

Schriftenreihe

LBF-Berichte

FB-258

Dr.-Ing. Christoph Bleicher, Dr.-Ing. Ralf Tschuncky, Dipl.-Ing. (FH) Jan Hesselner,
Kai Schnabel, M.Sc., Fabian Weber, M.Sc., Dr.-Ing. Rainer Wagener, Dr.-Ing. Jörg
Baumgartner, Dr.-Ing. Heinz Kaufmann

Schlussbericht zum BMWi-Vorhaben »unverDROSSen«

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit
und Systemzuverlässigkeit LBF

Schriftenreihe

LBF-Berichte

FB-258

Dr.-Ing. Christoph Bleicher, Dr.-Ing. Ralf Tschuncky, Dipl.-Ing. (FH) Jan Hesseler,
Kai Schnabel, M.Sc., Fabian Weber, M.Sc., Dr.-Ing. Rainer Wagener, Dr.-Ing. Jörg
Baumgartner, Dr.-Ing. Heinz Kaufmann

Schlussbericht zum BMWi-Vorhaben »unverDROSSen«

© Fraunhofer LBF

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

Bartningstr. 47

64289 Darmstadt

Telefon 06151 705-0

Telefax 06151 705-214

E-Mail info@lbf.fraunhofer.de

URL www.lbf.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Schlussbericht zum BMWi-Vorhaben „unverDROSSen“

Detektion, Prüfung und Bewertung von Dross im Großgussbereich

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 0325802A im Zeitraum vom 01.01.2015 bis 30.06.2018 gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Autoren:

Dr.-Ing. Christoph Bleicher (Gesamtprojektleiter)

Dr.-Ing. Ralf Tschuncky

Dipl.-Ing. (FH) Jan Hesseler

Kai Schnabel, M.Sc.

Fabian Weber, M.Sc.

Dr.-Ing. Rainer Wagener

Dr.-Ing. Jörg Baumgartner

Dr.-Ing. Heinz Kaufmann

Fraunhofer Gesellschaft vertreten durch die Forschungsstellen:

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Darmstadt 19.12.2018

Vorwort

Der vorliegende Abschlussbericht entstand im Rahmen des durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projektes „unverDROSSen“ am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF in Darmstadt in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP in Saarbrücken.

Für die Förderung des Vorhabens durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie sowie den daran beteiligten Projektpartnern ACS-Solutions GmbH, BMB Gesellschaft für Materialprüfung mbH, Friedrich Wilhelms – Hütte Eisenguss GmbH, MAN Diesel & Turbo SE, Meuselwitz Guss - Eisengießerei GmbH, Siempelkamp Giesserei GmbH, ThyssenKrupp Industrial Solutions GmbH und WRD GmbH sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Kurzfassung

Für Großgussbauteile aus Gusseisen mit Kugelgraphit stellt Dross eine der Ungängen dar, die die quasi-statischen wie auch die zyklischen Werkstoffkennwerte am stärksten negativ beeinflusst. Dabei lässt sich Dross insbesondere bei großen Baueilwanddicken, etwa bei Komponenten für die Windenergie oder den Großmaschinenbau, nur schwer vermeiden. Meist werden für die gießoberseitig auftretende Ungänge Materialzugaben auf jedes Bauteil aufgegeben, die den Dross auffangen und dessen anschließendes mechanisches Abarbeiten ermöglichen sollen.

Um unnötige Materialzugaben und das Abarbeiten zu vermeiden sowie auch Bauteile mit Dross hinsichtlich ihrer Lebensdauer richtig bemessen zu können, werden im Rahmen des Abschlussberichtes zum Vorhaben „unverDROSSen“ erarbeitete Ergebnisse zum zyklischen Werkstoffverhalten von Dross sowie ein Bauteilbeurteilungskonzept anhand von am Bauteil zerstörungsfrei gemessenen Kennwerten, wie der Dichte und der Steifigkeit des Drosses, diskutiert. Dabei liegt ein weiterer Schwerpunkt auf den Methoden, die eine Detektion von Dross zerstörungsfrei zulassen und der Beschreibung entsprechender Verfahren wie der Ultraschalltechnik.

Dazu werden neue und bereits etablierte Prüfmethode der zerstörungsfreien Prüfung, hinsichtlich der Fähigkeit Dross zu detektieren, untersucht und deren Wirkungsweise und Anwendungsgrenzen beschrieben. Ausgehend von zerstörungsfreien Messungen an Versuchskörpern werden Schwingproben aus den Versuchskörpern und Bauteilen im Dross und im ungängenfreien Bereich entnommen, exemplarisch für den EN-GJS-400 hinsichtlich des Schwingfestigkeitsverhaltens analysiert und Verbindungen zwischen der am Dross gemessenen Dichte sowie dem fiktiven Elastizitätsmodul zur Schwingfestigkeit und der zerstörungsfreien Prüfung gezogen.

Den Abschluss bildet die Beschreibung eines dehnungs- und spannungsbasierten Bauteilbeurteilungskonzeptes für Dross auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse.

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzdarstellung	1
1	Ausgangssituation und Zielsetzung des Vorhabens	1
2	Voraussetzungen des Vorhabens	3
3	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
3.1	Planung des Vorhabens	4
3.2	Ablauf des Vorhabens.....	6
4	Technische Grundlagen	7
4.1	Experimentelle Ermittlung des zyklischen Werkstoffverhaltens	7
4.1.1	Theoretische Grundlagen.....	7
4.1.2	Prüftechnik	14
4.1.3	Versuchsdurchführung	14
4.2	Zerstörungsfreie Werkstoffuntersuchungen	15
4.2.1	Ermittlung des quasi-statischen Spannungs-Dehnungsverhaltens	15
4.2.2	Magnetpulverprüfung	16
4.2.3	Magnetische Streuflussprüfung	17
4.2.4	Computer-Tomographieaufnahmen	18
4.2.5	Schwefelnachweis durch Baumann-Abdrücke.....	19
4.2.6	Ultraschall.....	19
4.2.7	3MA (Mikromagnetische Materialcharakterisierung).....	20
4.2.8	Mikromagnetische Prüfgeräte	22
4.3	Konzepte und Richtlinien für die Bemessung im Eisengroßguss	24
4.4	Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren oder Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benötigt wurden	25
4.5	Angabe der verwendeten Fachliteratur	25
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	26
II.	Eingehende Darstellung	29
6	Versuchskörper, Bauteile und Probenentnahme	29
6.1	Zerstörungsfreie Untersuchungen an Versuchskörpern und Bauteilen	32
6.1.1	Mechanisierte zerstörungsfreie Untersuchungen an Versuchskörpern aus GJS	32
6.1.2	Anwendbarkeit und Randbedingungen für den Einsatz der Prüfmethode	33

6.1.3	Mechanisierte Ultraschallprüfung	34
6.1.4	Mechanisierte 3MA (Mikromagnetische Prüfungen)	41
6.1.5	Magnetpulverprüfung	44
6.1.6	Mechanisierten Streuflussprüfung von der Dross-Seite	47
6.1.7	Zusammenfassung der Anwendbarkeit	49
6.2	Entnahme der Schwingproben aus Versuchskörpern und Bauteilen.....	49
6.3	Schwingprobe.....	52
6.4	Quasi-statische Werkstoffkennwerte aus Zugversuchen	52
6.5	Röntgen-Computertomographie an den Schwingproben.....	53
6.6	Baumann-Abdrücke an den Schwingproben	54
6.7	Magnetpulverprüfung an den Schwingproben	55
7	Ergebnisse der Werkstoffuntersuchungen.....	57
7.1	Schwingfestigkeit des Grundwerkstoffes.....	57
7.2	Charakterisierung des Drosses anhand fiktiver Elastizitätsmoduln	58
7.3	Schwingfestigkeit des Drosses	62
7.4	Ermittlung einer Dross-abhängigen Kerbwirkungszahl K_{fD}	65
7.5	Metallographie des Grundwerkstoffes	67
7.6	Metallographie des Drosses	69
8	Auswertung der zFP-Daten	73
8.1	Ultraschall.....	74
8.2	Computer-Tomographie.....	78
8.3	Ermittlung der Tiefenausdehnung des Drosses	83
9	Bauteilbeurteilungskonzept.....	86
9.1	Numerische Untersuchungen zum Bemessungskonzept.....	86
9.1.1	Synthetischer Dross	88
9.1.2	Numerische Untersuchung an einem Dross behafteten Bauteil	95
9.1.3	Zusammenfassung zur Modellierung von Dross in einer Finiten-Elemente Umgebung	99
9.2	Synthetische Spannungswöhlerlinien	100
9.3	Synthetische Dehnungswöhlerlinien.....	102
9.4	Bemessungskonzept	109
9.5	Anwendung des Bemessungskonzepts	110

10	Bezug zum Bericht des DNV GL	114
11	Nachweis von Veröffentlichungen.....	115
12	Zusammenfassung und Ausblick	116
13	Literatur	118
14	Bildverzeichnis.....	125
15	Tabellenverzeichnis.....	130
16	Abkürzungs- und Symbolverzeichnis.....	131
Anhang T		
	Tabellen.....	T 1 bis T 9
Anhang B		
	Bilder.....	B 1 bis B 15
Anhang I		
	Technischer Anhang Fraunhofer IZFP.....	I 1 bis I 96
Anhang V		
	Verfahrensanweisung zur mechanisierten Ultraschallprüfung.....	V 1 bis V 18

I. Kurzdarstellung

1 Ausgangssituation und Zielsetzung des Vorhabens

Großgussbauteile aus Kugelgraphitguss (GJS) bieten für die Windkraftindustrie durch hohe gestalterische Freiräume und den geringen Fertigungsaufwand unverzichtbare Vorteile. Da alle tragenden Bauteile einer bis zu 250t schweren Windenergiegondel aus GJS hergestellt sind, was etwa 30% der Gondelmasse entspricht, bestehen seit jeher Bestrebungen das Leistungsgewicht (Masse/Leistung) von Windenergieanlagen durch eine höhere Werkstoffausnutzung zu reduzieren. Dies bedeutet gleichzeitig erhöhte Anforderungen an die Kenntnisse des zyklischen Werkstoffverhaltens der verwendeten GJS-Werkstoffe, vor allem im Zusammenhang mit Werkstoffungängen. In diesem Zusammenhang besteht im Bereich der Herstellung von Großgussbauteilen aus Kugelgraphitguss die Herausforderung, oxidische, sulfidische und silikatische Verunreinigungen (Dross) am Bauteil zuverlässig mittels einer zerstörungsfreien Prüfmethode (ZfP) erkennen und die Ausprägung des Drosses bewerten zu können. Dross ist gießtechnisch schwer zu beeinflussen und stellt die Gießereien im laufenden Tagesgeschäft und in der Werkstoffprüfung immer wieder vor Herausforderungen in der Bauteilbemessung von drossbehafteten Bauteilen sowie hinsichtlich dessen Abarbeitung und den damit verbundenen wirtschaftlichen Folgen. Da für eine Bauteilbemessung exakte mechanische Kennwerte für Dross fehlen und Zertifizierer (etwa /DNV16/) sowie Kunden daher komplett drossfreie Bauteile fordern, arbeiten Gießer bisher mit Materialzugaben, die den Dross „auffangen“ sollen. Der Materialzuschlag ist dann komplett abzuarbeiten und bedarf eines enormen personellen Einsatzes zusätzlich zu der einhergehenden körperlichen Belastung für die Mitarbeiter in der Produktion, wenn der Dross an schwer zugänglichen Stellen nicht maschinell, sondern nur von Hand zu entfernen ist. Umso problematischer ist es jedoch, wenn durch das komplette Entfernen des Drosses die zulässige Materialstärke unterschritten wird. Dies zieht eine nachträgliche Betriebsfestigkeitsberechnung oder ein aufwändiges Schweißen dieser Stellen mit einer erneuten Bauteilfreigabe durch die Zertifizierungsstellen nach sich. Ist eine Nacharbeit am Bauteil überhaupt nicht durchführbar, kommt es zum Ausschuss und Neuabguss des Bauteils. Ein Neuabguss erfordert einen hohen Ressourcenaufwand, wobei das neuerliche Auftreten von Gefügefehlern nicht auszuschließen ist. Daher belastet der Gefügefehler Dross die energetischen, technischen, personellen und finanziellen Ressourcen bei der Herstellung neuer Windenergieanlagen enorm und stellt die Gießer und Anlagenbauer vor große Herausforderungen vor dem Hintergrund erhöhter Nachfrage und steigender Anforderungen im Windenergiebereich.

