



Lehrstuhl für Metallkunde und metallische Werkstoffe

Masterarbeit

Einfluss des Gefüges von
explosionsverfestigtem Hadfield-Stahl auf
die Ausbreitung akustischer
Oberflächenwellen

Lukas Feichtenschlager, BSc

November 2021

i. Eidesstattliche Erklärung des Autors

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

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.



Unterschrift Verfasser
Lukas Feichtenschlager

23.11.2021

Datum

ii. Vorwort

Diese Arbeit wurde im Rahmen einer Kooperation des Materials Center Leoben, der ÖBB Infrastruktur AG und der voestalpine Railway Systems GmbH verfasst.

Der Autor bedankt sich für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des COMET-Programms im K2 Zentrum „Integrated Computational Material, Process and Product Engineering (IC-MPPE)“ (Projektnummer 859480). Dieses Programm wird von den österreichischen Bundesministerien für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) und für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort (BMDW), vertreten durch die österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG), und den Bundesländern Steiermark, Oberösterreich und Tirol gefördert.

iii. Danksagung

An erster Stelle bedanke ich mich bei Herrn Prof. Reinhold Ebner, da er mir die Möglichkeit gegeben hat meine Masterarbeit am Materials Center Leoben (MCL) zu verfassen und diese Arbeit betreute.

Herrn Dr. Sven Eck gilt mein maßgeblicher Dank, da er mich freundlich aber bestimmt im Verlauf dieser Arbeit als Vorgesetzter begleitete und mir immer mit Rat- und Verbesserungsvorschlägen zur Verfügung stand.

Bei den wissenschaftlichen Mitarbeitern des MCLs möchte ich mich ebenso bedanken. Besonders bei Herrn Florian Sommer, welcher mich bei der Auswertung der zahlreichen Messungen stets unterstützte und bei Herrn Edgar Stipsits, welcher durch die Anfertigung der Lichtmikroskop-Aufnahmen und Härtemessungsverläufe zur Gesamtheit der Diplomarbeit beitrug. Auch gilt mein Dank Frau Dr. Claudia Gruber, welche mich stets mit hilfreichen Ratschlägen unterstützte.

Bei der voestalpine Railway Systems GmbH und der ÖBB Infrastruktur AG bedanke ich mich für die Bereitstellung der Probenkörper.

iv. Kurzfassung

Über 25 % aller Weichenherzen in Österreich bestehen aus Hadfield-Stahl, auch Mn-13 Stahl genannt. Dieser Stahl gilt aufgrund seiner Gussstruktur und groben Körner als nicht ultraschallprüfbar. Ziel dieser Diplomarbeit ist es zu prüfen, ob mithilfe von Oberflächenwellen eine Ultraschallprüfung in oberflächennahen Bereichen möglich ist und ob die Explosionsverfestigung, welche der Hadfield-Stahl zur Lebensdauer-Verlängerung ausgesetzt wird, zu einer Änderung der Ausbreitung der Oberflächenwelle führt. Abschließend soll geklärt werden, ob Risse mit dem verwendeten Setup detektiert werden können.

Oberflächenwellen besitzen aufgrund ihrer niedrigeren Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vergleich zu Longitudinalwellen eine wesentlich geringere Wellenlänge bei gleicher Frequenz. Diese kleinere Wellenlänge führt zu einem größeren Verhältnis von Korngröße zu Wellenlänge. Dieses Verhältnis ist für die Art des Streuungsmechanismus entscheidend, welcher maßgeblich für die Dämpfung bei Raumtemperatur verantwortlich ist.

Ausbreitungsgeschwindigkeit und Dämpfungskoeffizient wurden im Transmissionsverfahren für verschiedene Stadien der Explosionsverfestigung gemessen. Dazu wurden lichtmikroskopische Aufnahmen nahe den Messpositionen an Schienenkopf und Schienenfuß durchgeführt, um die Korngröße zu bestimmen. Zusätzlich wurden die Probenkörper einer Härteverlaufsprüfung unterzogen.

Die Explosionsverfestigung führt zu einer Zunahme der Härte nahe der Oberfläche. Es konnte nachgewiesen werden, dass der Dämpfungskoeffizient von Rayleighwellen aufgrund der Explosionsverfestigung für Messfrequenzen an Schienenproben von 1 und 2 MHz am Schienenkopf signifikant abnimmt. Dies ist auf eine Abnahme der Streuung zurückzuführen. Dieser Effekt tritt auch am Schienenfuß auf, der bei der Explosionsverfestigung ebenfalls plastifiziert wird. Es ist ein Trend bei der Abnahme der Ausbreitungsgeschwindigkeit durch die Explosionsverfestigung bei Messungen mit Frequenzen von 2 MHz zu beobachten, dessen genaue Abklärung noch weiterer Untersuchungen bedarf.

Die experimentellen Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass eine Rissdetektion am Hadfield-Stahl mit Oberflächenwellen möglich ist und ein Riss zu einer Verringerung der Amplitude und Laufzeitverlängerung der Welle führen kann.

v. Abstract

More than 25% of all turnout hearts in Austria are made of Hadfield-steel, also known as Mn-13 steel. Due to its cast structure and coarse grains, this steel is not practical for ultrasonic testing. The main goal of this diploma thesis is to examine whether ultrasonic testing in near-surface areas is possible with the use of surface acoustic waves and whether the explosion hardening to which the Hadfield-steel is subjected to extend its service life leads to a change in the propagation of the surface wave. Finally, it should be clarified whether cracks can be detected with the used setup.

This smaller wavelength leads to a larger ratio of grain size to wavelength. This ratio is decisive for the type of scattering, which significantly influences the attenuation at room temperature.

Velocity of propagation and attenuation coefficient were measured by transmission method for different stages of explosion hardening. For this purpose, optical microscope images were taken near the ultrasonic measurement positions at the rail head and rail foot to determine the grain size. In addition, the specimens were subjected to a hardness progression test.

The explosion hardening leads to an increase in hardness near the surface. It was demonstrated that the attenuation coefficient of Rayleigh waves due to explosion hardening decreases significantly for measurement frequencies on rail specimens of 1 and 2 MHz at the rail head. This is due to a decrease in scattering, which is also provable at the rail foot that is also deformed plastically when explosion hardening of turnouts. For measurements with frequencies of 2 MHz, a trend towards a decrease in propagation velocity due to explosion hardening can be observed, the exact clarification of which requires further investigations.

It has been shown that crack detection with surface waves is possible at the Hadfield-steel and the crack can lead to a reduction in amplitude and propagation delay of the wave.

1 Inhaltsverzeichnis

i.	Eidesstattliche Erklärung des Autors	2
ii.	Vorwort	3
iii.	Danksagung	4
iv.	Kurzfassung	5
v.	Abstract	6
1	Inhaltsverzeichnis.....	7
2	Symbolverzeichnis.....	9
3	Motivation.....	10
4	Theoretischer Teil.....	11
4.1	Grundlegendes zu Eisenbahnweichen	11
4.2	Hadfield-Stahl.....	12
4.2.1	Mechanische Kennwerte und Legierung	12
4.2.2	Verfestigungsmechanismen des Hadfield-Stahls.....	14
4.2.3	Explosionsverfestigung des Hadfield-Stahls	14
4.3	Grundlagen Wellen	15
4.3.1	Grundlegende Wellenarten	15
4.4	Rayleighwellen	18
4.4.1	Erzeugung von Rayleighwellen	20
4.5	Schallschwächung	21
4.5.1	Absorption.....	22
4.5.2	Streuung aufgrund des Gefüges.....	24
4.5.3	Streuung aufgrund von Versetzungen	26
4.5.4	Divergenz.....	27
4.6	Einflüsse auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit.....	27
4.7	Einflüsse auf Dämpfung und Ausbreitungsgeschwindigkeit von Rayleighwellen.....	28
4.8	Dispersion.....	29
4.9	Wechselwirkung von Rayleighwellen mit Rissen	30
4.10	GS200	32
4.11	GS-EchoView	34
4.12	Ermittlung der experimentellen Größen	36
4.12.1	Verfahren der Längendifferenz.....	36
5	Praktischer Teil.....	38
5.1	Ziel der Messungen.....	38
5.2	Methode der Messungen.....	38
5.2.1	Probenkörper - Rayleighwellen.....	38

5.2.2	Messungen - Rayleighwellen	39
5.2.3	Probenkörper - Metallographie	40
5.2.4	Messungen – Metallographie Härteverlaufsprüfung und Lichtmikroskopie.....	41
5.3	Versuchsaufbau - Rayleighwellen	42
5.3.1	Versuchsparameter Rayleighwellen	45
5.4	Auswertung der Rayleighwellenmessungen	46
5.4.1	Sanity Check	50
5.5	Ergebnisse Rayleighwellen	52
5.5.1	Messungen mit 1 MHz	52
5.5.2	Messungen mit 2 MHz	54
5.5.3	Vergleich der Messungen.....	56
5.6	Versuchsaufbau – Metallographie Härteverlaufsprüfung und Lichtmikroskopie	61
5.7	Auswertung – Metallographie	63
5.7.1	Metallographie – Härtemessung	63
5.7.2	Metallographie – Lichtmikroskop - Schienenkopf	65
5.7.3	Metallographie - Lichtmikroskop - Schienenfuß.....	69
5.8	Machbarkeit: Versuch der Rissdetektion mit dem bestehenden SAW Setup	72
6	Diskussion der Ergebnisse	75
6.1	Diskussion der Laufzeit.....	75
6.2	Diskussion der Dämpfungskoeffizienten	78
6.3	Diskussion der Rissdetektion	86
7	Schlussfolgerungen	87
8	Ausblick	88
9	Literaturverzeichnis.....	91
10	Abbildungsverzeichnis.....	94
11	Tabellenverzeichnis.....	96

2 Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	SI-Einheit
A_0	Ursprüngliche Amplitude	[V]
A_x	Amplitude nach Weg x	[V]
α	Dämpfungskoeffizient	[1/m]
α_A	Absorptionskoeffizient	[1/m]
α_S	Streukoeffizient	[1/m]
a	Risslänge	[m]
b	Burgersvektor	[m]
B	Spezifische Dämpfungskonstante	[Ns/m ²]
c	Ausbreitungsgeschwindigkeit	[m/s]
c_L	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Longitudinalwelle	[m/s]
c_T	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Transversalwelle	[m/s]
c_R	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rayleighwelle	[m/s]
c_{11}, c_{12}, c_{44}	elastische Koeffizienten	[Pa]
D	Korngröße	[m]
E	Elastizitätsmodul	[Pa]
f	Frequenz	[Hz]
G	Schubmodul	[Pa]
ρ	Massendichte	[kg/m ³]
Λ	Versetzungsdichte	[1/m ²]
k	Wellenzahl	[1/m]
ν	Poissonzahl	[-]
L	Länge des bewegungsfähigen Versetzungssegments	[m]
λ	Wellenlänge	[mm]
t	Zeit	[s]
x	Weg	[m]

3 Motivation

Hadfield-Stahl (DIN 1.3401) ist ein austenitischer Stahl, welcher sich besonders durch seinen hohen Mangengehalt von 10-14% auszeichnet. Hervorstechende Eigenschaften sind seine hohe Zähigkeit, Schlagbeständigkeit und hoher Verschleißwiderstand. Anwendung findet er zum Beispiel in Backenbrechern, Schlaghämmern und in Herzstücken von Weichen. Um den hohen mechanischen Belastungen, welche der Hadfield-Stahl in Herzstücken ausgesetzt ist, standzuhalten und um die Lebensdauer zu verlängern, wird dieser explosionsverfestigt, was zu einer plastischen Verformung an der Oberfläche und in der Mikrostruktur zu Versetzungs- und Zwillingsbildung führt. Im Einsatz bei Weichenherzen tritt weitere plastische Verformung und Verfestigung auf, wodurch sich das Herzstück der Geometrie der überrollenden Räder anpasst. Durch die geometrische Anpassung werden die lokalen Kontaktdrücke verringert, was zu einer zusätzlichen Verlängerung der Lebensdauer führt. Die üblichen Schadensarten im Betrieb eines Herzstückes sind Verschleiß, Ermüdung, Bruch und Abblättern [Dastur 1981; Zhang 2008; Srivastava 2008; Harzallah 2010; Efstathiou 2010].

Der Hadfield-Stahl besitzt ein grobes Gussgefüge aus bis zu 2 mm großen Körnern [Eck2014]. Üblicherweise werden in der zerstörungsfreien Prüfung mittels Ultraschall Frequenzen zwischen 1 bis 10 MHz angewandt. Ausschlaggebend für den Streuungsmechanismus und die daraus resultierende Dämpfung von Ultraschallwellen bei niedrigen Temperaturen ist das Verhältnis von Wellenlänge zu Korngröße. Beim Hadfield-Stahl kommt es aufgrund des hohen Verhältnisses und der Gussstruktur zu einer starken Streuung der Ultraschallwellen [Krautkrämer 1986; Hecht A. 1986].

Ziel dieser Diplomarbeit ist es (1) zu prüfen ob eine Ultraschallprüfung mit Oberflächenwellen an Schienenprobenkörpern mit dem Profil 60E1 aus Hadfield-Stahl möglich ist, (2) die Explosionsverfestigung einen messbaren Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit und Dämpfung der Rayleighwellen an der Oberfläche des Hadfield-Stahls hat und (3) ob eine Rissdetektion mit Oberflächenwellen an explosionsverfestigten Weichenherzstücken möglich ist.

4 Theoretischer Teil

4.1 Grundlegendes zu Eisenbahnweichen

Bei Weichen handelt es sich um die wartungsintensivsten Bestandteile des Gleissystems und sie sind am häufigsten von Störungen betroffen [Fendrich 2007].

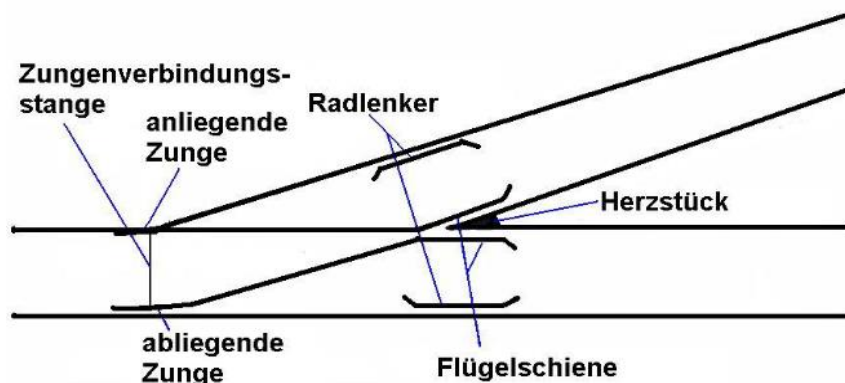


Abbildung 1: Skizzierter Aufbau einer Weiche [DB Netz AG 2012]

Wie in Abbildung 1 zu sehen, muss ein Rad eines Zuges beim Durchfahren einer Weiche den Kreuzungspunkt zwischen Flügelschiene und Herzstück durchqueren. Das Rad hat dabei entweder Kontakt mit der Flügelschiene, dem Herzstück oder beiden Bestandteilen. Beim Kontakt mit der Spitze des Herzstückes wirken enorme vertikale mechanische Kräfte auf Rad und Herzstück. Diese Kräfte können zur plastischen Verformung des Herzstückes führen. Bei abgenutzten Rädern können, bei gegebener Geometrie und Geschwindigkeit, durch dynamische Effekte laut Finite-Elemente-Analysen die Kontaktkräfte das Zwei- bis Vierfache der statischen Belastung des Rades, erreichen [Ekberg 2005, Wiest 2008; Pletz 2014].

Es wird geschätzt, dass beim Wechsel des Rades von Flügelschiene auf Herzstück bis zu siebenmal so hohe dynamische Kräfte im Vergleich zur rein statischen Belastung durch das Rad wirken können [Fischer 1979]. Die vertikale Komponente der Kraft ist beim Wechsel von Flügelschiene auf Herzstück im dynamischen Fall ca. drei Mal höher als im statischen [Ossberger 2013]. Durch diese hohen Kontaktkräfte kann es zu Eindrücken, Oberflächenausbrüchen, Head Checks und Rissen entlang der Schieneneinspannung kommen. Diese Defekte reduzieren die Lebensdauer der Weichen-Herzstücke oder führen sogar zu deren Ausscheiden. Der Grund für den Einsatz von Herzstücken aus Hadfield-Stahl ist deren Anpassung an Radgeometrien durch plastische Verformung

beim Kontakt zwischen Herzstück und Schiene. Durch diese Anpassung an die Radgeometrie sinken die Kontaktkräfte um 20%, im Vergleich zum nicht verformten Weichenherz [Wiest 2008].

4.2 Hadfield-Stahl

4.2.1 Mechanische Kennwerte und Legierung

Der Hadfield-Stahl (DIN 1.3401) ist nach seinem Erfinder Sir Robert A. Hadfield benannt, welcher diesen manganhaltigen Stahl 1882 entwickelte [Tweedale 1985].

Beim Hadfield-Stahl handelt es sich um eine Eisen-Legierung, welche hauptsächlich aus Eisen, Mangan und Kohlenstoff besteht. Der Mangananteil beträgt ca. 12 - 14 m% und der Kohlenstoffanteil 1 - 1,4 m%, diese Anteile werden meist im Verhältnis (Mn)10:(C)1 legiert [Curiel-Reyna 2007; Srivastava 2008]. Jedoch sind auch Verhältnisse zwischen 4:1 und 14:1 möglich [Kos 1988].

Um ein austenitisches Gefüge bei Raumtemperatur erreichen zu können wurde durch Tofaute und Linden gezeigt, dass das Manganäquivalent größer gleich 17 sein muss [Maratray 1995; Harzallah 2010]:

$$Mn_{eq} = (\%Mn) + 13(\%C) \geq 17 \quad [1]$$

Um ein vollständiges austenitisches Gefüge zu erreichen und um Karbidausscheidungen an den Korngrenzen zu vermeiden (diese reduzieren die Zähigkeit) wird der gegossene Hadfield-Stahl über 1000°C geglüht. Bis zu einem C-Gehalt von 1,4 m% liegt über 1000°C nur die Austenitphase vor und die Legierungselemente sind im Kristall gelöst (siehe: Abbildung 2). Die Glühzeiten betragen mehrere Stunden, damit das gesamte Bauteil austenitisiert wird. Um das austenitische Gefüge beizubehalten, wird der Hadfield-Stahl nach dem Glühen in Wasser abgeschreckt [Dastur 1981; Kos 1988; Curiel-Reyna 2007; Zhang 2008; Böhler Edelstahl 25.06.2021].

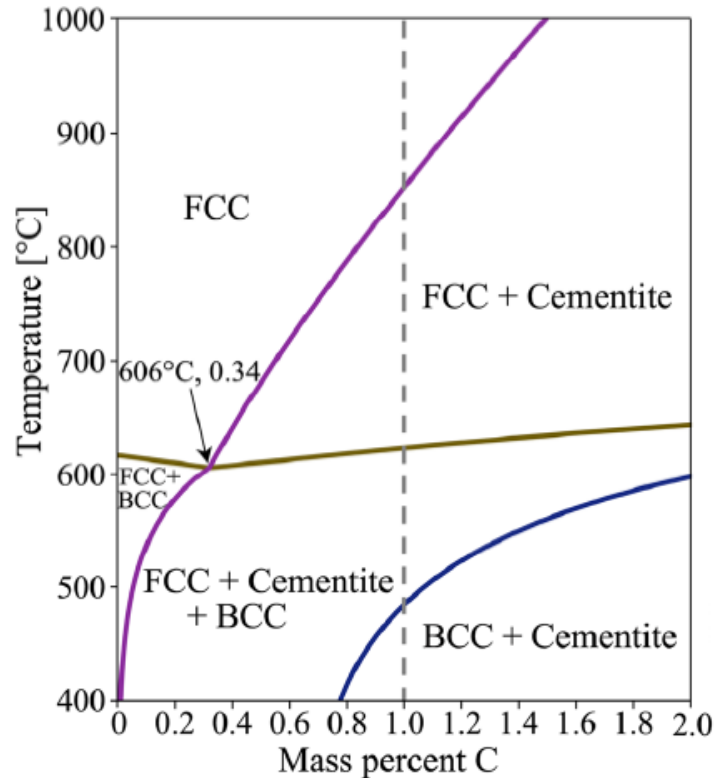


Abbildung 2: Phasendiagramm im thermodynamischen Gleichgewicht für ein Fe-12Mn-1C-0.32Si-0.1Cr System. Berechnet mit Thermo-Calc und unter Anwendung TCFE8 Datenbank [Martín 2017]

Weitere Legierungselemente sind Chrom (~ 0,08- 0,9 m%), Silizium (~ 0,4 - 0,7 m%) und Aluminium (~ 0,004 - 0,14 m%). Chrom wird zur Erhöhung der Fließspannung zulegiert, was zu einer Verringerung des mechanischen Verschleißes und der plastischen Verformung führt. Silizium erhöht ebenfalls die Fließspannung und verbessert die Desoxidation vor dem Gießprozess. Aluminium wird ebenso zur Desoxidation beigegeben [Kos 1988; Curiel-Reyna 2007; Srivastava 2008; Zhang 2008; Harzallah 2010; Moghaddam 2012; Martín 2017; Böhler Edelstahl 25.06.2021].

Die Zugfestigkeit des Hadfield-Stahls beträgt 800 - 1000 MPa [Dastur 1981; Harzallah 2010; Böhler Edelstahl 25.06.2021], er besitzt ein Kerbschlagarbeit von 100 - 120 J [Moghaddam 2012; Böhler Edelstahl 25.06.2021] die Härte beträgt 200 - 220 HV [Zhang 2008; Harzallah 2010; Böhler Edelstahl 25.06.2021] und die Bruchdehnung kann zwischen 10 und 80 % betragen [Kos 1988; Böhler Edelstahl 25.06.2021].

Seine charakteristischen Merkmale umfassen somit eine hohe Schlagzähigkeit, hohe Duktilität, hohen Verschleißwiderstand und die Möglichkeit zur hohen Kaltverfestigung. Das austenitische Gefüge ist nicht magnetisch [Srivastava 2008].

Aufgrund dieser mechanischen Eigenschaften wird der Hadfield-Stahl für hochbeanspruchte Bauteile im Bergbau, in Backenbrechern, in Schlaghämmern und für Weichenherzen verwendet [Srivastava 2008; Harzallah 2010; Efstathiou 2010].

4.2.2 Verfestigungsmechanismen des Hadfield-Stahls

Zur Beschreibung des Verfestigungsverhaltens des Hadfield-Stahls wurden mehrere Modelle vorgeschlagen. Erste Veröffentlichungen gingen von einer dehnungsinduzierten Umwandlung von α -Martensit (tetragonal raumzentriert) in ϵ -Martensit (hexagonal dichte Packung) aus [Collette 1957; Spreadborough 1960; Adler 1986]. Sant und Smith wiesen darauf hin, dass diese Martensitumwandlung bei niedrigen Kohlenstoffgehalten stattfindet, welche durch einen geringen Legierungsanteil oder durch Karbidbildung (Karbid binden den Kohlenstoff ab) erreicht werden kann [Sant 1987].

Dastur und Leslie gehen davon aus, dass dynamische Reckalterung der Grund für die enorme Verfestigung des Hadfield-Stahls ist [Dastur 1981].

Mittlerweile wird die dehnungsinduzierte Zwillingsbildung und die daraus resultierende Wechselwirkung zwischen Zwillingssystemen und Versetzungen als Haupteinflussfaktor für die Verfestigung des Hadfield-Stahls angesehen [Adler 1986; Zhang 2008; Efstathiou 2010; Karaman 1998; Karaman 2000; Sant 1987]. Die Zwillingsgrenzen führen zu einer Behinderung der Versetzungsbewegung und führen somit zu einer Verfestigung [Adler 1986; Karaman 2000; Efstathiou 2010].

Da der Hadfield-Stahl ein rein austenitisches Gefüge besitzt, liegen die Legierungselemente im Kristall gelöst vor. Somit liegt auch ein Anteil an Mischkristallverfestigung vor, welcher zu einer Erhöhung der Härte beiträgt [Karaman 2000].

4.2.3 Explosionsverfestigung des Hadfield-Stahls

Um die Lebensdauer von Weichenherzstücken im Einsatz zu erhöhen wird die Festigkeit im Bereich des Rad Schiene Kontakts gesteigert. Diese Steigerung der Festigkeit wird durch das Explosionsverfestigen erreicht, welches eine ausreichend dicke Härteschicht erzeugt. Sandstrahlen würde z.B. eine zu kleine Härteschicht für den Einsatz erzeugen. Andere Methoden der Kaltverfestigung wie Kaltwalzen oder Kaltschmieden sind für die Herstellung zu kostenintensiv. Durch die entstehende Schockwelle bei der

Explosionsverfestigung kommt es zu Zwillings- und Versetzungsbildung was zu einer plastischen Verformung führt. Die Lebensdauer eines Hadfield-Weichenstückes kann durch gezieltes Explosionsverfestigen um bis zu 40% gesteigert werden [Zhang 2008]. Zhang, et al. konnten zeigen, dass durch die Explosionsverfestigung die Randhärte bei genügend Sprengmaterial fast verdoppelt werden kann (von 220 HB auf 390 HB). Die Härte nimmt nach vorangegangener Explosionsverfestigung mit zunehmender Entfernung zur Oberfläche ab, bis sie den ursprünglichen Wert vor der Explosionsverfestigung erreicht (siehe Abbildung 3). Die Menge an Explosionsmittel sollte so gewählt werden, dass keine Mikrorisse an der Oberfläche entstehen. [Zhang 2008].

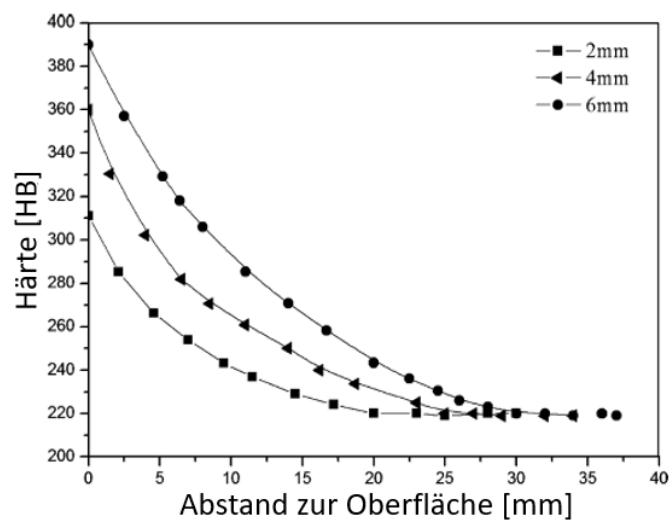


Abbildung 3: Härteverlauf mit zunehmendem Abstand zur Oberfläche für verschiedene Dicken der Explosionsmatten [Zhang 2008]

4.3 Grundlagen Wellen

4.3.1 Grundlegende Wellenarten

Ultraschallwellen sind mechanische Wellen und setzen sich aus den einzelnen Bewegungen der schwingenden Teilchen zusammen. Diese Schwingungen können in ihrer Gesamtheit als Wellen beschrieben werden. Die Frequenz von Ultraschall beträgt zwischen 20 kHz und 10 GHz. Diese Frequenzen befinden sich somit oberhalb des menschlichen Hörbereiches [Schaaffs 2001].

Grundsätzlich kann zwischen zwei Grundarten von Wellen unterschieden werden: Longitudinal- und Transversalwellen.

Wenn die Teilchen in derselben Richtung schwingen, in welche sich auch die Welle ausbreitet spricht man von einer Longitudinalwelle. Man nehme einen isotropen, homogenen Festkörper, welcher aus kleinen Stoffteilchen besteht, an. Diese Stoffteilchen werden auf der linken Seite ausgelenkt und besitzen die gleiche Frequenz (Anzahl der Schwingungen der Teilchen pro Sekunde) und die gleiche Amplitude (Auslenkung der Teilchen) so übertragen diese Teilchen ihre Schwingungsenergie an die rechts angrenzenden Teilchen. Wie in Abbildung 4 ersichtlich, kommt es zu Zonen höherer Dichte, wo sich die Teilchen näher als in ihrer Ruhelage kommen, in diesen Zonen liegen Druckspannungen vor. Ebenso liegen Zonen vor in welchen die Teilchen voneinander weiter entfernt als in ihrer Ruhelage sind, in diesen Zonen liegen Zugspannungen vor. In Gasen und Flüssigkeiten breiten sich Longitudinalwellen über Stöße der einzelnen Teilchen aus. Longitudinalwellen können sich nur in Medien ausbreiten [Krautkrämer 1986].

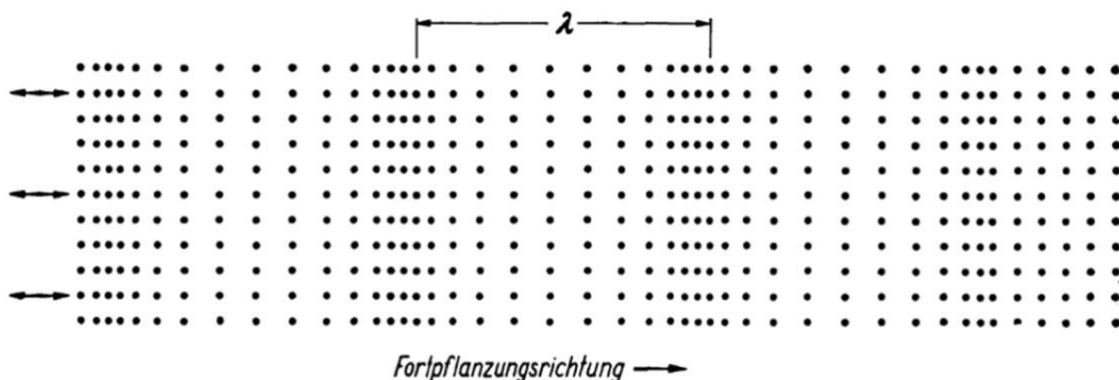


Abbildung 4: Ausbreitungs- und Schwingungsrichtung einer Longitudinalwelle. Die Welle wird am linken Rand angeregt und breitet sich nach rechts aus, wobei die Welle den äußeren rechten Rand noch nicht erreicht hat [Krautkrämer 1986].

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Longitudinalwellen in Festkörpern kann durch die Gleichung [II] errechnet werden [Kutzner 1983]:

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)*(1-2\nu)}} \quad [II]$$

Das Gegenstück zur Longitudinal- bildet die Transversalwelle, hierbei schwingen die Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle (Abbildung 5). Im Gegensatz zur

Übertragung der Druck/Zugkräfte bei der Longitudinalwelle werden bei der Transversalwelle im Festkörper Schubkräfte übertragen. Die Schwingung quer zur Ausbreitungsrichtung kann sich nur in Festkörpern ausbilden, da Gase und Flüssigkeiten keine Scherkräfte übertragen können [Krautkrämer 1986].

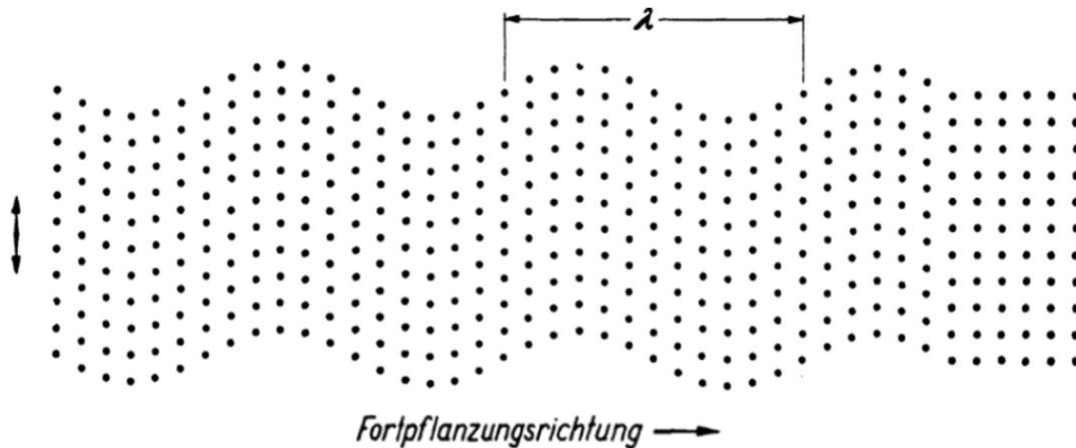


Abbildung 5: Ausbreitungs- und Schwingungsrichtung einer Transversalwelle. Die Welle wird am linken Rand angeregt und breitet sich nach rechts aus, dabei schwingt sie quer (nach oben und unten) zur Ausbreitungsrichtung. Die Welle hat in dieser Abbildung den rechten Rand noch nicht erreicht [Krautkrämer 1986].

In Festkörpern werden die Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Transversalwellen durch folgende Gleichungen beschrieben werden [Kutzner 1983]:

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad \text{[III]}$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit kann bei bekannter Wellenlänge und Frequenz bestimmt werden [Krautkrämer 1986]:

$$c = \lambda * f \quad \text{[IV]}$$

Die Wellenlänge ergibt sich aus dem Abstand zwischen zwei benachbarten Ebenen, welche sich im gleichen Bewegungszustand und somit in gleicher Phase befinden (siehe: Abbildung 4 und Abbildung 5).

Unter den Annahmen: $E \geq 0$ und $0 < \nu < 0,5$ und der Berücksichtigung, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeiten reelle Zahlen bilden, folgt, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Transversalwelle mindestens um den Faktor $\sqrt{2}$ geringer ist, als die der Longitudinalwelle [Kutzner 1983].

4.4 Rayleighwellen

Die Beschreibungen der Longitudinal- und Transversalwellen in den Gleichungen [II], [III] und in Abbildung 4 und Abbildung 5 gehen von unendlich ausgedehnten Körpern aus, von welchen nur ein Ausschnitt betrachtet wird. An Grenzflächen treten zusätzlich noch andere Wellenformen auf. Da es sich bei der Oberfläche eines Festkörpers um eine Grenzfläche handelt (Grenze zwischen Festkörper und Luft) treten an dieser Grenze die Oberflächenwellen (engl. „Surface Acoustic Waves (SAW)“) auf.

Rayleighwellen stellen eine Form der SAWs dar. Sie sind nach ihrem Entdecker Lord Rayleigh benannt. Sie setzen sich aus einem longitudinalen und transversalen Wellenanteil zusammen, der transversale Anteil ist höher [Rayleigh 1885; Rose 1999].

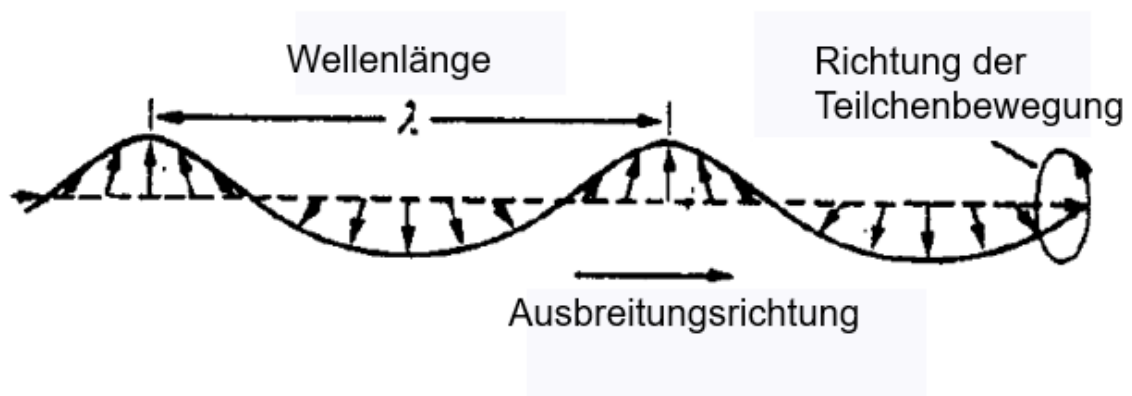


Abbildung 6: Ausbreitungs- und Schwingungsrichtung einer Rayleighwelle. Das Teilchen vollführt eine elliptische Bewegung, da die Rayleighwellen aus gegenläufigen Anteilen von Longitudinal- und Transversalwellen besteht [Frederick 1965; Graff 1991]

Wie in Abbildung 6 ersichtlich, vollführt das durch eine Rayleighwelle angeregte Teilchen eine elliptische Bewegung an der Oberfläche eines Festkörpers. Diese Bewegung resultiert daraus, dass das Teilchen gleichzeitig eine Bewegungskomponente in Ausbreitungsrichtung und eine senkrecht dazu besitzt. Diese Komponenten sind gegenläufig um die Periode $\frac{\pi}{2}$ zueinander versetzt. Die Rayleighwelle dringt dabei nur im Bereich des 1 – 1,5 fachen ihrer Wellenlänge in das darunter liegende Material ein (siehe: Abbildung 7) [Viktorov 1967; Meyendorf 2004].

