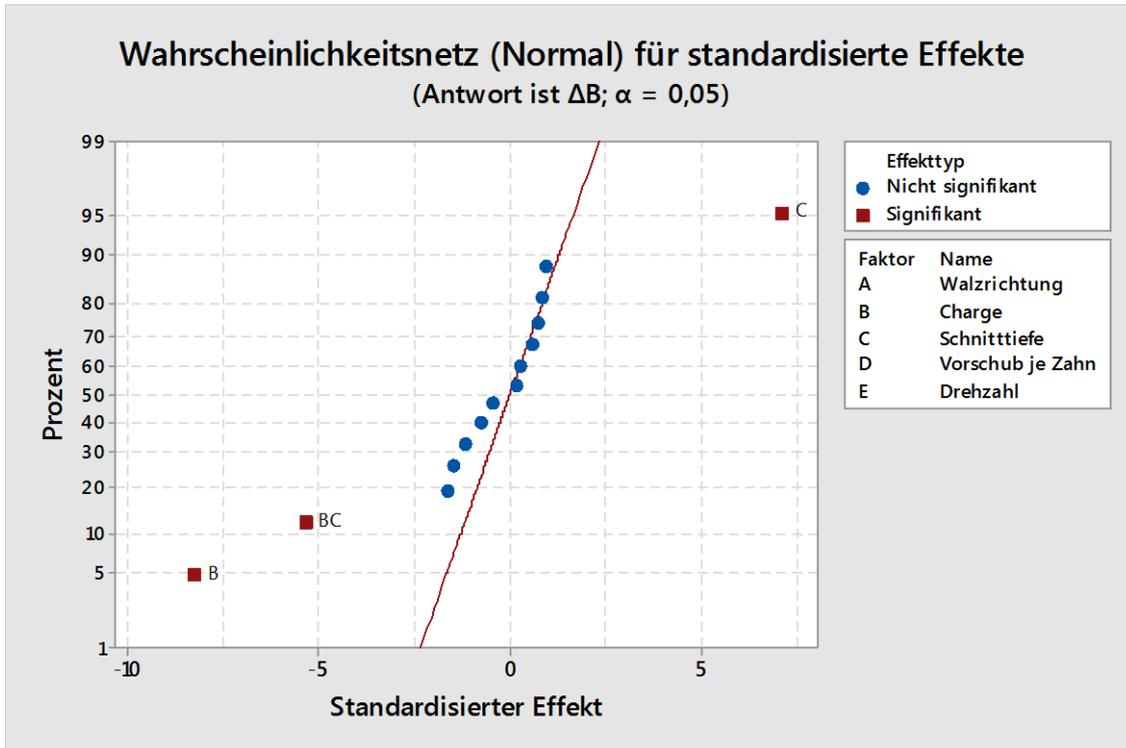
Average	
Number	0.898782
Area	2.834

Average	
Number	0.955696
Area	3.18653

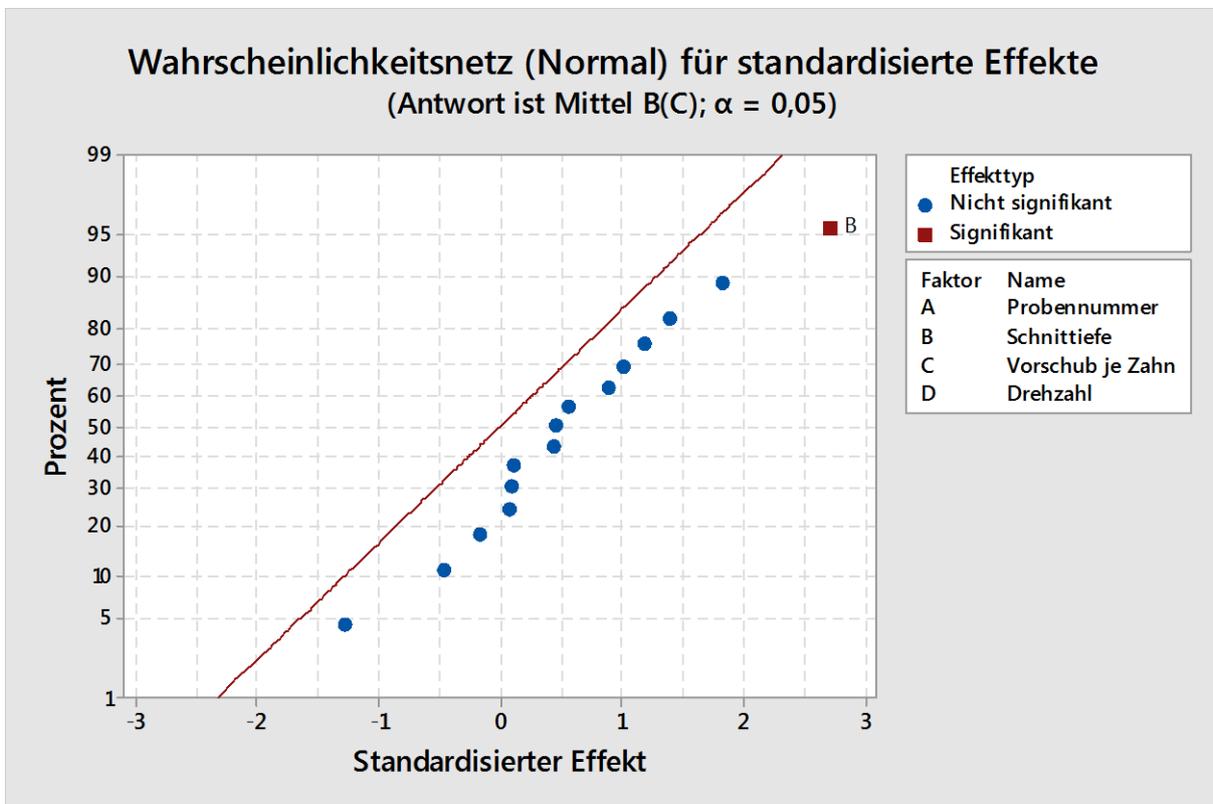
Standard Deviation	
Number	0.778126
Area	2.21869