Aktuell fehlen Methoden zur Berücksichtigung von Dross, Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP), die Dross klar nachweisen und klassifizieren können, sowie eine Zuordnung der statischen und zyklischen Festigkeiten des Drosses zu den Klassen. Bislang wird mit angenommenen Materialkennwerten gerechnet, ohne diese Kennwerte zuverlässig am Bauteil nachweisen zu können. Ein Nachweis der Bauteilsicherheit drossbehafteter Großgussbauteile aus Eisenguss wird aber zukünftig nur dann möglich sein, wenn eine Korrelation zwischen den Ergebnissen einer zerstörungsfreien Prüfung und der zyklischen Beanspruchbarkeit herzustellen ist. Für die geforderte Steigerung der Leistungsdichte von Windenergieanlagen (WEA) und anderen Großgusskomponenten, wie z.B. Schiffsmotoren, und die Reduzierung von Herstellungskosten sowie des Energieverbrauchs mit einer Reduzierung des Carbon Footprints, sind die zusätzlichen Aufwände, die im Rahmen von Dross entstehen, nicht zu rechtfertigen und erfordern daher neue Nachweismethoden der Bauteilsicherheit. Für die Windenergie wird

ein schnellerer und zuverlässigerer Ausbau bei einer deutlichen Reduzierung der Herstellungskosten sowie der energetischen Amortisierung möglich.

Das Gesamtziel des Forschungsprojektes „unverDROSSen“ liegt somit in der Entwicklung eines Konzeptes zum sicheren Umgang mit dem Werkstofffehler Dross bei Gusseisen mit Kugelgraphit in der Bauteilauslegung und -herstellung von Großgusskomponenten für Windenergieanlagen und anderer Komponenten des Anlagen- und Maschinenbaus. Dabei steht die Entwicklung einer Methode im Rahmen der Bauteilauslegung, -herstellung und -überprüfung mittels zerstörungsfreier Prüfmethode für eine kosten-, energie- und materialschonende Herstellung von Großgussbauteilen aus Kugelgraphitguss im Vordergrund. Ein Teilziel ist dabei die Verringerung von Konservativitäten des Bauteilauslegungsprozesses sowie in der Material- und Bauteilnutzung durch Bearbeitungszugaben oder das Verschrotten von ungenutzten Bauteilen zu vermeiden bzw. zu verringern. Damit soll eine direkte Leistungssteigerung des einzelnen Gießereiprodukts aber auch der Gesamtanlage erreicht werden. Ein weiteres Teilziel betrifft die Ableitung eines Dross-Festigkeitsklassen-Systems für die Verbindung der Erscheinungsformen von Dross mit ermittelten statischen und zyklischen Materialkennwerten. Das letzte Teilziel ist dabei die Weiterentwicklung von ZfP-Maßnahmen, um den Dross zu detektieren, abzubilden und zu charakterisieren (klassifizieren) sowie die versuchstechnische Beschreibung des drossbehafteten Gefüges durch zerstörende Materialuntersuchungen.

Aus den bestehenden Herausforderungen

- der Nachweisbarkeit von Dross an Großgussbauteilen,
- dem Fehlen von Methoden für einen standardisierten Lebensdauernachweis für mit Dross behafteten Bauteile,
- dem Fehlen von zyklischen und quasi-statischen Werkstoffkennwerten und
- der Verknüpfung von ZfP-Daten mit diesen Werkstoffdaten

ergibt sich für das Forschungsvorhaben „unverDROSSen“ die Aufgabe

- der Ertüchtigung von ZfP-Verfahren für den oberflächennahen sowie volumetrischen Nachweis von Dross,
- der Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfkonzepthes zur Detektion von Dross an Großgussbauteilen in den Gießereien,
- der Bereitstellung von quasi-statischen und zyklischen Werkstoffkennwerten für Dross,
- der Verknüpfung von zerstörungsfrei und zerstörend ermittelten Werkstoffkennwerten sowie
- der Ableitung eines Lebensdauernachweiskonzeptes und dessen Abstimmung mit Zertifizierungsorganen für mit Dross behaftete Bauteile.

2 Voraussetzungen des Vorhabens

Am Vorhaben „unverDROSSen“ nahmen neben dem Fraunhofer LBF, dem Fraunhofer IZFP, die Meuselwitz Guss – Eisengießerei GmbH, die Siempelkamp Giesserei GmbH, die Friedrich Wilhelms-Hütte Eisenguss GmbH, ACS-Solutions GmbH als Dienstleister im Bereich ZfP, ThyssenKrupp Industrial Solutions AG als Hersteller von Gesteinsmühlen, die WRD GmbH als Hersteller von Windenergieanlagen, MAN Diesel & Turbo als Gießer und Hersteller von Schiffsantrieben und die BMB Gesellschaft für Materialprüfung mbH teil.

Auf Seiten der Zertifizierung hatte der DNV GL über eine Unterbeauftragung als richtliniengabendes und zertifizierendes Organ das Projekt begleitet. Insbesondere wurden durch den DNV GL das Gesamtergebnis begutachtet.

Durch die beteiligten Gießereien sowie ThyssenKrupp Industrial Solutions wurden die Versuchskörper und durch Siempelkamp, die WRD GmbH sowie die Friedrich Wilhelms-Hütte Bauteilabschnitte für die Entnahme von Schwingproben sowie für die zerstörungsfreien Prüfungen bereitgestellt. Zudem unterstützte die Industrie beim Überarbeiten und Trennen der Versuchskörper sowie bei der Ermittlung quasi-statischer Werkstoffkennwerte.

Daneben führte die ACS und BMB GmbH in Zusammenarbeit mit den beiden Fraunhofer-Instituten umfangreiche zerstörungsfreie Prüfungen an den Versuchskörpern im Ganzen, an überarbeiteten Versuchskörpern, den daraus entnommenen Schwingproben sowie Bauteilen durch. Hierzu kamen zerstörungsfreie Prüfverfahren wie die Ultraschall- und die röntgenbasierte Durchstrahlung zum Einsatz, um hieraus messbare Kennwerte für die Bauteillebensdauerabschätzung abzuleiten.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

3.1 Planung des Vorhabens

Der Arbeitsplan ist in Bild 1 dargestellt. In diesem finden sich zudem folgende Projekt-Meilensteine:

MS 1: Festlegung eines Prüfverfahrens für die optimale Drossdetektion (Oktober 2016)

Zum Meilenstein 1 liegt basierend auf den Ergebnissen der zerstörungsfreien Untersuchungen an den Platten und Bauteilen die Kenntnis darüber vor, welche Verfahren praxisnah nach dem Stand der Wissenschaft für eine Drossdetektion optimal zu nutzen ist. Darauf aufbauend werden diese Verfahren eingehender untersucht und zum Ende des Projekts deren Anwendung in Verfahrensanweisungen festgehalten. Da alle praxisüblichen und eine Vielzahl weiterer ZfP-Verfahren im Projekt zum Einsatz kommen, ist dieser Meilenstein sicher zu erreichen. Sollte sich kein ausgezeichnetes Prüfverfahren durch die Untersuchungen ermitteln lassen, wird untersucht ob eine Kombination von verschiedenen Prüfmethoden (z.B. Oberflächen- und Volumenprüfverfahren) die Detektion von Dross verbessert und für diese kombinierte Methode eine Vorgehensweise bestimmt.

MS 2: Koppelung der statischen und dynamischen Festigkeiten über Drossklassen mit der ZfP (Juli 2017)

Bis zum Meilenstein 2 im letzten Jahr des Vorhabens liegen Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen der ZfP und den in statischen und zyklischen Versuchen ermittelten Materialkennwerten des Drosses vor, die über ein Dross-Festigkeitsklassen-System miteinander verbunden werden. Lässt sich eine solche Einteilung nicht ermitteln, lassen dennoch die im Projektvorhaben soweit ermittelten Kenntnisse über die Prüfbarkeit von Dross und die ermittelten Werkstoffkennwerte eine spezifische Bauteilprüfung zu.

MS 3: Projektabschluss (Dezember 2017)

Mit dem Meilenstein 3 schließt das Projekt ab. Bis dorthin wurden umfangreiche zerstörende und zerstörungsfreie Untersuchungen an mit Dross behafteten Bauteilen und Versuchskörpern durchgeführt und die Kenntnisse zur Prüfbarkeit deutlich erweitert. Neben eines Dross-Festigkeits-Klassensystems und der Verbesserung des Detektion von Dross wurde ebenso ein Bemessungskonzept für mit Dross behaftete Bauteile ermittelt. Abschließend findet eine Überführung der Ergebnisse durch die beteiligten Unternehmen und durch die Einbeziehung des Germanischen Lloyd als Zertifizierungsgesellschaft in die Praxis statt.

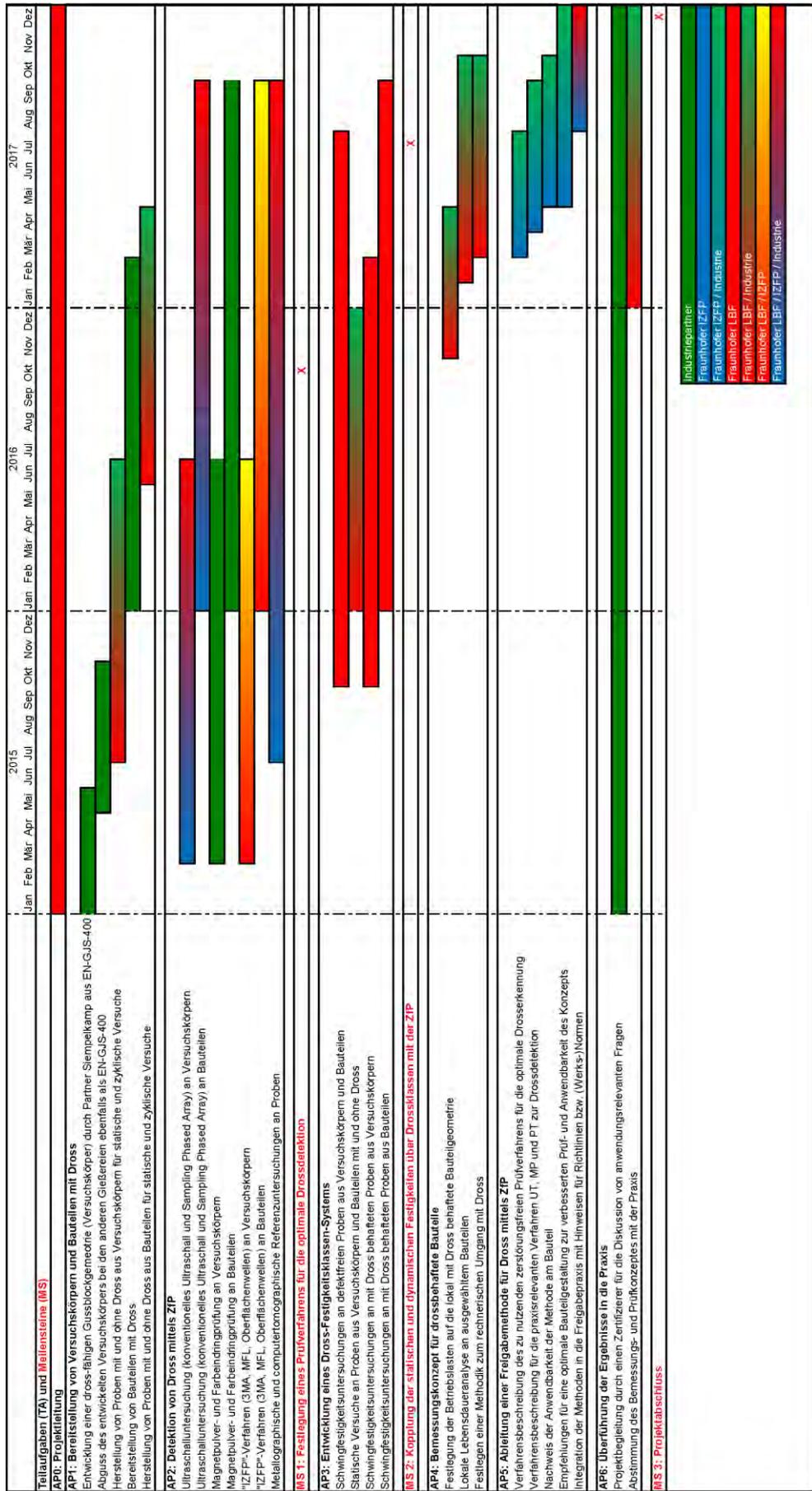


Bild 1 Projektplan

3.2 Ablauf des Vorhabens

Durch alle Projektpartner wurde im 1. Halbjahr 2017 eine 6-monatige kostenneutrale Projektverlängerung beantragt. Diese ergab sich auf Grund des ungeplant hohen Einsatzes an zerstörungsfreien Messungen an den Versuchskörpern ohne und mit abgearbeiteter Gusschicht. Die Abarbeitung und die anschließende erneute Vermessung der Versuchskörper, die auf Grund fehlender Möglichkeiten der Prüfkopfkopplung an der Oberfläche der Versuchskörper notwendig geworden war, zog umfangreiche mechanische Bearbeitungen sowie einen hohen logistischen Aufwand nach sich.