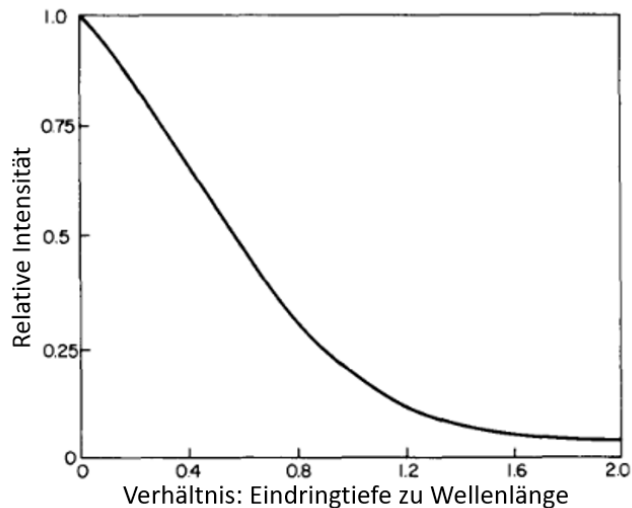


Abbildung 7: Einfluss der Eindringtiefe der Rayleighwelle auf die Intensität [Silk 1976]

Die charakteristische Gleichung der Rayleighwelle, auch Rayleighgleichung genannt lautet [Viktorov 1967; Worden 2001]

$$\eta^6 - 8(\eta)^4 + 8(\eta)^2(3 - 2\xi^2) + 16(\xi^2 - 1) = 0 \quad \text{[V]}$$

Wobei die Koeffizienten folgende Verhältnisse beschreiben:

$$\eta = \frac{c_R}{c_T} \quad \xi = \frac{c_T}{c_L} \quad \text{[VI]}$$

Unter der Bedingung: $0 \leq \nu \leq 0,5$ ergibt sich für Gleichung [V] nur eine reelle Lösung, welche die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rayleighwelle als Ergebnis besitzt. Des Weiteren ist die Frequenz nicht in der Gleichung enthalten, daher ist die Rayleighwelle im isotropen Halbraum frequenzunabhängig und es tritt keine Dispersion auf [Rayleigh 1885; Viktorov 1967].

Ewing, Jardetsky und Press haben darauf hingewiesen, dass die anderen nichtreellen Lösungen der Gleichung [V] spezielle Moden von Longitudinal- und Transversalwellen beschreiben [Ewing 1957; Graff 1991].

Nach einer Vereinfachung kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rayleighwelle durch die Gleichung [Viktorov 1967; Worden 2001]:

$$c_R = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} * c_T \quad \text{[VII]}$$

genähert werden.

Aus Gleichung [VII] folgt, dass wenn die Poissonzahl zwischen $0 < \nu < 0,5$ liegt, die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rayleighwelle kleiner ist als die der Transversalwelle. Bei gleicher Frequenz bewirkt dies nach Gleichung [IV] eine geringere Wellenlänge für die Rayleighwelle im Vergleich zu Longitudinal- und Transversalwellen im selben Medium [Oliner 1978].

4.4.1 Erzeugung von Rayleighwellen

Viktorov hat mehrere piezoelektrische Wandler (engl. Transducer) zur Erzeugung und Detektion von Rayleighwellen entwickelt und bestehende Wandler untersucht und beschrieben (siehe: [Viktorov 1967]). Für die vorliegende Arbeit wurde der sogenannte Comb-Wandler verwendet, daher wird nur auf diesen eingegangen.

Der Comb-Wandler ist ein Kamm-Aufsatz, dessen Unterseite aus einer periodischen Anordnung von Zähnen besteht (siehe: Abbildung 8). Durch das Piezoelement wird eine Longitudinalwelle in den Comb-Wandler eingebracht. Diese Welle breitet sich in den Kämmen aus. Die Kämmen schwingen an der Oberfläche und bringen Vibrationen an der Oberfläche und Longitudinalwellen in das darunterliegende Material ein. Durch die periodische Schwingung der einzelnen Zähne in gleicher Phase mit der gleichen Frequenz entsteht eine stehende Welle an der Grenzfläche zwischen Probenoberfläche und den Zähnen des Wandlers (siehe: Abbildung 8). Die Frequenz der Oberflächenwelle entspricht der Frequenz der Schwingungen der Zähne. An den beiden äußersten Kanten der äußersten Zähne teilt sich die stehende Welle in zwei entgegenlaufende Rayleighwellen auf [Viktorov 1967; Aatre 1996; Rose 1998; Rose 1996; Danicki 2002; Danicki 2010].

Laut Rose entspricht der Abstand zwischen zwei Zähnen der Wellenlänge der entstehenden Rayleighwellen [Rose 1996]. Laut Viktorov ist das entscheidende Kriterium um mit dem Comb-Wandler Rayleighwellen zu erzeugen, dass die Summe aus Breite eines Zahnes und die Distanz von Zahn zu Zahn der Wellenlänge der Rayleighwelle entspricht. Wenn diese Summe von der Wellenlänge abweicht ist die Anregung der Rayleighwellen weniger effizient [Viktorov 1967; Danicki 2002].

Laut der Firma Gampt entspricht die Summe aus Zahnbreite und Distanz zwischen zwei Zähnen der Wellenlänge der Rayleighwelle [GAMPT mbH 2018]. Die verwendeten Comb-Wandler der Firma Gampt weisen eine Zahnbreite von ca. $\frac{\lambda}{4}$ und einen Abstand

zwischen den Zähnen von ca. $\frac{3}{4}\lambda$ auf (siehe: Abbildung 8). Diese Werte wurden für Experimente mit einem Aluminiumtestkörper optimiert [GAMPT mbH 2007]. Für eine Nennfrequenz der Sonde von 1 MHz beträgt die Wellenlänge 2,9 mm und bei einer Nennfrequenz von 2 MHz 1,5 mm.

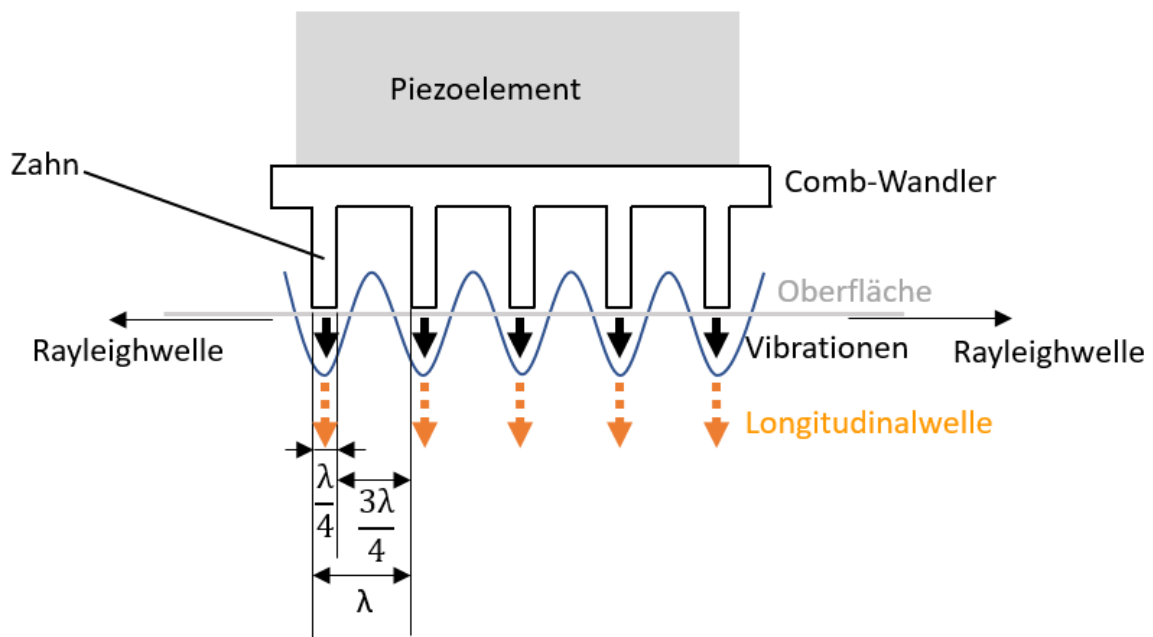


Abbildung 8: Funktion eines Comb-Wandlers

Der Abstand zwischen den Kämmen hat einen Einfluss auf die Signalform und die Höhe der Amplitude der erzeugten Rayleighwellen. Auch Höhe, Breite und Anzahl der Zähne beeinflussen die Amplitude und Signalform der erzeugten Rayleighwellen (siehe: [Rose 1996; Danicki 2002]).

4.5 Schallschwächung

Für die Dämpfung der Rayleighwellen wird ein exponentieller Abfall nach der Gleichung:

$$A_x = A_0 * e^{-\alpha x} \quad \text{[VIII]}$$

angenommen.

Der Dämpfungskoeffizient setzt sich aus Anteilen für Streuung und Absorption zusammen.

$$\alpha = \alpha_A + \alpha_S \quad [IX]$$

4.5.1 Absorption

Zur Absorption kommt es durch Umwandlung von Schall- in Wärmeenergie, Überwindung der inneren Reibung, Interaktion mit Versetzungen und Relaxation. Für den Absorptionskoeffizient wurde durch Experimente gezeigt, dass dieser für den Frequenzbereich von 2-20 MHz durch die lineare Gleichung beschrieben werden kann [Sharpe 1980; Krautkrämer 1986]:

$$\alpha_A = a^{L,T} * f \quad [X]$$

Die Umwandlung von Schall in Wärmeenergie, tritt nur bei Longitudinalwellen auf, da es durch die Schwingung in der Ausbreitungsrichtung zu Bereichen hoher Dichte kommt (siehe: Abbildung 4). Bei Transversalwellen bleibt das Volumen stets konstant und somit wird keine Energie in Wärme umgewandelt [Mason 1958].

Die Absorption aufgrund von innerer Reibung nimmt mit steigender Temperatur zu, ist aber bei Raumtemperatur sehr gering. Die Absorption aufgrund innerer Reibung kann bis ca. 600°C als vernachlässigbar klein angenommen werden [Bolognini 2003; Schiebold 2015].

Zusätzlich dämpfen Versetzungen akustische Wellen. Die Gleichung zur Beschreibung der Absorption von Ultraschallwellen durch Versetzungen basiert auf dem „vibrating string model“ von Granato und Lücke (siehe: [Granato 1966]). Dieses Modell geht davon aus, dass Versetzungssegmente einer Versetzung wie eingespannte Saiten schwingen können. Die Anregung dieser Versetzungs-Schwingung führt zu einem Verlust an Energie der Ultraschallwelle. Die einzelnen Versetzungssegmente werden an ihren Rändern durch Ausscheidungen, Punktdefekte und andere Versetzungen punktuell festgehalten. Diese Punkte agieren als Schwingungsknoten. Bei hohen Amplituden der Ultraschallwelle können sich Schwingungsknoten lösen, was einen zusätzlichen Energieverlust der Ultraschallwelle zur Folge hat. Für niedrige Messfrequenzen, welche wesentlich niedriger als die Resonanzfrequenz des Versetzungssegmentes sind

(< 4,5 MHz), kann folgende vereinfachte Gleichung angenommen werden [Granato 1966; Ogi 1997; Hirao 2000; Barra 2015]:

$$\alpha_{v,s} = \frac{16GBb^2}{K\pi^4} \Lambda L^4 f^2 \quad \text{[XI]}$$

$$K = \frac{2Gb^2}{\pi(1 - \nu)} \quad \text{[XII]}$$

Der Faktor K beschreibt Kraft pro Längeneinheit, welche durch die Eigenspannung der Versetzung verursacht wird. Aus der Gleichung [XI] geht hervor, dass die Absorption von Ultraschallwellen proportional von ΛL^4 abhängt. Die Absorption hängt somit proportional von der Versetzungsdichte und der vierten Potenz der Länge des Versetzungssegmentes ab. Der Absorptionskoeffizient gilt jedoch nur für Versetzungssegmente, welche mit der Ultraschallwelle nicht in Phase schwingen können [Granato 1956; Hirao 2000].

Angemerkt sei, dass die Einheit des Absorptionskoeffizienten in Gleichung [XI] aufgrund von Versetzungen $[\frac{1}{s}]$ beträgt. Für alle weiteren Dämpfungs- und Streukoeffizienten beträgt die Einheit $[\frac{1}{m}]$. Um die Koeffizienten miteinander vergleichen zu können, muss α_v durch die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle dividiert werden. Die Gleichung lautet somit:

$$\alpha_{v,m} = \frac{16GBb^2}{K\pi^4 c} \Lambda L^4 f^2 \quad \text{[XIII]}$$

Der Koeffizient aus Gleichung [XIII] hat nun die Einheit $[\frac{1}{m}]$.

Zusätzlich erhöhen Verzerrungen im Kristallgitter den Absorptionskoeffizienten. Ihr Einfluss auf den Absorptionskoeffizienten ist jedoch wesentlich geringer als der Einfluss von Versetzungen [Sharpe 1980; Krautkrämer 1986; Prasad 1994].

4.5.2 Streuung aufgrund des Gefüges

Durch Änderung der akustischen Impedanz an Korngrenzen kommt es zur Streuung der einfallenden Welle. An der Korngrenze tritt eine Änderung im Wellenwiderstand von einem Korn zum anderen auf. Der Grund dafür ist die Richtungsabhängigkeit der elastischen Konstanten im Einkristall. Je nach Verhältnis von Korngröße zu Wellenlänge treten verschiedene Streumechanismen auf (siehe: Abbildung 9) [Mason 1947; Mason 1948; Hecht A. 1986].

Der Streukoeffizient im Bereich der Rayleigh-Streuung ($0,02 \leq \frac{D}{\lambda} \leq 0,2$) ist stark von der Frequenz und der mittleren Korngröße abhängig [Bhatia 1967; Hecht A. 1986]:

$$\alpha_s^{L,T} \sim f^4 D^3 \quad \text{[XIV]}$$

Die Streuung nimmt somit im Bereich der Rayleigh-Streuung mit steigender Korngröße und Frequenz stark zu.

Wenn die Wellenlänge der Ultraschallwelle ca. der mittleren Korngröße entspricht, liegt stochastische Streuung vor [Bhatia 1967; Hecht A. 1986]:

$$\alpha_s^{L,T} \sim f^2 * D \quad \text{[XV]}$$

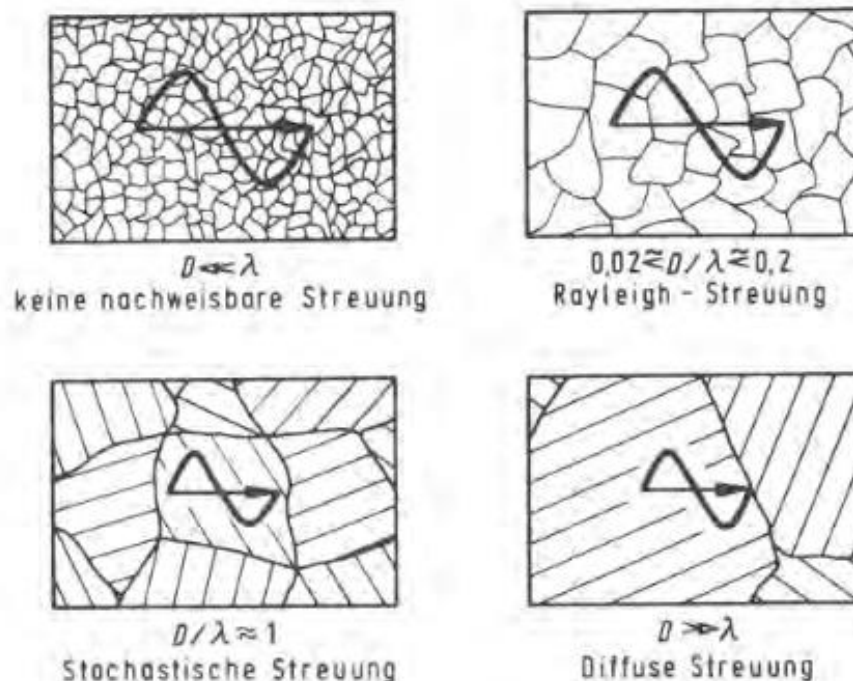


Abbildung 9: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Streumechanismen [Hecht A. 1986]

Für den Fall, dass die Wellenlänge sehr viel kleiner als die mittlere Korngröße ist, kommt es zur diffusen Streuung [Bhatia 1967; Hecht A. 1986]:

$$\alpha_S^{L,T} \sim D^{-1} \quad [\text{XVI}]$$

Die Bereiche sind nicht klar voneinander abgegrenzt, daher gibt es Übergangsbereiche zwischen den verschiedenen Streuungs-Mechanismen [Papadakis 1965; Rokhlin 1972]. Um die elastische Anisotropie zu berücksichtigen werden die Streukoeffizienten für Transversal- und Longitudinalwellen durch die folgenden Gleichungen berechnet. Diese gelten für kubische Metalle im Bereich der Rayleigh-Streuung [Bhatia 1967]:

$$\alpha_{R-S}^T = \frac{6\pi^3 * D^3 * f^4}{375\rho^2 * c_T^3} * \left(\frac{2}{c_L^5} + \frac{3}{c_T^5}\right) (c_{11} - c_{12} - 2c_{44})^2 \quad [\text{XVII}]$$

$$\alpha_{R-S}^L = \frac{8\pi^3 * D^3 * f^4}{375\rho^2 * c_L^3} * \left(\frac{2}{c_L^5} + \frac{3}{c_T^5}\right) (c_{11} - c_{12} - 2c_{44})^2 \quad [\text{XVIII}]$$

Der Term $(c_{11} - c_{12} - 2c_{44})^2$ beschreibt die elastische Anisotropie einer Einheitszelle mit kubischer Symmetrie. Je höher die Anisotropie des Kristalls ist, desto größer ist dieser Term und somit der Streukoeffizient. Somit werden Ultraschallwellen in Aluminium weniger gestreut als in Stahl, da Aluminium eine geringere elastische Anisotropie aufweist [Sharpe 1980; Hecht A. 1986; Willems 1981].

Im Bereich der stochastischen Streuung werden die Streukoeffizienten und die Berücksichtigung der elastischen Anisotropie für kubische Kristalle durch folgende Gleichungen berechnet [Papadakis 1965]:

$$\alpha_{S-S}^T = \frac{4\pi^2 * f^2 * D}{210\rho^2 * c_T^6} * (c_{11} - c_{12} - 2c_{44})^2 \quad [\text{XIX}]$$

$$\alpha_{S-S}^L = \frac{16\pi^2 * f^2 * D}{525\rho^2 * c_L^6} * (c_{11} - c_{12} - 2c_{44})^2 \quad [\text{XX}]$$

Transversalwellen werden in Stahl stärker gestreut als Longitudinalwellen. Das Verhältnis von transversalen zu longitudinalen Streukoeffizient im Bereich der Rayleigh-Streuung beträgt meist 4-5 ($\frac{a^T}{a^L} = 4 - 5$) [Papadakis 1963; Willems 1981; Hecht A. 1986].

Die Streukoeffizienten für Metalle verschiedener Kristallstrukturen wurden allgemein hergeleitet. Dafür sei auf die Literatur [Papadakis 1965] verwiesen.

Die Streukoeffizienten gelten nur für longitudinale und transversale Wellen. Die Rayleighwelle besteht jedoch aus longitudinalen und transversalen Anteilen und der Streukoeffizient für Rayleighwellen kann aus linearen Anteilen dieser beiden Wellenformen errechnet werden [Viktorov 1967]:

$$\alpha_S^R = A * \frac{c_T}{c_R} * \alpha^T + (1 - A) * \frac{c_L}{c_R} * \alpha^L \quad [XXI]$$

Der Faktor A hängt dabei von der Poissonzahl ab. Für Stahl wurde ein Wert von $A = 0,89$ theoretisch ermittelt und dieser weist eine gute Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen auf [Willems 1981].

Bei rauen Oberflächen kommt es im Vergleich zu glatten zusätzlich zu höherer Streuung von Rayleighwellen, da eine raue Oberfläche zu inkohärenter Streuung der Wellen führt [Cook 2001].

4.5.3 Streuung aufgrund von Versetzungen

Die Schwingungen der Versetzung, welche im „vibrating string model“ beschrieben werden, führen nicht nur zu einem Verlust an Schallenergie, sondern auch zur Streuung der Ultraschallwelle.

Wie in Abbildung 10 ersichtlich führt die Schwingung des Versetzungssegments zu sekundären gestreuten Wellen. Bei der Streuung an verschiedenen Versetzungssegmenten und unterschiedlichen Versetzungen kommt es zu Interferenz zwischen den gestreuten Wellen. Wenn die Wellen inkohärent von der Einfallsrichtung der ursprünglichen Welle weg gestreut werden, führt dies zu einer Dämpfung durch Streuung [Barra 2015].

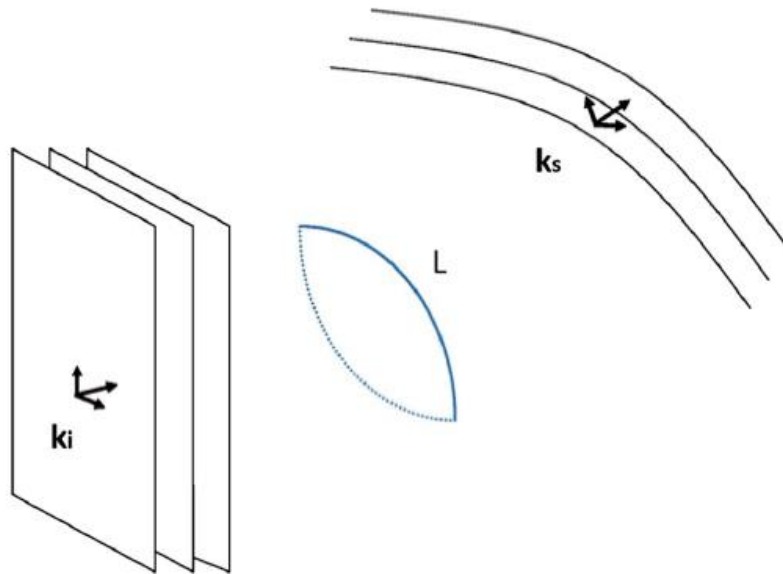


Abbildung 10: Eine ebene Welle mit der Wellenzahl k_i trifft auf ein Versetzungssegment mit der Länge L . An den Randpunkten der Länge L wird das Versetzungssegment blockiert. Je nach Orientierung des Versetzungssegments schwingt das Segment und erzeugt sekundäre gestreute Wellen mit dem Wellenvektor k_s [Barra 2015].

4.5.4 Divergenz

Zusätzlich zur Schallschwächung durch Absorption und Streuung kommt es zur Divergenz, der Verteilung von Schallenergie auf eine größere Fläche. Unter der Annahme einer Punktquelle nimmt die Amplitude bei einer kreisförmigen Ausbreitung der Rayleighwelle auf der Oberfläche mit $\frac{1}{\sqrt{x}}$ ab, dieser Faktor wird auch als geometrische Dämpfung bezeichnet. Der Faktor der geometrischen Dämpfung für sich kugelförmig ausbreitende Volumswellen beträgt $\frac{1}{x}$. Rayleighwellen besitzen somit im Vergleich zu Volumswellen eine geringere geometrische Dämpfung [Viktorov 1966; Worden 2001].

4.6 Einflüsse auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Longitudinal- und Transversalwellen in Stahl nimmt meistens mit zunehmender Härte ab. Grund dafür ist die Verzerrung des Kristalls, welche zu einer höheren Härte führt. Die Verringerung der Ausbreitungsgeschwindigkeit mit

zunehmender Härte ist bei Transversalwellen stärker als bei Longitudinalwellen [Sharpe 1980; Prasad 1994; Krautkrämer 1986].

Eine Gleichung für die Abnahme der Ausbreitungsgeschwindigkeit durch Versetzungen basiert wie Gleichung [XI] auf dem „vibrating string model“ von Granato und Lücke. Auch für die Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit wird die vereinfachte Gleichung für niedrige Frequenzen angenommen [Granato 1956; Hirao 2000]:

$$c = c_0 \left(1 - \frac{4Gb^2}{\pi^4 K} * \Lambda L^2 \right) \quad [\text{XXII}]$$

Allerdings führen nur jene Komponenten der Versetzungen, welche in der gleichen Phase schwingen können, wie die Ultraschallwelle zu einer Verminderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit. Der Faktor K ist unter der Gleichung [XII] nachzuschlagen. c_0 beschreibt die Ausbreitungsgeschwindigkeit, welche ohne Versetzungen gemessen wird [Granato 1956].

Laut Barra führt eine Versetzungsdichte von $10^{14} \frac{1}{\text{m}^2}$ bei einer durchschnittlichen Länge des Versetzungssegmentes von 100 nm im niedrigen Frequenzbereich zu einer Erniedrigung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle um ca. 1 % [Barra 2015].

4.7 Einflüsse auf Dämpfung und Ausbreitungsgeschwindigkeit von Rayleighwellen

Zusammenfassend gibt es eine Reihe gegenläufiger Mechanismen, welche sich auf die Schallschwächung und Ausbreitungsgeschwindigkeit von Rayleighwellen auswirken. Diese Einflüsse sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Einflüsse auf Absorptionskoeffizient, Streukoeffizient und Ausbreitungsgeschwindigkeit von Rayleighwellen

Effekt	Absorptionskoeffizient	Streukoeffizient (im Bereich der Rayleigh- und stochastischen Streuung)	Ausbreitungsgeschwindigkeit
Kornfeinung	-	↓	-
Erhöhung der elastischen Anisotropie des Vielkristalls	-	↑	-
Erhöhung der Anisotropie des Gefüges	-	↑	-
Erhöhung der Oberflächenrauigkeit	-	↑	-
Erhöhung der Temperatur	↑	-	↑
Erhöhung der Versetzungsdichte	↑	-	↓
Verzerrungen im Kristallgitter	↑	-	↓
Erhöhung der Frequenz der Ultraschallwelle	↑	↑	Theoretisch keine Auswirkung

4.8 Dispersion

Unter der Dispersion von Wellen versteht man die Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Frequenz der Welle. In der Literatur wird darauf hingewiesen, dass Rayleighwellen im isotropen elastischen Halbraum nicht dispersiv sind [Rayleigh 1885; Viktorov 1967; Worden 2001; Krautkrämer 1986].

Dieser Fall entspricht jedoch nicht der Realität. Theoretisch wurde nachgewiesen, dass Pulse von akustischen Wellen aufgrund elastischer Anisotropie mit zunehmender Laufzeit breiter als der ursprünglich ausgesandte Puls werden. Der Grund darin liegt in zufällig orientierten Körnern mit unterschiedlichen Korngrößen. Jedes Korn hat eine spezifische Orientierung und somit elastischen Konstanten, welche von der Orientierung abhängen. Daraus ergeben sich unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten für Ultraschallwellen je nach Größe und Orientierung des Korns. Dadurch kommt es zu unterschiedlichen Zeiten, in welchen sich die Ultraschallwelle im Korn aufhält. Zusätzlich werden Ultraschallwellen an Inhomogenitäten, wie Korngrenzen, oder Einschlüssen gebeugt und reflektiert. Der Ultraschallpuls wird somit auf viele verschiedene

geometrische Wege aufgeteilt, was dazu führt, dass die Wellenpakete zu unterschiedlichen Zeiten eintreffen [Every 2012].

Ein Gradient in der Härte führt ebenfalls zu Dispersion der Rayleighwelle. Mit zunehmender Härte sinkt die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Daher führt ein Gradient der Härte zu einem Gradienten der Ausbreitungsgeschwindigkeit und somit zu unterschiedlichen Zeiten der eintreffenden Wellenpakete. Auch innere Spannungen verursachen Dispersion [Bourse 1984; Krautkrämer 1986].

Ebenso wirkt sich die Krümmung der Oberfläche auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit aus. Auf stark gekrümmten Oberflächen ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit bei konvexen Geometrien erhöht und bei konkaven verringert [Scholte 1948; Viktorov 1958; Krautkrämer 1986].

4.9 Wechselwirkung von Rayleighwellen mit Rissen

Die Interaktion von Rayleighwellen mit offenen Rissen ist stark von der Wellenlänge abhängig. Im Folgenden werden 3 Fälle unterschieden:

- a) Ist die Wellenlänge sehr viel größer als der Riss, dann kommt es nur zu einer sehr schwachen Wechselwirkung, da sich die Welle unter dem Riss weiter fortbewegen kann [Cooper 1986]. Die Risse können durch die Amplitudenänderung der vom Riss reflektierten, oder transmittierten Anteile, erfasst werden [Resch 1985; Kinra 1986].
- b) Entspricht die Größenordnung der Wellenlänge der Rayleighwelle der Risstiefe, kommt es zu Streuung und Beugung am Riss. Der Transmissionsfaktor im Verhältnis von Risstiefe zu Wellenlänge verläuft beinahe linear. Risse bis zu einem Verhältnis von $\frac{a}{\lambda} \leq 1,5$ können durch Amplitudenverminderung der Transmissionsmessungen erfasst werden (siehe: Abbildung 11). Über dem Faktor 1,5 kann die Schwächung des Signals dazu führen, dass der Riss nicht mehr detektiert werden kann. [Kinra 1986; Pohl. 11.08.2021]. Zusätzlich wirken Risse in dieser Größenordnung wie ein Tiefpassfilter auf Oberflächenwellen, denn hochfrequente Anteile werden teilweise reflektiert [Longo 2006; Longo 2010; Cooper 1986].

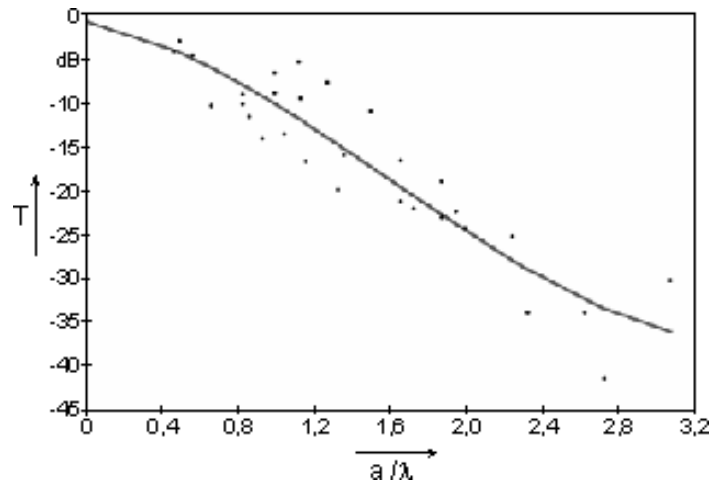


Abbildung 11: Abhängigkeit des Transmissionsfaktors vom Verhältnis zwischen Risstiefe und Wellenlänge [Pohl. 11.08.2021]

- c) Falls die Wellenlänge sehr viel kleiner als der Riss ist, dann ist die Welle gezwungen den Rissflanken zu folgen und legt daher einen längeren Weg zurück (siehe: Abbildung 12). In diesem Fall wird ein Teil der Rayleighwelle am Riss reflektiert, und ein Teil der Rayleighwelle wird in andere Wellenformen umgewandelt (modenkonvertiert) und nur ein geringer Teil der Rayleighwelle wird durch den Riss transmittiert. Der Riss kann somit durch die längere Laufzeit erfasst werden. Die Gleichung zur Bestimmung der Risstiefe durch die Laufzeitmessung lautet [Viktorov 1967; Silk 1976]:

$$l = \frac{c_R * t}{2} - x \quad [\text{XXIII}]$$

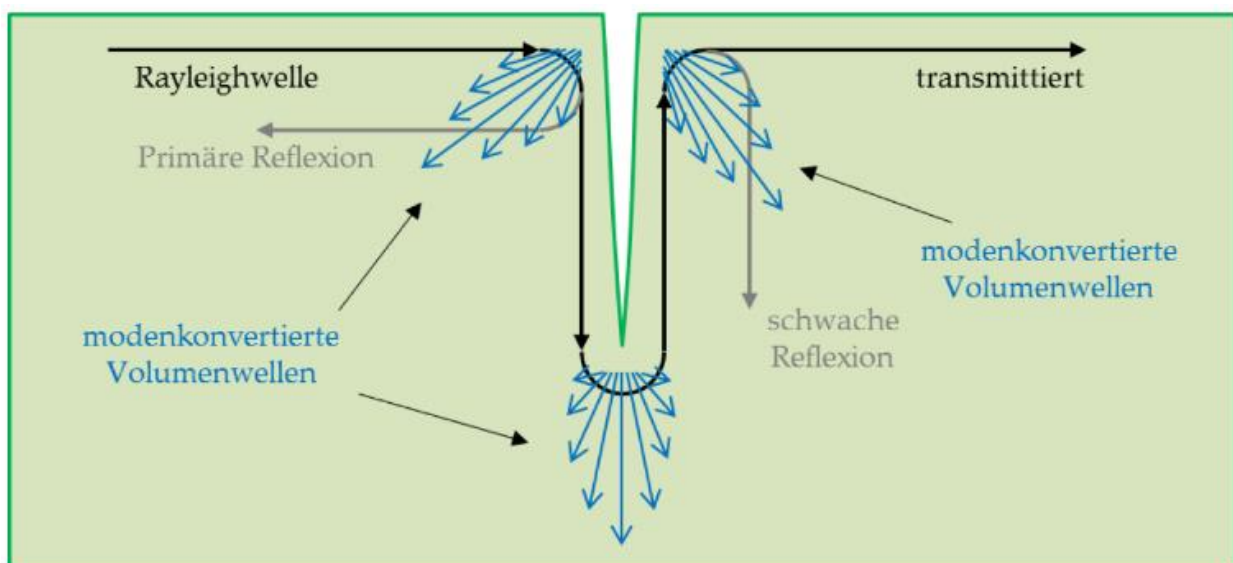


Abbildung 12: Verhalten der Rayleighwelle an einem Riss [Meyendorf 2004; Rau. 11.08.2021]

4.10 GS200

Beim GS200 (GAMPT-Scan 200) handelt es sich um ein A-Bild-Gerät (Darstellung der Amplitude von Ultraschallpulsen über die Zeit), welches für grundlegende Echoskopie geeignet ist. Es besitzt zwei Anschlüsse für Ein-Element-Ultraschallwandler und eine USB-Schnittstelle, um mit einem angeschlossenen Computer, welcher mit der GS-EchoView Software ausgestattet ist, zu kommunizieren [GAMPT mbH 2016].