Standard Deviation	
Number	0.861143
Area	2.51198

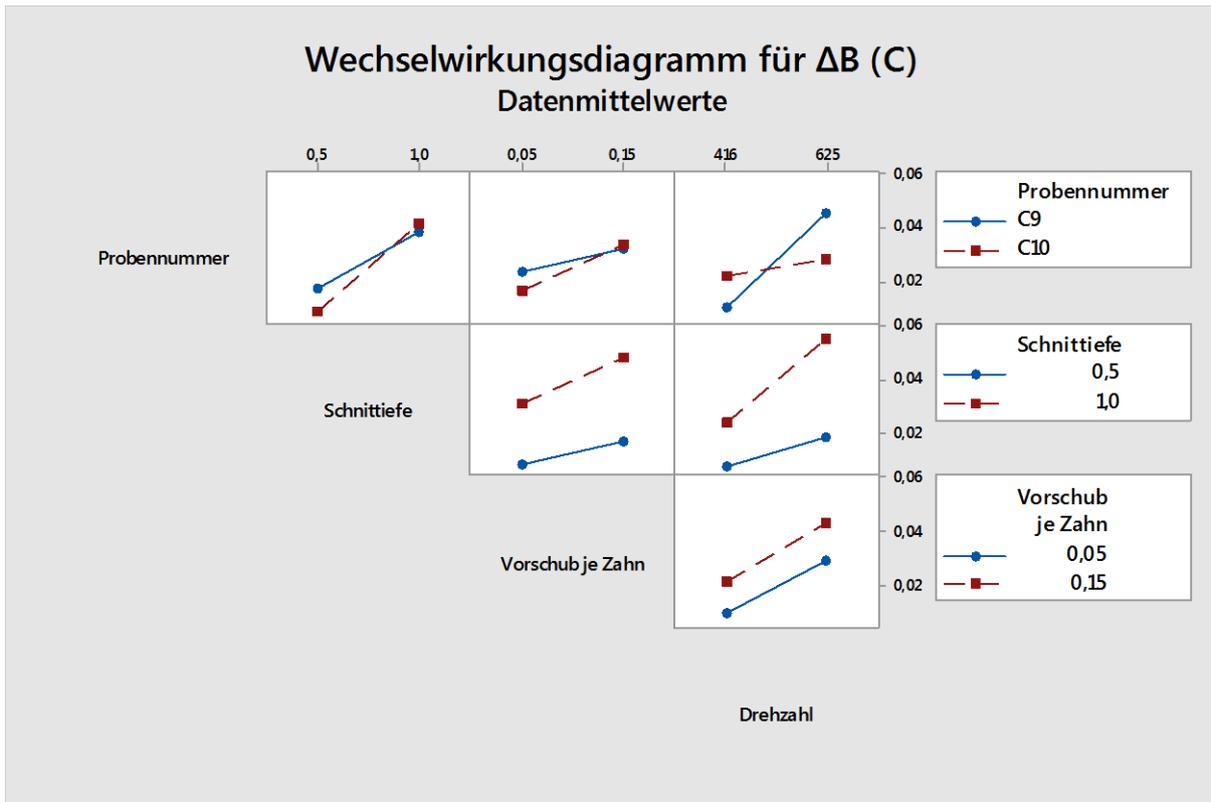
## ANHANG E DOE Ergebnisse



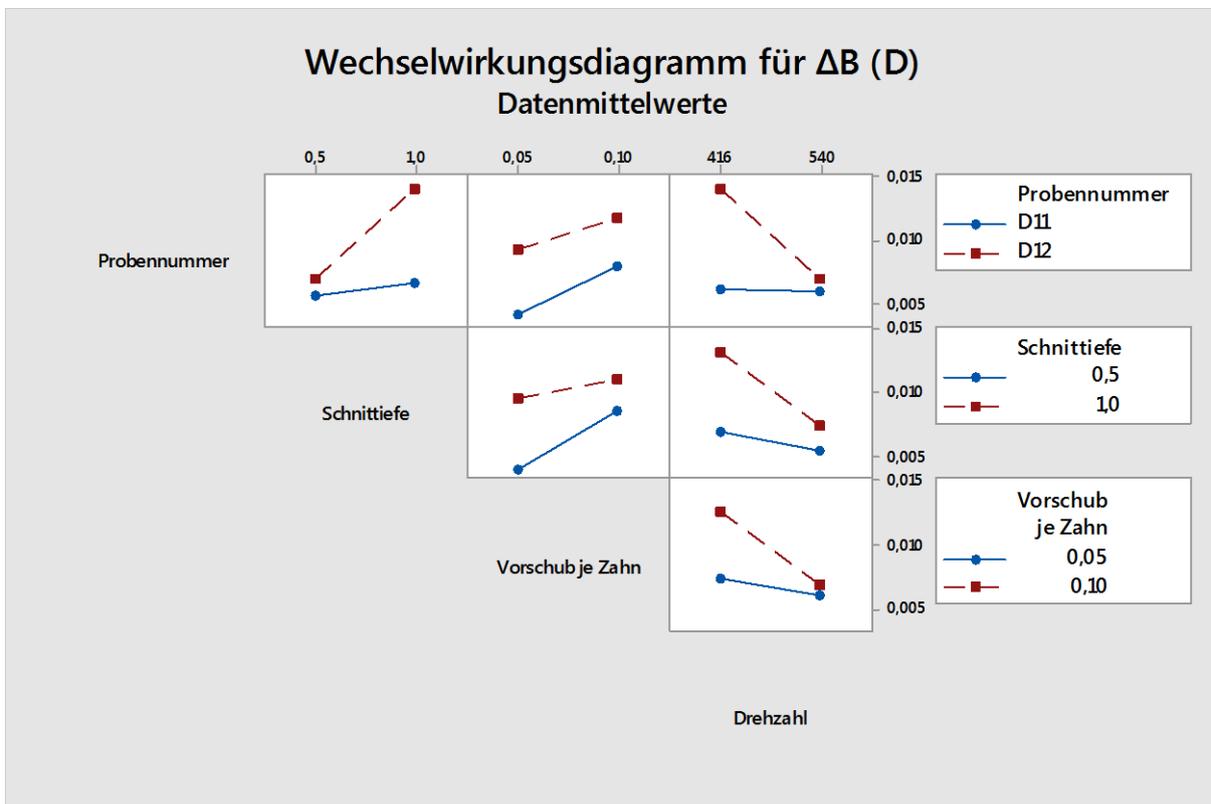
Wahrscheinlichkeitsnetz für standardisierte Effekte im Parametervergleich unter Betrachtung der Werte von End- zu Ausgangszustand der Chargen A und B des Werkstoffs 1.7225