Darüber hinaus wurden Bauteile durch die Projektpartner teilweise erst spät und teilweise ohne Dross zur Verfügung gestellt. Dies zog im Falle eines Bauteils einen erneuten Abguss und einen insgesamt mehrere Monate langen Zeitverzug nach sich. Auch nach dem Neuabguss des Bauteils konnte, wahrscheinlich auf Grund zu geringer Wanddicken, kein Dross detektiert und damit keine Schwingproben entnommen werden. Die dennoch durchgeführten zerstörungsfreien Untersuchungen an dem ersten und dem neu abgegossenen Bauteil führten zu Verzögerungen im Ablauf des Vorhabens. Dennoch wurde der Meilenstein MS 1 planmäßig im Oktober 2016 erreicht.

4 Technische Grundlagen

4.1 Experimentelle Ermittlung des zyklischen Werkstoffverhaltens

4.1.1 Theoretische Grundlagen

Um die zyklische Beanspruchbarkeit des Grundwerkstoffes sowie des Drosses ermitteln zu können, werden dehnungsgeregelte Wöhlerversuche unter konstanten Belastungsamplituden an den aus Versuchskörpern und Bauteilen entnommenen Schwingproben zum Nachweis des zyklischen Werkstoffverhaltens durchgeführt. Das Ergebnis wird in Wöhlerlinien dargestellt. Ein besonderer Fokus liegt bei der Auswertung zudem auf der Ermittlung der Steifigkeit bzw. des fiktiven Elastizitätsmoduls des Drosses.

Die durchgeführten Schwingfestigkeitsuntersuchungen unter konstanten Dehnungsamplituden erlauben die Bestimmung des zyklischen Werkstoffverhaltens auf Basis von sich zeitlich ändernden Spannungs-Dehnungshysteresen sowie auf Basis von Dehnungs-Wöhlerlinien.

Zur Ermittlung des zyklischen Werkstoffverhaltens unter Dehnungsregelung werden elastische und plastische Dehnungsanteile der werkstoffabhängigen Spannungs-Dehnung-Hysteresen bei halber Anrisschwingspielzahl ausgewertet. Eine schematische Darstellung einer Spannungs-Dehnung-Hysterese zeigt Bild 2. Darin ist

- ϵ die Dehnung
- ϵ_e die Dehnungsamplitude
- ϵ_m die Mitteldehnung
- ϵ_e die elastische Dehnung
- ϵ_p die plastische Dehnung
- ϵ_t die totale Dehnung

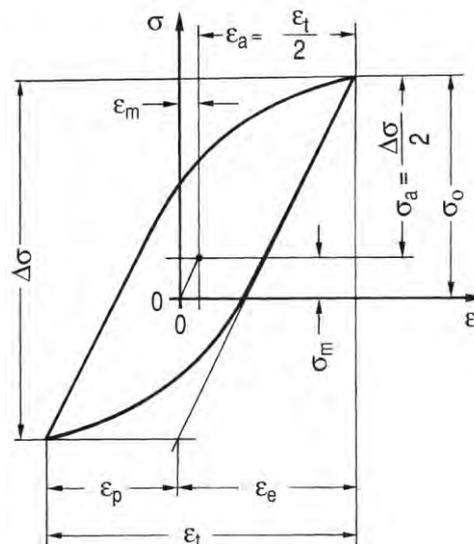


Bild 2 Kenngrößen der Spannungs-Dehnung-Hysterese in Anlehnung an /Hai06/

Um dem unterschiedlichen Werkstoffverhalten im Bereich der Kurzzeit- (elastisch-plastisch) und ab dem Beginn der Zeitfestigkeit (elastisch-plastisch) Rechnung zu tragen, erfolgt die Belastung der Prüfobjekte durch eine Dehnungsregelung mittels Extensometer und die Aufzeichnung von Dehnung ϵ , Kraft F sowie der Schwingspiele N bis zum technischen Anriss. Das Ergebnis sind zyklische Span-

nungs-Dehnungskurven nach Ramberg-Osgood /Ram43/ und die Dehnungswöhlerlinie basierend auf Coffin-Manson-Basquin-Morrow /Cof54, Man65, Bas10, Mor65/ sowie dem tri-linearen Ansatz mit einer Dreiteilung der elastischen Dehnungswöhlerlinie /Wag07/. Untersuchungen in /Ble16/ zeigen, dass die zyklische Spannungs-Dehnungskurve und die tri-lineare Dehnungswöhlerlinie das zyklische Werkstoffverhalten von duktilem Gusseisen bzw. GJS deutlich besser beschreiben als der klassische Ansatz nach /Cof54, Man65, Bas10, Mor65/. Dennoch wird im Folgenden zu Vergleichszwecken die Auswertung für beide Ansätze durchgeführt und einander gegenübergestellt, um die Auswahl des geeigneten Ansatzes zur Beschreibung von Dehnungswöhlerlinie und zyklischer Spannungs-Dehnungskurve zu verifizieren. Zyklische Spannungs-Dehnungskurve und Dehnungswöhlerlinie beschreiben beide das zyklische Werkstoffverhalten des untersuchten Werkstoffes und dienen etwa als Eingangsparameter für einen Bauteilfestigkeitsnachweis mit Hilfe numerischer Methoden. Die Kennwertermittlung erfolgt dabei im vorliegenden Fall unter Wechselbelastung, $R_\epsilon = -1$.

Die zyklische Spannungs-Dehnungskurve wird nach /Ram43/ verwendet. Die Totaldehnung $\epsilon_{a,t}$ setzt sich nach Gleichung (1) aus der Summe der elastischen $\epsilon_{a,e}$ und plastischen Dehnungsanteile $\epsilon_{a,p}$ zusammen.

$$\epsilon_{a,t} = \epsilon_{a,e} + \epsilon_{a,p} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \tag{1}$$

Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgt für jede Spannungs-Dehnungskurve durch Bestimmung des elastischen Dehnungsanteils $\epsilon_{a,e}$ als Quotient aus Spannungsamplitude σ_a und Elastizitätsmodul E. Der plastische Anteil $\epsilon_{a,p}$ ergibt sich als Differenz von elastischen Dehnungsanteil $\epsilon_{a,e}$ zur Totaldehnung $\epsilon_{a,t}$. In doppeltlogarithmischer Auftragung der Spannungsamplitude σ_a über den plastischen Dehnungsanteilen $\epsilon_{a,p}$ ist durch lineare Regression der zyklische Verfestigungskoeffizient K' als Wert der Spannung bei 100 % plastischer Dehnung und der zyklische Verfestigungsexponent n' aus der Steigung bestimmbar /Hai06/, Bild 3.

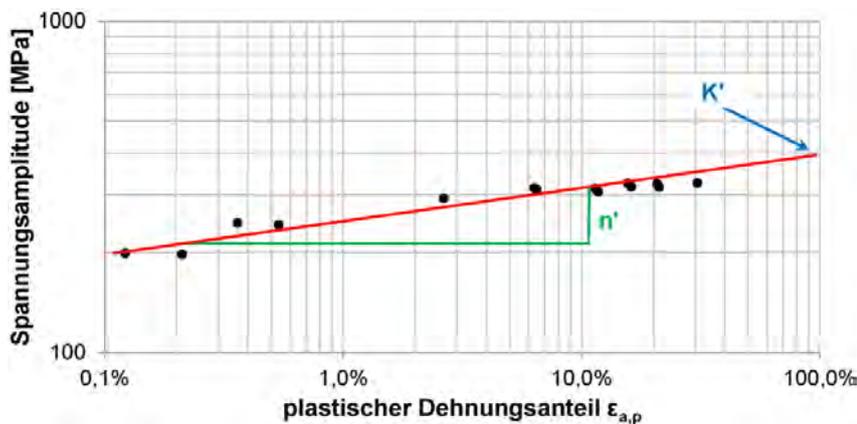


Bild 3 Bestimmung von K' und n' /Ble16/

Eine zyklische Spannungs-Dehnungskurve zeigt Bild 4. Zusätzlich ist im Diagramm die Erstbelastungskurve des Versuchs mit der höchsten Totaldehnung $\epsilon_{a,t}$ aufgetragen. Die Auftragung beider Kurven

lässt einen Vergleich des Werkstoffverhaltens bei quasistatischer und zyklischer Belastung zu und gibt Aufschluss darüber, ob ein Werkstoff unter der zyklischen Belastung ver- oder entfestigt oder ein neutrales Verhalten aufweist. Gusseisenwerkstoffe mit Kugelgraphit weisen in der Regel ein zyklisch verfestigendes Verhalten auf /Son90, Ble16/.

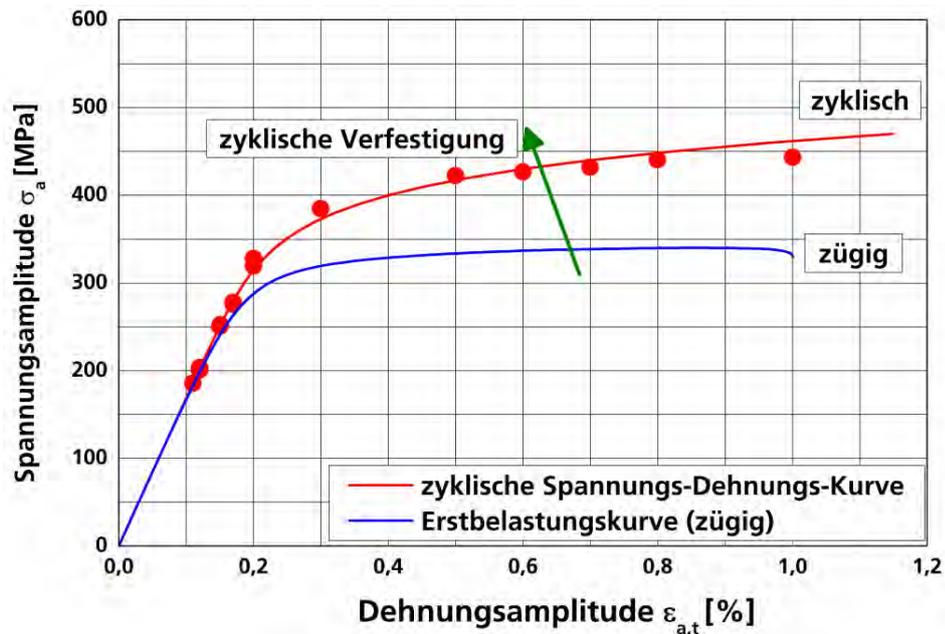


Bild 4 Zyklische Spannungs-Dehnungskurve und Erstbelastungskurve für einen EN-GJS-400 /Ble16/

Auch die Bestimmung der Dehnungswöhlerlinie basiert auf der Addition von plastischen und elastischen Dehnungsanteilen, Gleichung (2).

$$\epsilon_{a,t} = \epsilon_{a,e} + \epsilon_{a,p} = \frac{\sigma'_f}{E} \cdot (2 \cdot N_i)^b + \epsilon'_f \cdot (2 \cdot N_i)^c \quad (2)$$

Nach dem klassischen Ansatz beschreibt /Bas10/ eine Gerade im doppeltlogarithmischen Diagramm für den elastischen Dehnungsanteil $\epsilon_{a,e}$ der Totaldehnung $\epsilon_{a,t}$ in Abhängigkeit der Lebensdauer N . Auch der plastische Anteil der Totaldehnung ergibt nach Ansätzen von /Cof54, Man65/ eine Gerade. Die Addition dieser beiden Geraden führt zu der Dehnungswöhlerlinie für die Gesamtdehnung nach /Mor65/. In Gleichung (2) sind σ'_f der zyklische Spannungskoeffizient, ϵ'_f der zyklische Dehnungskoeffizient, b der zyklische Spannungsexponent und c der zyklische Dehnungsexponent. Jeder der beiden Summanden in Gleichung (2) bildet für sich eine Lebensdauerlinie im doppeltlogarithmischen Wöhlerdiagramm, deren Summe die (Gesamt-)Dehnungswöhlerlinie in Bild 5 ergibt.