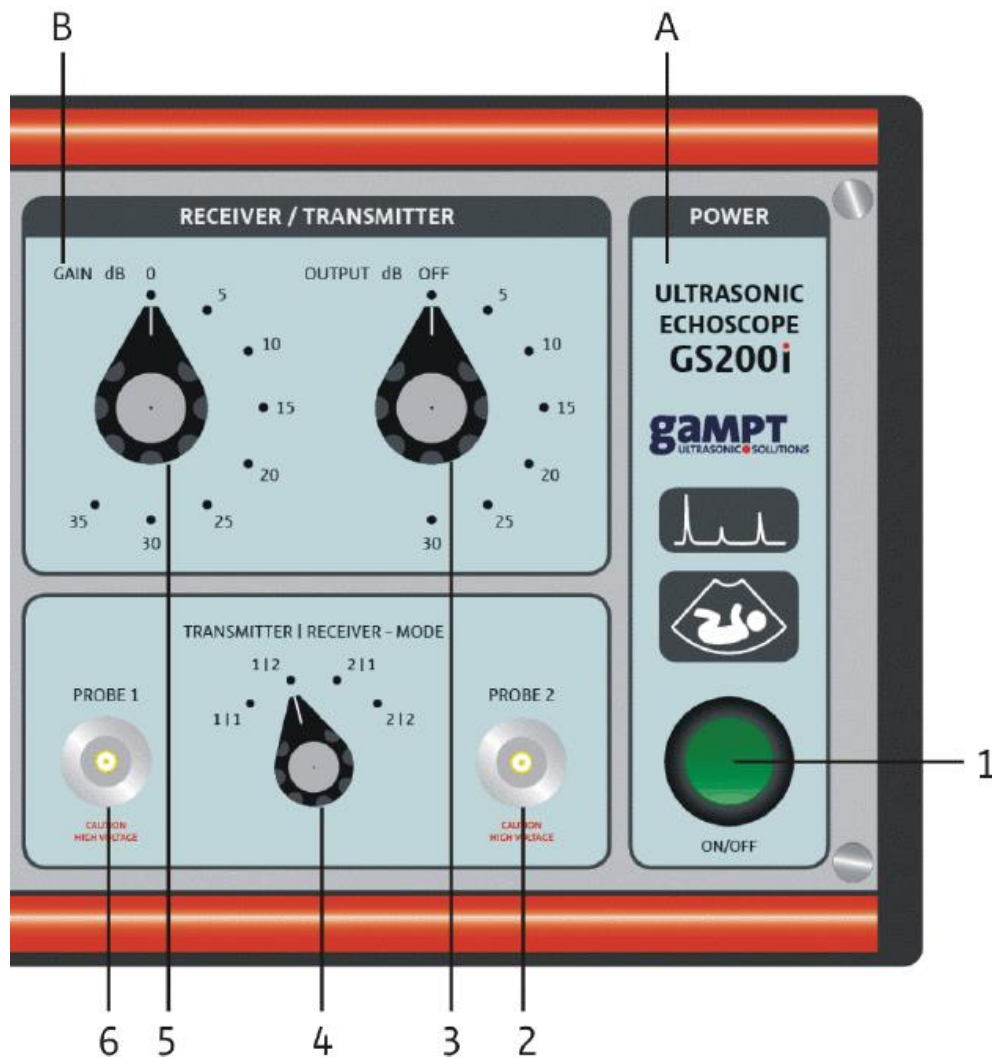


Abbildung 13: Vorderansicht der rechten Paneele des GS200i [GAMPT mbH 2015]

Die beiden Anschlüsse für die Ein-Element-Ultraschallwandler sind mit Probe 1 und Probe 2 gekennzeichnet (siehe: Abbildung 13). Zwischen den Anschlüssen befindet sich ein Schalter mit der Beschriftung Transmitter | Receiver – Mode (Nummer 4). Hierbei können Sender und Empfänger ausgewählt werden. Die Einstellungen sind in Tabelle 2 zusammengefasst [GAMPT mbH 2016]:

Tabelle 2: Einstellungen der Transmitter | Receiver - Moden

Einstellung	Sender	Empfänger	Verfahren
1 1	Probe 1	Probe 1	Reflexion
1 2	Probe 1	Probe 2	Transmission
2 1	Probe 2	Probe 1	Transmission
2 2	Probe 2	Probe 2	Reflexion

Output (Sendepiegel) und Gain (Empfangsverstärkung) ermöglichen die Einstellung von Sendepiegel und Empfangsverstärkung. Diese können in 5 dB Schritten variiert werden. Ein maximaler Sendepiegel von 30 dB entspricht dabei einer Sendespannung von ca. 300 Volt. Die Empfangsverstärkung kann bis zu einer maximalen Verstärkung von 35 dB gewählt werden (siehe: Abbildung 14) [GAMPT mbH 2016].

Die verwendeten Sonden besitzen eine blaue Markierung für 1 MHz Nennfrequenz und eine rote Markierung für 2 MHz Nennfrequenz der Sonden (siehe: Abbildung 14). Der Durchmesser der Sondenköpfe beträgt 27 mm [GAMPT mbH. 18.10.2021; GAMPT mbH. 18.10.2021].



Abbildung 14: Die GAMPT 1 und 2 MHz Ultraschallsonden. Die blaue Markierung steht für eine 1 MHz Sonde. Die 2 MHz Sonde besitzt eine rote Markierung. Die Federn, welche die Sonden umgeben wurden für andere Experimente, welche nicht im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, benötigt. Diese dienen somit keinem Zweck für diese Arbeit.

Die verwendeten 1 MHz Comb-Wandler (Rayleighwellenaufsätze) der Firma Gampt bestehen aus Acryl und besitzen einen Durchmesser von 32 mm und eine Höhe von 10 mm [GAMPT mbH. 18.10.2021] (siehe: Abbildung 15). Der Comb-Wandler für 1 MHz Nennfrequenz besitzt 10 Zähne, der für 2 MHz Nennfrequenz 20 Zähne.

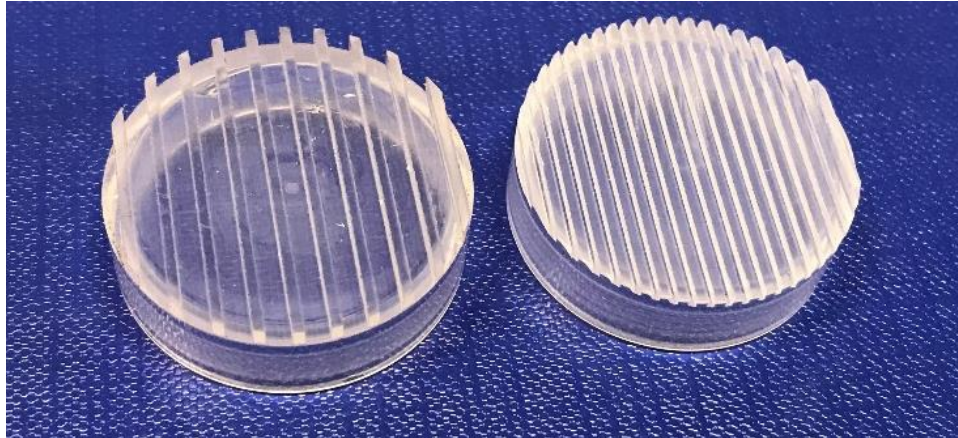


Abbildung 15: Comb-Wandler für 1 MHz (links) und 2 MHz (rechts)

Die verwendeten Comb-Wandler der Firma Gampt wurden im Lichtmikroskop vermessen. Daraus ergeben sich die Abmessungen, welche in Tabelle 3 tabelliert sind.

Tabelle 3: Abmessungen der Zähne der 1 und 2 MHz Comb-Transducer

Frequenz [Hz]	Zahnbreite [mm]	Spalt zwischen Zähnen [mm]	Periode Zahn + Spalt [mm]	Zahnhöhe [mm]
1	0,84	1,95	2,8	2
2	0,42	0,97	1,4	0,9

4.11 GS-EchoView

GS-EchoView ist die von GAMPT mbH bereitgestellte Software. Diese dient zur Kommunikation mit dem GS200 und zur Aufnahme und Darstellung der vom GS200 übermittelten Daten [GAMPT mbH 2016].

Es können das HF Signal (das digitalisierte Ultraschallsignal) und das Amp Signal (die von GS-EchoView berechnete Hüllkurve) einzeln oder gemeinsam dargestellt werden. Am linken Bildrand der GS-EchoView Software findet sich das Register Params, welches folgende Einstellmöglichkeiten bietet (siehe: Abbildung 16). (Anmerkung: Die gewählten Einstellungen für die Experimente werden in Kapitel 5 angegeben).

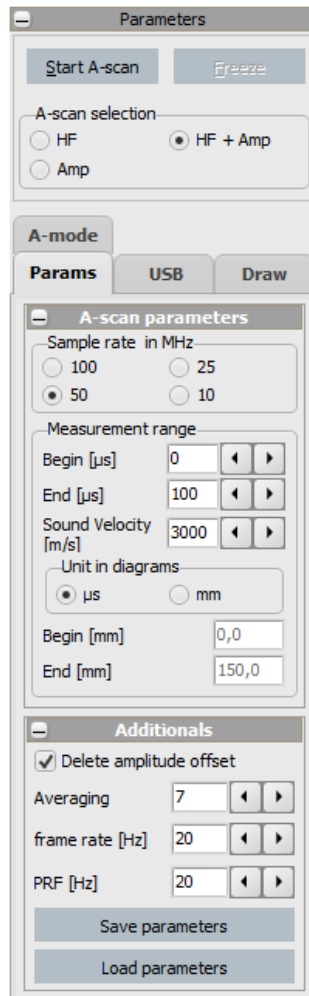


Abbildung 16: Anzeige des Register Params in GS-EchoView

Sample rate in MHz:

Die sample rate ist die Abtastrate. Bei der Umwandlung vom analogen zum digitalen Ultraschallsignal kann diese zwischen 10, 25, 50 und 100 MHz gewählt werden.

Measurement range Begin / End [µs]:

Diese bestimmt den Start- und Endwert des gewählten Messbereiches, welcher vom Echoskop erfasst wird. Durch die Auswahl µs wird eine Laufzeitmessung durchgeführt. Die Reichweite des Messbereiches ist von der sample rate abhängig.

Sound Velocity [m/s]:

Bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit können Fehler oder Bauteilwände durch die jeweiligen eintreffenden Echos bestimmt werden. Die Einstellung Sound Velocity [m/s] bedeutet, dass eine solche Tiefenmessung durchgeführt wird.

Unit in diagram μs oder mm :

Auswahl zwischen Laufzeitmessung [μs] und Tiefenmessung [mm].

Begin / End [mm]:

Start- und Endwert für den Messbereich der Tiefenmessung.

Additional - delete amplitude Offset:

Bei Auswahl dieser Funktion wird der Offset der von Gampt berechneten Hüllkurve korrigiert.

Frame rate [Hz]:

Gibt an, wie oft das Messsignal vom Echoskop abgefragt wird.

PRF [Hz]:

PRF (pulse repetition frequency) gibt die Frequenz an, mit der die Ultraschallpulse angeregt werden.

4.12 Ermittlung der experimentellen Größen

4.12.1 Verfahren der Längendifferenz

Um die Laufzeit zu bestimmen wurde das Verfahren der Längendifferenz verwendet. Diese Methode beruht auf der Variation der Messlänge zwischen den Sonden zur Ermittlung der Laufzeit und der Dämpfung. Die Laufzeit wird durch Messung der Zeit der Maxima der Ultraschall-Pulse bestimmt. Nun wird die Differenz aus den Entfernungen zwischen den Sonden und den Laufzeiten der Pulse gebildet. Zur Berechnung der Differenz werden die Entfernungen und Laufzeiten auf die Messung mit dem geringsten Abstand (3mm) bezogen. Die daraus resultierende Gleichung lautet:

$$c_R = \frac{x_x - x_1}{t_{RWx} + t_{AS} + t_{RA} + t_{KGx} - t_{RW1} + t_{AS} + t_{RA} + 1} \approx \frac{x_x - x_1}{t_{RWx} - t_{RW1}} \quad [\text{XXIV}]$$

Die Variable t_{RW} beschreibt die Ausbreitungszeit der Rayleighwelle, welche bestimmt werden soll. Die Zeit, welche der Wellenpuls in der Anpassungsschicht verbringt, ist t_{AS} . Die Zeit, welche der Wellenpuls im Kopplungsgel benötigt, wird durch t_{KG} und die Zeit im Comb-Wandler durch t_{RA} beschrieben. Die Variable x_1 beschreibt die geringste gemessene Distanz zwischen den Sonden einer Messreihe, x_x die gemessenen Distanzen bei höheren gemessenen Distanzen.

Durch Bildung der Differenzen von Weg und Zeit können systematische Fehler, wie die Verlängerung der Laufzeit durch die Comb-Wandler und Anpassungsschicht vermieden werden. Die Anpassungsschicht ist eine Schutzschicht zwischen Piezoelement und der Probenoberfläche [GAMPT mbH 2007].

Für die Dämpfung wird ein exponentieller Abfall angenommen (siehe: Gleichung [VIII]), somit kann der Dämpfungskoeffizient durch die folgende Gleichung berechnet werden:

$$\alpha = \frac{\ln \left(\frac{A_x}{A_1} \right)}{x} \quad [\text{XXV}]$$

Oberflächenwellen, welche durch Linienquellen angeregt werden, besitzen keine geometrische Dämpfung (siehe: [Österreicher 2019]). Da es sich bei den Zähnen des Comb-Wandlers um Linienquellen handelt wird die geometrische Dämpfung in der Auswertung nicht berücksichtigt.

5 Praktischer Teil

5.1 Ziel der Messungen

Ziel dieser Arbeit war es, die Ausbreitungsgeschwindigkeit und Dämpfungskoeffizienten für Schienenprobenkörper aus Hadfield-Stahl mit 60E1 Schienenprofil mit verschiedenen Stadien der Explosionsverfestigung zu bestimmen. Zusätzlich wurde die Korngröße anhand von Lichtmikroskop-Aufnahmen an den Messpositionen der Sonden ermittelt. Da die Explosionsverfestigung zu einem Härteanstieg nahe der Oberfläche führt, wurde der Härteverlauf durch eine Härteverlaufsprüfung bestimmt.

Anhand dieser Daten wurde geprüft, ob die Sprengverfestigung einen messbaren Einfluss auf Dämpfungskoeffizient und Ausbreitungsgeschwindigkeit von Rayleighwellen besitzt und ob Gefügeunterschiede im Lichtmikroskop zwischen den Proben erkennbar sind.

Mit dem bestehenden Setup wurde an einer Weichenprobe mit einem Riss am Schienenfuß getestet, ob der Riss im Transmissionsverfahren detektierbar ist.

5.2 Methode der Messungen

5.2.1 Probenkörper - Rayleighwellen

Die Probenkörper wurden von der voestalpine Railway Systems GmbH geliefert. Bei den drei Probenkörpern handelte es sich um eine nicht explosionsverfestigte und zwei explosionsverfestigte Schienen, die auf das Standardschienenprofil 60E1 gefräst wurden (siehe: Abbildung 17). Die gelieferten Proben waren ca. 18 cm lang (für exakte Abmessungen siehe Tabelle 3). Die 1x explosionsverfestigte Probe wurde mit einem zweilagigen Schuss gesprengt, die 2x explosionsverfestigte Probe durch einen zweilagigen und zusätzlich durch einen einlagigen Schuss.

Tabelle 4: Abmessungen und Beschriftungen der Probenkörper

Probenkörper	Stempel	Probenlänge [cm]
Nicht explosionsverfestigt	Kein Stempel Markierung: „kp 499 Mn Schiene“ auf Lauffläche	18,2
1x explosionsverfestigt	2079	18,6
2x explosionsverfestigt	2086	18,6

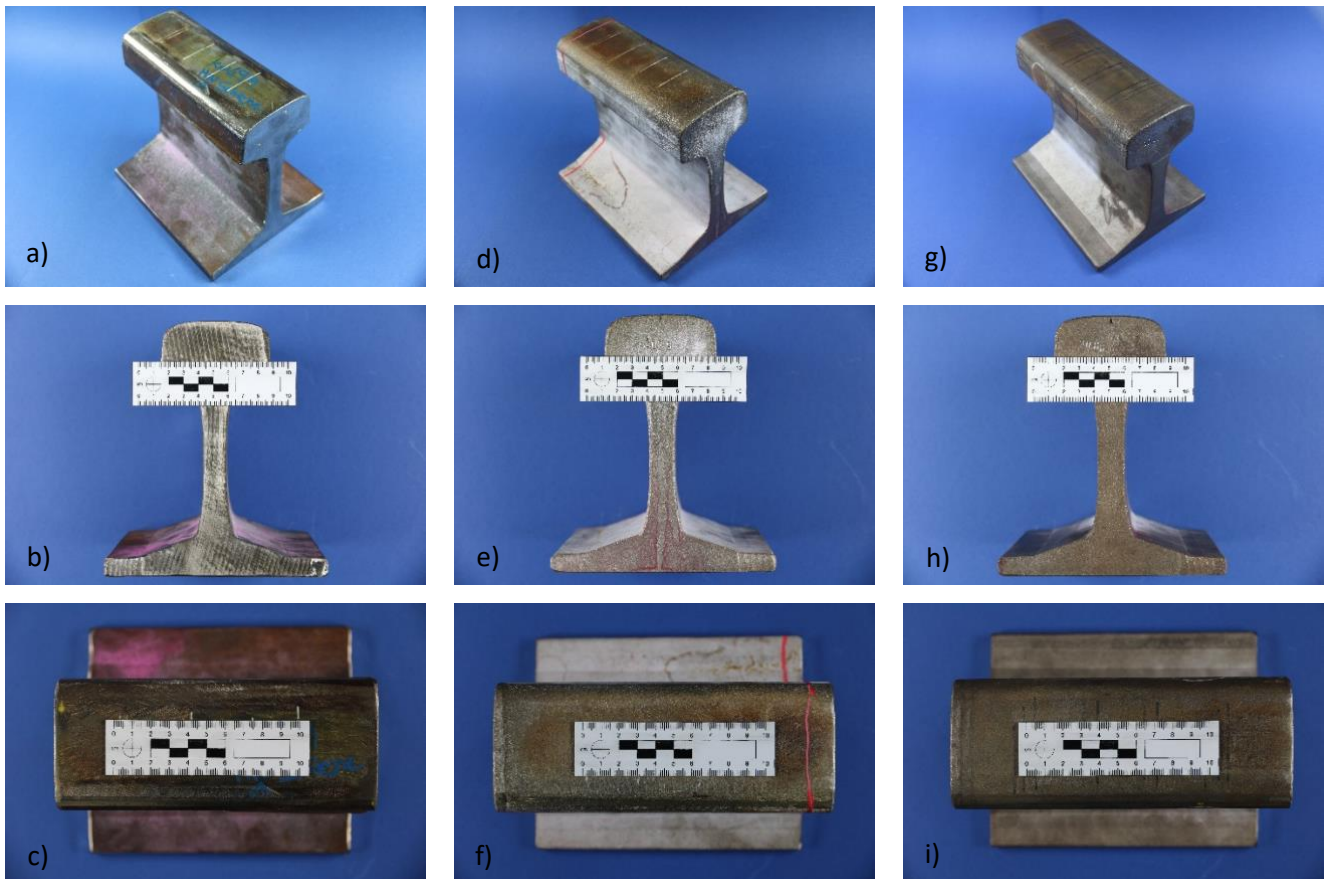


Abbildung 17: Aufnahmen der Probenkörper

- a) Gesamt-, b) Querschnitts-, c) Laufflächen- Ansicht der nicht explosionsverfestigten Probe
- d) Gesamt-, e) Querschnitts-, f) Laufflächen- Ansicht der 1x explosionsverfestigten Probe
- g) Gesamt-, h) Querschnitts-, i) Laufflächen- Ansicht der 2x explosionsverfestigten Probe

5.2.2 Messungen - Rayleighwellen

An den drei Probenkörpern mit jeweils ca. 18 cm Länge wurden in vorgegebenen Abständen Ultraschallmessungen von Oberflächenwellen im Transmissionsverfahren durchgeführt. Für die Messungen wurde das GAMPT GS200 mit 1 und 2 MHz Sonden und die zugehörigen Comb-Wandler (Rayleighaufsätzen) verwendet.

Die Messungen wurden jeweils in der Mitte des Schienenkopfes und am äußeren Rand des Schienenfußes durchgeführt. Die Messdistanzen zwischen den Sonden (3, 37, 70 und 98 mm) wurden mit Edding und Kreidestift eingezeichnet und zusätzlich mit einem digitalen Messschieber gemessen.

Die weiteren Messungen erfolgten nach folgendem Ablauf:

- Mit dem Messschieber wurde die Distanz zwischen den äußeren Kämmen der Comb-Wandler gemessen.
- Die Messsignale des GS200 wurden in der GS-EchoView-Software importiert und im A-Bild Modus dargestellt.
- Die Daten des A-Bild Modus wurden als dat-Dateien gespeichert und in Origin importiert. In Origin wurde eine Hüllkurve für die Rohdaten errechnet.
- Die Rohdaten einer Messreihe wurden nun auf das Maximum der Hüllkurve bei 3 mm, da es sich hierbei um die geringste Messdistanz handelt, normiert.
- An den normierten Daten wurde wieder ein Peak Detect durchgeführt und Zeit und Amplitude bestimmt.
- Durch das Verfahren der Längendifferenz wurde die Laufzeit bestimmt. Aus dem Verhältnis der Amplituden und dem zurückgelegten Weg wurde der Dämpfungskoeffizient bestimmt.
- Die Ergebnisse für Dämpfungskoeffizient und Ausbreitungsgeschwindigkeit wurden statistisch und graphisch analysiert.

5.2.3 Probenkörper - Metallographie

Nach Abschluss der Rayleighwellenmessungen wurde von jeder Probe ein 1 cm breites Stück durch Bandsägen hinuntergeschnitten. Aus diesem abgeschnittenen Stück wurden wieder durch Bandsägen weitere drei Teile (Schienenkopf, Schienensteg und Schienenfuß) hergestellt (siehe: Abbildung 18).

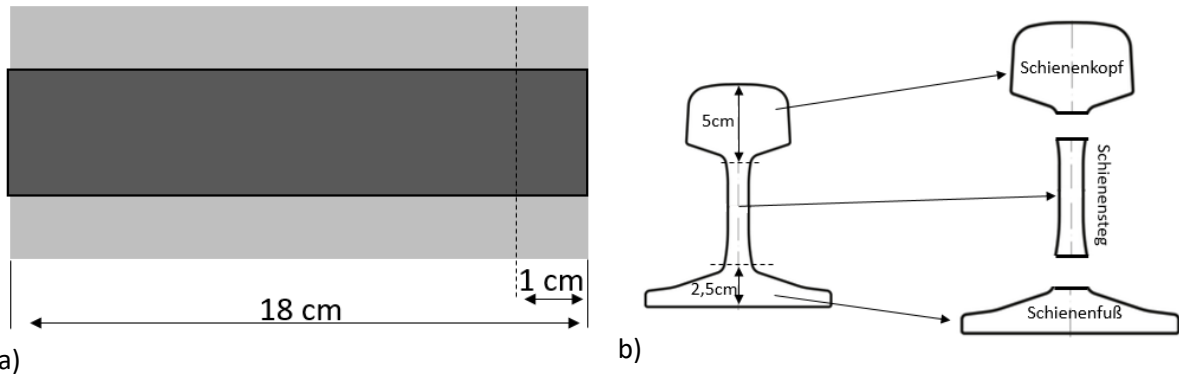


Abbildung 18: Probenfertigung für die Metallographie

- Ansicht von oben auf den Schienenkörper. Ein 1 cm langes Querschnittsstück wurde abgetrennt
- Das Querschnittsstück wurde weiter in drei Teile (Schienenkopf, Schienensteg und Schienenfuß) unter den angegebenen Abmessungen geschnitten

Die angefertigten Proben von Schienenkopf und Schienenfuß sind in Abbildung 19 zu sehen.



Abbildung 19: Probenkörper (jeweils Schienenkopf und Schienenfuß), welche für die Metallographie verwendet wurden.

- Gekennzeichnet mit Nummer 1: 1x explosionsverfestigt
- Gekennzeichnet mit Nummer 2: 2x explosionsverfestigt
- Gekennzeichnet mit Nummer 3: nicht explosionsverfestigt

5.2.4 Messungen – Metallographie Härteverlaufsprüfung und Lichtmikroskopie

An Schienenkopf und Schienenfuß wurde mit HV1 der Verlauf der Härte nach EN ISO 6507-1 (Vickers) gemessen. Am Schienenkopf wurde in der Mitte des Probenkörpers von der Schnittkante im Abstand zwischen den Härteeindrücken von 1 mm für die ersten 10 mm Abstand vom Schnitttrand und 2 mm für die restlichen 40 mm gemessen. Am Schienenfuß wurde der Härteverlauf am äußeren Rand von der unteren bis zur oberen Schnittkante im Abstand von 1 mm gemessen. Für die Position des Härteverlaufs siehe: Abbildung 20.

Nach der Härteverlaufsprüfung wurden Aufnahmen mit dem Lichtmikroskop mit 25x Vergrößerung durchgeführt. Neun einzelne Bilder wurden mithilfe des Olympus MIA-Tools (Multi Image Alignment) zu einem Bild zusammengefügt. Es wurden drei MIA-Bilder am Schienenkopf und zwei am Schienenfuß angefertigt (siehe: Abbildung 20). Nun wurden vier Linien mit zunehmendem Abstand von jeweils 1 mm zum oberen Rand des Schienenkopfes gelegt und mithilfe des Linienschnittverfahrens die Korngröße bestimmt. Am Schienenfuß wurden ebenfalls vier Linien parallel zum Schienenboden im Abstand von 1 mm gelegt. An diesen Linien am Schienenfuß wurde ebenfalls das Linienschnittverfahren angewandt und die Korngröße bestimmt.

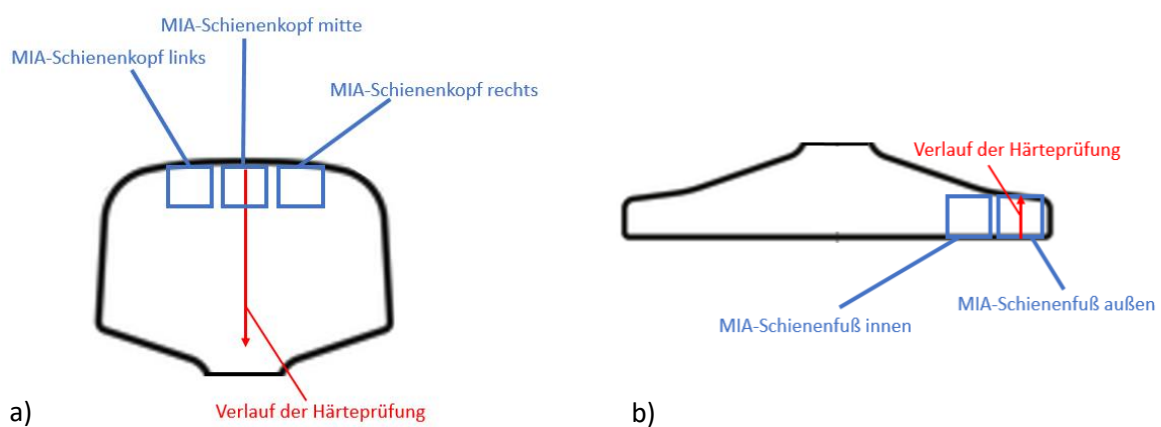


Abbildung 20: Position der MIA-Aufnahmen und Verlauf der Härteprüfung am a) Schienenkopf und b) Schienenfuß

5.3 Versuchsaufbau - Rayleighwellen

Alle Messungen wurden mit dem GAMPT GS200 und 1 und 2 MHz Prüfköpfen durchgeführt. Die Messungen wurden auf schwarzen Antivibrationsmatten durchgeführt.

Comb-Wandler an Sonden anbringen:

- Kopplungsgel wurde in die Comb-Wandler (GAMPT-Rayleighaufsätze) gefüllt, sodass die gesamte innere Oberfläche bedeckt werden konnte.
- Die Comb-Wandler wurden auf den Ultraschallsonden angebracht und eingedreht, sodass alle Luftblasen nach außen gepresst wurden.



Abbildung 21: Messaufbau am Schienenfuß. Mit dem Messschieber wurden die äußeren Kämme der Comb-Wandler parallel zueinander ausgerichtet und die exakte Distanz gemessen.

- a) 4 mm
- b) 37 mm
- c) 70 mm
- d) 98 mm

Ablauf einer Messung:

- Für Messungen am Schienenfuß wurden die Probenkörper auf den Kopf gestellt (siehe: Abbildung 21). Bei Messungen am Schienenkopf standen die Proben am Schienenfuß (siehe: Abbildung 22).
- Die Abstände der Messpositionen wurden mit Edding oder Kreidestift an den Probenkörpern markiert. Die Abstände zwischen den sich am nächsten liegenden Zähnen der Comb-Wandler betragen 3, 37, 70 und 98 mm bei 1 MHz-Messungen und bei 2 MHz 3, 37, 70 mm. Die Abstände sind nur Richtwerte; die genaue äußerste Distanz der Kämme wurde bei jeder Messung mit dem Messschieber gemessen.
- Eine erbsengroße Menge Kopplungsgel wurde an den Messpositionen der Sonden an der Schienenoberfläche aufgebracht.
- Das Kopplungsgel wurde mit einem Lineal glatt verstrichen.

- Die Sonden mit Comb-Wandler wurden auf der mit Kopplungsgel benetzten Oberfläche angebracht.
- Mit einem digitalen Messschieber (Messbereich: 0 – 150 mm, Messgenauigkeit: 0,1 μm) wurden die äußersten Kämme der Comb-Wandler parallel zueinander ausgerichtet und die Entfernung gemessen.

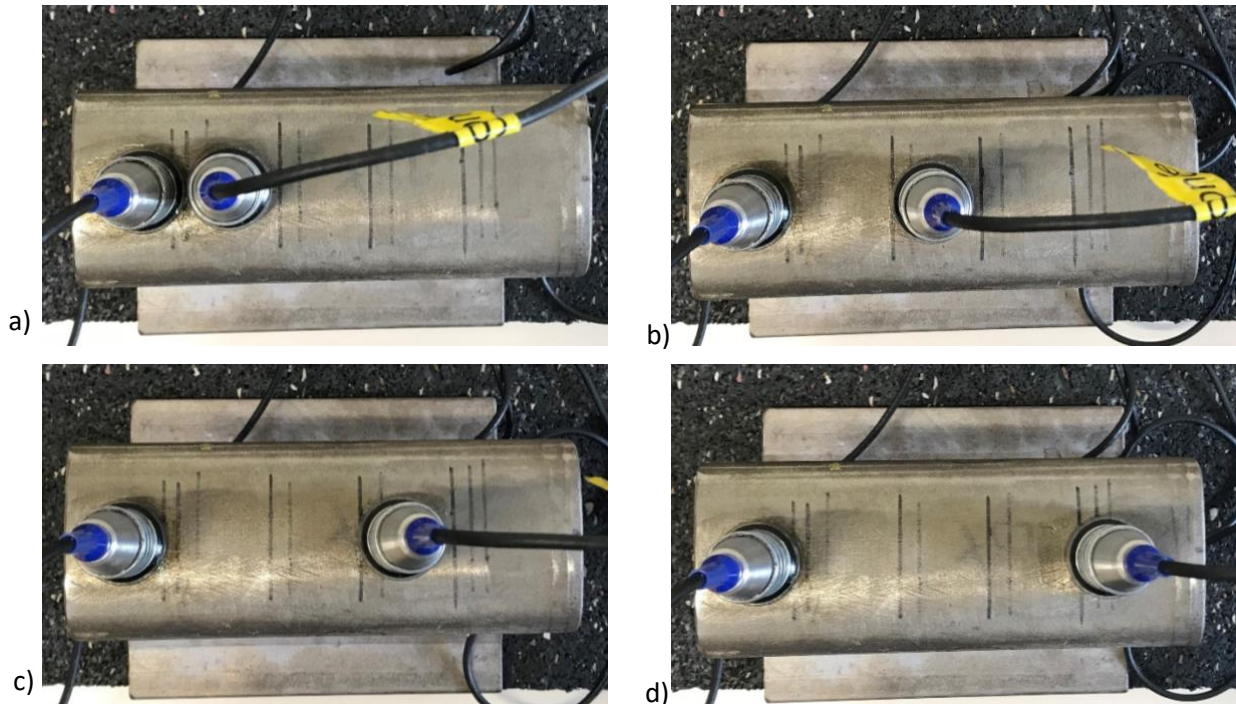


Abbildung 22: Messaufbau am Schienenkopf. Der Probenkörper steht auf einer Antivibrationsmatte. Die Position der rechten Sonde und somit die Distanz zwischen den Sonden wurde schrittweise erhöht.

- a) 3 mm Distanz
- b) 37 mm Distanz
- c) 70 mm Distanz
- d) 98 mm Distanz

- Nach der Messung der Länge wurde der Messschieber entfernt, um die Sonden nicht zu beeinflussen. Dies war insbesondere bei den 2 MHz Sonden notwendig, da die Sonden aufgrund der geringen Höhe der Comb-Wandler Zähne durch den Messschieber angehoben wurden.
- Das Messsignal wurde in der GS-EchoView Software aufgezeichnet und das Ultraschallsignal und dessen Hüllkurve als dat-file gespeichert. Die von GS-EchoView berechnete Hüllkurve diente während der Messung zur Orientierung. Da die Parameter zur Hüllkurvenberechnung von GS-EchoView nicht bekannt sind, wurde mittels Origin eine Hüllkurve mit bekannten Parametern berechnet.
- Die rechte Sonde wurde abgenommen und die Oberfläche der Schiene vom Kopplungsgel mit Küchenrolle gereinigt.

- Kopplungsgel wurde an der neuen Messposition aufgebracht, mit einem Geodreieck verstrichen und die bewegte Sonde neu aufgebracht, ausgerichtet und die Entfernung mit dem Messschieber gemessen.
- Dieser Vorgang wurde für alle Sondendistanzen durchgeführt (siehe: Abbildung 21 und Abbildung 22).
- Nach einer Messreihe (Variation aller festgelegten Abstände mit einer Sonde) wurden die Positionen der Sonden getauscht. Daher wurde die Sonde, deren Position in der vorherigen Messreihe variierte, nun fixiert und der neue Abstand der Sonden mit der zuerst fixierten Sonde eingestellt.
- Nach Abschluss dieser beiden Messreihen wurden die Comb-Wandler von den Sonden abgenommen und ebenso wie die Sondenoberfläche vom Kopplungsgel gereinigt. Insgesamt wurden sieben solcher Versuchsreihen für jeweils Schienenkopf und Schienenfuß mit jeweils 1 und 2 MHz Sonden durchgeführt.