Ergebnis der DoE Auswertung zur Parameteranalyse der Charge C des Werkstoffs 1.3505



Ergebnis der DoE Auswertung zur Wechselwirkungsanalyse der Charge C des Werkstoffs 1.3505



Ergebnis der DoE Auswertung zur Wechselwirkungsanalyse der Charge D des Werkstoffs 1.2080

**ANHANG F**

**Auslegung der Zugproben:**

Mit  $F_{max} = 50 \text{ kN}$

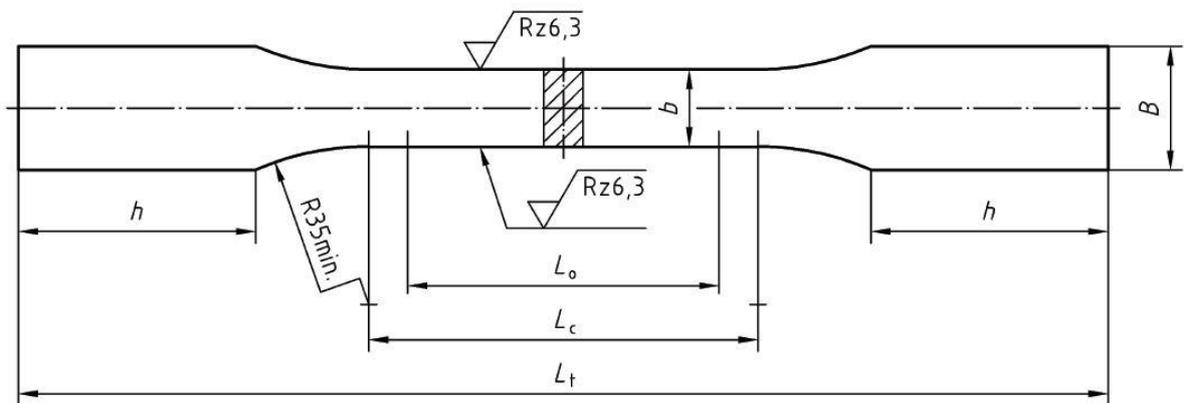
$\sigma = R_m = 1300 \text{ MPa}$

$$\sigma = \frac{F}{A} (1)$$

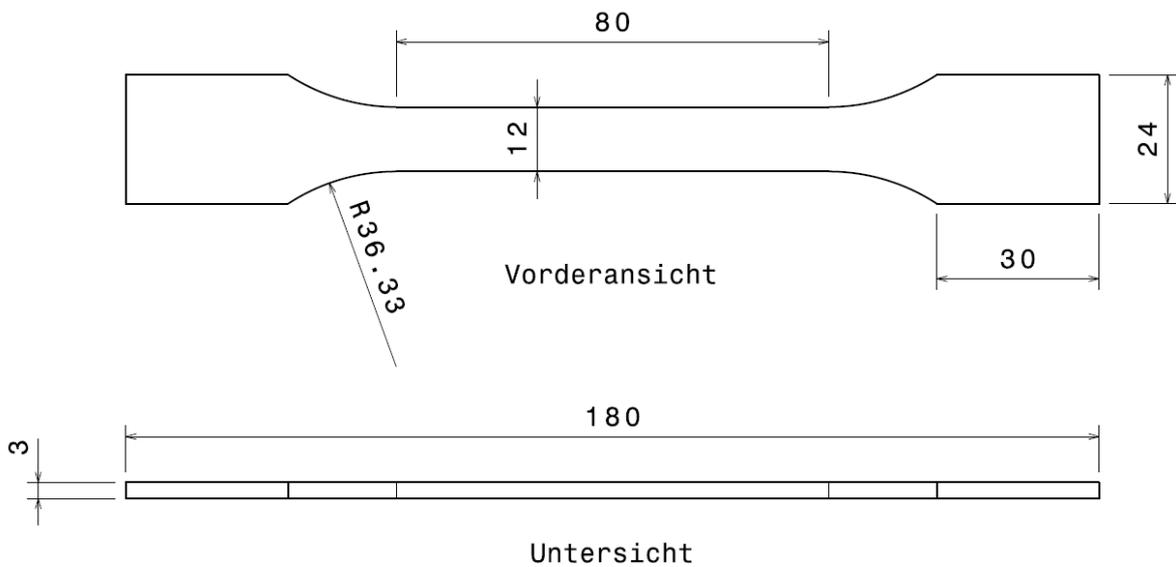
Gleichung (1) auflösen nach A und Werte einsetzen.  $A \approx 37 \text{ mm}^2$  (mit  $\sigma$  etwas größer als Tabellen wert) Überlegung: Flachzugproben, weil einfacher mit Hallsensor zu Messen. Allerdings Auftreten von Kanteneffekten.