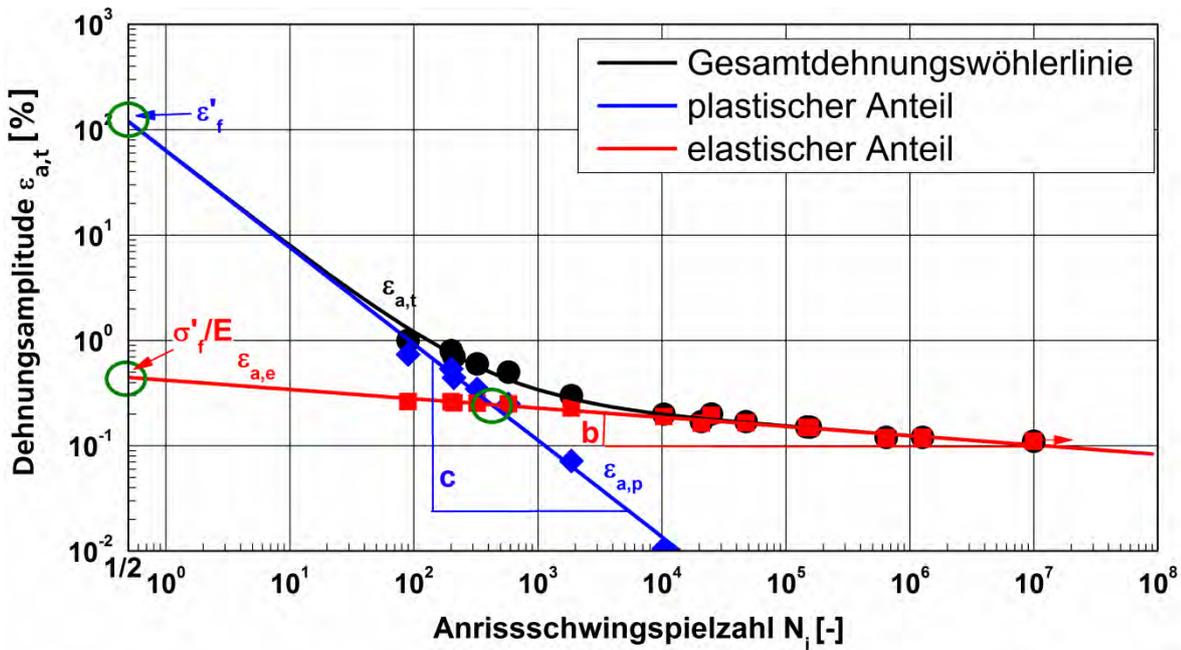


Bild 5 Darstellung der elastischen, plastischen und der summierten Dehnungswöhlerlinie

Auf Basis der Parameter der Dehnungswöhlerlinie lassen sich, sofern die Kompatibilitätsbedingung erfüllt ist /Nie08/, die Parameter K' und n' der zyklischen Spannungs-Dehnungskurven nach Gleichung (3) und (4) ermitteln. Eine detaillierte Herleitung dieser Beziehung findet sich beispielweise in /Nie08/.

$$K' = \frac{\sigma'_f}{(\epsilon'_f)^{n'}} \tag{3}$$

$$n' = \frac{b}{c} \tag{4}$$

Allerdings ist die Kompatibilitätsbedingung vor allem bei Gusseisenwerkstoffen mit Kugelgraphit häufig nicht erfüllt, z.B. /Ble16/, und eine Ableitung der Parameter für die zyklische Spannungs-Dehnungskurve nach Ramberg-Osgood /Ram43/ aus den Kennwerten der klassischen Dehnungswöhlerlinie nach Coffin-Manson-Basquin-Morrow /Bas10, Cof54, Man65, Mor65/ nur mit Vorbehalt möglich.

Aus diesem Grund wird in /Wag07/ ein tri-linearer Ansatz auf Basis von ebenfalls zyklisch verfestigenden Aluminiumknetlegierungen für die elastische Dehnungswöhlerlinie vorgeschlagen und in /Ble16/ für einige GJS-Werkstoffe bestätigt (Bild 9), der die elastische Dehnungswöhlerlinie in 3 Bereiche entsprechend dem zyklischen Werkstoffverhalten unterteilt, Bild 6. Dieser berücksichtigt nicht nur die ungenügende Regression der elastischen Anteile durch den Ansatz von /Bas10/, sondern auch ein Abknicken der Dehnungswöhlerlinie wie bei der Spannungswöhlerlinie zum Bereich der Langzeitfestigkeit hin. Für Gusseisenwerkstoffe liegt der Abknickpunkt N_k in der Regel im Bereich von $N = 5 \cdot 10^5$ bis $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen, z.B. /Kau98, Ble16, Son90, Woh11/. Danach wird ein Abfall der Schwingfestigkeit von 5 % pro Dekade für Stahl und Gusseisen mit Kugelgraphit angenommen, sofern kein oder nur unzureichend experimentell abgesichertes Wissen über den weiteren Verlauf der Wöhlerlinie nach dem

Abknickpunkt N_k vorliegt /So05b, Son07/. Für die hier untersuchten GJS-Werkstoffe bedeutet dies eine Neigung von $k^* = 44,9$, (Abfall der Schwingfestigkeit nach dem Abknickpunkt um 5 % pro Dekade), wenn keine Korrosion, erhöhte oder verringerte Temperaturen vorliegen /So05b, Son07/.

Bei der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie stellt Bereich I den Bereich mit elasto-plastischem Werkstoffverhalten bzw. Spannungs-Dehnungshysteresen über die gesamte Lebensdauer, d.h. für die Erstbelastung und im zyklisch stabilisierten Werkstoffzustand, dar. Für Bereich II verhält sich der Werkstoff zunächst elasto-plastisch und wird dann nach zyklischer Beanspruchung auf Grund der zyklischen Verfestigung makroskopisch elastisch, während im Bereich III sowohl im Anfang als auch am Ende der Lebensdauer ein makroskopisch elastisches Werkstoffverhalten vorliegt, Bild 7 und Bild 8. In Anlehnung an das Vorgehen in /Wag07/ werden nun für die linearisierten Bereiche I und II Werte sowohl für σ'_{f1} und σ'_{f2} als auch für b_1 und b_2 ermittelt. Es gilt $\sigma'_{f2} > \sigma'_f > \sigma'_{f1}$ sowie $b_1 > b > b_2$. Die gesamte tri-lineare Dehnungswöhlerlinie ergibt sich somit zu Gleichung (5):

$$\epsilon_a = \frac{\sigma'_{f,i}}{E} \cdot (2 \cdot N_A)^{b_i} + \epsilon'_f \cdot (2 \cdot N_A)^c \quad (5)$$

Der Übergang zwischen den 3 Bereichen wird durch die Übergangsbedingungen definiert:

$$\frac{\sigma'_{f,1}}{E} \cdot (2 \cdot N_A)^{b_1} \leq \frac{\sigma'_{f,2}}{E} \cdot (2 \cdot N_A)^{b_2} \quad (6)$$

$$\frac{\sigma'_{f,2}}{E} \cdot (2 \cdot N_A)^{b_2} \geq \frac{\sigma'_{f,3}}{E} \cdot (2 \cdot N_A)^{b_3} \quad (7)$$

Für Lebensdauerberechnung mit variabler Amplitude wird die Elementar-Modifikation empfohlen, dementsprechend ergeben sich die Kennwerte für den dritten Bereich zu, Gleichung (8) und Gleichung (9).