5.3.1 Versuchsparameter Rayleighwellen

Die Messungen wurden in den Transmissionsmoden (Einstellung am GS200: Modus 1/2 und Modus 2/1) durchgeführt. Für die Messungen wurden die in Tabelle 5 tabellierten Parameter am GS200 und in der GS-EchoView-Software gewählt:

Tabelle 5: Messparameter: Einstellungen am GS200 und in GS-EchoView

Messfrequenz	1 MHz	2 MHz
Output [dB]	25	25
Gain [dB]	20	25
Begin [μs]	0	0
End [μs]	100	100
FFT-Filter	off	off
Cepstrum-Filter	off	off
Averaging	7	7
Frame rate [Hz]	20	20
PRF [Hz]	20	20
Delete offset	ein	ein
Sample rate [MHz]	100	100

5.4 Auswertung der Rayleighwellenmessungen

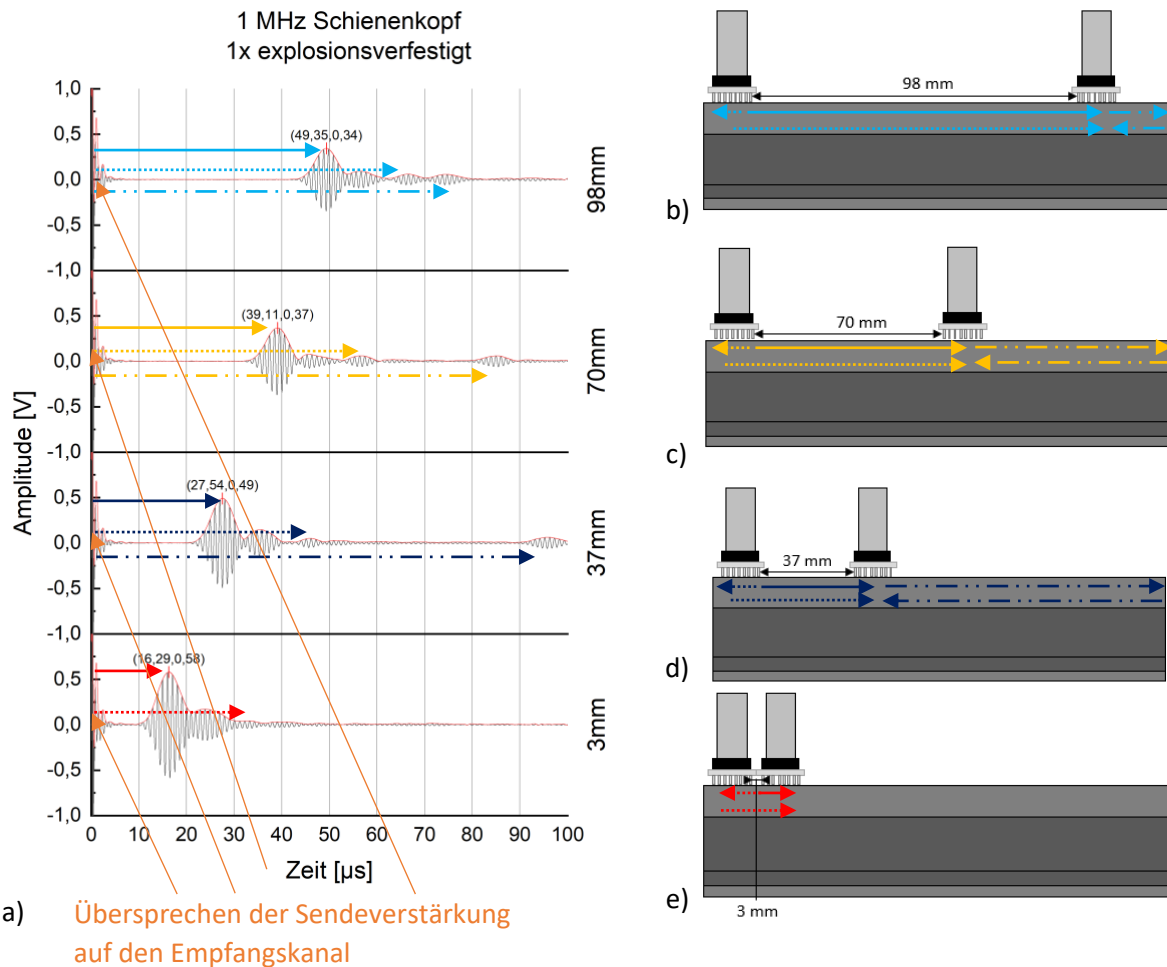


Abbildung 23: Zustandekommen des Ultraschallmesssignals für 1 MHz. Die durchgehenden Linien geben den direkten Weg der Rayleighwelle an, welcher gemessen und ausgewertet wurde. Die strichlierten Linien geben Reflexionen von den Schnittkanten des Probenkörpers an. Striche gleicher Größe geben Reflexionen von der linken Schnittkante und Striche mit variierender Größe Reflexionen von der rechten Schnittkante des Probenkörpers an.

a) Messsignal der 1x explosionsverfestigten Probe am Schienenkopf. Die Werte über den Maxima geben Zeit und Amplitude an; b) Beispielhafter Messaufbau bei 98 mm Distanz; c) Beispielhafter Messaufbau bei 70 mm Distanz; d) Beispielhafter Messaufbau bei 37 mm Distanz; e) Beispielhafter Messaufbau bei 3 mm Distanz.

Die als dat-Dateien gespeicherten Ultraschallsignale wurden in OriginPro 2020b importiert. Da die Berechnung der Hüllkurve in GS-EchoView im entsprechenden Manual nicht hinreichend dokumentiert ist, wurde mittels Origin eine Hüllkurve neu berechnet. Für diese Neuberechnung der Hüllkurve wurden folgende Einstellungen verwendet:

Umhüllungstyp: obere Hüllkurve
Glättungspunkte: 10

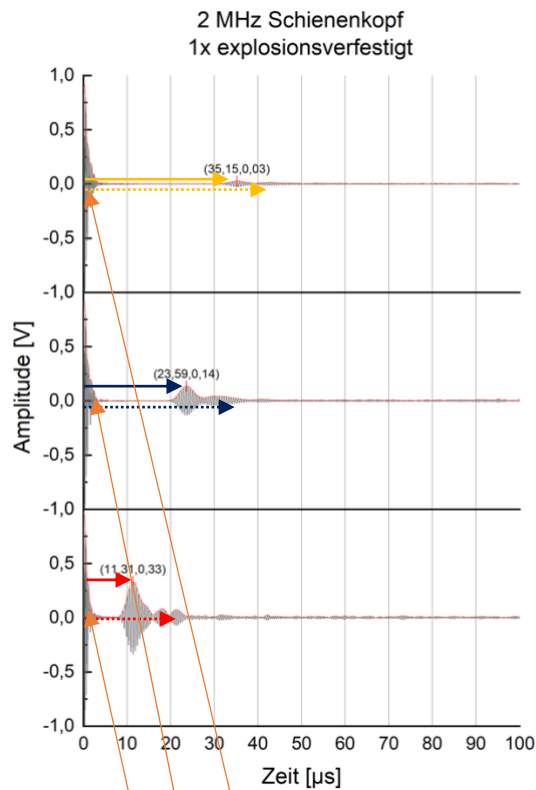
An der Hüllkurve wurde ein Peak-Detect durchgeführt. Dabei wurden folgende Parameter angewandt:

Modalwert:	konstant
Bereich:	Kurve in der grafischen Datenauswahl (10-60 μ s)
Konstant:	Minimum
Richtung:	positiv
Methode:	lokales Maximum
Lokale Punkte:	5
Methode:	nach Höhe
Schwellwert:	90%

In Abbildung 23 ist ein beispielhaftes Ultraschallsignal für 1 MHz Sonden am Schienenkopf der 1x explosionsverfestigten Probe zu sehen. Der Ausschlag in den ersten Mikrosekunden (0-5 μ s) ergibt sich aus dem Übersprechen von Sendeverstärkung auf den Empfangskanal. Dieser Effekt steht in keinem physikalischen Zusammenhang mit der gesendeten Rayleighwelle. Die Zeit bis zum Auftreten und die Amplitude des ersten Maximums wurden gemessen. Bei den nachfolgenden Peaks handelt es sich um Reflexionen von den Schnittkanten.

Im Vergleich zu 1 MHz sind bei 2 MHz Messungen keine Reflexionen der rechten Schnittkante im Signal zu erkennen. Zusätzlich ist das nach dem Signal einsetzende Rauschen bei 2 MHz größer als bei 1 MHz (siehe: Abbildung 23 und Abbildung 24)

Der Peak-Detect ist aufgrund der genannten Einstellungen darauf ausgelegt das Maximum der Hüllkurve des jeweiligen Signals zu ermitteln. Für dieses Maximum wurden Amplitude und Zeit ausgegeben. Die Rohdaten wurden auf das Maximum der Hüllkurve bei 3 mm Distanz zwischen den Sonden normiert, da es sich hierbei um die geringste Messdistanz handelt. Diese Normierung wurde für jede Messreihe durchgeführt. An der Hüllkurve der normierten Daten wurde wieder ein Peak-Detect durchgeführt, um die Laufzeit und das durch die Normierung entstandene Amplitudenverhältnis zu bestimmen (siehe: Abbildung 25 und Abbildung 26). Bei dem Peak-Detect der normierten Daten wurden dieselben Parameter wie bei den Rohdaten angewandt.



a) Übersprechen der Sendeverstärkung auf den Empfangskanal

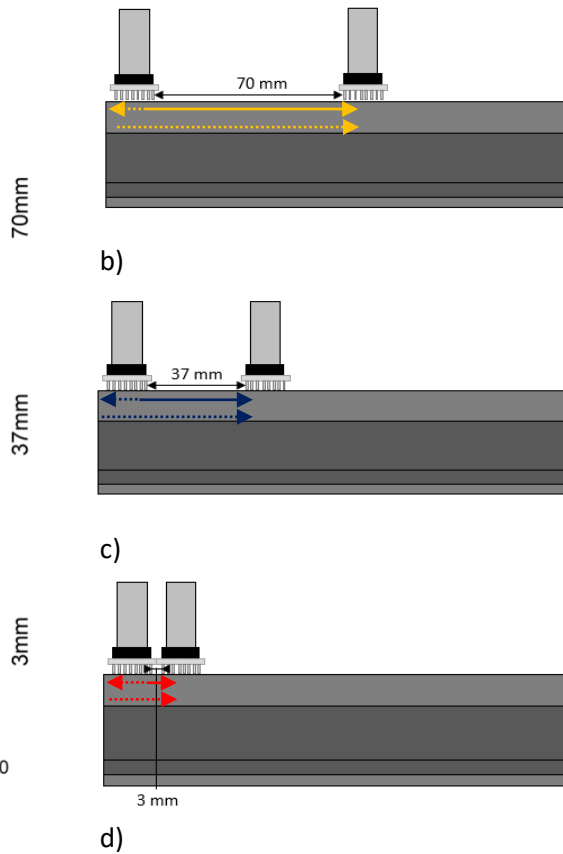
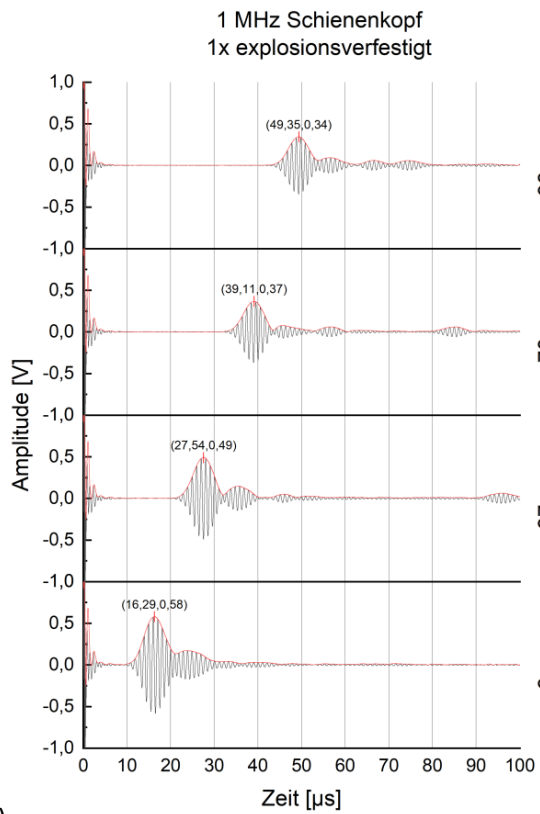


Abbildung 24: Zustandekommen des Ultraschallmesssignals für 2 MHz. Die durchgehenden Linien geben den direkten Weg der Rayleighwelle an, welcher gemessen und ausgewertet wurde.

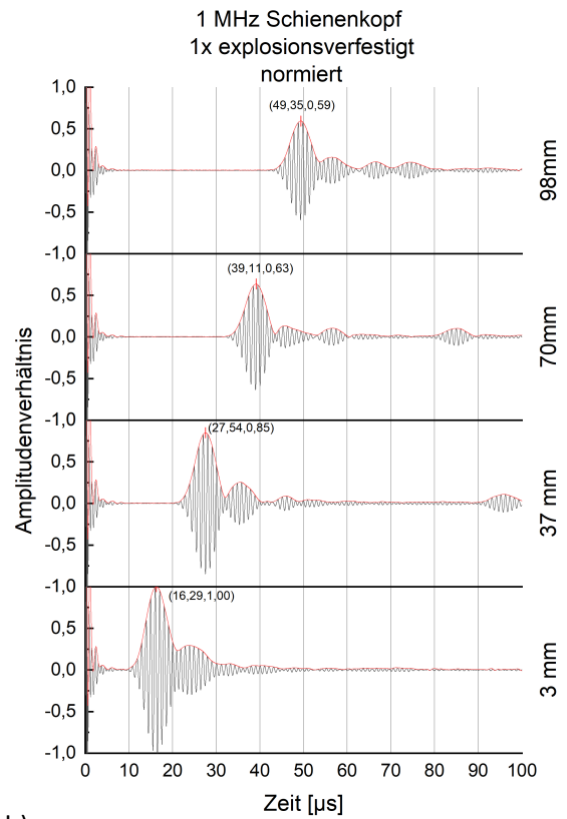
- a) Messsignal der 1x explosionsverfestigten Probe am Schienenkopf. Die Werte über den Maxima geben Zeit und Amplitude an;
- b) Beispielhafter Messaufbau bei 70 mm Distanz;
- c) Beispielhafter Messaufbau bei 37 mm Distanz;
- d) Beispielhafter Messaufbau bei 3 mm Distanz;

Da bei 2 MHz Messungen für die nicht und nur 1x explosionsverfestigten Proben die Amplitude wesentlich schneller abfällt als bei 1 MHz Messungen und bei 98 mm das Maximum nicht mehr zu erkennen war, wurden nur 3 Messdistanzen (3, 37 und 70 mm) für 2 MHz gewählt (siehe: Abbildung 26).

Der Dämpfungskoeffizient wird in der Einheit Neper pro Meter (Np/m) angegeben. Neper ist eine dimensionslose Hilfsmaßeinheit und geht vom natürlichen Logarithmus eines Verhältnisses zweier Werte aus.



a)



b)

Abbildung 25: Messsignale vor und nach der Normierung für 1 MHz Sonden am Schienenkopf der 1x explosionsverfestigten Schienenprobe. Die Werte in Klammern geben Zeit und Amplitude der Maxima an. Durch die Normierung auf das Signal bei 3 mm (geringste Distanz) wurden die Amplituden ins Verhältnis zum Maximum bei 3 mm gesetzt; a) Rohsignal; b) normiertes Signal.

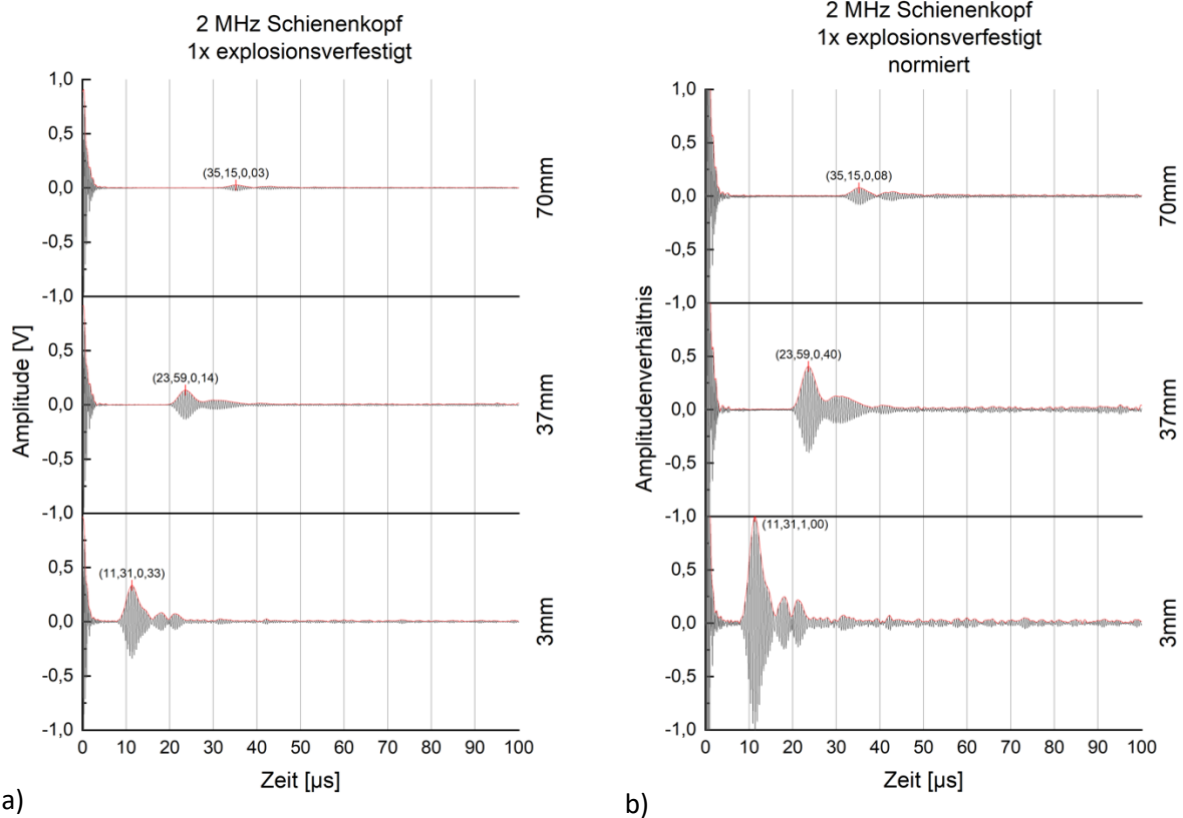
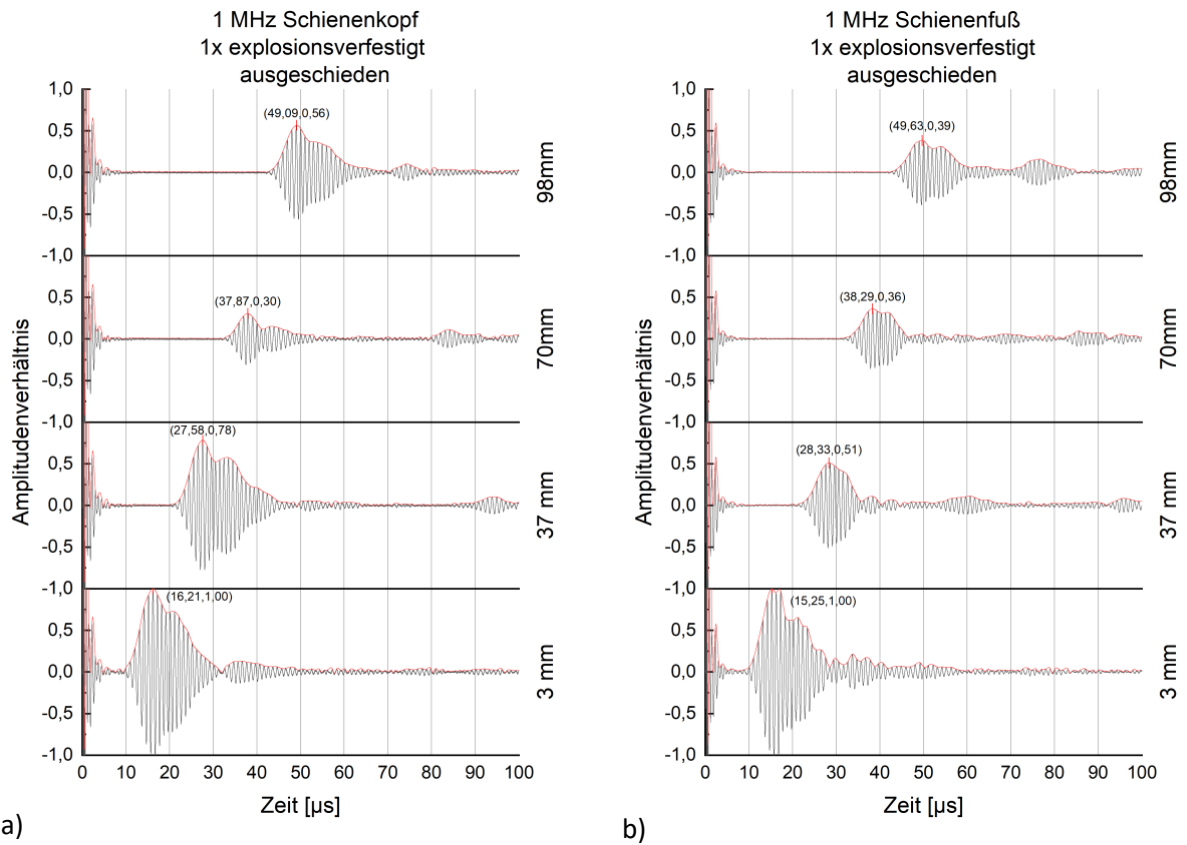


Abbildung 26: Messsignale vor und nach der Normierung für 2 MHz Sonden am Schienenkopf der 1x explosionsverfestigten Schienenprobe. Die Werte in Klammern geben Zeit und Amplitude der Maxima an. Durch die Normierung auf das Signal bei 3 mm (geringste Distanz) wurden die Amplituden ins Verhältnis zum Maximum bei 3 mm gesetzt. Bei 2 MHz wurde nur 3 Messungen bis zu einer Distanz von 70 mm durchgeführt; a) Rohsignal; b) normiertes Signal.

5.4.1 Sanity Check

Die Daten wurden einem Sanity Check unterzogen, d.h. einer Plausibilitätsprüfung hinsichtlich der Signalform. Ein erster Hinweis waren physikalisch nicht sinnvolle Ergebnisse, wie zum Beispiel Amplituden, welche wesentlich höher oder niedriger als die anderen Amplituden des Signalverlaufes in der Messserie waren, hier wurden auch in der Signalform Unstimmigkeiten entdeckt und die entsprechenden Signale aus der Messreihe ausgeschieden. Daten, bei denen die Signalform doppelte Peaks oder Peak-Schultern aufwies, wurden entfernt (siehe: Abbildung 27). Die fehlerhaften Messungen sind auf Unsicherheiten beim Messaufbau (z.B. nicht paralleles Ausrichten der Kammzähne von Sender und Empfänger, Kopplungsgel zwischen den Kämmen, ...) und daraus resultierenden ungewünschten Reflexionen und Überlagerungen der gesendeten und empfangenen Wellenpakete zurückzuführen. Diese wurden erst bei der Betrachtung der gesamten Messserie offensichtlich. Für eine Auflistung aller ermittelten Messungenauigkeiten und Vorschläge zur Vermeidung dieser siehe Tabelle 8.



a)

b)

Abbildung 27: Beispielhafte Messsignale die nach dem Sanity-Check für ungültig erklärt wurden.

- Bei 70 mm Distanz folgt die Amplitude nicht dem Verlauf. Sie ist wesentlich kleiner als bei den anderen Messungen. Der zweite Peak nach dem bestimmten Maximum trifft später ein als bei den anderen Messungen der Messreihe. Die 70 mm Werte wurden daher aus der Auswertung entfernt.
- Im Signal bei 3 mm sind zwei Peaks vorhanden, welche beide als Maximum angenommen werden konnten. Zusätzlich unterscheidet sich die jeweilige Signalform bei den Messungen. Einzig bei 70 und 98 mm sind die Signalformen durch die beiden aufeinanderfolgenden Peaks ähnlich. Da aufgrund der zwei Peaks bei 3 mm keine Normierung möglich war wurde die gesamte Messreihe für ungültig erklärt.

5.5 Ergebnisse Rayleighwellen

5.5.1 Messungen mit 1 MHz

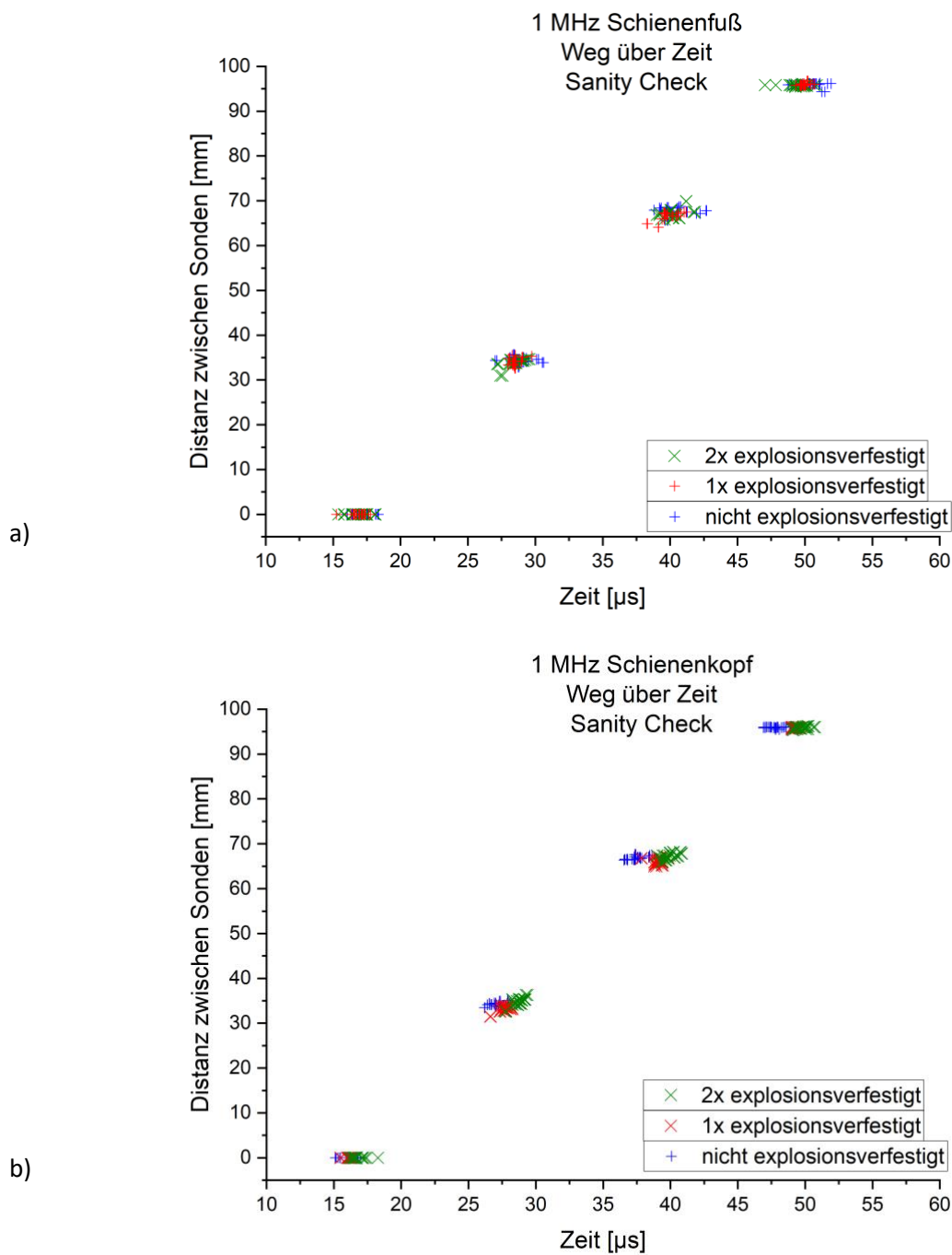


Abbildung 28: Weg über Zeit Diagramme der Maxima der Messsignale für 1 MHz Messungen nach dem durchgeführten Sanity Check a) am Schienenfuß und b) am Schienenkopf

In Abbildung 28 sind die gemessenen Distanzen zwischen den Sonden über die Laufzeit aufgetragen. Durch den Sanity Check wurden für die 1 MHz Messungen insgesamt 16 % der Messungen aus der Auswertung entfernt.

Ein auffälliger Unterschied zwischen den Laufzeitmessungen bei 1 MHz an Schienenkopf und –fuß ist, dass die Maxima am Schienenkopf der nicht explosionsverfestigten Probe (siehe: Abbildung 28, blaue Messpunkte) früher eintreffen als bei den explosionsverfestigten Proben (siehe: Abbildung 28, rote und grüne Messpunkte).

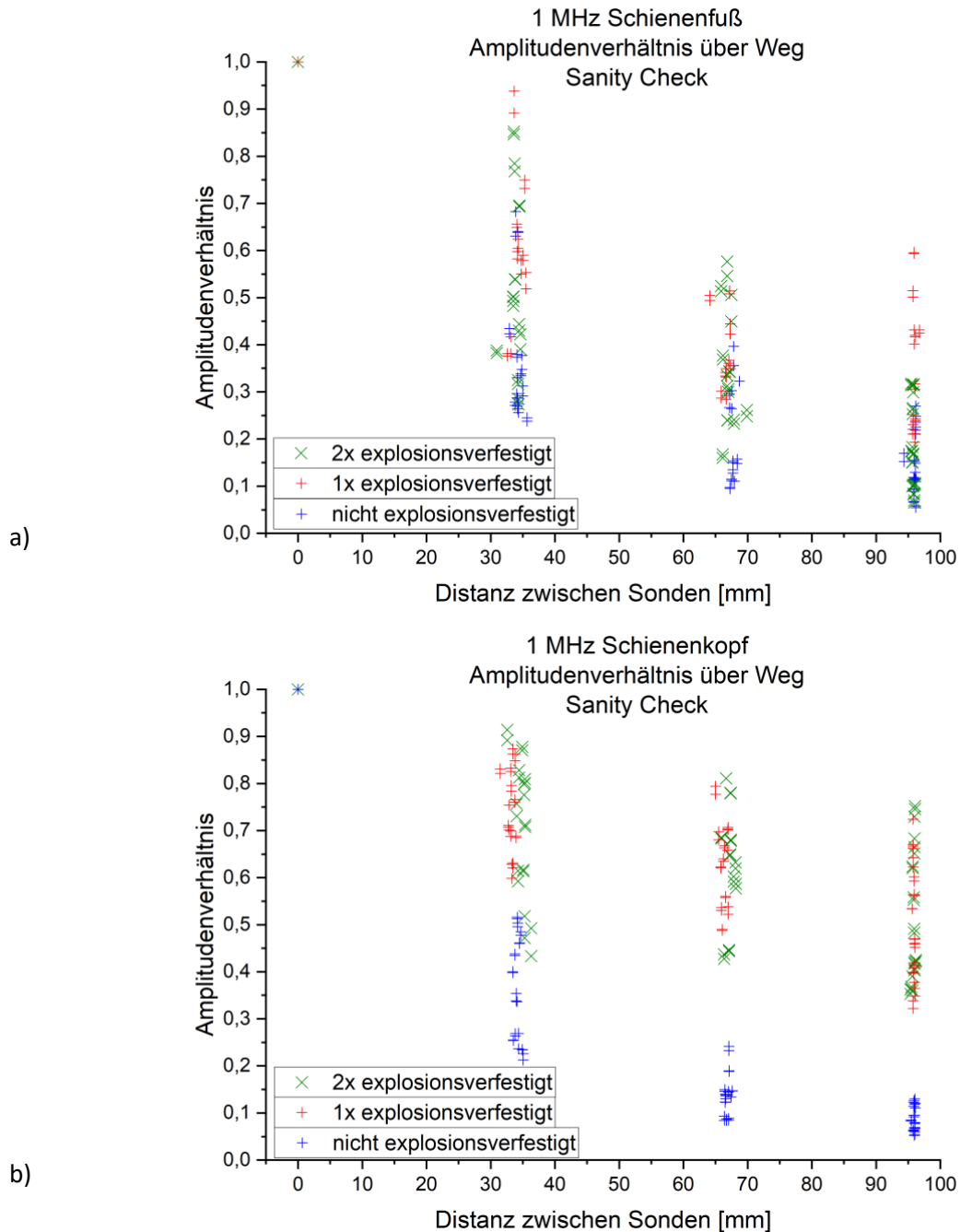


Abbildung 29: Normiertes Amplitudenverhältnis über Weg für 1 MHz Messungen a) am Schienenfuß und b) am Schienenkopf mit durchgeführten Sanity Check.

Aus Abbildung 29 geht hervor, dass die Amplitude der Maxima für 1 MHz der nicht explosionsverfestigten Probe sowohl am Schienenkopf als auch am –fuß mit zunehmender Distanz mehr abnimmt als bei den explosionsverfestigten Proben. Ebenso ist zu erkennen, dass die Streuung der Werte der gemessenen Amplitudenverhältnisse sehr hoch ist. Das Amplitudenverhältnis schwankt für eine gewählte Messdistanz um einen Faktor bis zu 0,5. Dies ist die Hälfte des möglichen Amplitudenverhältnisses.

5.5.2 Messungen mit 2 MHz

Die Auswertung bei 2 MHz am Schienenfuß war für Messungen bei 70 mm Distanz zwischen den Sonden kaum möglich. Bei dieser Distanz konnten wegen des schlechten Signal-Rausch-Verhältnisses nur vier Maxima (4,8 % der Messungen) am Schienenfuß gültig ausgewertet werden (siehe: Abbildung 30a und Abbildung 31a). Die Auswertung am Schienenfuß ist für 2 MHz somit praktisch nicht möglich. Insgesamt wurden bei den 2 MHz Messungen 33 % der Messdaten durch den Sanity Check aussortiert.

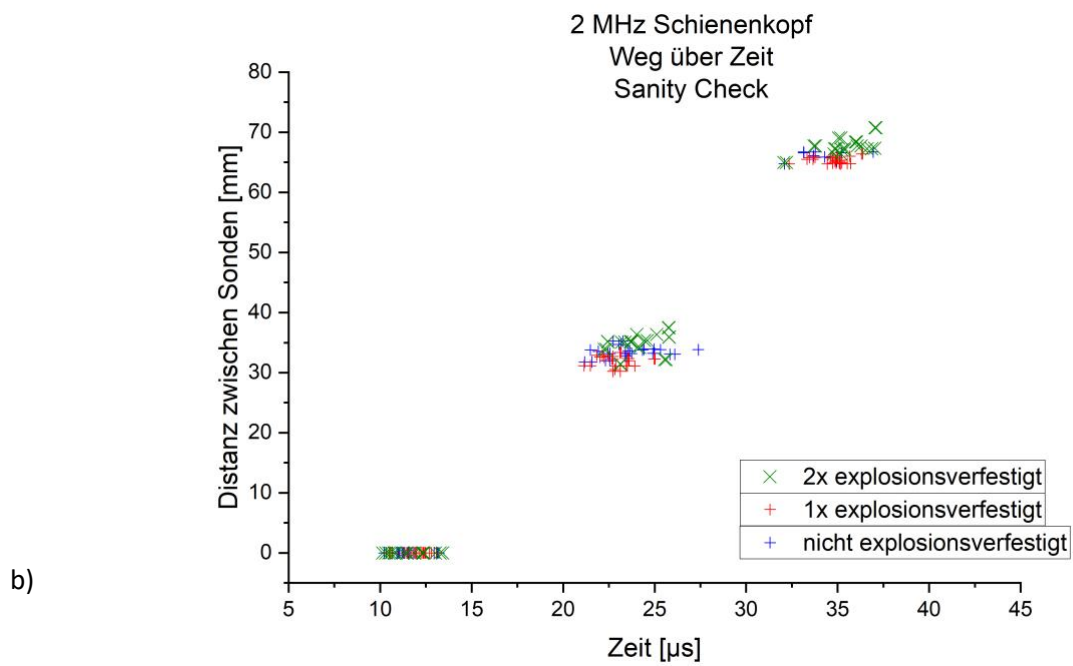
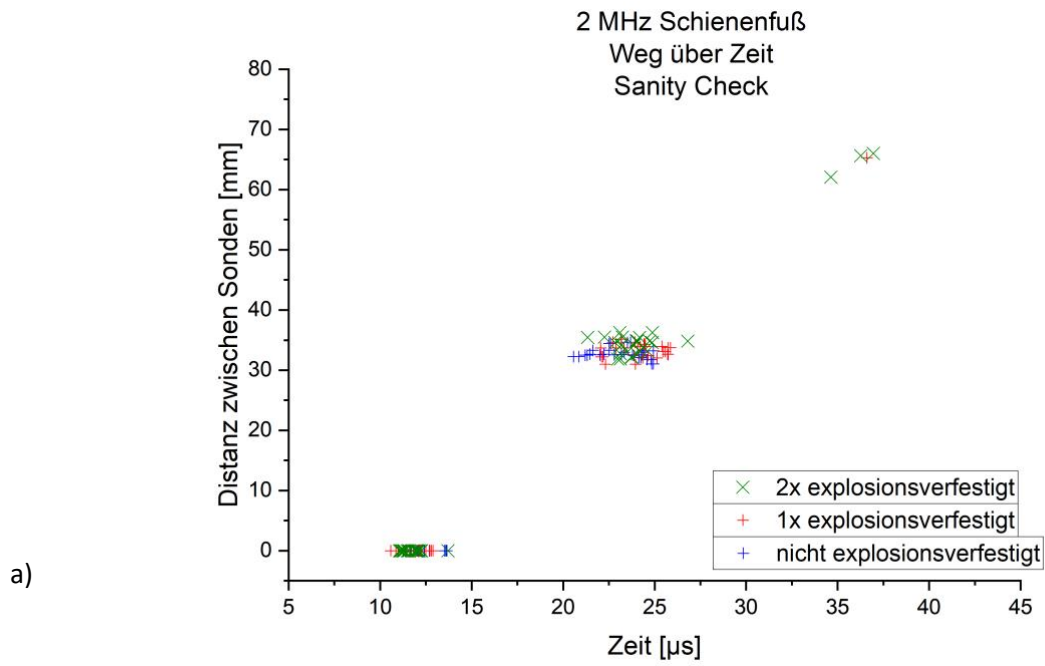


Abbildung 30: Weg über Zeit Diagramme der Maxima der Messsignale für 2 MHz Messungen a) am Schienenfuß und b) am Schienenkopf mit durchgeführten Sanity Check.