$A = 12 \text{ mm} \cdot 3 \text{ mm} = 36 \text{ mm}^2$

Damit kann eine Spannung  $\sigma = 1388,9 \text{ MPa}$  erreicht werden.



Flachzugprobe Form E nach DIN 50125



aus Daten konstruierte Zugprobe

**ANHANG G****Entmagnetisier-Einheit mit standardisiertem Vorgehen**

Die Werkstücke werden gleichmäßig und einzeln durch den Entmagnetisierer gefördert. Die Geschwindigkeit und die Anzahl an Durchgängen wurden auf Basis von Versuchen festgelegt. Zur Vergleichbarkeit des Ausgangszustands ENTM wurde ein Zielwert der maximalen magnetischen Flussdichte bestimmt. Alle Werkstücke wurden nach der Entmagnetisierung im Flächenscan vermessen. Die Länge der Einfuhr- und Ausfuhrlänge ist durch die Herstellerangaben bestimmt. Die Abbildung zeigt den umgesetzten Aufbau. Der Tunnelentmagnetisierer ist von der Firma *SMT Stute Magnet Technik*. Er ist nicht für den Dauereinsatz geeignet, die Spezifikationen sind im ersten Bild zu erkennen.



Spezifikationen



Aufbau

**ANHANG H :****Ergebnis der Zugprobe der Charge B vor Zugbelastung**

Messwerte der Proben der Chargen A und B des Werkstoffes 1.7225 in paralleler Walzrichtung sowohl Mittelwert als auch Maximum und Minimum

Mittelwert:	-0,01	-0,013	0,044	0,048
Bmin:	-0,029	-0,018	0,038	0,041
Bmax:	0,006	-0,008	0,052	0,058
A PW vor	X	Y	Z	B

Mittelwert:	-0,001	0,023	0,0251	0,079
Bmin:	-0,154	-0,032	-0,034	0,024
Bmax:	0,115	0,076	0,124	0,18
A PW nach	X	Y	Z	B

Mittelwert:	-0,015	-0,014	0,044	0,049
Bmin:	-0,029	-0,019	0,036	0,04
Bmax:	0,001	-0,008	0,051	0,057
B PW vor	X	Y	Z	B

Mittelwert:	-0,012	0,0049	0,033	0,044
Bmin:	-0,069	-0,019	0,008	0,011
Bmax:	0,035	0,023	0,079	0,093
B PW nach	X	Y	Z	B

**ANHANG I****Studentische Arbeiten im Rahmen dieser Arbeit**

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden folgende inhaltlich unterstützende Arbeiten begleitet und integriert

2011 Bachelor Thesis Kai Uwe Fink Unterstützung bei der Untersuchung des Einflusses der Bearbeitungsrichtung durch punktuelle Messung in z-Richtung

2012 Studienarbeit Alexander Dornhöfer Unterstützung beim Aufbau und Auslegung des Messaufbaus, dadurch flächiger Oberflächenscan möglich und ersetzt die punktuelle lokale Messung der Anfangsphase

2012 Bachelor Thesis Lilliane Käfer Unterstützung bei der Optimierung der Messabläufe, gemeinsame Veröffentlichung auf der NAMRC 2015

2012 EEIGM Report Josefin Ratcovich Unterstützung zum Werkstoffverhalten bei der Analyse der magnetischen Domänenverschiebung mit Magnetic Force Mikroskopie, gemeinsame Veröffentlichung auf der EEIGM Konferenz 2012 in Schweden

2013 Bachelor Thesis Philipp Engel, Untersuchungen zum Einfluss der Werkzugschneide unter dem Aspekt der Änderung der magnetischen Oberflächenänderungen