$$b_3 = b_2 \quad (8)$$

$$\sigma'_{f,3} = \sigma'_{f,2} \quad (9)$$

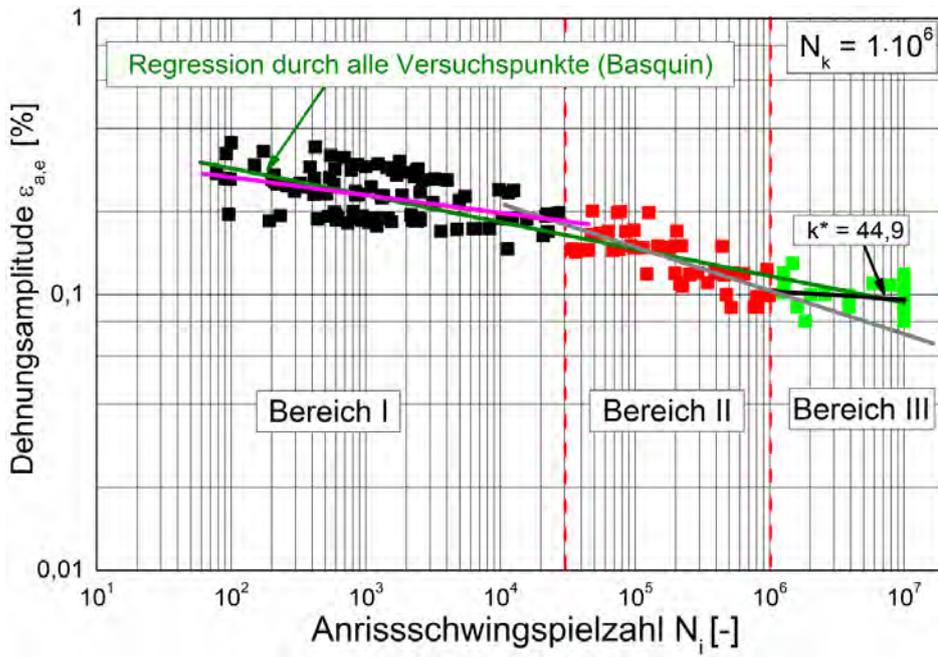


Bild 6 Regression über elastische Dehnungsanteile aus 179 Einzelversuchen

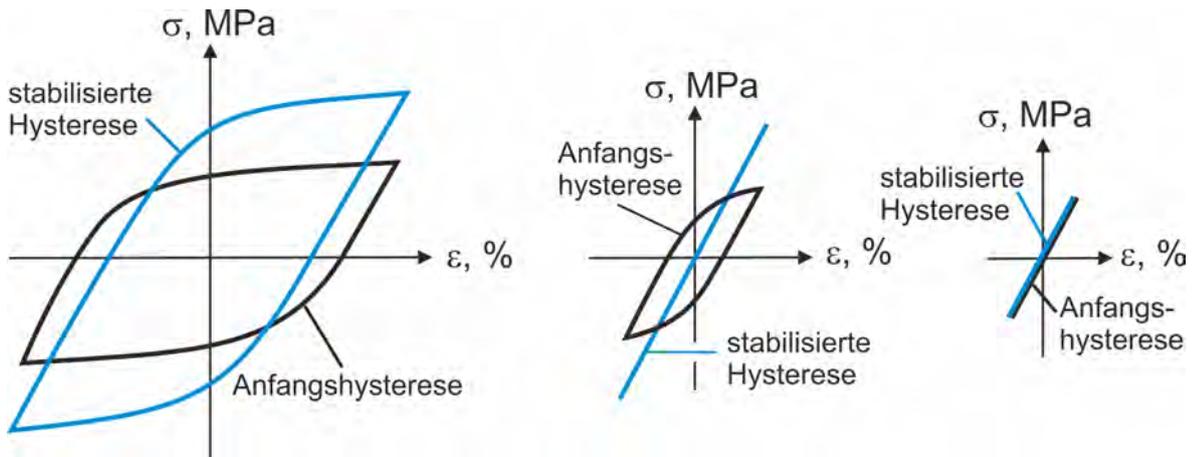


Bild 7 Werkstoffverhalten in den 3 Bereichen der elastischen Dehnungswöhlerlinie

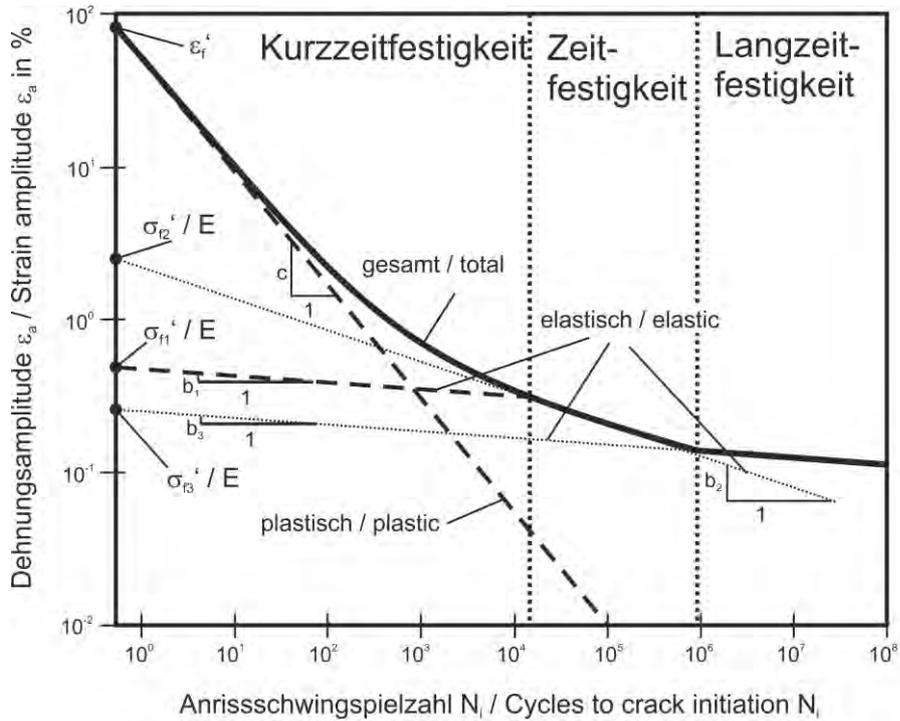


Bild 8 Die tri-lineare Dehnungswöhlerlinie

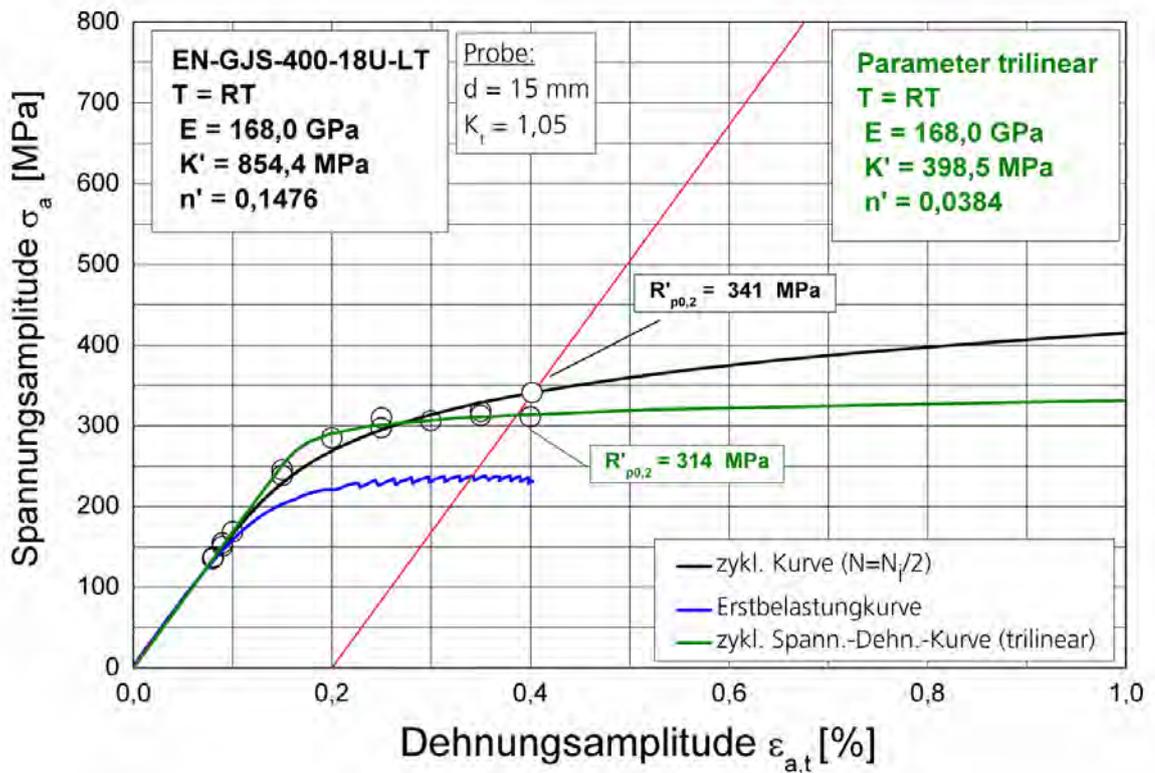


Bild 9 Zyklische Spannungsdehnungskurven im Vergleich /Ble16/

4.1.2 Prüftechnik

Die zyklischen, dehnungsgeregelten Werkstoffuntersuchungen finden unter konstanten Beanspruchungsamplituden auf servo-hydraulischen Prüfmaschinen statt, bei denen hydraulische Zylinder die Prüfkräfte bereitstellen. Da der Zylinder die Schwingprobe oder das Prüfobjekt direkt belastet und vor allem die Frequenz sowie die Art der Belastungsabfolge, z.B. als Sinus, Rampe oder Dreieck, frei einstellbar ist, bildet dieser Prüfaufbau einen Zwangsantrieb. Allerdings sind servo-hydraulische Prüfmaschinen meist auf maximale Prüffrequenzen von etwa $f = 50$ Hz beschränkt. Die vorliegenden Versuche finden auf zwei Prüfständen mit maximalen Lasten von 63 kN, Bild 10 mit einer Flacheinspannung unter Axialbelastung statt. Die Sollwertvorgabe erfolgt mit MTS-Prüfsoftware sowie über kalibrierte Dehnungsaufnehmer mit einem Schneidenabstand von 25 mm. Bild 10 zeigt eine der beiden Prüfmaschinen, mit Schwingprobe, kalibrierter Kraftmessdose und zwei Dehnungsaufnehmern. Zwei Klammern mit einer Anpresskraft von jeweils 2 N halten dabei die Schneiden bzw. den Dehnungsaufnehmer auf der Schwingprobe gemäß /SEP06/. Dabei ist ein Dehnungsaufnehmer zur Sollwertvorgabe auf der Schwingprobe montiert, während der zweite Dehnungsaufnehmer lediglich die Dehnung misst, die sich auf der gegenüberliegenden Probenseite einstellt. Dies ermöglicht die Ermittlung der Steifigkeit bzw. des fiktiven Elastizitätsmoduls E_f /Ble16/ für jede Schwingprobe auf zwei Seiten, ohne dabei die Probe mehrfach belasten zu müssen.

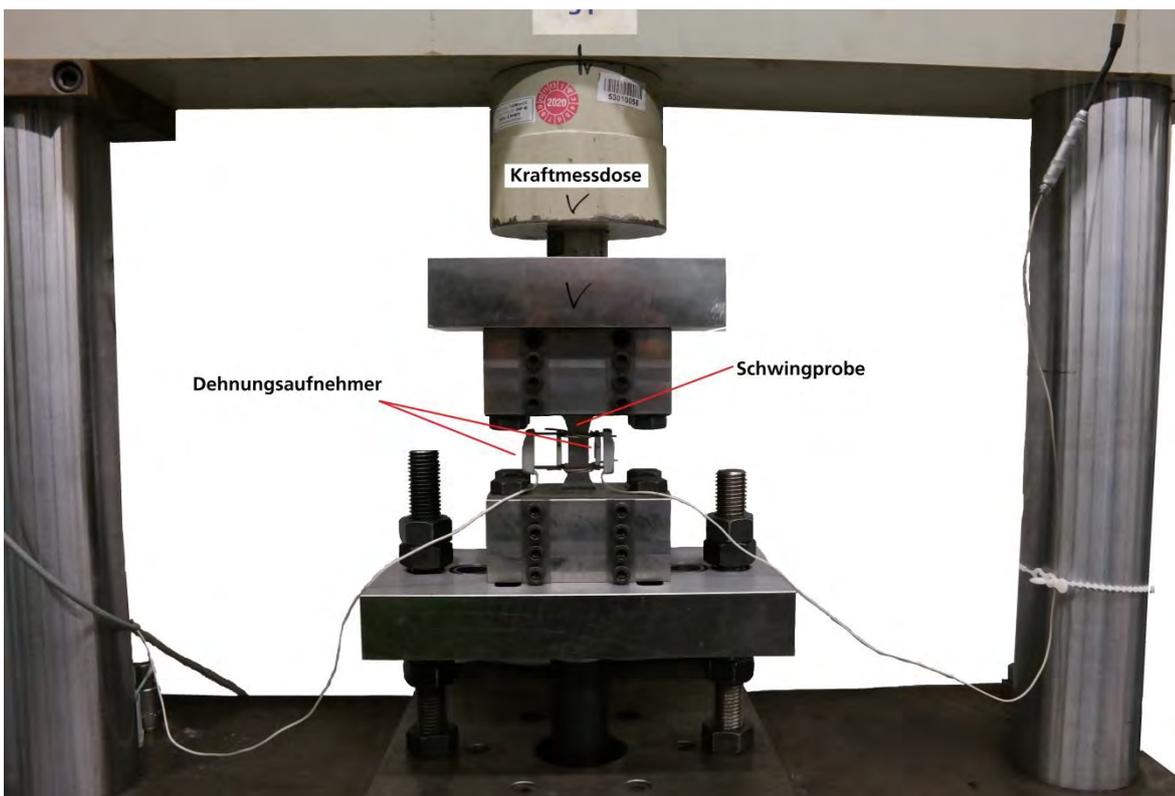


Bild 10 Servo-hydraulische Prüfmaschine (63 kN Maximallast), Schwingprobe und zwei Dehnungsaufnehmer

4.1.3 Versuchsdurchführung

Die Durchführung der dehnungsgeregelten Versuche ist in Richtlinien wie dem /SEP06/ festgehalten. Darin werden u.a. die Prüffrequenzen in Abhängigkeit der Dehnungsamplituden vorgegeben. Für me-

tallische Werkstoffe wie auch für die vorliegenden GJS-Werkstoffe erfolgt das Vorgehen der Schwingprüfung in Anlehnung an das Stahl-Eisen-Prüfblatt SEP1240 /SEP06/.

Die Grenzschwingspielzahl beträgt für die hier durchgeführten dehnungsgeregelten Versuche $N_G = 1 \cdot 10^7$ Zyklen, wobei nahezu der gesamte Lebensdauerbereich von wenigen Schwingspielen bis N_G abgedeckt wird. In Abhängigkeit der Lasthorizonte stellen sich so untere Grenzschwingspielzahlen im Bereich von mehreren 10 Zyklen ein. Die Versuche werden nicht bis zum Bruch der Schwingproben, sondern bis zum technischen Anriss, der anhand eines Steifigkeitsabfalls von einem Abfall deren Steifigkeit von 20 % definiert wird, untersucht. Die Schwingprüfung erfolgt unter Wechselbeanspruchung, $R_\epsilon = -1$.