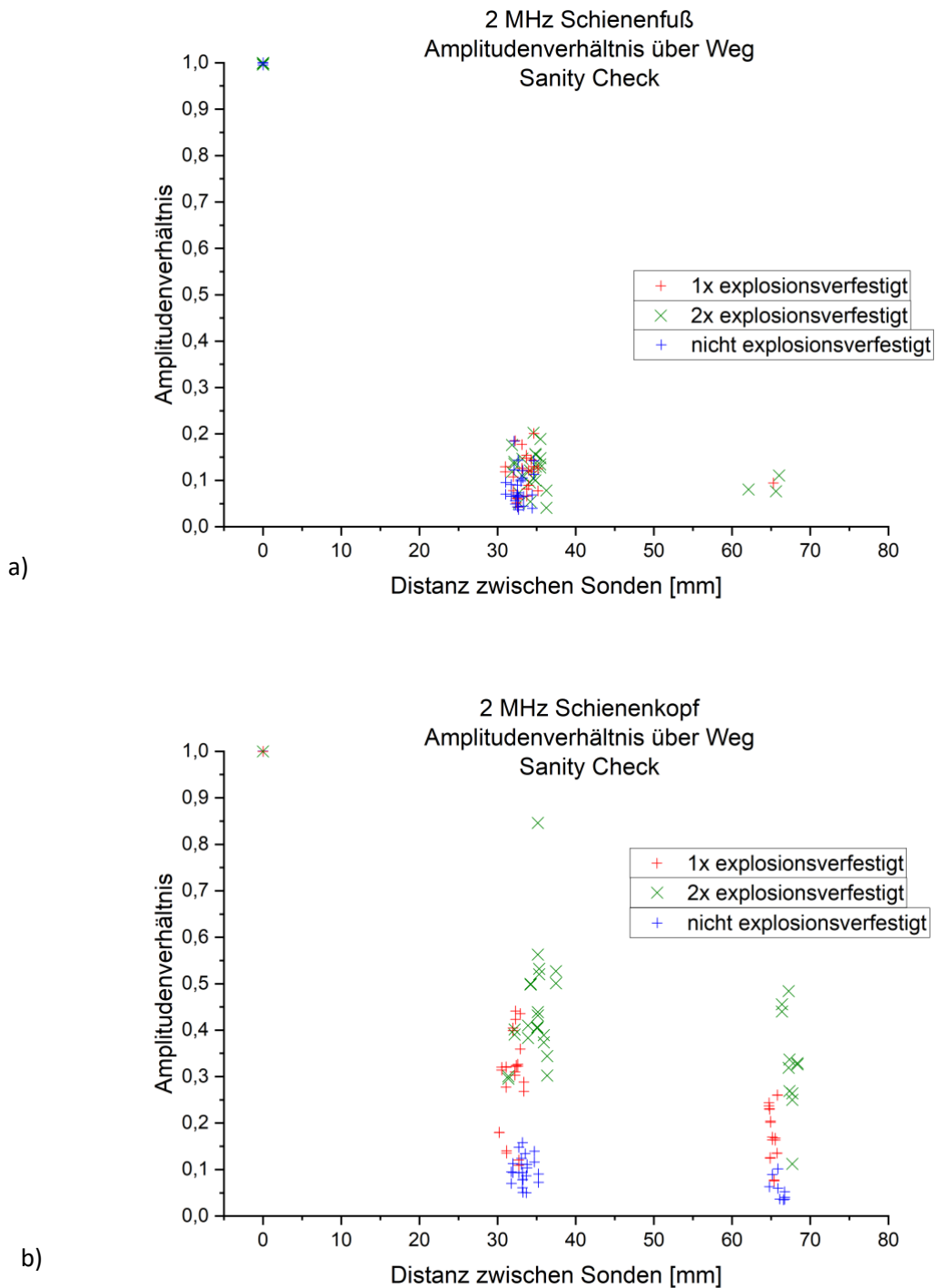


Abbildung 31: Normiertes Amplitudenverhältnis über Weg für 2 MHz Messungen a) am Schienenfuß und b) am Schienenkopf mit durchgeführten Sanity Check.

5.5.3 Vergleich der Messungen

Aus dem Vergleich zwischen Abbildung 29a und Abbildung 31a geht hervor, dass das Amplitudenverhältnis bei 2 MHz Messungen am Schienenfuß für alle Proben bei 37 mm schon auf 0,05 – 0,2 gesunken ist. Im Gegensatz zu den 1 MHz Messungen. Bei diesen liegt das minimalste bestimmte Amplitudenverhältnis nach 98 mm Distanz bei der nicht

explosionsverfestigten Probe bei einem Amplitudenverhältnis von 0,05. Die Dämpfung bei 2 MHz ist am Schienenfuß somit im Vergleich zu den 1 MHz-Messungen erkennbar höher. Am Schienenkopf ist in Abbildung 31b zu sehen, dass das Amplitudenverhältnis für die nicht explosionsverfestigte Probe bei 2 MHz am stärksten abnimmt und für die 2x explosionsverfestigte am geringsten.

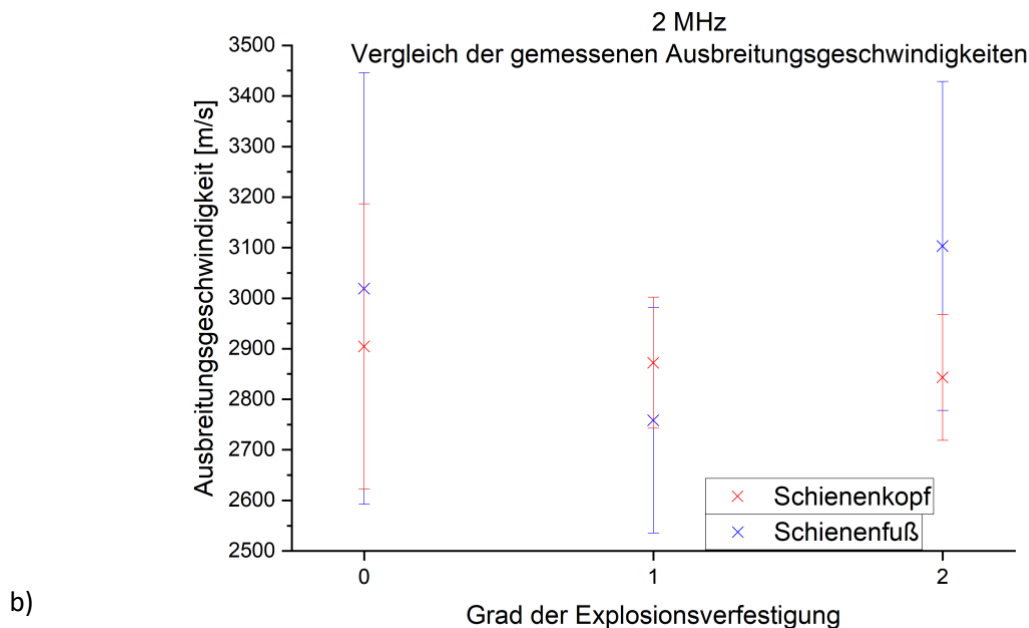
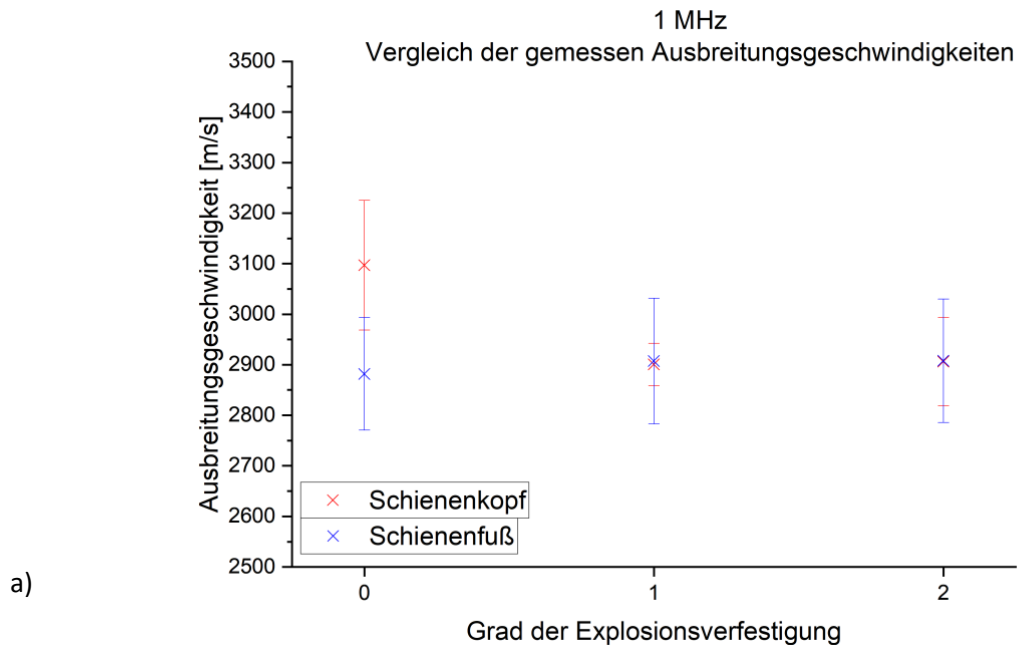


Abbildung 32: Vergleich der gemessenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten mit Standardabweichung für 1 und 2 MHz Messungen an a) Schienenkopf und b) Schienenfuß

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit am Schienenkopf für 1 MHz Messungen bei der nicht explosionsverfestigten Probe (3096 ± 128 m/s) ist etwas höher als bei den explosionsverfestigten. 1x (2900 ± 42 m/s) oder 2x explosionsverfestigt (2906 ± 87 m/s) hat keinen signifikanten Unterschied auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit (siehe: Abbildung 32a). Am Schienenfuß zeigt sich bei 1 MHz Messungen kein wesentlicher

Einfluss durch die Explosionsverfestigung auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die gemessene Ausbreitungsgeschwindigkeit bei 1 MHz Messungen am Schienenfuß beträgt 2882 ± 111 m/s bei der nicht explosionsverfestigten Probe, 2907 ± 124 m/s bei der 1x explosionsverfestigten Probe und 2908 ± 122 m/s bei der 2x explosionsverfestigten Probe (siehe: Abbildung 32a).

Am Schienenfuß wurde bei den 2 MHz Messungen keine einheitliche Ausbreitungsgeschwindigkeit gemessen. Die gemessene Ausbreitungsgeschwindigkeit schwankt zwischen 3019 ± 427 m/s (nicht explosionsverfestigt), 2759 ± 224 m/s (1x explosionsverfestigt) und 3103 ± 325 m/s (2x explosionsverfestigt) (siehe: Abbildung 32 a).

Am Schienenkopf zeigt sich bei 2 MHz Messungen eine leichte Abnahme der Ausbreitungsgeschwindigkeit mit zunehmender Explosionsverfestigung. Die Werte nach Probenkörpern nehmen von 2904 ± 282 m/s (nicht explosionsverfestigt) auf 2872 ± 130 m/s (1x Explosionsverfestigt) bis 2843 ± 125 m/s (2x explosionsverfestigt) ab (siehe: Abbildung 32 b).

Die Standardabweichungen der Ausbreitungsgeschwindigkeit sind bei den 2 MHz Messungen am Schienenkopf der explosionsverfestigten ähnlich den Standardabweichungen der Messungen bei 1 MHz am Schienenkopf. Ansonsten sind die Standardabweichungen der gemessenen Ausbreitungsgeschwindigkeit der 2 MHz Messungen wesentlich höher als bei 1 MHz Messungen.

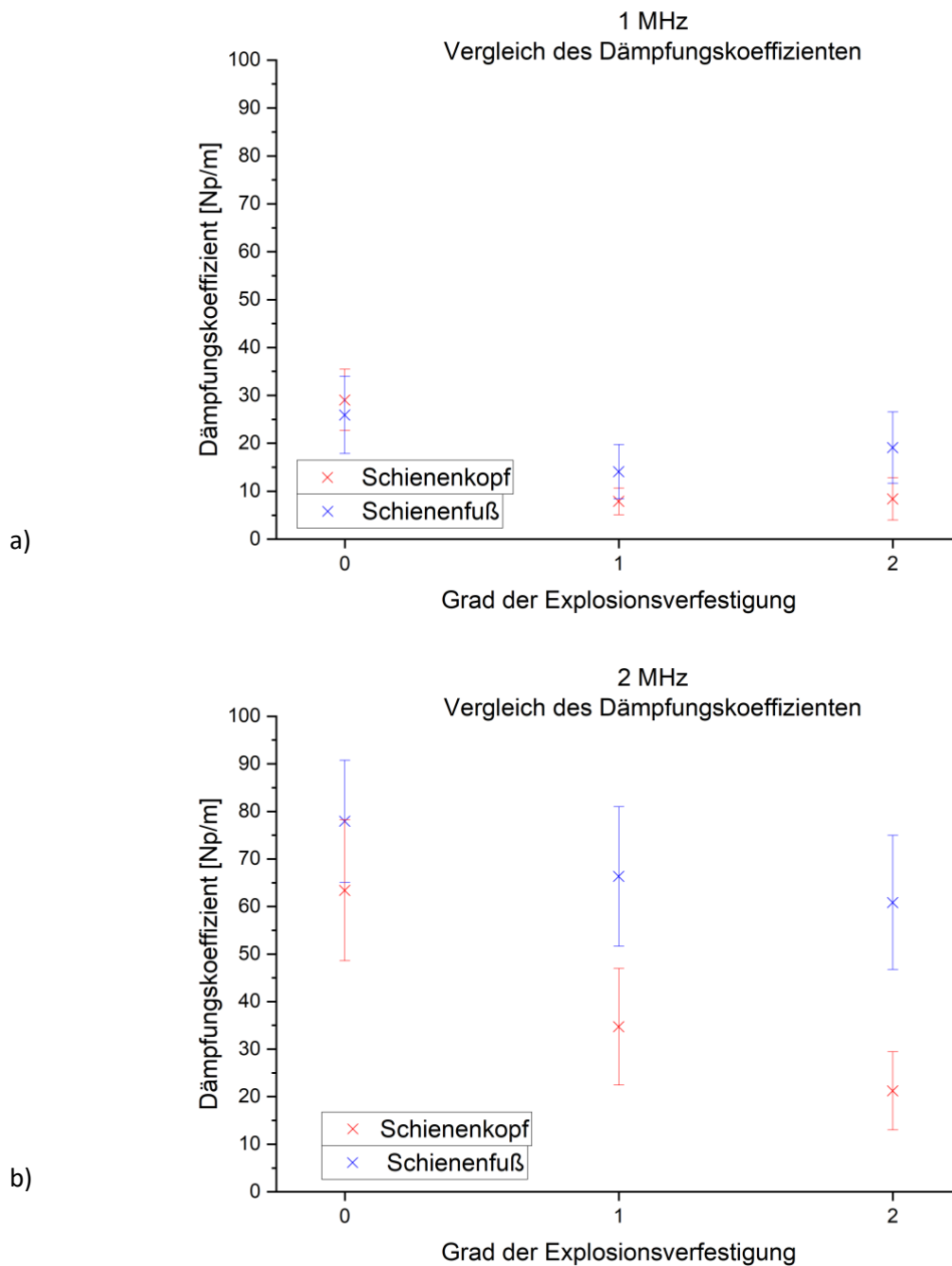


Abbildung 33: Vergleich der gemessenen Dämpfungskoeffizienten mit Standardabweichung für 1 und 2 MHz Messungen an a) Schienenkopf und b) Schienenfuß

Am Schienenkopf nimmt die Dämpfung durch die Explosionsverfestigung bei den 1 und 2 MHz Messungen signifikant ab. Die Dämpfung bei 2 MHz ist wesentlich höher als bei 1 MHz (siehe: Abbildung 33).

Bei der nicht explosionsverfestigten Probe am Schienenkopf beträgt der Dämpfungskoeffizient bei 1 MHz 29 ± 6 Np/m. Dieser sinkt auf $7,8 \pm 2,8$ Np/m bei der 1x

explosionsverfestigten Probe und beträgt $8,4 \pm 4,4$ Np/m bei der 2x explosionsverfestigten Probe. Bei 1 MHz gibt es somit keinen signifikanten Effekt auf die Dämpfung am Schienenkopf, wenn 1x oder 2x explosionsverfestigt wurde.

Auch am Schienenfuß nimmt die Dämpfung bei 1 MHz durch die Explosionsverfestigung ab, jedoch nicht so stark wie am Schienenkopf. Der Dämpfungskoeffizient liegt bei 26 ± 8 Np/m bei der nicht explosionsverfestigten Probe und sinkt auf 14 ± 6 Np/m bei der 1x explosionsverfestigten Probe und 19 ± 7 Np/m bei der 2x explosionsverfestigten Probe.

Bei den 2 MHz Messungen zeigt sich ebenfalls eine Abnahme des Dämpfungskoeffizienten durch die Explosionsverfestigung. Die Abnahme ist am Schienenkopf stärker. Der Koeffizient der nicht explosionsverfestigten Probe liegt bei 2 MHz am Schienenkopf bei 63 ± 15 Np/m und sinkt auf 35 ± 12 Np/m (1x explosionsverfestigt) und auf 21 ± 8 Np/m (2x explosionsverfestigt). Der Dämpfungskoeffizient nimmt bei 2 MHz und 2x explosionsverfestigt also stärker ab als bei 1x explosionsverfestigt (siehe: Abbildung 33).

Am Schienenfuß beträgt der Dämpfungskoeffizient der nicht explosionsverfestigten Probe 78 ± 13 Np/m, bei 1x explosionsverfestigt 66 ± 15 Np/m und bei 2x explosionsverfestigt 61 ± 14 Np/m. Somit nimmt die Dämpfung am Schienenfuß bei 2 MHz durch die Explosionsverfestigung ab. Der Unterschied zwischen 1x oder 2x explosionsverfestigt ist jedoch nicht signifikant.

5.6 Versuchsaufbau – Metallographie

Härteverlaufsprüfung und Lichtmikroskopie

Die geschnittenen Probenkörper (Schienenkopf und Schienenfuß aus Abbildung 19) wurden mit der Flächenschleifmaschine Delta LC400 planparallel geschliffen. Im Anschluss wurden die Proben auf der Maschine LaboPol-60 geschliffen. Die Körnungen der einzelnen Schritte waren: 80, 120, 220, 500 und 1200. Die Proben wurden mit $3 \mu\text{m}$ und $1 \mu\text{m}$ Körnung mit der Maschine TegraPol-31 poliert. Nach dem Polieren wurden die Proben mit 2%iger-Nitallösung 15-20 Sekunden geätzt.

Die Härteverlaufsmessung HV1 nach EN ISO 6507-1 (Vickers) wurde mit dem Gerät Qness Q10 A+ durchgeführt. Die Härteverlaufsprüfung am Schienenkopf wurde über eine Verlaufslänge von insgesamt 50 mm durchgeführt. Innerhalb der ersten 10 mm von der oberen Schnittkante des Schienenkopfes beträgt der Abstand zwischen den

Härteeindrücken ca. 1 mm. Nach den ersten 10 mm beträgt die Distanz zwischen den Härteeindrücken ca. 2 mm. Am Schienenfuß wurde von der unteren Schnittkante die Härte mit 1 mm Abstand bis zur oberen Kante des Schienenfußes gemessen (siehe: Abbildung 20).

Die Lichtmikroskop-Aufnahmen wurden mit dem Gerät Olympus BX51M durchgeführt. Die MIA-Aufnahmen wurden in der Olympus Stream Software zusammengesetzt. Eine MIA-Aufnahme setzt sich aus neun Bildern mit jeweils 25-facher Vergrößerung zusammen. Zusätzlich wurde eine Aufnahme mit 50-facher Vergrößerung im Schnittkantenbereich des MIAs mit dem Lichtmikroskop aufgenommen.

Die Daten aus der Härteverlaufsmessung wurden in Origin importiert und graphisch dargestellt.

Die MIA-Aufnahmen wurden in IrfanView importiert und vier Linien mit zunehmendem Abstand von ca. 1 mm zur Schnittkante eingezeichnet. Die Anzahl der von der Linie geschnittenen Körner wurde gezählt. Die Linienlänge und Maßstablänge wurde in Pixel mit dem Measure-tool gemessen. Aus dem Verhältnis von Linienlänge zu Maßstab kann bei bekannter wahrer Maßstablänge die wahre Länge der Linie ermittelt werden. Die Korngröße wurde nun aus der wahren Linienlänge durch die Anzahl der geschnittenen Körner ermittelt.

5.7 Auswertung – Metallographie

5.7.1 Metallographie – Härtemessung

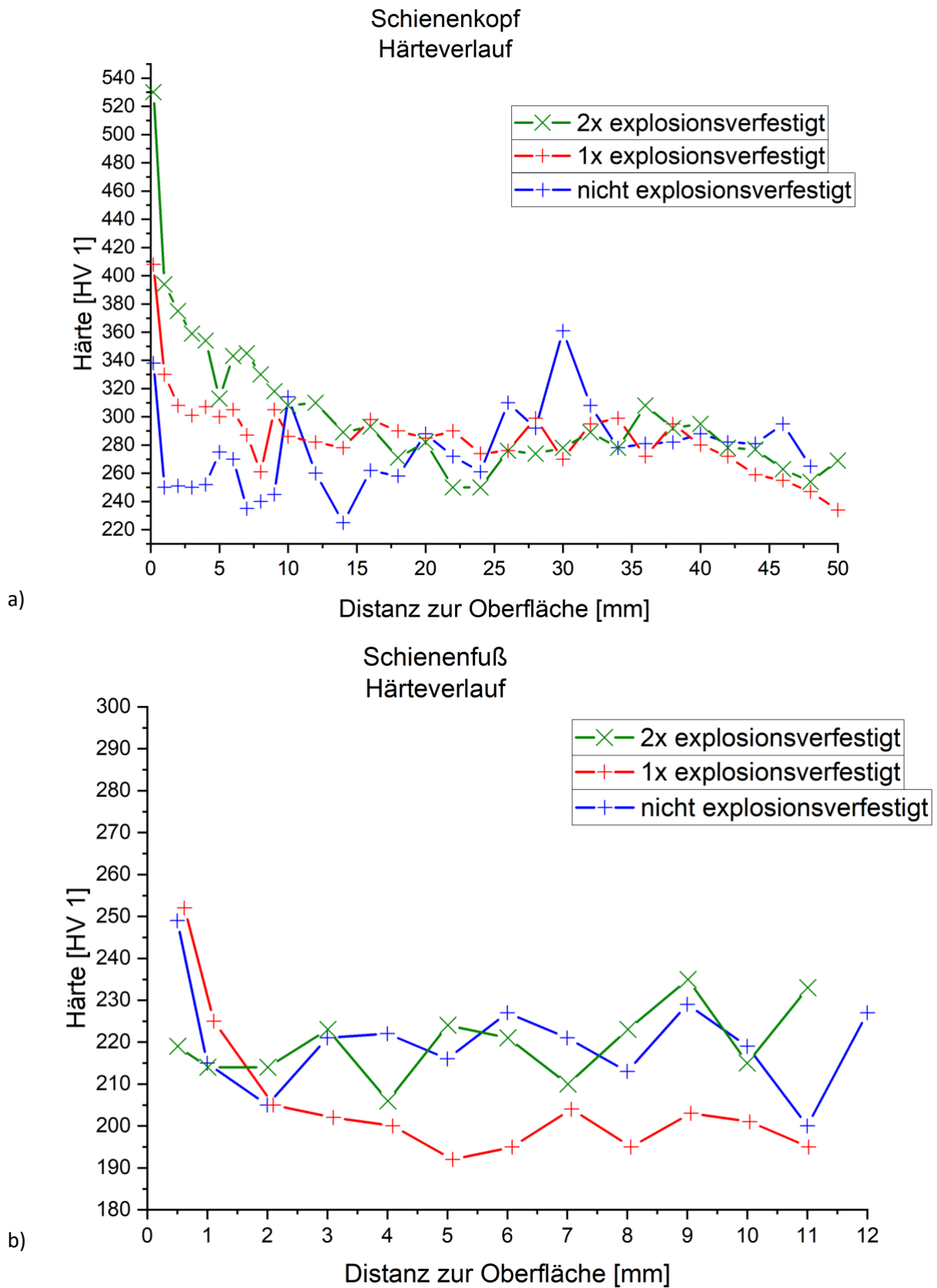


Abbildung 34: Härteverlauf für die nicht, 1x und 2x explosionsverfestigte Probe an a) Schienenkopf) und b) Schienenfuß

Aus Abbildung 34 geht hervor, dass die Härte am Schienenkopf innerhalb der ersten 10 mm durch die Explosionsverfestigung gesteigert wurde. 2x explosionsverfestigt führt dabei in 1 mm Distanz von der Oberfläche zu einer höheren Härte (530 HV) als 1x explosionsverfestigt (408 HV). Ab 10 mm Distanz zur Oberfläche weisen alle Proben eine einheitliche Härte von ca. 280 HV auf. Die nicht explosionsverfestigte Probe weist am Schienenkopf innerhalb von 1 mm Abstand zur Oberfläche eine erhöhte Härte (338 HV) im Vergleich zum Grundmaterial auf.

Der Härteverlauf der nicht explosionsverfestigten Probe weist eine stärkere Streuung der Messwerte als die explosionsverfestigten Proben auf. Anhand der vorhandenen Schliffbilder konnten keine Ursachen für diese Streuung ausgemacht werden. Der Grund für den Ausreißer der nicht explosionsverfestigten Probe am Schienenkopf bei 30 mm konnte nicht gefunden werden. Das Gefüge des Hadfield-Stahls zeigt lokale Inhomogenitäten wie Ausscheidungen (siehe: 5.7.2 Metallographie – Lichtmikroskop - Schienenkopf und 5.7.3 Metallographie - Lichtmikroskop - Schienenfuß) und vermutlich ist der Ausreißer auf die höhere Härte einer Ausscheidung zurück zu führen.

Am Schienenfuß weisen die nicht und 2x explosionsverfestigten Proben ab ca. 3 mm eine höhere Härte auf (ca. 220 HV) als die 1x explosionsverfestigte Probe (ca. 200 HV). Die Härte der 1x und nicht explosionsverfestigten Probe ist im Abstand von 1 mm von der Oberfläche höher (ca. 250 HV) als bei 2x explosionsverfestigt (220 HV).

Allgemein ist das Grundgefüge (Gefüge, welches von der Oberfläche entfernt ist) am Schienenkopf bei allen Probenkörpern annähernd gleich hart (ca. 280 HV).

Am Schienenfuß ist das Grundgefüge bei allen Proben nicht so hart wie am Schienenkopf und die 1x explosionsverfestigte Probe ist weicher als die nicht und 2x explosionsverfestigte Probe.

Die nicht explosionsverfestigte Probe weist am Schienenfuß beim ersten Härtemesspunkt eine höhere Härte als beim Grundgefüge auf. Aus den folgenden Gefügebildern vom Schienenfuß (siehe: Abbildung 39b und Abbildung 40b) geht hervor, dass innerhalb der ersten 1 mm Abstand von der Oberfläche Kaltverfestigung auftritt. Diese ist vermutlich auf das Bandsägen zurückzuführen. Der Effekt der Kaltverfestigung durch das Bandsägen verstärkt vermutlich auch die Härte am Schienenkopf zusätzlich zur Verfestigung durch die Explosionsverfestigung.

5.7.2 Metallographie – Lichtmikroskop - Schienenkopf

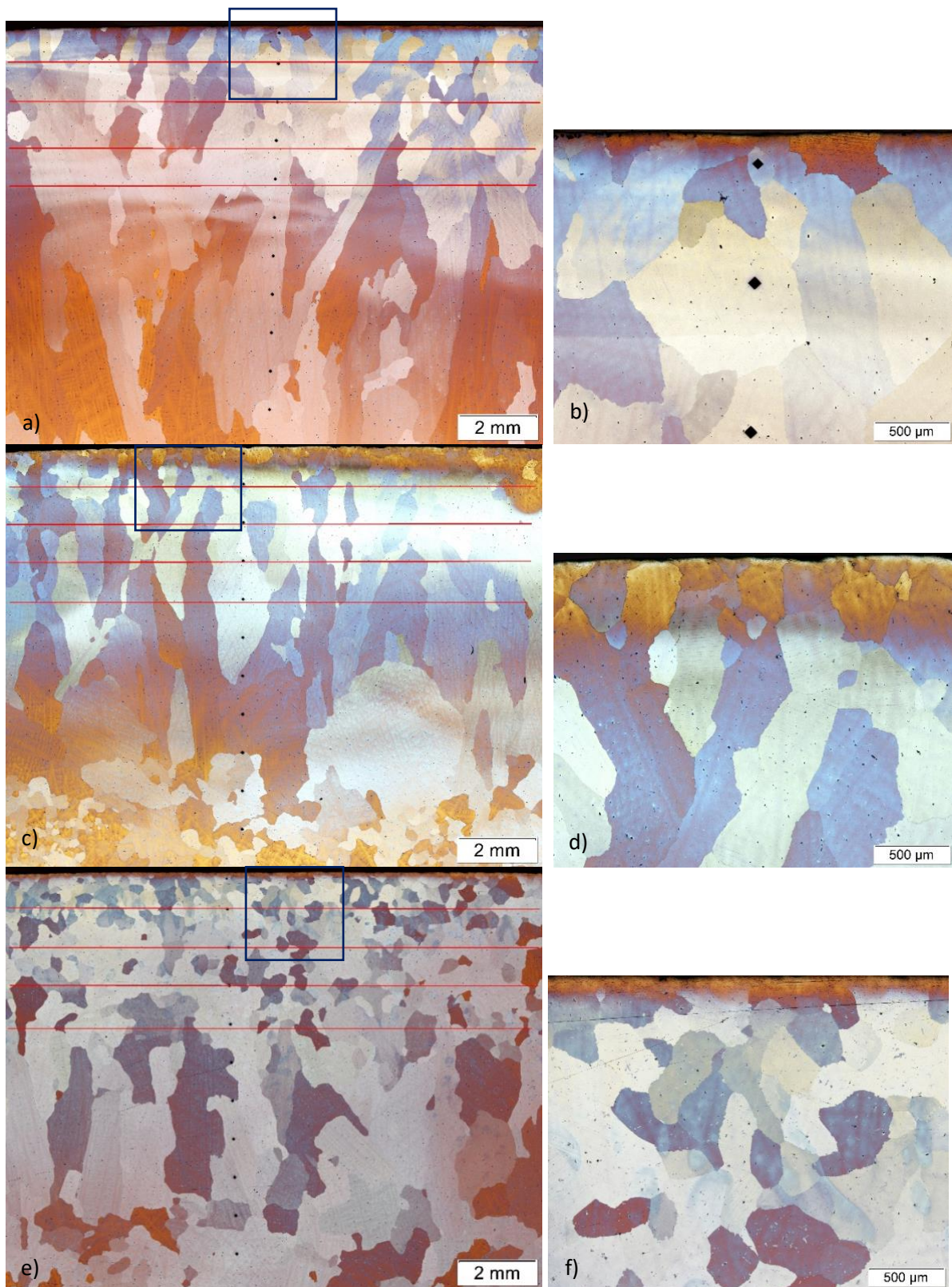


Abbildung 35: MIA-Aufnahmen und für die Korngrößenbestimmung angelegte Linien an der Position Schienenkopf mitte für: a) nicht explosionsverfestigte; c) 1x explosionsverfestigt und e) 2x explosionsverfestigte Probe. Die eingerahmte Position gibt die Position für nebenstehenden Aufnahmen mit 50-facher Vergrößerung an b) nicht explosionsverfestigte; d) 1x explosionsverfestigte und f) 2x explosionsverfestigte Probe.

In der Abbildung 35 sind die MIA-Aufnahmen für die Position Schienenkopf mitte zu sehen. Die Positionen für die Schliffbilder sind in Abbildung 20 ersichtlich. Rein visuell fällt auf, dass die Körner mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche größer werden und Dendriten in den groben Körnern zu sehen sind. Die groben Körner weisen eine Orientierung von außen nach innen auf. Bei den schwarzen quadratischen Punkten handelt es sich um die Vickers Härteeindrücke. Die angelegten Linien wurden so gewählt, dass sie sich mit einem zunehmenden Abstand von ca. 1 mm von der Oberfläche entfernen (siehe: Abbildung 35, Abbildung 37 und Abbildung 38) .

Die Linien wurden von oben nach unten nummeriert.

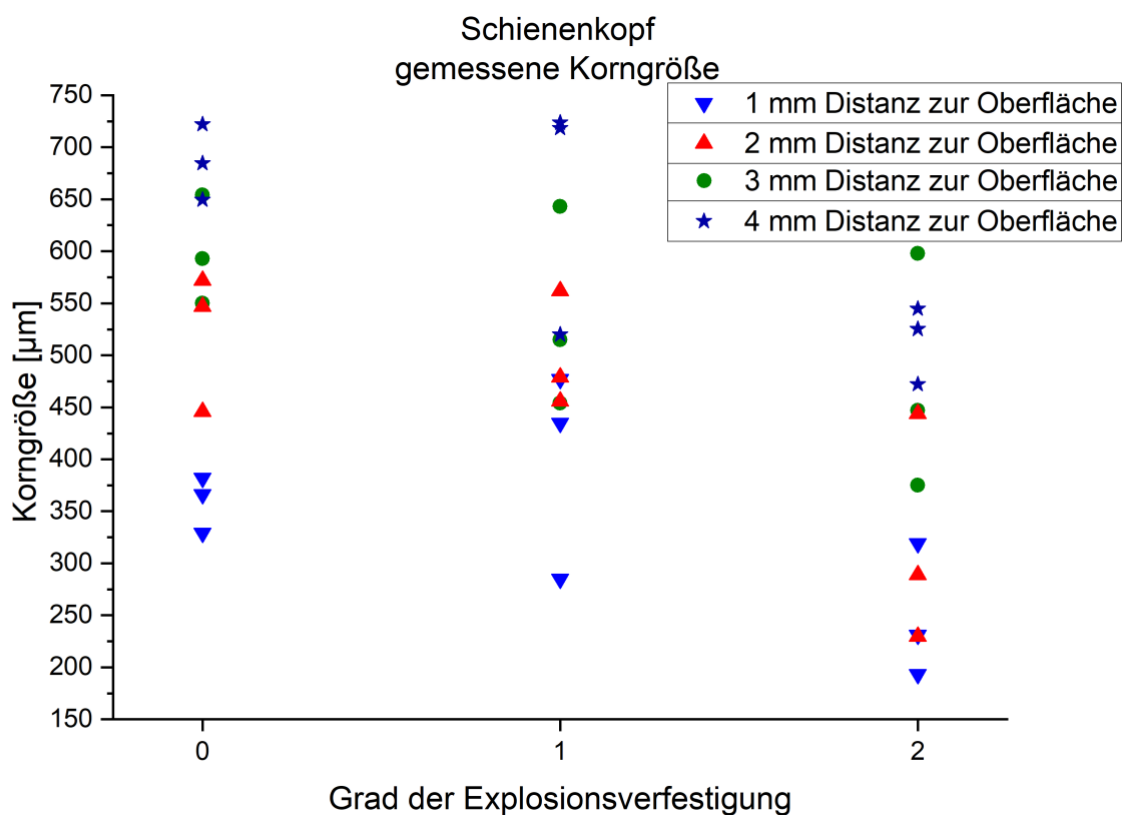


Abbildung 36: Bestimmte Korngröße als Ergebnis des Linienschnittverfahrens am Schienenkopf für die Positionen Schienenkopf mitte, Schienenkopf links, Schienenkopf rechts.