2014 Bachelor Thesis Taner Abak, Unterstützung bei der Umsetzung einer Entmagnetisierereinheit

2015 Bachelor Thesis Philip Weiler Unterstützung der Werkstoffcharakterisierung des Werkstoffs 1.7225 u.a. mit EBSD Messungen am Lehrstuhl für Funktionswerkstoffe

2016 Master Thesis Franziska Herter, Unterstützung beim Aufbau und Durchführung der Versuche am Modellsystem



Probe	Initial												Fräsen												n = Drehzahl							
	X			Y			Z			Mittelwert			Scan			Parameter			X			Y			Z			Mittelwert				
	Min	Max	Mittelwert	Min	Max	Mittelwert	Min	Max	Mittelwert	Min	Max	Mittelwert	Min	Max	Mittelwert	n	vf	ap	Min	Max	Mittelwert	Min	Max	Mittelwert	Min	Max	Mittelwert	Min	Max	Mittelwert		
A7	-0.503	0.320	-0.245	0.280	-0.232	0.445	0.105	0.554	A7				800	600	1	-0.743	0.615	-0.323	0.625	-0.480	0.730	0.362	0.871									
A8	-0.580	0.338	-0.265	0.318	-0.276	0.497	0.107	0.642	A8				800	600	1	-0.729	0.631	-0.340	0.622	-0.454	0.742	0.333	0.868									
A9	-0.561	0.330	-0.233	0.289	-0.224	0.451	0.114	0.619	A9				800	600	1	-0.725	0.592	-0.346	0.597	-0.423	0.720	0.239	0.835									
A11	-0.580	0.392	-0.257	0.302	-0.143	0.471	0.141	0.637	A11				800	600	1	-0.711	0.620	-0.346	0.529	-0.276	0.693	0.185	0.807									
A12	-0.589	0.358	-0.278	0.312	-0.148	0.474	0.110	0.634	A12				800	600	1	-0.694	0.588	-0.336	0.523	-0.288	0.888	0.207	0.805									
A28	-0.531	0.372	-0.283	0.276	-0.052	0.489	0.055	0.594	A28				800	600	0.5	-0.789	0.617	-0.340	0.438	-0.100	0.667	0.093	0.832									
A30	-0.633	0.397	-0.297	0.291	-0.174	0.516	0.099	0.664	A30				800	600	0.5	-0.881	0.654	-0.342	0.437	-0.251	0.688	0.077	0.908									
A31	-0.661	0.367	-0.275	0.326	-0.198	0.509	0.120	0.682	A31				800	600	0.5	-0.941	0.660	-0.346	0.453	-0.324	0.707	0.066	0.956									
A32	-0.740	0.377	-0.298	0.252	-0.295	0.508	0.113	0.749	A32				800	600	0.5	-0.989	0.604	-0.349	0.442	-0.442	0.716	0.096	1.007									
A33	-0.816	0.502	-0.316	0.265	-0.490	0.535	0.146	0.838	A33				800	600	0.5	-1.053	0.637	-0.347	0.462	-0.611	0.751	0.150	1.089									
A16	-0.501	0.352	-0.244	0.305	-0.049	0.469	0.104	0.541	A16				800	400	1	-0.769	0.626	-0.348	0.485	-0.164	0.692	0.137	0.829									
A17	-0.504	0.369	-0.263	0.260	-0.023	0.473	0.090	0.557	A17				800	400	1	-0.757	0.628	-0.339	0.490	-0.187	0.684	0.138	0.817									
A18	-0.503	0.365	-0.272	0.259	-0.046	0.461	0.073	0.559	A18				800	400	1	-0.782	0.601	-0.337	0.490	-0.213	0.681	0.133	0.840									
A19	-0.507	0.353	-0.264	0.266	-0.093	0.453	0.071	0.544	A19				800	400	1	-0.759	0.593	-0.333	0.502	-0.250	0.676	0.169	0.821									
A20	-0.486	0.351	-0.273	0.282	-0.086	0.464	0.068	0.546	A20				800	400	1	-0.774	0.587	-0.332	0.484	-0.148	0.665	0.143	0.827									
A4	-0.841	0.727	-0.285	0.433	-0.717	0.773	0.244	0.924	A4				400	300	1	-0.884	1.280	-0.349	0.761	-1.036	1.053	0.421	1.457									
A34	-0.825	0.840	-0.321	0.334	-0.729	0.572	0.157	1.012	A34				400	300	1	-1.090	1.036	-0.396	0.548	-0.885	0.882	0.174	1.232									