Versuchsmatrizen der durchgeführten Versuchsreihen mit deren Bezeichnung sowie einer Unterscheidung nach Halbzeug und der Anzahl der je Versuchsreihe durchgeführten Einzelversuche sind im **Anhang T** für alle untersuchten Werkstoffe dargestellt.

4.2 Zerstörungsfreie Werkstoffuntersuchungen

4.2.1 Ermittlung des quasi-statischen Spannungs-Dehnungsverhaltens

Da auf Grund des Drosses ähnlich wie auch beim Lunker /Sig03, Har04, Bla05, Har09, Olk15, Ble16/ in den Schwingproben mit einer Änderung des quasistatischen Spannungs-Dehnungsverhaltens im Vergleich zum ungeschnittenen Zustand zu rechnen ist, ist es das Ziel dieser Messung den fiktiven Elastizitätsmodul E_f /Ble16/ als ein Charakterisierungsmerkmal der mit Dross behafteten Schwingproben zu bestimmen. Für geschlossene und angeschnittene Lunker in GJS-Werkstoffen kann in /Ble16/ bereits nachgewiesen werden, dass in weiten Teilen guter Zusammenhang zwischen der Dichte und dem fiktiven Elastizitätsmodul besteht, Bild 11.

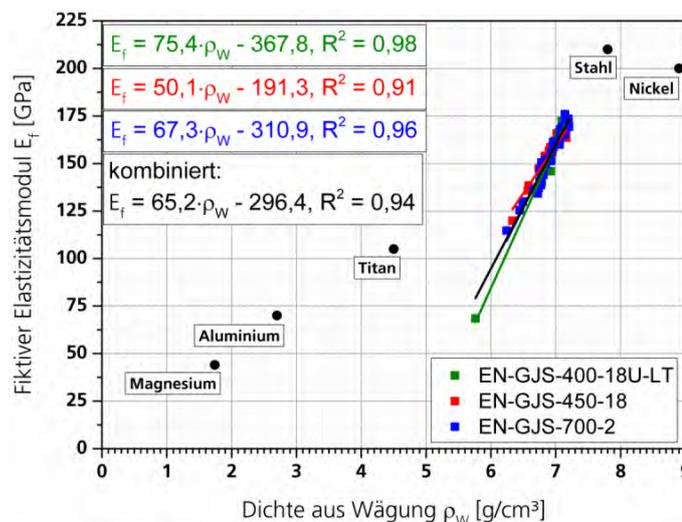


Bild 11 Regression zwischen Dichte und fiktivem Elastizitätsmodul E_f /Ble16/

Zur Ermittlung des fiktiven Elastizitätsmoduls der Schwingproben mit Dross unter Axialbelastung kommt, wie in Kapitel 2.1.2, eine servo-hydraulische Prüfmaschine zum Einsatz. Die Schwingproben werden mechanisch geklemmt, mit Dehnungsaufnehmern versehen und der im dehnungsgeregelten Versuch ermittelte Spannungs-Dehnungsverlauf für einen oder beide Dehnungsaufnehmer ausgewer-

tet. Dabei ist die ermittelte Spannung eine Nennspannung, indem die von der Kraftmessdose aufgezeichnete Belastung der Probe auf den Prüfquerschnitt (8x15mm) bezogen wird.

Diese Vorgehensweise zeichnet sich dadurch aus, dass kein Umsetzen des Dehnungsaufnehmers und keine Be- und Entlastung der Schwingprobe vor dem eigentlichen dehnungsgeregelten Schwingversuch stattfindet, Bild 10. Dies vermeidet eine ungewollte Vorbeanspruchung der Schwingprobe, was eine Verfälschung des Messergebnisses vermeidet. Gleichzeitig ermöglicht das parallele Aufzeichnen der Dehnungen auf beiden Seiten der Schwingprobe die Berechnung einer gemittelten Steifigkeit über die Probendicke hinweg. Dies kompensiert eine inhomogene Verteilung des Drosses in den jeweiligen Schwingproben.

Zur Ermittlung des fiktiven Elastizitätsmoduls E_f wird im linear-elastischen Bereich der Erstbelastungskurve die Steifigkeit auf Basis des hyperbolischen Elastizitätsmoduls nach /Fan95/ bestimmt. Die Methode ermittelt einen Elastizitätsmodul E aus einem Diagramm, in dem die Ordinate nicht die Spannung, sondern das Verhältnis aus Dehnung ϵ zu Spannung σ anzeigt. Als Abszisse dient weiterhin die Dehnung ϵ . Ein Beispiel für diese Auftragung zeigt Bild 12. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass diese Methode eventuelle Nichtlinearitäten, die eine zweifelsfreie Ermittlung eines Elastizitätsmoduls erschweren, beseitigt. Ebenso umgeht die Methode den Einfluss von Spannungskonzentrationen am Graphit, die bei einer Belastung Verformungen im Mikrobereich zur Folge haben, ohne, dass diese makroskopisch ermittelbar wären /Fan95/. Mit Hilfe des hyperbolischen Ansatzes zeigt sich im Dehnung/Spannung-Dehnungs-Diagramm ein Plateau, das den reziproken Wert des Elastizitätsmoduls ausweist /Fan95/. Bei der Bestimmung des hyperbolischen Elastizitätsmoduls wird stets vom Nennquerschnitt (15 mm x 8 mm) ausgegangen, sodass eventuelle Ausbrüche oder im Dross nicht dicht gespeiste Stellen unberücksichtigt und die Ergebnisse im Nennspannungssystem errechnet werden.

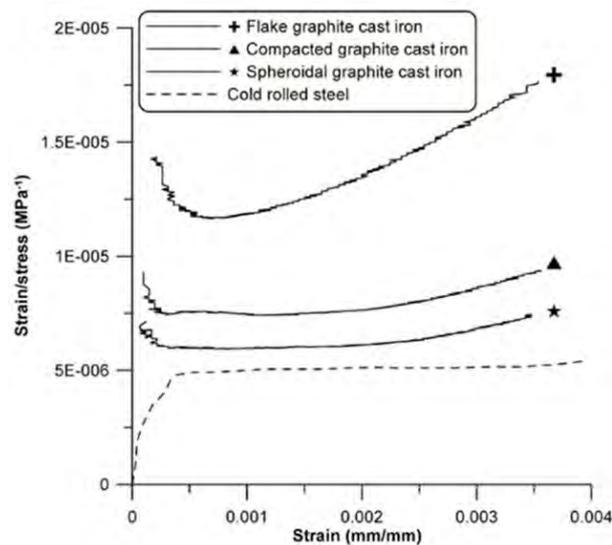


Bild 12 Ermittlung des hyperbolischen Elastizitätsmoduls nach /Sjo07/

4.2.2 Magnetpulverprüfung

Sowohl an den Versuchskörpern als auch an Teilen der Schwingproben werden Magnetpulverprüfungen (MT) zur Darstellung der Drossstrukturen auf der Bauteiloberfläche durchgeführt. Die Untersuchungen finden sowohl in schwarz-weißer als auch mit fluoreszierendem Magnetpulver nach /DIN69/

statt. Für die MT-Aufnahmen an den Versuchskörpern kommt ein elektrisches Magnetjoch sowie für die MT-Aufnahmen an den Flachproben Permanentmagnete zum Einsatz.

Streifelder an Ungängen werden durch Magnetisierung des Prüflings erzeugt. Die günstigste Orientierung des Magnetfeldes ist senkrecht zur Richtung der maximalen Fehlerausdehnung /Dob80/. Im Falle eines Risses entspricht es der Richtung senkrecht zum Rissverlauf.

4.2.3 Magnetische Streuflussprüfung

Die sensorgestützte Streuflussprüfung ist ein zerstörungsfreies magnetisches Prüfverfahren, bei welchem oberflächennahe Defekte mit Hilfe magnetischer Gleich- bzw. Wechselfelder unter Nutzung von Magnetfeldsensoren detektiert werden /Dob78/. Der zugrundeliegende physikalische Effekt stimmt mit demjenigen der Magnetpulverprüfung (MT-Prüfung) überein und beruht auf der Störung des Magnetfeldverlaufes an Ungängen im oberflächennahen Bereich des Prüflings /Dob85/. Das Verfahren beschränkt sich ausschließlich auf ferromagnetische Werkstoffe ($\mu \gg 1$).

Zur Magnetfeldmessung kommen verschiedene Sensoren, wie zum Beispiel Hall-Sonden oder GMR-Sensoren, zum Einsatz /Rip01/. Obwohl die sensorgestützte Streuflussprüfung sich nur auf oberflächennahe Fehler beschränkt, ist die Detektion verdeckter Fehler grundsätzlich möglich /Klo08/.

Das Verfahren der magnetischen Streuflussprüfung (magnetic flux leakage testing, MFL) ist in der Norm DIN 54130 „magnetische Streufluss-Verfahren“ allgemein /Din74/ beschrieben. Die sensorgestützte magnetische Streuflussprüfung ist ebenfalls grundlegend in der Norm DIN 54136 „magnetische Streuflussprüfung mit Sondenabtastung“ beschrieben /Din88/.

Beim magnetischen Streuflussverfahren (magnetic flux leakage testing, MFL) wird das Prüfobjekt mit einer Magnetisierungseinrichtung, entweder einem Elektromagneten oder einem Permanentmagneten, horizontal magnetisiert. Eine weitere Art der Magnetisierung stellt die Stromdurchflutung dar, bei der das zu prüfende Bauteil von einem definierten elektrischen Strom durchflossen wird. Dieser Strom erzeugt ein ringförmiges Magnetfeld.

Im Allgemeinen erhöht sich an Stellen mit reduzierter Wanddicke oder bei Rissen senkrecht zu den Magnetfeldlinien und oberflächennahen Einschlüssen die magnetische Flussdichte im Ligament, sodass an der Oberfläche folglich Streifelder aus dem Prüfobjekt austreten, Bild 13.

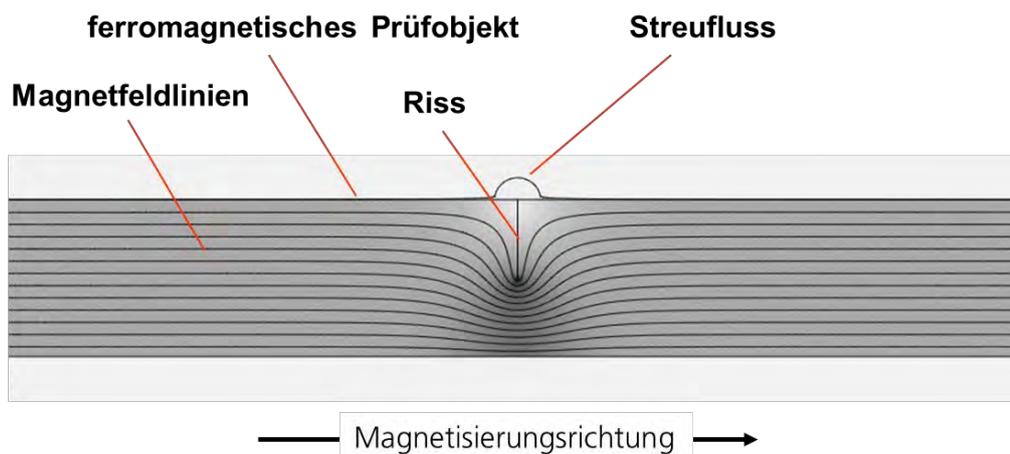


Bild 13 Prinzip-Skizze eines magnetisierten ferromagnetischen Bauteils: Störung des Magnetfeldverlaufes durch einen rissartigen Fehler

Je nach Visualisierung des magnetischen Streuflusses unterscheidet man zwischen der Magnetpulver (MT)-Prüfung und der sensorgestützten magnetischen Streuflussprüfung.

Sensorgestützte magnetische Streuflussprüfung

Die sensorgestützte Streuflussprüfung ist ein zerstörungsfreies magnetisches Prüfverfahren, bei welchem oberflächennahe Defekte mit Hilfe magnetischer Gleich- bzw. Wechselfelder unter Nutzung von Magnetfeldsensoren detektiert werden /Dob78/. Der zugrundeliegende physikalische Effekt stimmt mit demjenigen der Magnetpulverprüfung überein und beruht auf der Störung des Magnetfeldverlaufes an Ungängen im oberflächennahen Bereich des Prüflings /Dob85/. Das Verfahren beschränkt sich ausschließlich auf ferromagnetische Werkstoffe ($\mu \gg 1$).