Aus Abbildung 36 ist ersichtlich, dass die Korngröße am Schienenkopf mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche für alle Proben zunimmt. Die Korngröße der 2x explosionsverfestigten Probe ist geringer (186 – 598 µm) als die der beiden anderen Proben (285 – 724 µm). Zwischen der nicht und 1x explosionsverfestigten Probe gibt es keinen wesentlichen Unterschied in der Korngröße am Schienenkopf. Ab ca. 3 mm Abstand von der Oberfläche weisen die Körner am Schienenkopf bei allen Proben eine längliche Form auf. In diesen groben Körnern sind dendritische Strukturen zu erkennen.

Vor allem am Schienenkopf mitte ist bei der 1x und 2x explosionsverfestigten Probe (Abbildung 35 d und f) die Kaltverfestigung, welche durch die Explosionsverfestigung auftritt, durch die feinen schwarzen Linien bis in 3 mm Tiefe zu sehen.

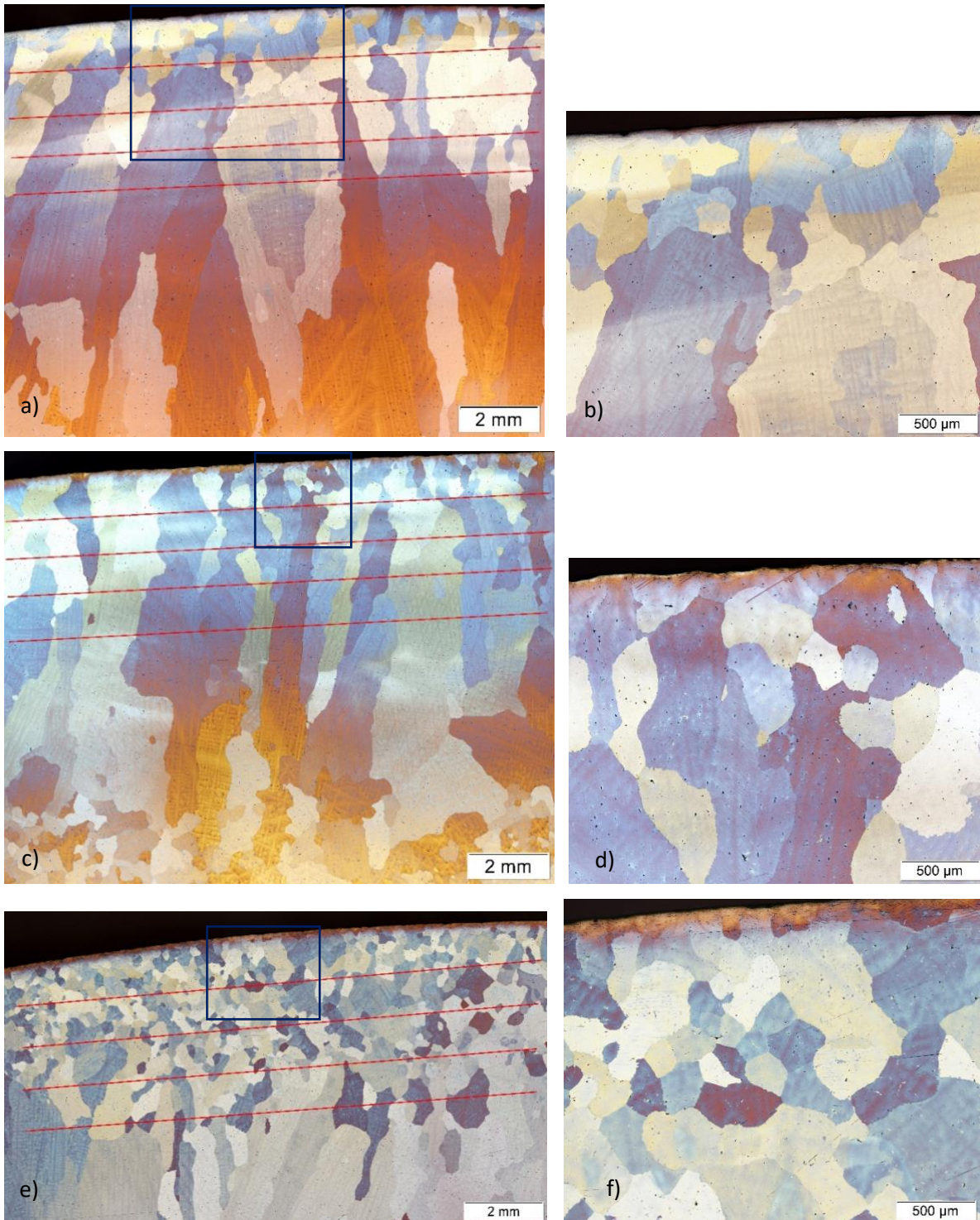


Abbildung 37: MIA-Aufnahmen und für die Korngrößenbestimmung angelegte Linien an der Position Schienenkopf links für: a) nicht explosionsverfestigte; c) 1x explosionsverfestigt und e) 2x explosionsverfestigte Probe. Die eingerahmte Position gibt die Position für Aufnahmen mit 50-facher Vergrößerung an b) nicht explosionsverfestigte; d) 1x explosionsverfestigte und f) 2x explosionsverfestigte Probe

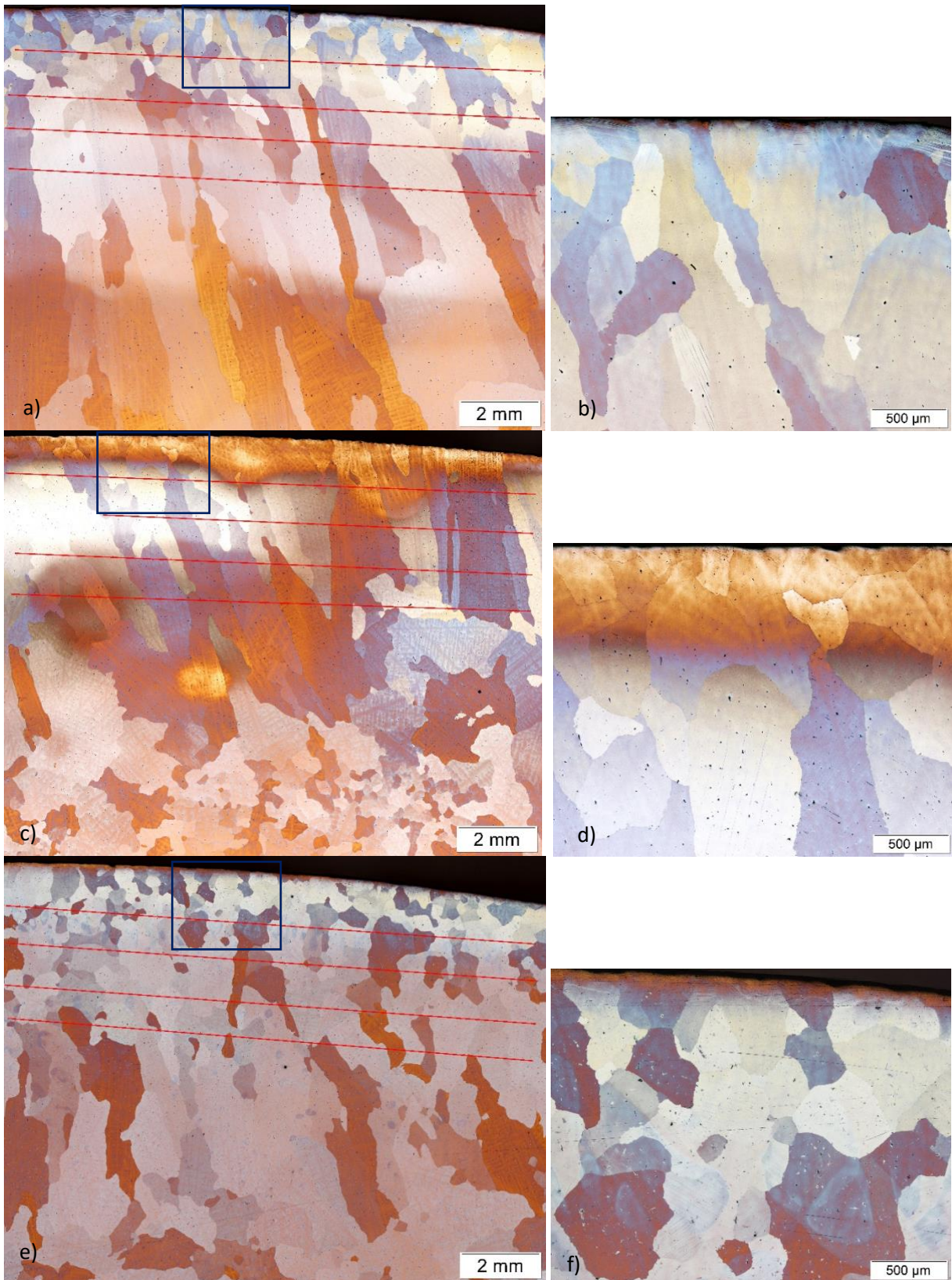


Abbildung 38: MIA-Aufnahmen und für die Korngrößenbestimmung angelegte Linien an der Position Schienenkopf rechts für: a) nicht explosionsverfestigte; c) 1x explosionsverfestigt und e) 2x explosionsverfestigte Probe. Die eingerahmte Position gibt die Position für Aufnahmen mit 50-facher Vergrößerung an b) nicht explosionsverfestigte; d) 1x explosionsverfestigte und f) 2x explosionsverfestigte Probe

5.7.3 Metallographie - Lichtmikroskop - Schienenfuß

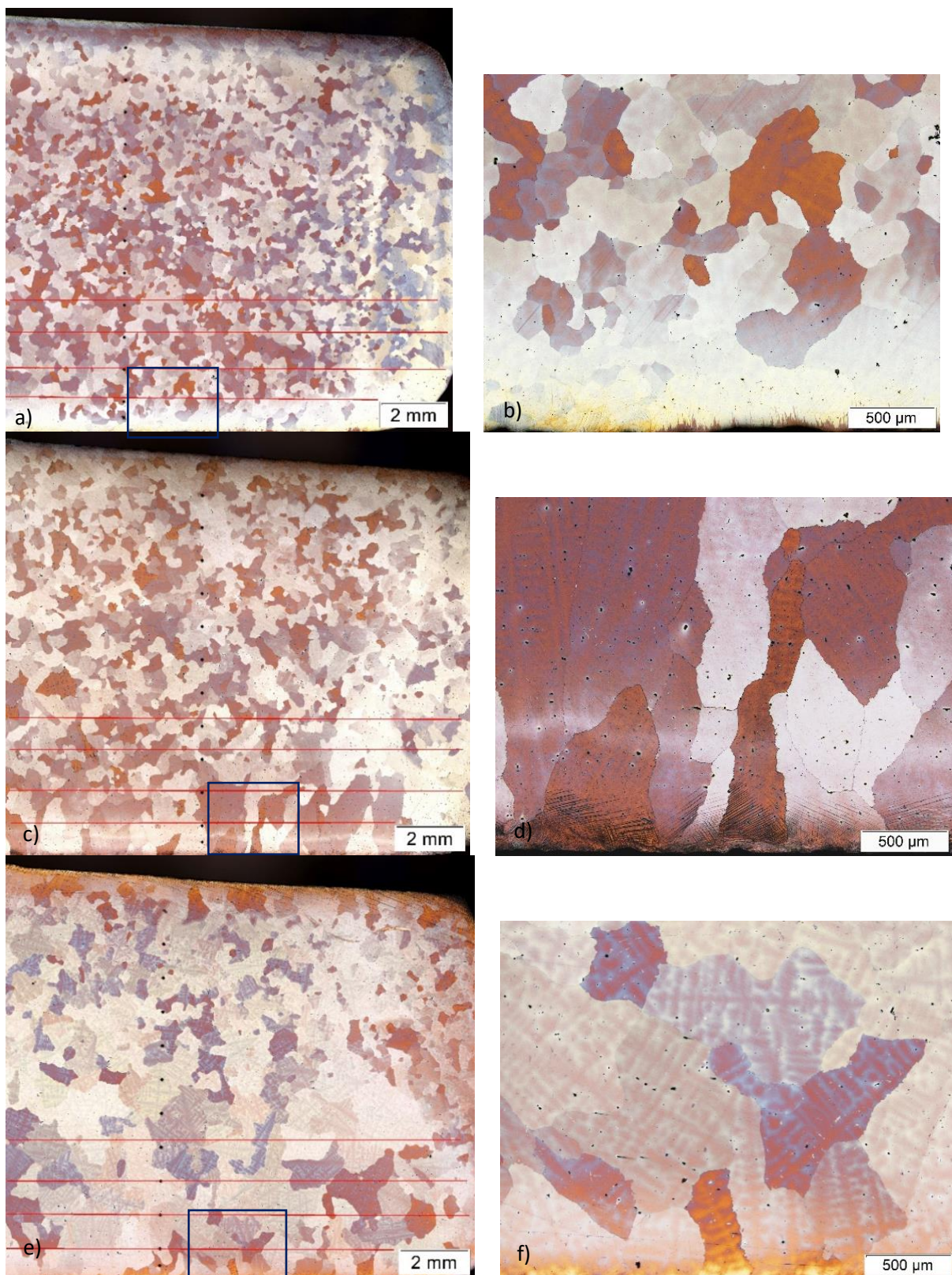


Abbildung 39: MIA-Aufnahmen und für die Korngrößenbestimmung angelegte Linien an der Position Schienenfuß außen für: a) nicht explosionsverfestigte; c) 1x explosionsverfestigt und e) 2x explosionsverfestigte Probe. Die eingerahmte Position gibt die Position für Aufnahmen mit 50-facher Vergrößerung an b) nicht explosionsverfestigte; d) 1x explosionsverfestigte und f) 2x explosionsverfestigte Probe

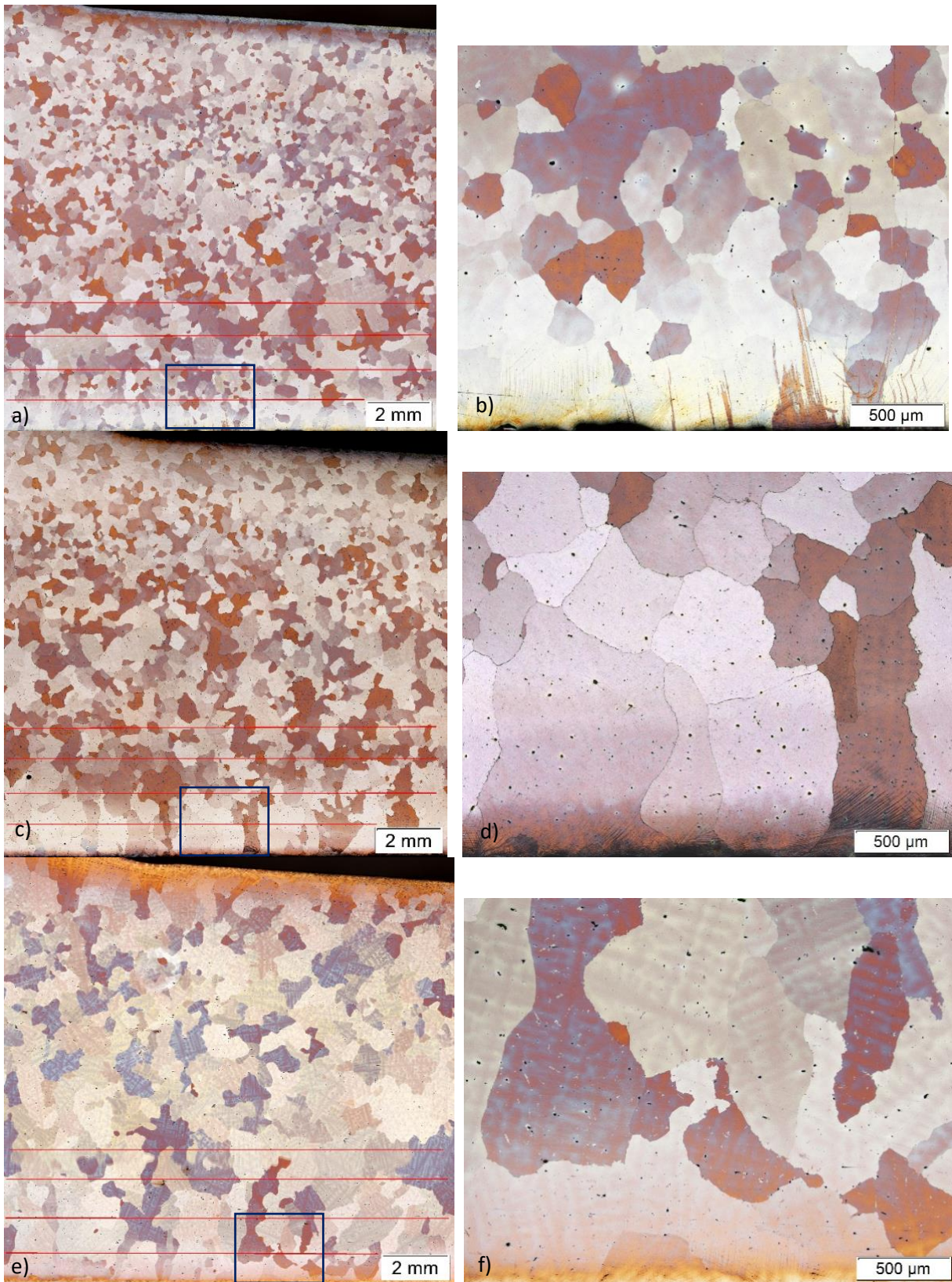


Abbildung 40: MIA-Aufnahmen und für die Korngrößenbestimmung angelegte Linien an der Position Schienenfuß innen für: a) nicht explosionsverfestigte; c) 1x explosionsverfestigt und e) 2x explosionsverfestigte Probe. Die eingerahmte Position gibt die Position für Aufnahmen mit 50-facher Vergrößerung an b) nicht explosionsverfestigte; d) 1x explosionsverfestigte und f) 2x explosionsverfestigte Probe

Die Ergebnisse des Linienschnittverfahrens für den Schienenfuß sind in Abbildung 41 dargestellt. Die Korngröße ist bei der nicht explosionsverfestigten Probe am geringsten (zwischen 186 und 361 μm) und bei der 2x explosionsverfestigten Probe am höchsten (zwischen 413 und 589 μm). Bei der 1x explosionsverfestigten Probe nimmt am Schienenfuß die Korngröße mit zunehmender Distanz zur Oberfläche ab.

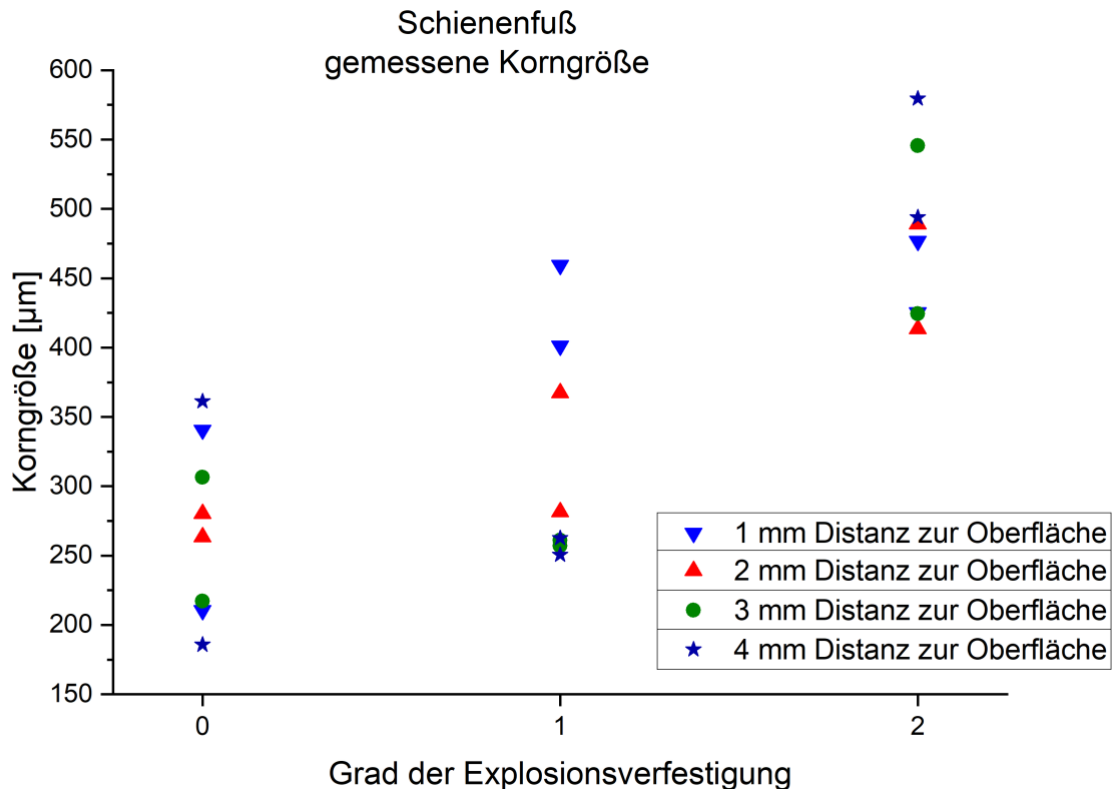


Abbildung 41: Die durch das Linienschnittverfahren ermittelte Korngröße am Schienenfuß für die Positionen Schienenfuß außen und Schienenfuß innen.

In den Abbildung 39 b, d, f) und Abbildung 40 b, d, f) sind am unteren Rand der Bilder feine schwarze Linien zu erkennen. Diese Linien deuten auf Kaltverfestigung hin. Da diese Linien bei allen Proben auftreten ist davon auszugehen, dass diese durch das Bandsägen entstanden sind. In Abbildung 39 e) sind wie in Abbildung 39 f) und Abbildung 40 f) in den groben Körnern Dendriten zu sehen. Die Dendriten sind somit immer am Schienenfuß der 2x explosionsverfestigten Probe vorhanden.

5.8 Machbarkeit: Versuch der Rissdetektion mit dem bestehenden SAW Setup

Die Machbarkeit der Rissdetektion an einer realen Hadfield-Stahl-(Mn-12) Weiche wurde mit Hilfe des bestehenden Setups mit dem GS200 an einer Probe mit Ermüdungsriss überprüft. Der Probenkörper stammte aus einem ausgeschiedenen Hadfield-Stahl Weichenherz, die Weichengeometrie und die genaue Lage des Risses sind dem Projektteam bekannt (siehe vertraulicher Schadenskatalog der Projektes IC-MPPE P4.18 NDT-MnTurnout), sie werden in dieser Arbeit aber aus Gründen der Vertraulichkeit nicht angegeben. Die beiden Messsonden wurden dabei jeweils links und rechts des Risses positioniert, sodass die Rayleighwelle auf den senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stehenden Riss trifft (siehe: Abbildung 42).

Die Messung wurde analog zum Versuchsaufbau in Punkt 5.3 Versuchsaufbau - Rayleighwellen aufgebaut. Der einzige Unterschied betraf die Verstärkungseinstellungen. Gain und Output betragen bei der Messung am Riss jeweils 25 dB und dass nur in einem vorgegebenen Abstand zwischen den Sonden gemessen wurde, anstatt den Abstand zu variieren. Der Abstand der äußersten Zähne wurde mit dem Messschieber gemessen und die Kämme parallel zueinander ausgerichtet. Die Differenz der gemessenen Distanzen im Vergleich zur Referenzmessung und der Abstand von der unteren Kante des Probenkörpers sind in Tabelle 6 tabelliert. Eine negative Differenz besagt, dass die Zähne der Sonden näher beieinander lagen als bei der Referenzmessung, eine positive Differenz, dass sie weiter auseinander lagen als bei der Referenzmessung. Nach der Distanzmessung wurde der Messschieber entfernt. Es wurde mit 1 MHz Sonden im Transmissionsmodus gemessen.

Tabelle 6: Distanz zwischen den nächsten Kammzähnen und zur unteren Kante der durchgeführten Messungen

Messung Nr.	Differenz zur Referenzmessung [mm]	Distanz zur Kante [mm]
1	0,58	33,8
2	0,2	27,3
3	-0,72	17,8
4	0,35	14,4
5 - Referenz	0	Referenzmessung

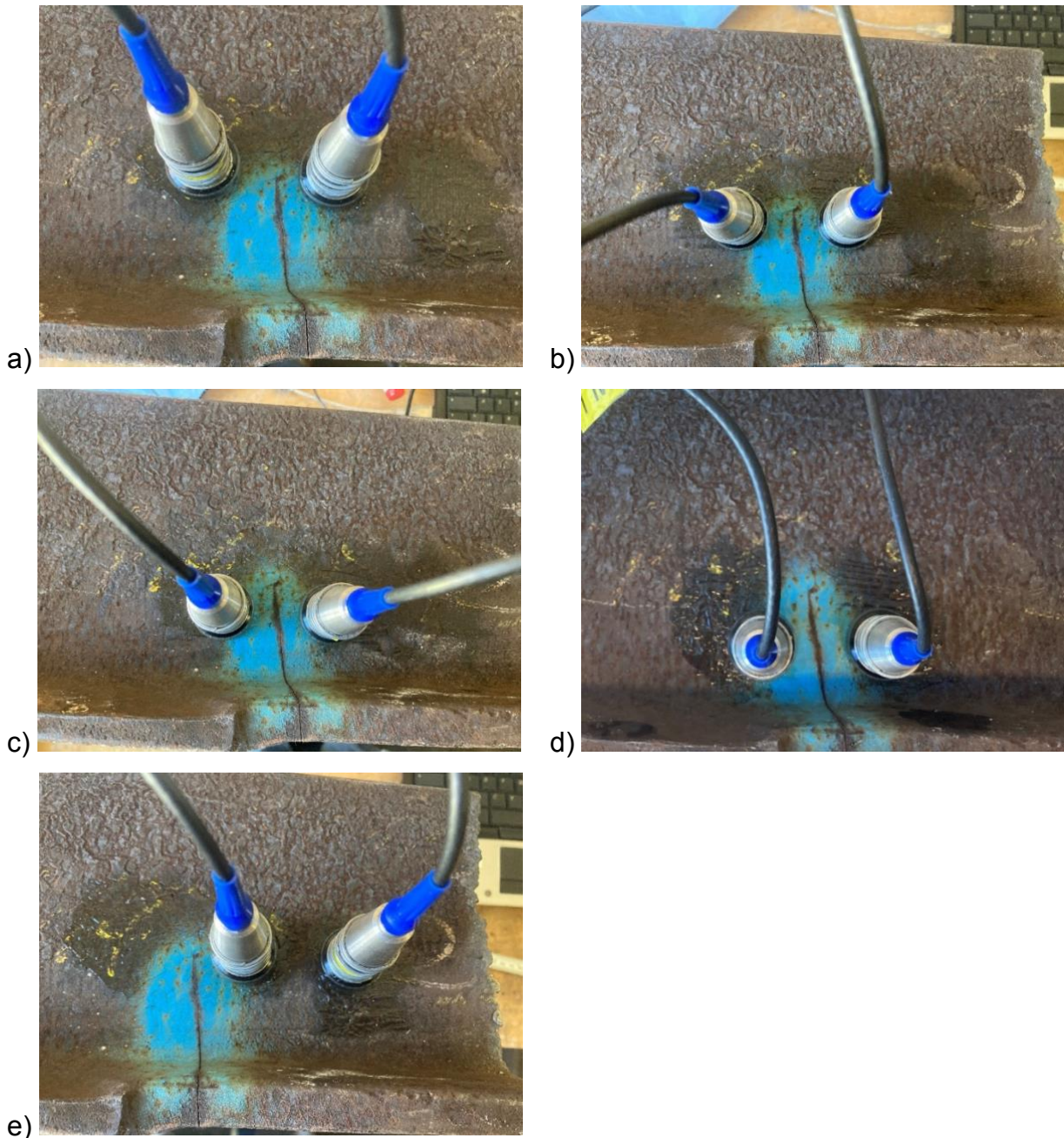


Abbildung 42: Die Sensoren werden jeweils links und rechts von der Rissflanke positioniert. Die Distanz zwischen den Sensoren wird annähernd gleich gewählt und die genaue Distanz mit Messschieber gemessen. Die Sensoren werden nach jeder Messung weiter zur unteren Kante des Probenkörpers versetzt. a) Messung Nr. 1; b) Messung Nr. 2; c) Messung Nr. 3; d) Messung Nr. 4. e) Die Referenzmessung ohne Riss wurde neben Riss durchgeführt

Die aufgenommenen Signale wurden in Origin importiert und mit derselben Vorgehensweise normiert wie in 5.3 Versuchsaufbau - Rayleighwellen beschrieben. Die Signale wurden auf das Referenzsignal normiert.

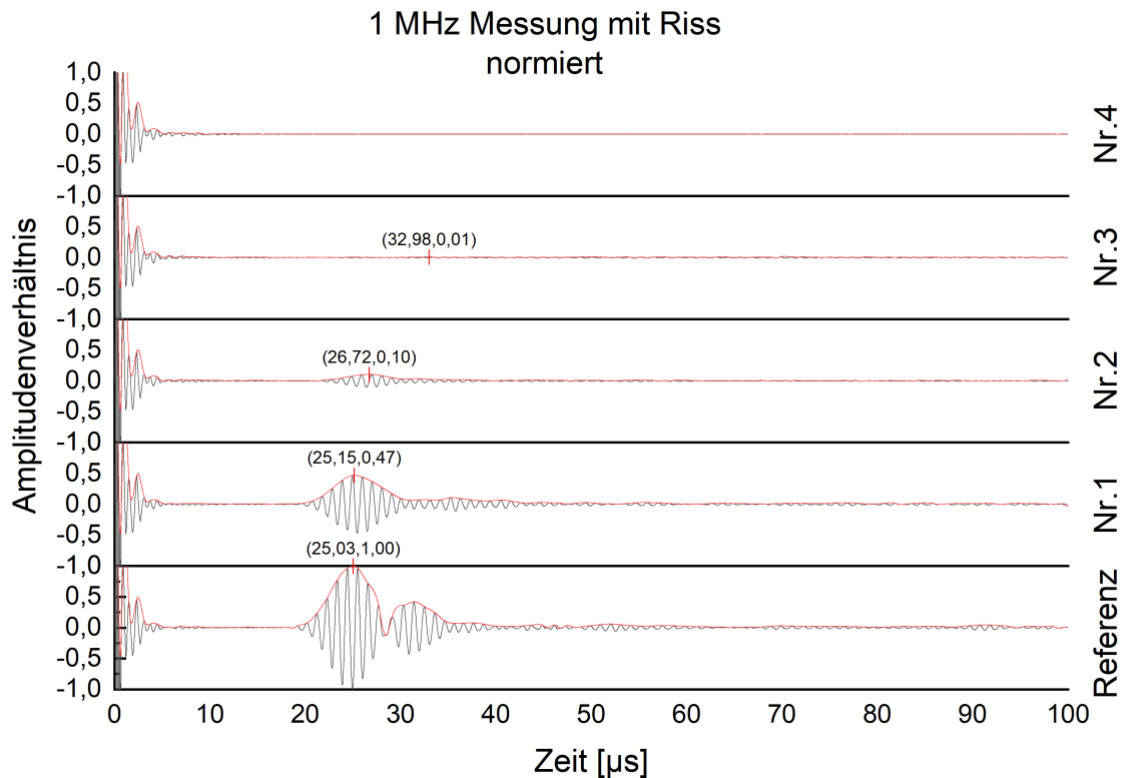


Abbildung 43: Messsignal für die durchgeführte Messung am Riss. Von der Referenzmessung auf Nr.1 ist eine Amplitudenschwächung um 53% des Amplitudenverhältnisses zu beobachten. Von Nr.1 auf Nr.2 ist eine weitere Amplitudenschwächung auf 10% der ursprünglichen Amplitude der Referenzmessung zu beobachten und die Laufzeit hat sich im Vergleich zur Referenz um 1,69 µs erhöht. In der Messung Nr. 3 ist schwaches Rauschen zu sehen. Bei Messung Nr.4 ist kein Signal mehr zu beobachten.

Wie in Abbildung 43 zu sehen ist der Riss an der Kante des Probenkörpers durchgerissen. Dies äußert sich auch im Messsignal (siehe: Abbildung 43). Bei Messung Nr. 4 wurde kein Signal der Rayleighwelle mehr empfangen. Bei Messung Nr. 3 ist noch leichtes Rauschen zu sehen. Das Messsignal von Nr. 3 ist jedoch nicht auswertbar.

Auffällig ist die Messung Nr.1 im Vergleich zur Referenzmessung. Hierbei hat die Amplitude auf 47 % des Referenzwertes abgenommen. Die Messung Nr. 1 wurde mit einem 0,58 mm größeren Abstand durchgeführt.

Aus dem Vergleich der Referenzmessung zu Messung Nr. 2 ist ersichtlich, dass sich die Laufzeit des Wellenpulses der Rayleighwelle um 1,69 µs im Vergleich zur Referenzmessung erhöht hat und die Amplitude auf 10% des Referenzwertes abgenommen hat.

6 Diskussion der Ergebnisse

6.1 Diskussion der Laufzeit

Im folgenden Abschnitt wird von der Ausbreitungsgeschwindigkeit gesprochen, damit ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rayleighwelle gemeint.

Für den Hadfield-Stahl wird ein E-Modul von 201 GPa eine Dichte von 7900 kg/m^3 und eine Poissonzahl von 0,3 angenommen.

Daraus ergibt sich nach den Gleichungen [II] und [III] eine longitudinale Ausbreitungsgeschwindigkeit von 5852 m/s und eine transversale Ausbreitungsgeschwindigkeit von 3128 m/s . Die theoretische Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rayleighwelle nach Gleichung [VII] beträgt 2902 m/s .