A35	-0.820	1.050	-0.328	0.513	-0.863	0.680	0.283	1.213	A35				400	300	1	-0.962	1.325	-0.404	0.739	-1.125	0.991	0.287	1.545									
A37	-1.195	1.010	-0.402	0.272	-0.691	1.173	0.341	1.417	A37				400	300	1	-1.056	0.899	-0.418	0.283	-0.802	1.186	0.471	1.343									
A38	-0.866	0.692	-0.297	0.224	-0.526	0.771	0.229	0.992	A38				400	300	1	-0.976	0.911	-0.385	0.324	-0.755	0.987	0.324	1.126									
A13	-0.598	0.368	-0.283	0.320	-0.153	0.488	0.084	0.642	A13				800	600	1	-0.597	0.493	-0.298	0.440	-0.230	0.527	0.112	0.670									
A24	-0.581	0.369	-0.267	0.237	-0.065	0.449	0.057	0.623	A24				800	600	1	-0.756	0.478	-0.312	0.430	-0.162	0.558	0.078	0.782									
A25	-0.516	0.368	-0.275	0.276	-0.071	0.471	0.080	0.585	A25				800	600	1	-0.758	0.471	-0.322	0.431	-0.161	0.550	0.100	0.788									
A27	-0.507	0.372	-0.269	0.263	-0.066	0.479	0.061	0.575	A27				800	600	1	-0.616	0.415	-0.294	0.326	-0.097	0.455	0.085	0.654									
A29	-0.609	0.366	-0.276	0.265	-0.101	0.486	0.083	0.632	A29				800	600	1	-0.752	0.506	-0.326	0.382	-0.136	0.571	0.082	0.766									
A14	-0.567	0.400	-0.299	0.292	-0.105	0.491	0.074	0.596	A14				800	600	0.5	-0.679	0.413	-0.216	0.283	-0.082	0.404	0.094	0.530									
A21	-0.528	0.359	-0.268	0.345	-0.130	0.490	0.130	0.583	A21				800	600	0.5	-0.457	0.384	-0.205	0.275	-0.055	0.388	0.106	0.504									
A22	-0.505	0.357	-0.288	0.322	-0.117	0.493	0.092	0.567	A22				800	600	0.5	-0.461	0.384	-0.217	0.294	-0.077	0.400	0.110	0.507									
A23	-0.591	0.463	-0.310	0.375	-0.151	0.571	0.155	0.669	A23				800	600	0.5	-0.488	0.404	-0.224	0.309	-0.094	0.412	0.117	0.534									
A26	-0.580	0.408	-0.299	0.441	-0.146	0.617	0.167	0.676	A26				800	600	0.5	-0.396	0.351	-0.195	0.239	-0.043	0.356	0.114	0.449									
A1	-0.575	0.452	-0.136	0.209	-0.245	0.495	0.090	0.667	A1				800	400	1	-0.536	0.432	-0.114	0.197	-0.150	0.424	0.010	0.610									
A3	-0.611	0.250	-0.362	0.339	-0.306	0.423	0.162	0.666	A3				800	400	1	-0.547	0.379	-0.168	0.451	-0.342	0.448	0.172	0.609									
A5	-0.800	0.770	-0.314	0.367	-0.689	0.566	0.198	0.903	A5				800	400	1	-0.733	1.018	-0.250	0.689	-0.833	0.728	0.312	1.161									
A6	-0.487	0.585	-0.278	0.393	-0.464	0.470	0.164	0.661	A6				800	400	1	-0.630	0.855	-0.239	0.652	-0.675	0.686	0.393	0.969									
A36	-0.479	0.645	-0.271	0.520	-0.464	0.495	0.120	0.712	A36				800	400	1	-0.644	0.826	-0.220	0.649	-0.645	0.618	0.316	0.943									
A2	-0.597	0.407	-0.225	0.203	-0.320	0.487	0.054	0.682	A2				400	300	1	-0.509	0.223	-0.211	0.271	-0.150	0.444	0.094	0.579									
A10	-0.524	0.341	-0.245	0.177	-0.121	0.412	0.099	0.574	A10				400	300	1	-0.374	0.453	-0.241	0.176	-0.288	0.117	0.090	0.472									
A15	-0.307	0.437	-0.197	0.065	-0.294	0.054	0.117	0.477	A15				400	300	1	-0.374	0.453	-0.241	0.176	-0.288	0.117	0.090	0.472									
A39	-0.533	0.438	-0.168	0.186	-0.167	0.449	0.158	0.559	A39				400	300	1	-0.612	0.260	-0.203	0.230	-0.057	0.490	0.061	0.674									
A40	-0.533	0.438	-0.168	0.186	-0.167	0.449	0.158	0.559	A40				400	300	1	-0.716	0.263	-0.169	0.209	-0.042	0.443	0.044	0.738									