Zur Magnetfeldmessung kommen verschiedene magnetfeldempfindliche Sensoren wie zum Beispiel Hall-Sonden zum Einsatz /Rip01/. Diese können bei mechanisierten sensorgestützten magnetischen Streuflussprüfungen die Bauteiloberfläche mit einem Verschleißschutz berühren, oder mit einer geringen, wohl definierten Abhebung, berührungslos abtasten. Die Streufelder können, neben Hall-Sonden, auch mit magneto-resistiven Sensoren (GMR, AMR) oder Spulen detektiert werden. Letztere können nur sinnvoll bei konstanter Abtastgeschwindigkeit eingesetzt werden. Die Sensoren besitzen im Allgemeinen eine richtungsabhängige Empfindlichkeit und sind so orientiert oder konzipiert, dass sie eine der drei räumlichen Feldkomponenten erfassen können. Je nach Ausrichtung der Sensoren können Streufeldkomponenten senkrecht oder parallel zur Testkörperoberfläche gemessen werden. Während mit Hall-Sonden und magneto-resistiven Sensoren die Feldstärke direkt bestimmt werden kann, erhält man beim Einsatz von Spulen ein Messsignal, das proportional zur Änderung des magnetischen Flusses ist.

Obwohl die sensorgestützte Streuflussprüfung sich nur auf oberflächennahe Fehler beschränkt, ist die Detektion verdeckter Fehler grundsätzlich möglich /Klo08/.

Streufelder an Ungängen werden durch Magnetisierung des Prüflings erzeugt. Die günstigste Orientierung des Magnetfeldes ist senkrecht zur Richtung der maximalen Fehlerausdehnung /Dob80/. Im Falle eines Risses entspricht es der Richtung senkrecht zum Rissverlauf.

Die sensorgestützte magnetische Streuflussprüfung hat bei der Auffindung von Rissen gegenüber den klassischen Magnetpulver- oder Farbeindring-Verfahren den Vorteil, dass die Prüfung sauber und digital dokumentiert abläuft. Die Digitalisierung bietet darüber hinaus die Möglichkeit zusätzlicher Bildverarbeitung.

Das Verfahren der magnetischen Streuflussprüfung ist in der Norm DIN 54130 „magnetische Streufluss-Verfahren“ allgemein beschrieben /DIN30/. Die sensorgestützte magnetische Streuflussprüfung ist ebenfalls grundlegend in der Norm DIN 54136 „magnetische Streuflussprüfung mit Sondenabtastung“ beschrieben /DIN36/.

4.2.4 Computer-Tomographieaufnahmen

An einem Großteil der zerstörend geprüften Schwingproben aber auch an zylindrischen Werkstoffproben aus den Gussplatten werden zusätzlich Röntgen-Computertomographieaufnahmen (CT) zur Beschreibung der volumetrischen Drossausdehnung bei Projektpartner BMB durchgeführt. Die CT-Aufnahmen werden dabei maßgeblich im Prüfbereich der Schwingproben durchgeführt. Die dreidi-

mensionalen Aufnahmen werden anschließend in Summenbilder in Dickenrichtung der Schwingproben transformiert und dienen neben den MT-Aufnahmen zur Drossbewertung.

4.2.5 Schwefelnachweis durch Baumann-Abdrücke

Dross im GJS lässt sich zerstörungsfrei durch einen sogenannten Baumann- bzw. Schwefelabdruck nachweisen und gegebenenfalls für eine Drosscharakterisierung heranziehen. Das Verfahren liefert jedoch wie die MT-Aufnahmen keine Tiefeninformation zur Drossausdehnung, sondern nur Ergebnisse von der Oberfläche, /Has08/.

Zur Durchführung des Baumann-Abdrucks /Kau57/ ist es von Vorteil, die Oberfläche vor Beginn zu säubern, damit im Nachhinein ein gutes Resultat des Abdrucks erzielt wird. Im nächsten Schritt wird ein in verdünnter Schwefelsäure (5%-haltig) getränktes Fotopapier (Bromsilberpapier) mit der Schichtseite auf die Probenoberfläche aufgebracht und gegen Verrutschen zu sichern. Das Fotopapier ist mehrmals auf die Probenoberfläche anzudrücken. In etwa fünf Minuten, in denen das Bromsilberpapier auf der Oberfläche angedrückt ist, reagiert zuerst die Schwefelsäure mit den sulfidischen Einschlüssen des Materials (Gleichung (10) + (11)). Dabei entsteht Schwefelwasserstoff nach folgendem Reaktionsschema:



Anschließend reagiert der Schwefelwasserstoff mit dem Bromsilber des Fotopapiers zu Schwefelsilber, Gleichung (12). An diesen Stellen erscheint eine mehr oder weniger stark bräunliche Verfärbung auf dem Papier. Die Farbintensivierung zeigt die Stärke der Schwefelanreicherungen an.



4.2.6 Ultraschall

Die Ultraschallprüfung ist ein im industriellen Umfeld und Forschungsbereich etabliertes akustisches zerstörungsfreies Prüfverfahren, das hauptsächlich zur Volumenprüfung eingesetzt wird und dadurch einen wesentlichen Bestandteil von Qualitätssicherungsmaßnahmen darstellt. Besonders im Bereich des Gießereiwesens, in dem hohe Anforderungen an die Ultraschallprüfung gestellt werden, ist sie ein etabliertes Verfahren, um mit ihren verschiedenartigen Einsatzmöglichkeiten die Sicherstellung hergestellter Großgusskomponenten gewährleisten zu können. Diese werkstoffseitigen Herausforderungen in Verbindung mit der immer komplexer werdenden Bauteilgeometrie und der hochauflösenden Fehlerprüfung sowie Materialcharakterisierung aber auch der Umsetzung schnellerer Prüfgeschwindigkeiten können mit der automatisierten Ultraschalltechnik Rechnung getragen werden.

Grundsätzlich beruht die Ultraschallprüfung darauf, dass sich Schallwellen in unterschiedlichen Medien verschieden schnell ausbreiten. Sie werden an Grenzflächen unterschiedlicher Wellenimpedanz teilweise reflektiert, ein anderer Teil breitet sich weiter aus. Mit steigender Differenz der Wellenimpedanz vergrößert sich der reflektierte Anteil. Ultraschallprüfungen können sowohl händisch punktuell bzw.

von Hand geführt oder auch mechanisiert mit Hilfe von Manipulationssystemen durch ein entsprechend geschultes Personal durchgeführt werden.

Denn gerade im Bereich schwer prüfbarer Materialien, zu denen auch die Prüfung von Gussstücken gehört, werden hohe Ansprüche an die Ausbildung und Erfahrung des Prüfpersonals gestellt. Dieses muss in jedem Fall gemäß DIN EN ISO 9712 „Zerstörungsfreie Prüfung - Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung“ /DIN12/ qualifiziert und zertifiziert sein, um je nach Qualifizierungsstufe die folgenden Tätigkeiten durchführen zu dürfen:

- Ultraschall Stufe 1: Einsatz von Ultraschall-Prüfverfahren an verschiedenen Werkstoffen nach einer vorgegebenen Prüfanweisung, Einordnung der Prüfergebnisse sowie die Erstellung eines Prüfberichts
- Ultraschall Stufe 2: Ausführung von Tätigkeiten der Stufe 1, Erarbeitung von Ultraschall-Prüfanweisungen gemäß Regelwerken und kundenspezifischen Anforderungen, Wahrnehmen von Prüfaufsichtsfunktionen
- Ultraschall Stufe 3: Ausführung von Tätigkeiten der Stufe 1 und 2, Übernahme der vollen Verantwortung für Prüfeinrichtungen und das Prüfpersonal, Erstellung bzw. Validierung entsprechender Verfahrensbeschreibungen.

Weitere Grundlage der in diesem Forschungsvorhaben angewandten mechanisierten Ultraschallprüfung bildet das Regelwerk DIN EN 12680-3 „Gießereiwesen - Ultraschallprüfung - Teil 3: Gussstücke aus Gusseisen mit Kugelgraphit“ /DIN80/ und impliziert die darin erwähnten normativen Verweise wie zum Beispiel: DIN EN ISO 16810 „Zerstörungsfreie Prüfung – Ultraschallprüfung“ /DIN10/, DIN EN ISO 16811 „Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung - Empfindlichkeits- und Entfernungsjustierung“ /DIN11/, DIN EN ISO 16823 „Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung – Durchschallungstechnik“ /DIN23/, DIN EN 12668 „Zerstörungsfreie Prüfung - Charakterisierung und Verifizierung der Ultraschall-Prüfausrüstung“ Teil 1 bis 3 /DIN68/, etc. Zusätzlich sei an dieser Stelle auf das „Handbuch Automatische Ultraschall-Prüfsysteme“ des Fachausschusses/Unterausschusses der deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP) verwiesen, in welchem Anwendern Vorgehensweisen zur automatisierten Ultraschallprüfung verschiedenster Art an die Hand gegeben werden /Bar17/.

Da die Ultraschallprüfung für unterschiedliche Anwendungen bereits genormt ist, und teilweise auf diese im Rahmen Projektes zurückgegriffen werden konnte, wurde darüber hinaus eine Verfahrensanweisung zur „mechanisierten Ultraschallprüfung von Großgussbauteilen mit Kugelgraphit (GJS) unter Einsatz von Einzelschwingern“ erarbeitet.

4.2.7 3MA (Mikromagnetische Materialcharakterisierung)

Die Voraussetzung für die Anwendung einer Vielzahl von mikromagnetischen zerstörungsfreien Prüfverfahren ist ein ferromagnetisches Verhalten des zu prüfenden Materials. Solche ferromagnetischen Materialien weisen eine charakteristische Domänenstruktur auf /Wei07/. Hierbei stellen die Domänen in sich spontan bis zur Sättigung magnetisierte Bereiche dar, die durch sogenannte Bloch-Wände voneinander getrennt sind. Die Ausrichtung der Magnetisierungsvektoren der Domänen ist über eine ferromagnetische Probe im unmagnetisierten Zustand statistisch so verteilt, dass sich deren Gesamtwirkung vollständig neutralisiert.

Ferromagnetische Materialien richten unter Einwirkung eines externen, magnetischen Feldes die Magnetisierungsvektoren der Domänen in Richtung des externen Magnetfeldes aus. Bei einer Wechselfeldmagnetisierung von ferromagnetischen Werkstoffen besteht kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der magnetischen Feldstärke H und der magnetischen Flussdichte B . Bei zeitlich periodischer Ummagnetisierung reagiert ein ferromagnetisches Material mit einem Hystereseverlauf von B über H , der sogenannten Hysteresekurve /Kne62, Cul72/. Dieses mikrostrukturspezifische Hystereseverhalten kann mittels unterschiedlicher mikromagnetischer Prüfverfahren zur zerstörungsfreien Materialcharakterisierung ausgenutzt werden. Im Folgenden wird nach einer kurzen Einzelverfahrensvorstellung ein am Fraunhofer IZFP entwickelter Hybrid-Ansatz, der die verschiedenen vorgestellten mikromagnetischen Verfahren kombiniert, vorgestellt. Bei diesem Hybrid-Ansatz handelt es sich um den bereits in Prüfsysteme überführten 3MA-Ansatz, der im Rahmen dieses Vorhaben zum Einsatz kam. 3MA ist ein Akronym für Mikromagnetische, Multiparameter-, Mikrostruktur- und Spannungsanalyse [Alt02, Tsc11]. In der Regel kombiniert 3MA mehrere der folgenden mikromagnetischen Verfahren:

Oberwellenanalyse im Zeitsignal der tangentialen Magnetfeldstärke

Bei der sinusförmigen Wechselfeldmagnetisierung eines ferromagnetischen Materials verursacht die Nichtlinearität der ferromagnetischen Hysterese im Signal der Tangentialfeldstärke neben der Grundschwingung ausgeprägte mikrostrukturabhängige Oberwellenanteile. Diese ermöglichen es, Rückschlüsse auf das Mikrogefüge des zu prüfenden Materials zu ziehen /Dob88, Pit90/.