- Dieser Wert stimmt gut mit den mit 1 MHz Frequenz gemessenen Werten an Schienenkopf und Schienenfuß der 1x (Schienenfuß: $2907 \pm 124 \text{ m/s}$, Schienenkopf: $2900 \pm 42 \text{ m/s}$) und 2x (Schienenfuß: $2908 \pm 122 \text{ m/s}$, Schienenkopf $2906 \pm 87 \text{ m/s}$) explosionsverfestigten Probe überein.
- Ebenso stimmt der theoretische Wert gut mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der 2 MHz Messung am Schienenkopf der nicht explosionsverfestigten Probe ($2904 \pm 282 \text{ m/s}$) überein (siehe: Abbildung 44a).
- Bei der nicht explosionsverfestigten Probe beträgt die gemessene Ausbreitungsgeschwindigkeit für eine Frequenz von 1 MHz am Schienenkopf $3097 \pm 128 \text{ m/s}$ und am Schienenfuß $2882 \pm 111 \text{ m/s}$
- Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist damit am Schienenkopf um ca. 200 m/s höher als am Schienenfuß. Eine vernünftige Erklärung für den signifikanten Unterschied konnte nicht gefunden werden. Bei der Betrachtung des Härteunterschieds im Härteverlauf der nicht explosionsverfestigten Probe an Schienenkopf und Schienenfuß der ersten von $4,5 \text{ mm}$, was ca. der Eindringtiefe der Rayleighwelle bei einer Frequenz von 1 MHz und einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von 2902 m/s entspricht, beträgt maximal 47 HV . Unter den selben Annahmen beträgt der maximale Härteunterschied zwischen Schienenkopf und -fuß an 1x explosionsverfestigten Probe 206 HV und an der 2x explosionsverfestigten Probe 324 HV (siehe: Abbildung 34). Die wesentlich höheren Härteunterschiede zwischen Schienenkopf und Schienenfuß an den explosionsverfestigten Proben führen zu keiner Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rayleighwelle bei 1 MHz . Somit sollte der Härteunterschied nicht für den signifikanten Unterschied

der Ausbreitungsgeschwindigkeit zwischen Schienenkopf und Schienenfuß bei der nicht explosionsverfestigten Probe verantwortlich sein.

- Bei den 2 MHz Messungen am Schienenkopf ist ein Trend zu erkennen, bei dem die Ausbreitungsgeschwindigkeit mit zunehmendem Grad der Explosionsverfestigung abnimmt. Die gemessene Ausbreitungsgeschwindigkeit der nicht explosionsverfestigten Schiene beträgt 2904 ± 282 m/s und liegt damit sehr nahe am theoretisch ermittelten Wert von 2902 m/s. Die weiteren Werte für die Ausbreitungsgeschwindigkeit betragen 2872 ± 129 m/s (1x explosionsverfestigt) und 2843 ± 125 m/s (2x explosionsverfestigt). Bei 2 MHz beträgt die Eindringtiefe der Rayleighwelle ca. 2,2 mm. Der Härteunterschied ist am Schienenkopf innerhalb der ersten 1 mm Abstand von der Oberfläche besonders signifikant (siehe: Abbildung 34) und laut Abbildung 7 sollte die Rayleighwelle in diesem Bereich von 1 mm auch die höchste Intensität aufweisen. Die Härte nimmt am Schienenkopf im Randbereich mit zunehmendem Grad der Explosionsverfestigung zu (siehe: Abbildung 34). Dies bestätigt die theoretische Vorhersage, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit mit zunehmender Härte abnimmt.
- Die gemessenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten bei 2 MHz am Schienenfuß weisen eine höhere Standardabweichung auf als die 1 MHz Messungen und die Mittelwerte deuten auf keine einheitliche Ausbreitungsgeschwindigkeit hin.
- Am Schienenfuß waren nur Messungen bis 37 mm Distanz zwischen den beiden Sonden sinnvoll, da bei höheren Distanzen aufgrund der starken Dämpfung kein Signaleinsatz mehr zu beobachten war. Da es weniger Messergebnisse gibt ist die Standardabweichung höher. Messungen mit 2 MHz am Schienenfuß eines aus Hadfield-Stahl bestehenden Prüfkörpers ist aufgrund der geringen möglichen Messdistanz somit nicht sinnvoll.
- Ein Unterschied in der Ausbreitungsgeschwindigkeit zwischen 1 und 2 MHz Frequenz kann aufgrund der stark streuenden Werte für die Ausbreitungsgeschwindigkeit am Schienenfuß bei 2 MHz nicht nachgewiesen werden.

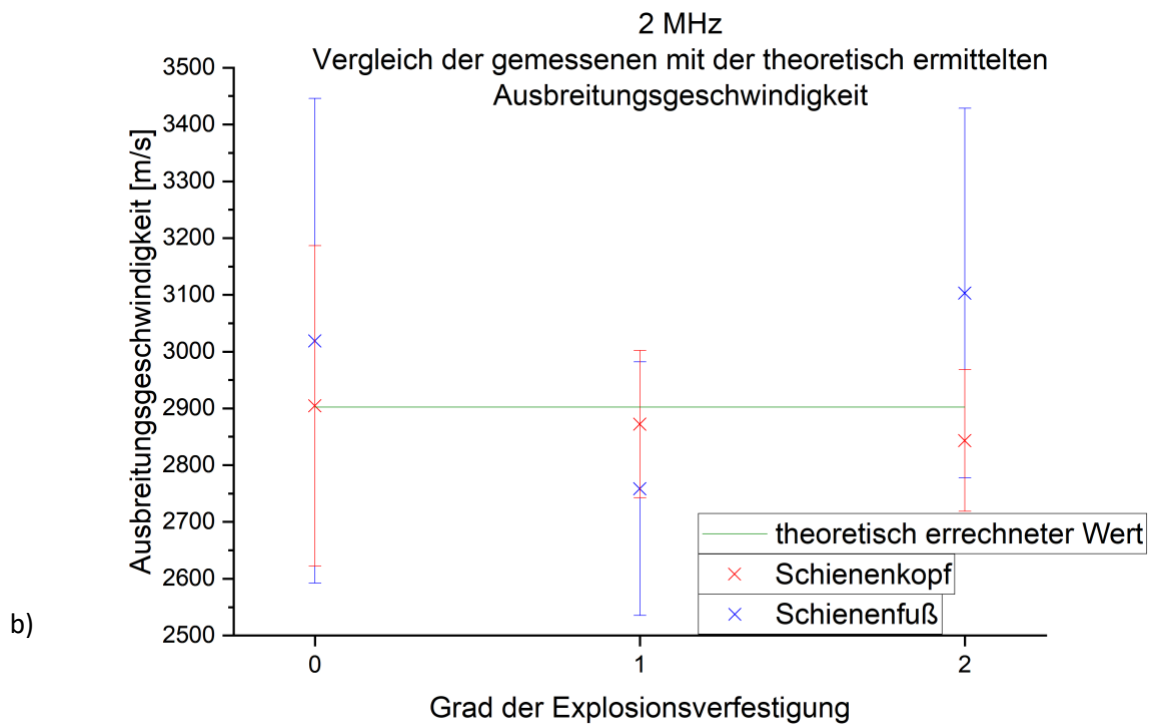
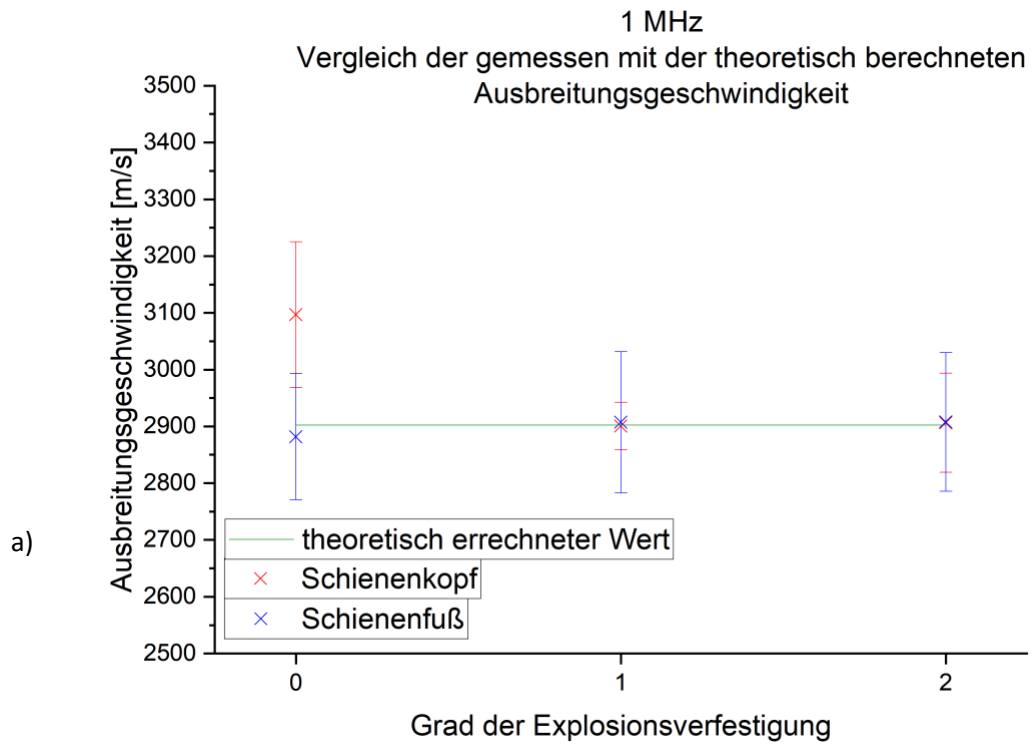


Abbildung 44: Vergleich der gemessenen Werte der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rayleighwellen mit den theoretisch ermittelten für a) 1 und b) 2 MHz.

6.2 Diskussion der Dämpfungskoeffizienten

Im Anschluss wurden die Streukoeffizienten der Rayleighwelle für die Messungen mit 1 und 2 MHz Sonden berechnet. Die Bezeichnung Streukoeffizient bezieht sich dabei immer auf den Streukoeffizient der Rayleighwelle. Dazu mussten die ermittelten mittleren Korngrößen berücksichtigt werden. Vorerst musste festgestellt werden wie tief die Rayleighwelle ins Material eindringt. Die Korngröße nimmt am Schienenkopf bei allen Probenkörpern mit steigender Eindringtiefe zu (siehe: Abbildung 36). Am Schienenfuß ist kein einheitlicher Trend bezüglich der Änderung der Korngröße mit steigender Eindringtiefe zu erkennen (siehe: Abbildung 41). Je nach Frequenz der Rayleighwelle und somit Eindringtiefe, interagiert die Rayleighwelle mit verschiedenen durchschnittlichen Korngrößen. Der Streukoeffizient wurde jeweils aus der kleinsten und der größten Korngröße für die jeweilige Probe und Messposition berechnet, um eine Vorhersage zu treffen, in welcher Größenordnung sich der Dämpfungskoeffizient ohne Berücksichtigung der Absorption bewegt. Dieser theoretische Wert wurde mit den gemessenen Werten verglichen.

Da die Nennfrequenzen der Sonden 1 und 2 MHz betragen, kann aus Gleichung [IV], mithilfe der bereits ermittelten theoretischen Geschwindigkeit die jeweilige Wellenlänge der Rayleighwelle ermittelt werden. Diese Wellenlängen betragen, bei der Annahme der theoretischen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rayleighwelle (2902 m/s), für 1 MHz $\lambda_{1\text{MHz}} = 2,9 \text{ mm}$ und für 2 MHz $\lambda_{2\text{MHz}} = 1,45 \text{ mm}$.

Die Rayleighwelle dringt mit dem 1,5 fachen ihrer Wellenlänge in das darunterliegende Material ein. Bei 1 MHz Nennfrequenz der Sonden sind dies 4,5 mm. Die Rayleighwelle mit 2 MHz Frequenz dringt ca. 2,2 mm in den Probenkörper ein.

Der Abstand Linien zu Oberfläche, welche zur Bestimmung der Korngröße in die Gefügeaufnahmen gelegt wurden, nimmt jeweils um ca. 1 mm zu. Die Auswertung aller vier Linien bedeutet somit, dass die mittlere Korngröße in ca. 4 mm Tiefe bestimmt wurde. Deshalb wurden bei 1 MHz Nennfrequenz alle vier Linien der jeweiligen Schlibfbilder für die Bestimmung der maximalen und minimalen Korngröße verwendet. Bei 2 MHz Sonden wurden nur die zwei der Oberfläche am nächsten liegenden Linien zur Auswertung herangezogen. Somit wurde bei der Auswertung für 2 MHz die mittlere Korngröße bis zu 2 mm Tiefe bestimmt.

Die minimale Korngröße aller Proben, welche für die Auswertung für 1 MHz Sonden bestimmt wurde, beträgt 186 µm. Die minimale Korngröße bei 2 MHz ebenso.

Das minimale Verhältnis von Korngröße zu Wellenlänge der Rayleighwelle beträgt somit:

$$\frac{D_{min}}{\lambda_{1MHz}} = 0,06$$

$$\frac{D_{min}}{\lambda_{2MHz}} = 0,13$$

Die größte gemessene Korngröße aller Probenkörper für 1 MHz Messungen beträgt 724 µm. Daraus ergibt sich im Verhältnis zur Wellenlänge:

$$\frac{D_{max}}{\lambda_{1MHz}} = 0,38$$

Die größte gemessene Korngröße aller Probenkörper innerhalb der 2 mm Distanz von der Oberfläche, für die Auswertung mit 2 MHz beträgt 572 µm. Daraus ergibt sich folgendes Verhältnis:

$$\frac{D_{max}}{\lambda_{2MHz}} = 0,4$$

Die Verhältnisse der kleinsten gemessenen Korngröße zur Wellenlänge befinden sich im Bereich der Rayleigh-Streuung. Das maximale Verhältnis befindet sich in einem Übergangsbereich zwischen Rayleighstreuung und stochastischer Streuung (siehe: Abbildung 9) .

Somit wurde für die Berechnung des minimalen Streukoeffizienten Rayleigh-Streuung angenommen. Bei der Bestimmung des maximalen Streukoeffizienten wurden sowohl der Streukoeffizient unter Annahme der Rayleigh-Streuung als auch der Streukoeffizient unter Annahme der stochastischen Streuung berechnet.

Laut Pelletier sollen die Gitterparameter von austenitischem Edelstahl jenen des Hadfield-Stahls sehr ähnlich sein (siehe: [Pelletier 1992]). Teklu et al. haben die in Tabelle 7 tabellierten elastischen Konstanten für austenitischen Edelstahl gemessen:

Tabelle 7: Elastische Konstanten eines Einkristalls eines austenitischen Edelstahls (70Fe-15Ni-15Cr) [Teklu 2004]

C11	C12	C44	E	G	v
210,9	140,3	122,5	196,9	75,73	0,29997

Diese gemessenen Konstanten wurden für die Berechnung der elastischen Anisotropie (siehe: Gleichungen [XVII], [XVIII], [XIX] und [XX]) herangezogen.

Die größte und kleinste ermittelte mittlere Korngröße wurde nun je nach verwendeter Messfrequenz, für jede Probe und die Messposition ermittelt. Für die Messposition Schienenkopf wurden die Korngrößenauswertungen von Schienenkopf links, Schienenkopf mitte und Schienenkopf rechts herangezogen. Für die Messposition Schienenfuß, wurden die Korngrößenauswertungen für Schienenfuß außen und Schienenfuß innen verwendet.

Durch Kombination der Gleichungen [XVII], [XVIII], [XIX] und [XX] mit [XXI] wurden die Grenzen der Streukoeffizienten unter Berücksichtigung der gemessenen Korngrößen für die Rayleighwelle berechnet.

Für die nicht explosionsverfestigte Probe bei 1 MHz gilt (siehe: Abbildung 45) :

- Am Schienenfuß liegt stochastische Streuung vor. Der Dämpfungskoeffizient beträgt 26 ± 8 Np/m.
- Am Schienenkopf beträgt der Dämpfungskoeffizient 29 ± 6 Np/m. Der maximale Streukoeffizient für Rayleigh-Streuung beträgt $30,8$ Np/m. Der maximale Streukoeffizient für liegt bei 68 Np/m. Ob Rayleigh oder stochastische Streuung am Schienenkopf vorliegt kann somit nicht geklärt werden. Vermutlich liegen beide Streuungsarten zu verschiedenen Anteilen vor, wobei der Anteil der Rayleigh-Streuung höher ist.
- Es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen den Dämpfungskoeffizienten an Schienenkopf und Schienenfuß.
- Da die Absorption aufgrund von Versetzungen ohne Explosionsverfestigung als vernachlässigbar klein angenommen wird entspricht der Dämpfungskoeffizient in etwa dem theoretischen Streukoeffizient.

Für die 1x explosionsverfestigte Probe bei 1 MHz gilt (siehe: Abbildung 45) :

- Der Dämpfungskoeffizient am Schienenfuß beträgt 14 ± 6 Np/m. Durch die Explosionsverfestigung sollte durch Zunahme der Versetzungsdichte die Absorption und somit die Dämpfung erhöht werden. Es ist daher anzunehmen, dass der Streukoeffizient niedriger als gemessene Dämpfungskoeffizient liegt. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung des gemessenen

Dämpfungskoeffizienten und dem maximalen Rayleighstreuungskoeffizient (8 Np/m) liegt am Schienenfuß Rayleigh und stochastische Streuung vor.

- Am Schienenkopf liegt Rayleigh-Streuung vor. Der Dämpfungskoeffizient beträgt $7,8 \pm 2,8$ Np/m.
- Der Dämpfungskoeffizient sinkt jedoch an Schienenkopf und Schienenfuß im Vergleich zur nicht explosionsverfestigten Probe. Dies lässt auf eine Verringerung der Streuung schließen.
- Der Dämpfungskoeffizient am Schienenfuß ist signifikant höher als am Schienenkopf. Der Einfluss der Explosionsverfestigung ist somit am Schienenkopf stärker als am Schienenfuß. Der Schienenfuß wird jedoch auch die Explosionsverfestigung beeinflusst, denn der gemessene Dämpfungskoeffizient ist niedriger als am Schienenfuß der nicht explosionsverfestigten Probe.

Für die 2x explosionsverfestigte Probe bei 1 MHz gilt (siehe: Abbildung 45) :

- Am Schienenfuß liegt analog zur 1x Explosionsverfestigten am Schienenkopf sowohl Rayleigh als auch stochastische Streuung vor. Der Dämpfungskoeffizient beträgt 19 ± 7 Np/m.
- Am Schienenkopf liegt Rayleigh-Streuung vor. Der Dämpfungskoeffizient beträgt $8,4 \pm 4,4$ Np/m. Die Explosionsverfestigung verringert den Dämpfungskoeffizienten am Schienenkopf somit stärker als am Schienenfuß.
- Sowohl am Schienenkopf als auch am Schienenfuß gibt's es keine signifikanten Unterschiede der Dämpfungskoeffizienten zur 1x explosionsverfestigten Probe.
- Der gemessene Dämpfungskoeffizient liegt am Schienenkopf mittig zwischen den theoretischen Grenzen der Rayleigh-Streuung (0,5 – 18 Np/m) . Bei der 1x explosionsverfestigten Probe befindet sich der gemessene Dämpfungskoeffizient ($7,8 \pm 2,8$ Np/m) näher am minimalen theoretischen Wert (2,5 Np/m) als am maximalen (32 Np/m). Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass die Dämpfung aufgrund steigender Absorption durch Versetzungen zunimmt.

Eine reine Aufhärtung durch Versetzungsbildung am Schienenkopf hätte eine Erhöhung des Absorptions- und somit Dämpfungskoeffizienten von Rayleighwellen zur Folge. Bei den Messungen mit 1 MHz an Schienenkopf und Schienenfuß führt die Explosionsverfestigung zu einer Verringerung des Dämpfungskoeffizienten. Daher wird sich die Streuung von Rayleighwellen verringern. Eine Verringerung der Korngröße

würde zu einer Verringerung der Streuung führen. Diese kleinere Korngröße kann in den durchgeführten Lichtmikroskop-Aufnahmen nicht zu beobachtet werden. Der Effekt der Verringerung des Dämpfungskoeffizienten ist bei den explosionsverfestigten Proben am Schienenkopf stärker ausgeprägt als am Schienenfuß.

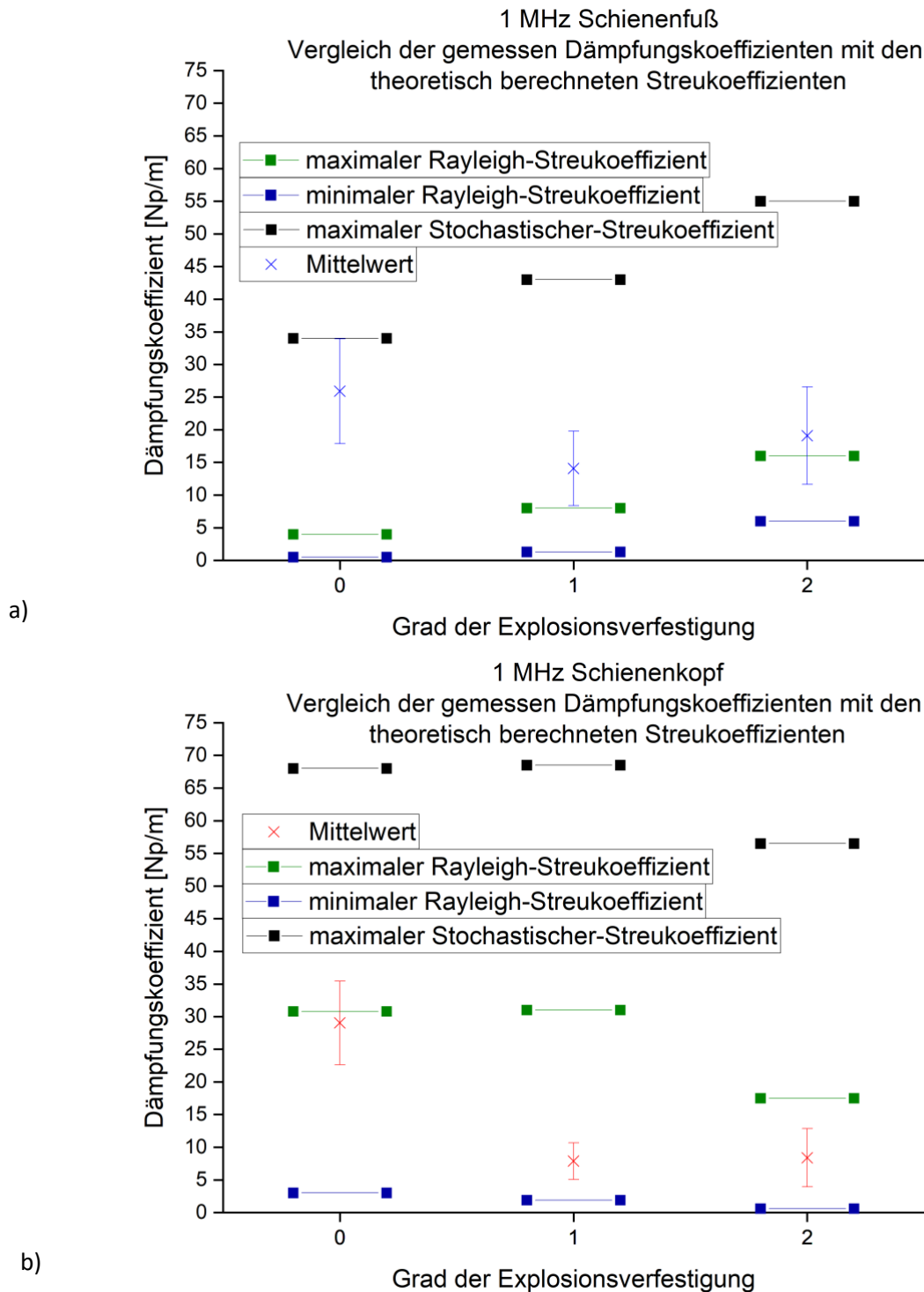


Abbildung 45: Vergleich der Mittelwerte mit Standardabweichungen der gemessenen Dämpfungskoeffizienten für die Messung mit 1 MHz Sonden mit den theoretisch berechneten Dämpfungskoeffizienten. Für a) Schienenfuß und b) Schienenkopf.

Für die nicht explosionsverfestigte Probe bei 2 MHz gilt (siehe: Abbildung 46):

- Der gemessene Dämpfungskoeffizient am Schienenfuß beträgt 78 ± 13 Np/m. Es liegt stochastische Streuung vor.
- Am Schienenkopf beträgt der Dämpfungskoeffizient 63 ± 15 Np/m. Es liegt Rayleigh-Streuung vor.
- Die Dämpfung am Schienenkopf ist geringer als am Schienenfuß.
- Die Korngröße am Schienenfuß ist kleiner als am Schienenkopf (vergleiche: Abbildung 36 und Abbildung 41).
- Aufgrund der kleineren Korngröße sollte die Dämpfung am Schienenfuß geringer sein als am Schienenkopf. Jedoch ist das Gegenteil der Fall. Mögliche Einflüsse auf den Streukoeffizienten können anhand der vorliegenden Lichtmikroskop-Aufnahmen nicht erfasst werden.

Für die 1x explosionsverfestigte Probe bei 2 MHz gilt (siehe: Abbildung 46):

- Der gemessene Dämpfungskoeffizient am Schienenfuß beträgt 66 ± 15 Np/m. Es liegt Rayleigh-Streuung vor.
- Am Schienenkopf beträgt der Dämpfungskoeffizient 35 ± 12 Np/m und ist somit signifikant geringer als am Schienenkopf der nicht explosionsverfestigten Probe. Der gemessene Dämpfungskoeffizient befindet sich knapp über dem minimalen theoretisch bestimmten Rayleigh Streukoeffizienten (30 Np/m).
- Es kann wieder von einer Verringerung der Streuung durch die Explosionsverfestigung ausgegangen werden, da am Schienenfuß Rayleigh statt stochastischer Streuung, wie bei der nichtexplosionsverfestigten Probe, vorliegt.
- Aufgrund der Absorption durch Versetzungen sollte es zu einer Erhöhung des Dämpfungskoeffizienten aufgrund der Explosionsverfestigung am Schienenkopf kommen. Die Position

Für die 2x explosionsverfestigte Probe bei 2 MHz gilt (siehe: Abbildung 46):

- Der gemessene Dämpfungskoeffizient am Schienenfuß beträgt 61 ± 14 Np/m und liegt somit unterhalb der minimalen theoretischen Grenze für Rayleigh-Streuung.
- Am Schienenkopf beträgt der Dämpfungskoeffizient 21 ± 8 Np/m und liegt im Bereich der Rayleigh-Streuung. Der Koeffizient ist signifikant niedriger als bei der 1x explosionsverfestigten Probe.

Zusammenfassend gilt für die Messungen mit 2 MHz Frequenz:

- Am Schienenfuß liegt bei der nicht explosionsverfestigten Probe stochastische Streuung vor, bei der 1x explosionsverfestigten Rayleigh-Streuung und bei der 2x explosionsverfestigten Probe liegt der gemessene Dämpfungskoeffizient unter dem theoretischen Limit für Rayleigh-Streuung. Somit verringert sich die Streuung am Schienenfuß mit zunehmender Explosionsverfestigung. Der Effekt welcher zur Verringerung der Streuung führt kann anhand der Lichtmikroskop-Aufnahmen nicht identifiziert werden.
- Im Vergleich der gemessenen Dämpfungskoeffizienten nimmt dieser mit zunehmender Explosionsverfestigung ab.
- Wie bei den Messungen am Schienenkopf an der nicht und 1x explosionsverfestigten Probe befindet sich der gemessene Dämpfungskoeffizient bei der 2x explosionsverfestigten Probe knapp über der minimalen Grenze des Rayleigh Streukoeffizienten. Das Verhältnis von Dämpfungskoeffizient zum minimalen Rayleigh Streukoeffizienten am Schienenkopf bleibt somit bei allen Proben annähernd gleich. Die Explosionsverfestigung sollte die Dämpfung aber zumindest erhöhen, dies ist nicht der Fall.
- Die Eindringtiefe von Rayleighwellen beträgt bei 2 MHz im Hadfield-Stahl ca. 2,2 mm. Diese Welle wird somit wesentlich mehr als die Welle mit 1 MHz durch die höhere Härte im oberflächennahen Bereich mit zunehmender Explosionsverfestigung beeinflusst. Absorption durch Versetzungen und Verringerung der Streuung könnten bei 2 MHz im Gleichgewicht vorliegen, somit kann keine Verringerung des Dämpfungskoeffizienten erfasst werden.
- Es wurde schon darauf hingewiesen, dass die Messungen mit 2 MHz Sonden bei der nicht explosionsverfestigten Probe an allen Messpositionen und bei den explosionsverfestigten Proben am Schienenfuß nur bis 37 mm auswertbare Ergebnisse liefern. Zusätzlich wurden durch den Sanity Check 33% der Messwerte aussortiert. Somit stehen bei der 2 MHz Auswertung wesentlich weniger Messwerte zur Verfügung als bei den 1 MHz Messungen. Dies führt zu der geringeren Standardabweichung bei den 1 MHz Messungen im Vergleich zu 2 MHz.

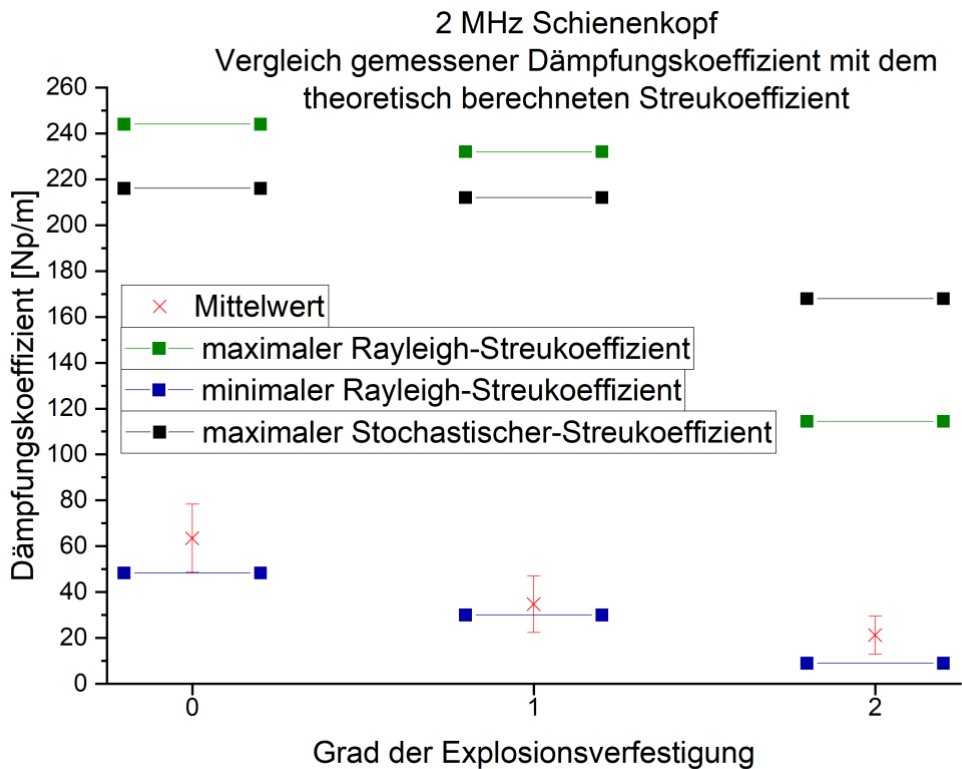
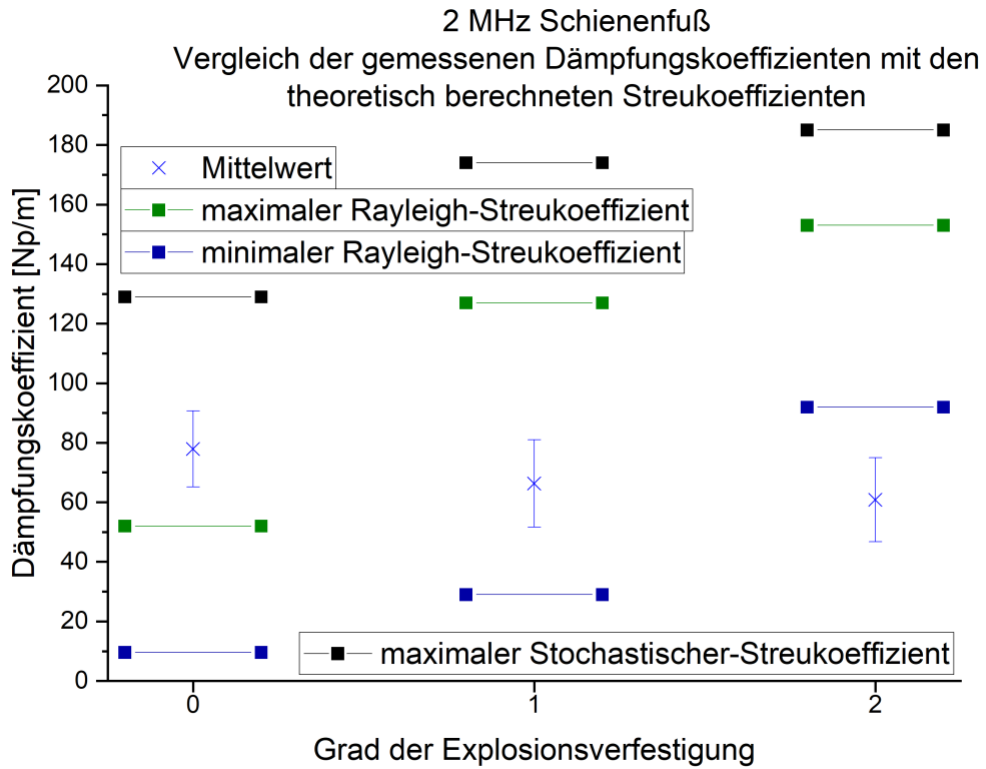


Abbildung 46: Vergleich der Mittelwerte mit Standardabweichungen der gemessenen Dämpfungskoeffizienten für die Messung mit 2 MHz Sonden mit den theoretisch berechneten Dämpfungskoeffizienten. Für a) Schienenfuß und b) Schienenkopf.

6.3 Diskussion der Rissdetektion

Wie in Abbildung 43 ersichtlich nimmt die Amplitude bei der Messung Nr. 1 am Riss um 53 % im Vergleich zur Referenzmessung ab. Dieser Abfall entspricht -3 dB. Anhand von Abbildung 11 lässt dies darauf schließen, dass die Risstiefe ca. 1,2 mm beträgt.

Die Sonden bei Messung Nr. 2 sind um 0,2 mm weiter entfernt als bei der Referenzmessung. Dieser größere Abstand würde zu einer Laufzeitverlängerung von 0,07 μs führen. Die Laufzeitverlängerung ist wesentlich größer und beträgt 1,69 μs .

Zur Bestimmung der Risstiefe wird Gleichung [XXIII] herangezogen, da es zu einer Laufzeitverlängerung kommt. Unter Berücksichtigung der Laufzeitverlängerung durch den höheren Abstand ergibt sich eine Risstiefe von ca. 2,4 mm.

Wenn man die Beziehung aus Abbildung 11 anwendet, führt eine Verringerung der Amplitude wie bei der Messung Nr. 2 auf 10% des Referenzwertes zu einer Risstiefe von 2,9 mm. Ein Riss kann somit zu einer Verringerung der Amplitude und zu einer Verlängerung der Laufzeit mit dem verwendeten Setup führen.

Die Risstiefe ist nicht bekannt, es ist jedoch aufgrund des Rissfortschrittes anzunehmen, dass die Risstiefe von der Messung der Nr. 1 bis Messung Nr. 4 zunimmt. Daher ist bei den Messungen Nr. 3 und Nr. 4 kein Signaleinsatz mehr zu beobachten, da die Risstiefe zu groß ist, um Anteile der Welle zu transmittieren.

Im Gegensatz zu den Messungen der Ausbreitungsgeschwindigkeit wurden die Versuchsmessungen am Riss nur einmal durchgeführt und sind somit einer größeren Streuung der Messwerte unterworfen.

7 Schlussfolgerungen

Die Explosionsverfestigung beeinflusst bei Hadfield-Stahl Schienenprobenkörpern Schienenkopf und Schienenfuß.