Kurze Proben



Versuchsreihe C – 100Cr6		Fräsen												n = Drehzahl		
		Probe	Scan	X		Y		Z		Mittelwert		Min	Max	Min	Max	
				Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
Lange Proben	C9	v01		-0,071	0,068	-0,056	-0,003	0,036	0,101	0,038	0,113					
		v02		-0,090	0,071	-0,059	0,000	0,017	0,118	0,023	0,133					
		v04		-0,079	0,060	-0,052	-0,004	0,033	0,104	0,036	0,117					
		v06		-0,072	0,061	-0,050	-0,004	0,030	0,102	0,033	0,111					
		v07		-0,070	0,055	-0,055	-0,004	0,035	0,098	0,036	0,112					
		v10		-0,076	0,044	-0,054	-0,005	0,034	0,105	0,037	0,120					
		v12		-0,073	0,047	-0,052	-0,005	0,032	0,098	0,036	0,111					
		v15		-0,090	0,060	-0,058	-0,002	0,014	0,114	0,022	0,136					
		v16		-0,079	0,043	-0,051	-0,005	0,029	0,101	0,033	0,115					
		v17		-0,076	0,041	-0,056	-0,006	0,029	0,099	0,033	0,112					
v19		-0,099	0,046	-0,063	-0,002	0,010	0,115	0,020	0,138							
v20		-0,074	0,028	-0,050	-0,007	0,030	0,096	0,034	0,107							
v28		-0,079	0,037	-0,050	-0,006	0,033	0,099	0,035	0,118							
v29		-0,052	0,039	-0,044	-0,003	0,024	0,092	0,026	0,101							
v30		-0,046	0,035	-0,044	-0,003	0,026	0,089	0,028	0,098							
Lange Proben	C10	v03		-0,105	0,045	-0,049	-0,006	0,030	0,101	0,034	0,118					
		v05		-0,104	0,062	-0,055	-0,001	0,019	0,115	0,024	0,128					
		v08		-0,101	0,061	-0,052	0,000	0,018	0,115	0,025	0,128					
		v09		-0,100	0,036	-0,049	-0,006	0,039	0,101	0,041	0,113					
		v11		-0,105	0,040	-0,056	-0,001	0,020	0,112	0,025	0,130					
		v13		-0,098	0,051	-0,057	-0,001	0,019	0,114	0,024	0,135					
		v14		-0,091	0,053	-0,057	-0,001	0,018	0,109	0,023	0,127					
		v18		-0,080	0,038	-0,048	-0,006	0,034	0,098	0,037	0,107					
		v21		-0,104	0,050	-0,066	0,001	0,011	0,117	0,020	0,140					
		v22		-0,082	0,041	-0,051	-0,006	0,036	0,099	0,039	0,117					
v23		-0,079	0,038	-0,048	0,000	0,040	0,094	0,042	0,111							
v24		-0,080	0,035	-0,049	-0,003	0,038	0,097	0,041	0,114							
v25		-0,081	0,034	-0,045	-0,002	0,037	0,096	0,038	0,113							
v26		-0,081	0,030	-0,049	-0,005	0,032	0,094	0,034	0,114							
v27		-0,075	0,027	-0,045	-0,003	0,036	0,089	0,038	0,109							
Kurze Proben	NEM	C4														
		C5														
		C6														
		C7														
		C1														
		C2														
		C3														
ENTM	ENTM	C8														

Parameter

n vf ap

Scan

Probe

Mittelwert

Min Max

X

Y

Z

Mittelwert

Min Max

Z

Min Max

Y

Min Max

X

Min Max

Y

Min Max

Z

Min Max

Mittelwert

Min Max

X

Y

Z

Min Max

Mittelwert

Min Max