Eine Verringerung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Rayleighwellen durch die Explosionsverfestigung kann nicht signifikant belegt werden, es ist jedoch ein Trend der Abnahme der Ausbreitungsgeschwindigkeit bei Messungen mit Rayleighwellen mit 2 MHz zu erkennen. Bei 1 MHz Messungen ist keine Abnahme der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Rayleighwellen zu beobachten. Dies ist auf die unterschiedlichen Eindringtiefen der Rayleighwelle bei verschiedenen Frequenzen zurückzuführen. Mit zunehmendem Abstand zur Oberfläche werden die Unterschiede in der Härte zwischen den Probenkörpern am Schienenkopf geringer, bis sie ab 10 mm eine einheitliche Härte aufweisen. Bei einer Frequenz von 1 MHz dringt die Rayleighwelle bis ca. 4,5 mm in den Probenkörper aus Hadfield-Stahl ein. Die Härteunterschiede sind bei dieser Eindringtiefe zu gering, um bei dem gewählten Setup eine Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit zu messen. Bei einer Frequenz von 2 MHz dringt die Rayleighwelle ca. 2,2 mm in den Probenkörper ein und ist somit ausschließlich mit dem Gefüge in Kontakt, welches durch die Explosionsverfestigung aufgehärtet wurde. Am Schienenfuß kann keine Auswirkung der Explosionsverfestigung auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rayleighwelle nachgewiesen werden.

Die Explosionsverfestigung führt am Schienenkopf zu einer Verringerung des Dämpfungskoeffizienten von Rayleighwellen mit einer Frequenz von 1 und 2 MHz. Aufgrund der Versetzungsbildung und der daraus folgenden plastischen Verformung sollte der Absorptions- und somit der Dämpfungskoeffizient zunehmen. Der Dämpfungskoeffizient nimmt bei 1 MHz im Verhältnis zu den ermittelten Streukoeffizienten ab. Bei 2 MHz Messungen bleibt das Verhältnis annähernd konstant. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich der Streukoeffizient der Rayleighwelle verringert. Am Schienenfuß sinkt das Verhältnis von gemessenen Dämpfungskoeffizient der Rayleighwellen zu den berechneten minimalen Streukoeffizienten der Rayleighwellen. Dies lässt auf eine Verringerung der Streuung schließen. Welcher Effekt zur Abnahme der Streuung aufgrund der Explosionsverfestigung führt, ist anhand der durchgeführten Lichtmikroskop-Aufnahmen nicht auszumachen. Die in der Literatur beschriebene mechanische Zwillingsbildung könnte die Streuung und somit Dämpfung der Rayleighwellen am Hadfield-Stahl verringern.

Eine Rissdetektion mit dem vorhandenen Setup ist grundsätzlich möglich. Der Riss ist je nach Risstiefe durch eine Amplitudenverringerng und Laufzeitverlängerung im Transmissionsmodus zu identifizieren. Weitere Untersuchungen zur Zunahme der Laufzeit und Dämpfung mit bekannten Risstiefen sind noch durchzuführen.

8 Ausblick

Die durchgeführten Messungen mit dem GS-200 weisen eine große Anzahl an Messunsicherheiten auf. Zukünftige Untersuchungen sollten sich darauf fokussieren diese Messunsicherheiten zu vermeiden. Die Messunsicherheiten und mögliche Lösungsvorschläge sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Da die Streuung durch die Explosionsverfestigung abnimmt, sollte auch bei höheren Frequenzen eine Messung mit Rayleighwellen möglich sein, wenn die Rayleighwelle keine hohe Eindringtiefe besitzt. Deshalb wird empfohlen nur in oberflächennahen Bereichen, welche am stärksten von der Explosionsverfestigung betroffen sind, (< 1 mm) zu messen. Dazu werden Frequenzen von über 5 MHz empfohlen, da deren Eindringtiefe unter 1 mm liegt. Die größere Frequenz hat eine Erhöhung des Absorptionskoeffizienten zur Folge. Der Effekt, welcher die Streuung im oberflächennahen Bereich verringert, wie es die Zwillingsbildung aufgrund der Explosionsverfestigung sein könnte, müsste in diesem Bereich signifikant zur Verringerung der Dämpfung beitragen. Bei diesen Messungen mit erhöhten Frequenzen müsste Einfluss der Explosionsverfestigung auf Laufzeit und Dämpfung der Rayleighwelle nahe der Oberfläche (< 1 mm) im Vergleich zu den durchgeführten Messungen dieser Arbeit eindeutiger nachweisbar sein. Nicht explosionsverfestigte Proben werden mit diesen hohen Frequenzen nicht prüfbar sein.

Um den Einfluss des Absorptionskoeffizienten durch Versetzungen zu bestimmen, ist es nötig die Versetzungslänge und Versetzungsdichte zu bestimmen. Diese Werte könnten durch Messungen mit einem Transelektronenmikroskop bestimmt werden.

Da sich der Dämpfungskoeffizient durch die Explosionsverfestigung am Schienenkopf verringert, die Korngröße jedoch keinen wesentlichen Einfluss auf die Dämpfung zu haben scheint, wird angeraten EBSD (Electron-Backscatter-Diffraction) Messungen an den Proben durchzuführen, um eventuell durch die Explosionsverfestigung gebildete kleinere Substrukturen in den Körnern auflösen zu können. Bei diesen kleineren

Substrukturen könnte es sich um mechanisch gebildete Zwillinge handeln, da diese ja aufgrund der Explosionsverfestigung entstehen.

Die exakte Korrelation des Amplitudenverlustes und der Laufzeitverlängerung mit der Risslänge mit dem gegenwärtigen Setup am Hadfield-Stahl sollte durch Anwenden des vorhandenen Messaufbaus, mit vorhandenen künstlich eingebrachten Rissen deren Tiefe bekannt ist, ermittelt werden.

Aufgrund der starken Dämpfung von Rayleighwellen mit einer Frequenz von 2 MHz an den Schienenkörpern aus Hadfield-Stahl am Schienenfuß wird von der Messung mit 2 MHz zur Rissdetektion abgeraten. Um eine permanente Überwachung von explosionsverfestigten Weichenherzen mit dem vorhandenen 1 MHz Setup zu gewährleisten, wird eine regelmäßige Anordnung von Sensoren mit Comb-Wandlern im Transmissionsmodus im Abstand von 9 cm angeraten. Die ursprüngliche Amplitude der ausgesandten Rayleighwelle sollte innerhalb dieses Abstandes auf ca. 30 % der ursprünglichen Amplitude verringert werden. Bei höheren Amplitudenverlusten würde dies auf einen Riss oder mehrere Risse zwischen den Sonden hindeuten.

Bei der Annahme eines Risses mit einer Tiefe von 0,54 mm und einem Sondenabstand von 9 cm würde sich die Amplitude laut Abbildung 11 auf 24 % des Ursprungswertes verringern. Bei einer permanenten Messung sollte diese Verringerung der Amplitude (ohne Riss: 30 %, mit Riss von 0,54 cm: 24 % des Ursprungswertes) messbar sein.

Risse ab 2 mm Tiefe können mit dem Auge identifiziert werden. Laut Abbildung 11 würde ein Riss mit 2 mm Tiefe und einem Sondenabstand von 9 cm zu einer Amplitude führen, welche auf 15 % des Ursprungswertes abgenommen hat. Messungen zur Bestätigung dieser Annahmen sind in Zukunft durchzuführen.

Tabelle 8: Messunsicherheiten des Messsetups mit dem GS-200 und Lösungsvorschläge zur Vermeidung dieser

Effekt	Auswirkung auf			Lösungsvorschlag
	Amplitude	Messdistanz	Qualität der Einkopplung	
Messunsicherheit der Längenbestimmung	✓	✓	-	Modifikation des Messaufbaus mit dauerhafter Messung und Einstellung des Sondenabstandes mit Mikrometerschraube
Nicht exakt parallele Ausrichtung der Rayleighaufsätze	✓	✓	✓	Berührungslose Messung durch thermische Anregung und Messung mit Laser-Doppler Vibrometer
Variation der Menge an Kopplungsgel zwischen Sonde und Rayleighaufsatz und zwischen Aufsatz und Stahloberfläche	✓	-	✓	Berührungslose Messung durch thermische Anregung und Messung mit Laser-Doppler Vibrometer
Verschmieren des Kopplungsgels beim Ausrichten der Rayleighaufsätze	✓	-	✓	Berührungslose Messung durch thermische Anregung und Messung mit Laser-Doppler Vibrometer
Veränderung der Sondenausrichtung durch Distanzmessung mit Messschieber	✓	✓	-	Berührungslose Messung durch thermische Anregung und Messung mit Laser-Doppler Vibrometer
Kratzer an Sondenoberfläche	✓	-	✓	Neue Sonden oder berührungslose Messung durch thermische Anregung und Messung mit Laser-Doppler Vibrometer
Korrosionsprodukte an Stahloberfläche	✓	-	✓	Nachbehandlung der Probenkörper durch schleifen und polieren
Einfluss der Probengeometrie	✓	-	✓	Messungen an ebenen Probenkörper mit großen Abmessungen
Einfluss der Oberflächenrauigkeit der Probenkörper	✓	-	✓	Schleifen und polieren der Probenkörper vor dem Durchführen der Messung

9 Literaturverzeichnis

- [Aatre 1996]: 1996 Symposium on Smart Materials, Structures, and MEMS 1996. SPIE.
- [Adler 1986]: Adler, P. H.; Olson, G. B.; Owen, W. S.: Strain Hardening of Hadfield Manganese Steel. Metallurgical Transactions A 1986. 10.
- [Barra 2015]: Barra, Felipe; Espinoza-González, Rodrigo; Fernández, Henry; Lund, Fernando; Maurel, Agnès; Pagneux, Vincent: The Use of Ultrasound to Measure Dislocation Density. JOM 2015. 8.
- [Bhatia 1967]: Bhatia, A. B.: Ultrasonic absorption 1967. Oxford. Clarendon.
- [Böhler Edelstahl 25.06.2021]: Böhler Edelstahl: Datenblatt K700DE - 01.02 - EM-WS 25.06.2021.
- [Bolognini 2003]: Bolognini, S.; Moreau, A.: Ultrasonic absorption in ultra-low carbon steel. Journal of Applied Physics 2003. 6.
- [Bourse 1984]: Bourse; Fremiot; Lambert; Rivenez; Foct: Contribution des mesures de vitesse des ondes de Rayleigh par traitement numérique du signal à l'étude de l'état superficiel des métaux 1984. Florenz.
- [Collette 1957]: Collette, G.; Crussard, C.; Kohn, A.; Plateau, J.; Pomey, G.; Weisz, M.: Contribution à l'étude des transformations des austénites à 12 % Mn. Revue de Métallurgie 1957. 6.
- [Cook 2001]: Cook, D.A; Berthelot, Y.H: Detection of small surface-breaking fatigue cracks in steel using scattering of Rayleigh waves. NDT & E International 2001. 7.
- [Cooper 1986]: Cooper, J. A.; Crosbie, R. A.; Dewhurst, R. J.; McKie, A. W.; Palmer, S. B.: Surface acoustic wave interactions with cracks and slots: a noncontacting study using lasers. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control 1986. 5.
- [Curiel-Reyna 2007]: Curiel-Reyna, E.; Contreras, J.; Rangel-Ortiz, T.; Herrera, A.; Baños, L.; Real, A. del.; Rodríguez, M. E.: Effect of Carbide Precipitation on the Structure and Hardness in the Heat-Affected Zone of Hadfield Steel After Post-Cooling Treatments. Materials and Manufacturing Processes 2007. 1.
- [Danicki 2002]: Danicki, Eugene J.: Scattering by periodic cracks and theory of comb transducers. Wave Motion 2002. 4.
- [Danicki 2010]: Danicki, Eugene J.: Interface wave-modes in comb transducers. Wave Motion 2010. 8.
- [Dastur 1981]: Dastur, Y. N.; Leslie, W. C.: Mechanism of work hardening in Hadfield manganese steel. Metallurgical Transactions A 1981. 5.
- [DB Netz AG 2012]: DB Netz AG: Richtlinie 482.8002 2012. Berlin.
- [Eck 2014]: Eck, Sven; Oßberger, Heinz; Oßberger, Uwe; Marsoner, Stefan; Ebner, Reinhold: Comparison of the fatigue and impact fracture behaviour of five different steel grades used in the frog of a turnout. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 2014. 6.
- [Efstathiou 2010]: Efstathiou, C.; Sehitoglu, H.: Strain hardening and heterogeneous deformation during twinning in Hadfield steel. Acta Materialia 2010. 5.
- [Every 2012]: Every, A. G.; Maznev, A. A.: Dispersion of an acoustic pulse passing through a large-grained polycrystalline film. Journal of the Acoustic Society of America 2012. 131(6).
- [Ewing 1957]: Ewing, W. M.; Jardetzky, W. S.; Press, F.: Elastic waves in layered media 1957. New York. McGraw-Hill.
- [Fendrich 2007]: Handbuch Eisenbahninfrastruktur 2007. Berlin Heidelberg New York. Springer.
- [Fischer 1979]: Fischer, F. D.; Steiner, H.; Schossmann, R.: Zur Ermittlung der Spannungen im Radüberlaufsbereich von Herzstückspitzen. ETR (Eisenbahntechnische Rundschau) 1979. 28 (7/8).
- [Frederick 1965]: Frederick, J. R.: Ultrasonic engineering 1965. New York. John Wiley and Sons.
- [GAMPT mbH]: GAMPT mbH: Technische Daten: Rayleighwellenaufsatz (Paar) für Sonden für GS200/GS200i. 18.10.2021.
- [GAMPT mbH]: GAMPT mbH: Technische Daten: Ultraschallsonde 1 MHz für GAMPT-Scan/FlowDop. 18.10.2021.
- [GAMPT mbH]: GAMPT mbH: Technische Daten: Ultraschallsonde 2 MHz für GAMPT-Scan/FlowDop. 18.10.2021.
- [GAMPT mbH 2015]: GAMPT mbH: Ultraschallechoskop GS200/GS200i Benutzerhandbuch 2015.
- [GAMPT mbH 2007]: GAMPT mbH: Versuchsanleitungen 2007.
- [GAMPT mbH 2016]: GAMPT mbH: Ultraschallechoskop GS200/GS200i 2016.
- [GAMPT mbH 2018]: GAMPT mbH: Rissprüfung mit Rayleighwellen 2018.

- [Graff 1991]: Graff, K. F.: Wave Motion in Elastic Solids 1991. New York. Dover Publications.
- [Granato 1956]: Granato, A.; Lücke, K.: Theory of Mechanical Damping Due to Dislocations. Journal of Applied Physics 1956. 6.
- [Granato 1966]: Granato, A. V.; Lücke, K.: The Vibrating String Model of Dislocation Damping 1966.
- [Harzallah 2010]: Harzallah, R.; Mouftiez, A.; Felder, E.; Hariri, S.; Maujean, J.-P.: Rolling contact fatigue of Hadfield steel X120Mn12. Wear 2010. 9-10.
- [Hecht A. 1986]: Hecht A.: Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe von Ultraschallrückstreuung 1986. Berlin.
- [Hirao 2000]: Hirao, M.; Ogi, H.; Suzuki, N.; Ohtani, T.: Ultrasonic attenuation peak during fatigue of polycrystalline copper. Acta Materialia 2000. 2.
- [Karaman 1998]: Karaman, I.; Sehitoglu, Huseyin; Gall, Ken; Chumlyakov, Yuriy I.: On The Deformation Mechanisms in Single Crystal Hadfield Manganese Steels. Scripta Materialia 1998. 6.
- [Karaman 2000]: Karaman, I.; Sehitoglu, H.; Beaudoin, A.J.; Chumlyakov, Y.I.; Maier, H.J.; Tomé, C.N: Modeling the deformation behavior of Hadfield steel single and polycrystals due to twinning and slip. Acta Materialia 2000. 9.
- [Kinra 1986]: Kinra, Vikram K.; Vu, Bien Q.: Diffraction of Rayleigh waves in a half-space. II. Inclined edge crack. The Journal of the Acoustical Society of America 1986. 6.
- [Kos 1988]: Kos, B.: Manganhartstahl und Verfahren zu seiner Herstellung 1988.
- [Krautkrämer 1986]: Krautkrämer, J.; Krautkrämer, H.: Werkstoffprüfung mit Ultraschall 1986. Berlin Heidelberg. Springer-Verlag.
- [Kutzner 1983]: Kutzner, J.: Grundlagen der Ultraschallphysik 1983. Stuttgart. BG Teuner.
- [Longo 2006]: Longo, R.; Vanlanduit, S.; Guillaume, P.: Laser vibrometer measurements of SAWs for non-destructive testing 2006.
- [Longo 2010]: Longo, Roberto; Vanlanduit, Steve; Vanherzeele, Joris; Guillaume, Patrick: A method for crack sizing using Laser Doppler Vibrometer measurements of Surface Acoustic Waves. Ultrasonics 2010. 1.
- [Maratray 1995]: Maratray, F.: High Carbon Manganese Austenitic Steels 1995. Paris. The International Manganese Institute.
- [Mason 1947]: Mason, W. P.; McSkimin, H. J.: Attenuation and Scattering of High Frequency Sound Waves in Metals and Glasses. Journal of the Acoustic Society of America 1947. 19(3).
- [Mason 1948]: Mason, W. P.; McSkimin, H. J.: Energy Losses of Sound Waves in Metals Due to Scattering and Diffusion. Journal of Applied Physics 1948. 19:940.
- [Mason 1958]: Mason, W. P.: Physical Acoustics and the Properties of Solids 1958. Princeton, N.J. Van Nostrand.
- [Meyendorf 2004]: Nondestructive Materials Characterization 2004. Berlin, Heidelberg, s.l. Springer Berlin Heidelberg.
- [Moghaddam 2012]: Moghaddam, E. G.; Varahram, N.; Davami, P.: On the comparison of microstructural characteristics and mechanical properties of high-vanadium austenitic manganese steels with the Hadfield steel. Materials Science and Engineering: A 2012.
- [Ogi 1997]: Ogi, Hirotsugu; Hirao, Masahiko; Minoura, Kiyoshi: Noncontact measurement of ultrasonic attenuation during rotating fatigue test of steel. Journal of Applied Physics 1997. 8.
- [Oliner 1978]: Acoustic Surface Waves 1978. Berlin Heidelberg New York. Springer-Verlag.
- [Ossberger 2013]: Ossberger, Uwe; Pletz, Martin; Eck, Sven; Daves, Werner: Validation of a finite element crossing model using measurements at an instrumented turnout 2013. Qingdao, China. Unpublished.
- [Österreicher 2019]: Österreicher, M.; Unterberger, W.: Aspekte zur Punkt- und Linienquellenthematik bei künstlicher Schwingungsanregung mittels Schwingungsgeneratoren 2019. 6. D-A-CH Tagung Erdbebeningenieurwesen & Baudynamik (D-A-CH 2019), Universität Innsbruck.
- [Papadakis 1963]: Papadakis, E. P.: Rayleigh and Stochastic Scattering of Ultrasonic Waves in Steel. Journal of Applied Physics 1963. 34(2).
- [Papadakis 1965]: Papadakis, E. P.: Revised Grain-Scattering Formulas and Tables. Journal of the Acoustic Society of America 1965. 37(4).

- [Pelletier 1992]: Pelletier, J. M.; Sauger, E.; Gachon, Y.; Vannes, A. B.: Mechanical and tribological properties of Hadfieldsteel coatings manufactured by laser processing. *Journal of Materials Science* 1992. 34.
- [Pletz 2014]: Pletz, M.; Daves, W.; Yao, W.; Ossberger, H.: Rolling contact fatigue of three crossing nose materials—Multiscale FE approach. *Wear* 2014. 1-2.
- [Pohl 2001]: Pohl, J.: Risstiefenmessung mit Ultraschall-Rayleighwellen 2001. 11.08.2021.
- [Prasad 1994]: Prasad, R.; Kumar, S.: Study of the influence of deformation and thermal treatment on the ultrasonic behaviour of steel. *Journal of Materials Processing Technology* 1994. 1.
- [Rayleigh 1885]: Rayleigh: On Waves Propagated along the Plane Surface of an Elastic Solid. *Proceedings of the London Mathematical Society* 1885. 1.
- [Resch 1985]: Resch, M. T.; Nelson, D. V.; Yuce, H. H.; Ramusat, G. F.: A surface acoustic wave technique for monitoring the growth behavior of small surface fatigue cracks. *Journal of Nondestructive Evaluation* 1985. 1.
- [Rokhlin 1972]: Rokhlin, L. L.: Scattering of Ultrasound in Polycrystalline Materials. *Soviet Physics-Acoustics* 18 1972. 18(1).
- [Rose 1998]: Rose, J. L.; Pelts, S. P.; Quarry, M. J.: A comb transducer model for guided wave NDE. *Ultrasonics* 1998. 1-5.
- [Rose 1996]: Rose, J. L.: *Ultrasonic comb transducer for smart materials* 1996. Bangalore, India.
- [Rose 1999]: Rose, J. L.: *Ultrasonic Waves in Solid Media* 1999. Cambridge University Press.
- [Sant 1987]: Sant, S. B.; Smith, R. W.: A study in the work-hardening behaviour of austenitic manganese steels. *Journal of Materials Science* 1987. 5.
- [Schaaffs 2001]: Schaaffs, W.: *Molekularakustik: Eine Einführung in die Zusammenhänge Zwischen Ultraschall und Molekülstruktur in Flüssigkeiten und Gasen* 2001. Springer.
- [Schiebold 2015]: Schiebold, Karlheinz: *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Ultraschallprüfung* 2015. Berlin. Springer Vieweg.
- [Scholte 1948]: Scholte, J. G.: On the large displacements commonly regarded as caused by Love-waves and similar dispersive surface waves 1948.
- [Sharpe 1980]: Sharpe, W. H.: *Research techniques in nondestructive testing* 1980. Academic Press.
- [Silk 1976]: Silk, M. G.: The determination of crack penetration using ultrasonic surface waves. *NDT International* 1976. 6.
- [Spreadborough 1960]: Spreadborough, J.: Stacking faults in iron–manganese and cobalt–nickel. *Acta Crystallographica* 1960. 8.
- [Srivastava 2008]: Srivastava, Ashok Kumar; Das, Karabi: Microstructural characterization of Hadfield austenitic manganese steel. *Journal of Materials Science* 2008. 16.
- [Teklu 2004]: Teklu, A.; Ledbetter, H.; Kim, S.k; Boatner, L.; McGuire, M.; Keppens, V.: Single-crystal elastic constants of Fe15Ni15Cr alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A-physical Metallurgy and Materials Science - METALL MATER TRANS A* 2004.
- [Tweeddale 1985]: Tweeddale, G.: Sir Robert Abbott Hadfield F. R. S. (1858-1940) and the discovery of manganese steel. *Notes and Records of the Royal Society of London* 1985. 1.
- [Viktorov 1958]: Viktorov, I. A.: Rayleigh-type waves on cylindrical surface. *Soviet Physics-Acoustics* 1958. 4.
- [Viktorov 1966]: Viktorov, I. A.: *Fisiceskie osnovy primeneniya ultrasvukovykh voln Relea i Lemba v tehnike*. 1966. Moskva. Nauka.
- [Viktorov 1967]: Viktorov, I. A.: *Rayleigh and Lamb waves* 1967. New York. Plenum Press.
- [Wiest 2008]: Wiest, M.; Daves, W.; Fischer, F. D.; Ossberger, H.: Deformation and damage of a crossing nose due to wheel passages. *Wear* 2008. 9-10.
- [Willems 1981]: Willems, H.; Goebbels, K.: Characterization of microstructure by backscattered ultrasonic waves. *Metal Science* 1981. 15.
- [Worden 2001]: Worden, K.: Rayleigh and Lamb Waves. *Strain* 2001. 37-4.
- [Zhang 2008]: Zhang, Fucheng; Lv, Bo; Wang, Tiansheng; Zheng, Chunlei; Zhang, Ming; Luo, Haihui; Liu, Hui: Microstructure and Properties of Purity High Mn Steel Crossing Explosion Hardened. *ISIJ International* 2008. 12.

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Skizzierter Aufbau einer Weiche [DB Netz AG 2012]	11
Abbildung 2: Phasendiagramm im thermodynamischen Gleichgewicht für ein Fe–12Mn–1C–0.32Si–0.1Cr System. Berechnet mit Thermo-Calc und unter Anwendung TCFE8 Datenbank [Martín 2017]	13
Abbildung 3: Härteverlauf mit zunehmendem Abstand zur Oberfläche für verschiedene Dicken der Explosionsmatten [Zhang 2008].....	15
Abbildung 4: Ausbreitungs- und Schwingungsrichtung einer Longitudinalwelle. Die Welle wird am linken Rand angeregt und breitet sich nach rechts aus, wobei die Welle den äußeren rechten Rand noch nicht erreicht hat [Krautkrämer 1986].....	16
Abbildung 5: Ausbreitungs- und Schwingungsrichtung einer Transversalwelle. Die Welle wird am linken Rand angeregt und breitet sich nach rechts aus, dabei schwingt sie quer (nach oben und unten) zur Ausbreitungsrichtung. Die Welle hat in dieser Abbildung den rechten Rand noch nicht erreicht [Krautkrämer 1986].....	17
Abbildung 6: Ausbreitungs- und Schwingungsrichtung einer Rayleighwelle. Das Teilchen vollführt eine elliptische Bewegung, da die Rayleighwellen aus gegenläufigen Anteilen von Longitudinal- und Transversalwellen besteht [Frederick 1965; Graff 1991]	18
Abbildung 7: Einfluss der Eindringtiefe der Rayleighwelle auf die Intensität [Silk 1976]	19
Abbildung 8: Funktion eines Comb-Wandlers	21
Abbildung 9: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Streumechanismen [Hecht A. 1986].....	24
Abbildung 10: Eine ebene Welle mit der Wellenzahl k_i trifft auf ein Versetzungssegment mit der Länge L . An den Randpunkten der Länge L wird das Versetzungssegment blockiert. Je nach Orientierung des Versetzungssegments schwingt das Segment und erzeugt sekundäre gestreute Wellen mit dem Wellenvektor k_S [Barra 2015].....	27
Abbildung 11: Abhängigkeit des Transmissionsfaktors vom Verhältnis zwischen Risstiefe und Wellenlänge [Pohl. 11.08.2021]	31
Abbildung 12: Verhalten der Rayleighwelle an einem Riss [Meyendorf 2004; Rau. 11.08.2021].....	31
Abbildung 13: Vorderansicht der rechten Paneele des GS200i [GAMPT mbH 2015]	32
Abbildung 14: Die GAMPT 1 und 2 MHz Ultraschallsonden. Die blaue Markierung steht für eine 1 MHz Sonde. Die 2 MHz Sonde besitzt eine rote Markierung. Die Federn, welche die Sonden umgeben wurden für andere Experimente, welche nicht im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, benötigt. Diese dienen somit keinem Zweck für diese Arbeit.	33
Abbildung 15: Comb-Wandler für 1 MHz (links) und 2 MHz (rechts)	34
Abbildung 16: Anzeige des Register Params in GS-EchoView.....	35
Abbildung 17: Aufnahmen der Probenkörper	39
Abbildung 18: Probenfertigung für die Metallographie	41
Abbildung 19: Probenkörper (jeweils Schienenkopf und Schienenfuß), welche für die Metallographie verwendet wurden.....	41
Abbildung 20: Position der MIA-Aufnahmen und Verlauf der Härteprüfung am a) Schienenkopf und b) Schienenfuß.....	42
Abbildung 21: Messaufbau am Schienenfuß. Mit dem Messschieber wurden die äußeren Kämme der Comb-Wandler parallel zueinander ausgerichtet und die exakte Distanz gemessen.	43
Abbildung 22: Messaufbau am Schienenkopf. Der Probenkörper steht auf einer Antivibrationsmatte. Die Position der rechten Sonde und somit die Distanz zwischen den Sonden wurde schrittweise erhöht.	44
Abbildung 23: Zustandekommen des Ultraschallmesssignals für 1 MHz. Die durchgehenden Linien geben den direkten Weg der Rayleighwelle an, welcher gemessen und ausgewertet wurde. Die strichlierten Linien geben Reflexionen von den Schnittkanten des Probenkörpers an. Striche gleicher Größe geben Reflexionen von der linken Schnittkante und Striche mit variierender Größe Reflexionen von der rechten Schnittkante des Probenkörpers an.....	46

Abbildung 24: Zustandekommen des Ultraschallmesssignals für 2 MHz. Die durchgehenden Linien geben den direkten Weg der Rayleighwelle an, welcher gemessen und ausgewertet wurde.	48
Abbildung 25: Messsignale vor und nach der Normierung für 1 MHz Sonden am Schienenkopf der 1x explosionsverfestigten Schienenprobe. Die Werte in Klammern geben Zeit und Amplitude der Maxima an. Durch die Normierung auf das Signal bei 3 mm (geringste Distanz) wurden die Amplituden ins Verhältnis zum Maximum bei 3 mm gesetzt; a) Rohsignal; b) normiertes Signal.	49
Abbildung 26: Messsignale vor und nach der Normierung für 2 MHz Sonden am Schienenkopf der 1x explosionsverfestigten Schienenprobe. Die Werte in Klammern geben Zeit und Amplitude der Maxima an. Durch die Normierung auf das Signal bei 3 mm (geringste Distanz) wurden die Amplituden ins Verhältnis zum Maximum bei 3 mm gesetzt. Bei 2 MHz wurde nur 3 Messungen bis zu einer Distanz von 70 mm durchgeführt; a) Rohsignal; b) normiertes Signal.	50
Abbildung 27: Beispielhafte Messsignale die nach dem Sanity-Check für ungültig erklärt wurden.	51
Abbildung 28: Weg über Zeit Diagramme der Maxima der Messsignale für 1 MHz Messungen nach dem durchgeführten Sanity Check a) am Schienenfuß und b) am Schienenkopf	52
Abbildung 29: Normiertes Amplitudenverhältnis über Weg für 1 MHz Messungen a) am Schienenfuß und b) am Schienenkopf mit durchgeführten Sanity Check.	53
Abbildung 30: Weg über Zeit Diagramme der Maxima der Messsignale für 2 MHz Messungen a) am Schienenfuß und b) am Schienenkopf mit durchgeführten Sanity Check.	55
Abbildung 31: Normiertes Amplitudenverhältnis über Weg für 2 MHz Messungen a) am Schienenfuß und b) am Schienenkopf mit durchgeführten Sanity Check.	56
Abbildung 32: Vergleich der gemessenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten mit Standardabweichung für 1 und 2 MHz Messungen an a) Schienenkopf und b) Schienenfuß	58
Abbildung 33: Vergleich der gemessenen Dämpfungskoeffizienten mit Standardabweichung für 1 und 2 MHz Messungen an a) Schienenkopf und b) Schienenfuß	60
Abbildung 34: Härteverlauf für die nicht, 1x und 2x explosionsverfestigte Probe an a) Schienenkopf) und b) Schienenfuß	63
Abbildung 35: MIA-Aufnahmen und für die Korngrößenbestimmung angelegte Linien an der Position Schienenkopf mitte für: a) nicht explosionsverfestigte; c) 1x explosionsverfestigt und e) 2x explosionsverfestigte Probe. Die eingerahmte Position gibt die Position für nebenstehenden Aufnahmen mit 50-facher Vergrößerung an b) nicht explosionsverfestigte; d) 1x explosionsverfestigte und f) 2x explosionsverfestigte Probe.....	65
Abbildung 36: Bestimmte Korngröße als Ergebnis des Linienschnittverfahrens am Schienenkopf für die Positionen Schienenkopf mitte, Schienenkopf links, Schienenkopf rechts.	66
Abbildung 37: MIA-Aufnahmen und für die Korngrößenbestimmung angelegte Linien an der Position Schienenkopf links für: a) nicht explosionsverfestigte; c) 1x explosionsverfestigt und e) 2x explosionsverfestigte Probe. Die eingerahmte Position gibt die Position für Aufnahmen mit 50-facher Vergrößerung an b) nicht explosionsverfestigte; d) 1x explosionsverfestigte und f) 2x explosionsverfestigte Probe.....	67
Abbildung 38: MIA-Aufnahmen und für die Korngrößenbestimmung angelegte Linien an der Position Schienenkopf rechts für: a) nicht explosionsverfestigte; c) 1x explosionsverfestigt und e) 2x explosionsverfestigte Probe. Die eingerahmte Position gibt die Position für Aufnahmen mit 50-facher Vergrößerung an b) nicht explosionsverfestigte; d) 1x explosionsverfestigte und f) 2x explosionsverfestigte Probe.....	68
Abbildung 39: MIA-Aufnahmen und für die Korngrößenbestimmung angelegte Linien an der Position Schienenfuß außen für: a) nicht explosionsverfestigte; c) 1x explosionsverfestigt und e) 2x explosionsverfestigte Probe. Die eingerahmte Position gibt die Position für Aufnahmen mit 50-facher Vergrößerung an b) nicht explosionsverfestigte; d) 1x explosionsverfestigte und f) 2x explosionsverfestigte Probe.....	69

Abbildung 40: MIA-Aufnahmen und für die Korngrößenbestimmung angelegte Linien an der Position Schienenfuß innen für: a) nicht explosionsverfestigte; c) 1x explosionsverfestigt und e) 2x explosionsverfestigte Probe. Die eingerahmte Position gibt die Position für Aufnahmen mit 50-facher Vergrößerung an b) nicht explosionsverfestigte; d) 1x explosionsverfestigte und f) 2x explosionsverfestigte Probe.....	70
Abbildung 41: Die durch das Linienschnittverfahren ermittelte Korngröße am Schienenfuß für die Positionen Schienenfuß außen und Schienenfuß innen.....	71
Abbildung 42: Die Sonden werden jeweils links und rechts von der Rissflanke positioniert. Die Distanz zwischen den Sonden wird annähernd gleich gewählt und die genaue Distanz mit Messschieber gemessen. Die Sonden werden nach jeder Messung weiter zur unteren Kante des Probenkörpers versetzt. a) Messung Nr. 1; b) Messung Nr. 2; c) Messung Nr. 3; d) Messung Nr.4. e) Die Referenzmessung ohne Riss wurde neben Riss durchgeführt.....	73
Abbildung 43: Messsignal für die durchgeführte Messung am Riss. Von der Referenzmessung auf Nr.1 ist eine Amplitudenschwächung um 53% des Amplitudenverhältnisses zu beobachten. Von Nr.1 auf Nr.2 ist eine weitere Amplitudenschwächung auf 10% der ursprünglichen Amplitude der Referenzmessung zu beobachten und die Laufzeit hat sich im Vergleich zur Referenz um 1,69 μ s erhöht. In der Messung Nr. 3 ist schwaches Rauschen zu sehen. Bei Messung Nr.4 ist kein Signal mehr zu beobachten.....	74
Abbildung 44: Vergleich der gemessenen Werte der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rayleighwellen mit den theoretisch ermittelten für a) 1 und b) 2 MHz.	77
Abbildung 45: Vergleich der Mittelwerte mit Standardabweichungen der gemessenen Dämpfungskoeffizienten für die Messung mit 1 MHz Sonden mit den theoretisch berechneten Dämpfungskoeffizienten. Für a) Schienenfuß und b) Schienenkopf.	82
Abbildung 46: Vergleich der Mittelwerte mit Standardabweichungen der gemessenen Dämpfungskoeffizienten für die Messung mit 2 MHz Sonden mit den theoretisch berechneten Dämpfungskoeffizienten. Für a) Schienenfuß und b) Schienenkopf.	85

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einflüsse auf Absorptionskoeffizient, Streukoeffizient und Ausbreitungsgeschwindigkeit von Rayleighwellen	29
Tabelle 2: Einstellungen der Transmitter Receiver - Moden	33
Tabelle 3: Abmessungen der Zähne der 1 und 2 MHz Comb-Transducer	34
Tabelle 4: Abmessungen und Beschriftungen der Probenkörper.....	39
Tabelle 5: Messparameter: Einstellungen am GS200 und in GS-EchoView.....	45
Tabelle 6: Distanz zwischen den nächsten Kammzähnen und zur unteren Kante der durchgeführten Messungen.....	72
Tabelle 7: Elastische Konstanten eines Einkristalls eines austenitischen Edelstahls (70Fe-15Ni-15Cr) [Teklu 2004]	79
Tabelle 8: Messunsicherheiten des Messsetups mit dem GS-200 und Lösungsvorschläge zur Vermeidung dieser.....	90