Magnetische Barkhausen-Rausch-Analyse

Die magnetische Barkhausen-Rausch-Analyse basiert auf einer Entdeckung von Heinrich Georg Barkhausen /Bar19/. Die Ummagnetisierung ferromagnetischer Werkstoffe erfolgt zu einem Großteil durch Bloch-Wand-Bewegungen. Diese Bloch-Wand-Bewegungen werden durch die Wechselwirkung der Bloch-Wände mit dem Mikrogefüge beeinflusst, was zu sprunghaften lokalen Magnetisierungsänderungen führt. Dies induziert in magnetinduktiven Aufnehmern mikrostrukturabhängige Rauschimpulse, die zur Materialcharakterisierung eingesetzt werden können.

Überlagerungspermeabilität

Mit dem Verfahren der Überlagerungspermeabilität kann durch kleine überlagerte Magnetfeldanregungen der reversible Anteil der momentanen Magnetisierungsänderung erfasst werden. Ein qualitatives Maß für die Überlagerungspermeabilität über den gesamten Hysteresebereich ergibt sich, indem man dem sinusförmigen Erregerfeld ein höherfrequentes magnetisches Wechselfeld überlagert, sodass über den gesamten Verlauf der Hysterese eine Auswertung der Überlagerungspermeabilität erfolgen kann. Es entstehen dadurch kleine Innenschleifen der Hysterese. Die Steigung dieser reversibel durchlaufenen Innenschleifen ist ein Maß für die Überlagerungspermeabilität, aus der wiederum Rückschlüsse auf die Eigenschaften des zu prüfenden Materials gezogen werden können.

Wirbelstromimpedanzanalyse

Die Wirbelstromimpedanzanalyse ist ein klassisches, weit verbreitetes und etabliertes zerstörungsfreies elektromagnetisches Prüfverfahren, das zur Anwendung keiner Ummagnetisierung der zu analysierenden Probe bedarf. Das Prinzip der zerstörungsfreien Wirbelstromimpedanzanalyse beruht darauf, dass die Impedanzänderung einer wechselstromdurchflossenen Spule gemessen wird, während sie mit dem zu prüfenden Material in Wechselwirkung gebracht wird /Hep72/. Voraussetzung ist folglich, dass das zu prüfende Material leitfähig sein muss. Die Mikrostruktur beeinflusst die Wirbelströme durch ver-

schiedenste Wechselwirkungen. Abhängig von den Einflüssen werden unterschiedliche Betrags- und Phasenänderungen der Spulenimpedanz hervorgerufen.

4.2.8 Mikromagnetische Prüfgeräte

Im Rahmen dieses Vorhabens werden zwei 3MA-Prüfgeräte-Varianten (MikoMach und 3MA-X8) eingesetzt; das MikroMach-Prüfgerät und das 3MA-X8-Prüfgerät.

Das MikroMach-Prüfgerät nutzt unterschiedliche mikromagnetische Informationsinhalte, die mit Hilfe folgender in einem zeitlichen Multiplex ausgeführten Messverfahren gewonnen werden:

- Analyse des Zeitsignals der tangentialen Magnetfeldstärke (Oberwellenanalyse)
- Barkhausen-Rausch-Analyse
- Mehrfrequenz-Überlagerungspermeabilitätsanalyse
- Mehrfrequenz-Wirbelstromimpedanzanalyse

Bei MikroMach-Geräten wird eine kompakte Bauform des Prüfgerätes realisiert, indem keine Trennung des Prüfgerätes von der verwendeten Sensorik vorgenommen und zusätzlich auf eine kompakte Bauweise der Prüfelektronik geachtet wird. So ist quasi im Sensorgehäuse das komplette Prüfgerät untergebracht. Die Steuerung von Messabläufen, die Überwachung einzelner Gerätefunktionen, die Messgrößenermittlung, die Signalweiterverarbeitung und -verknüpfung erfolgt vollständig im steuernden PC, der auch die übergeordnete Messdatenerfassung, Darstellung und Archivierung übernimmt. Als Verbindungsschnittstelle dient der verbreitete USB-Standard. Durch die gewählte Verfahrenskombination ist es möglich, Randschichteigenschaften im Tiefenbereich von ca. 200 μm bis zu einigen Millimetern, je nach verwendeter Sensorik, zu bestimmen. Die wichtigsten Komponenten eines MikroMach-Prüfgerätes sind das Prüfgerät (kombinierte Prüfelektronik und Sensorik) sowie die Software zur Ansteuerung und Auswertung, Bild 14.

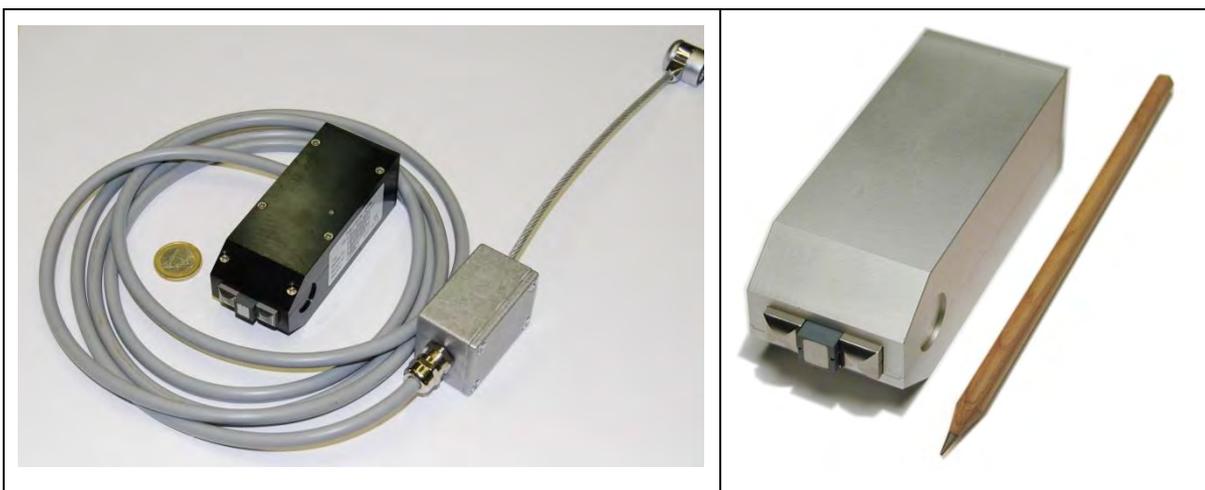


Bild 14 MikroMach-Prüfgerät (Bauform E1030)

Das 3MA-X8-Prüfgerät nutzt eine Kombination aus drei unterschiedlichen mikromagnetischen Messmethoden, die durch intelligente Signalverarbeitung zeitgleich angewandt werden. Bei den drei kombinierten Methoden handelt es sich um:

- Oberwellenanalyse des Zeitsignals des Magnetisierungsstroms
- Analyse der Wirbelstromimpedanz
- Analyse der Wirbelstrom-Überlagerungspermeabilität

Aus den drei Messmethoden werden magnetische Kenngrößen abgeleitet, die mit mechanisch-technologischen Werkstoffkenngrößen korrelieren. Bei der Gerätevariante 3MA-X8 handelt sich um ein mikromagnetisches Prüfsystem, das für eine schnelle niederfrequente Signalverarbeitung optimiert wurde. Die wichtigsten Komponenten eines 3MA-X8-Prüfsystems sind der Sensor, das Prüfgerät sowie die Software zur Ansteuerung und Auswertung, Bild 15.



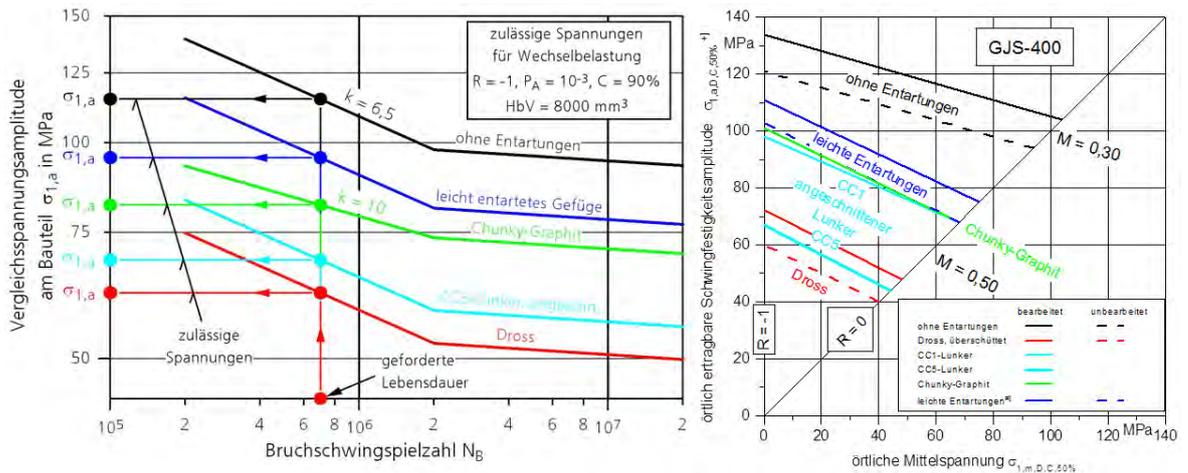
Bild 15 3MA-X8-Prüfgerät inklusive Sensor (Bauform 1030-X8) und Laptop mit Software zur Ansteuerung und Auswertung

4.3 Konzepte und Richtlinien für die Bemessung im Eisengroßguss

Die Bauteilauslegung im Großguss ist überwiegend gekennzeichnet durch die Nutzung von synthetischen Kennwerten auf Basis quasistatischer Zugfestigkeitskennwerte aus Angussproben. Eine umfangreiche Entnahme von Schwingproben oder gar die Prüfung des kompletten Bauteils wird entweder auf Grund einer Einzelteilmontage und/oder Bauteilmassen von zum Teil mehr als 100 t häufig verhindert. Im Auslegungsprozess bzw. dem Festigkeitsnachweis gegen zyklische Belastungen von Großgussbauteilen kommt daher häufig die Richtlinie des Forschungskuratoriums Maschinenbau /FKM12/ oder im speziellen Fall der Auslegung von Windenergiekomponenten die Auslegungsrichtlinie des Germanischen Lloyd /DNV16/ zum Einsatz. Dabei werden Windenergieanlagen in aller Regel auf eine Lebensdauer von 20 Jahren ausgelegt. Dabei beziehen sich jedoch die für die Auslegung anzuwendenden Berechnungsgrundlagen in vielen Teilen auf das Konzept der synthetischen Wöhlerlinien, die auf /Hue81/ zurückgehen. Die Erkenntnisse hieraus erweitern /Gud99, Ber13/ in verschiedenen Arbeiten und ergänzen diese um neue Werkstoffgruppen. Die Auslegung erfolgt dabei mit Hilfe des Nennspannungskonzeptes /Gud99, Ber13/.

Dies deckt jedoch zunächst nur den ungänzenfreien Werkstoffzustand ab. Ungänzen wie Lunker oder eben Dross werden im synthetischen Konzept von /Gud99, FKM12, Ber13/ gar nicht berücksichtigt. Lediglich der DNV GL bietet die Möglichkeit, durch Abschlagfaktoren lokal vorliegende Ungänzen zu berücksichtigen; diese gelten jedoch nicht für Dross. Da Dross bisher schwer zu detektieren und hinsichtlich seiner zyklischen Beanspruchbarkeit zu beurteilen ist, ist er nach /DNV16/ komplett abzuarbeiten. Hinzu kommt der Nachweis für eine ausreichende Bauteilfestigkeit auch nach Abarbeiten des Drosses, unter Berücksichtigung verringerter Wanddicken. Dies führt letztendlich zu einem restriktiven Umgang mit detektiertem Dross in den Gießereien.

Schwingfestigkeitsergebnisse von dickwandigem GJS mit Dross stellt /Kau98/ vor, Bild 16. Hierzu werden Mittelspannungsempfindlichkeiten und Wöhlerlinien für unterschiedliche, nach dem Herstellungsverfahren untergliederte Drossarten, erarbeitet. Jedoch findet zu diesem Zeitpunkt keine Klassifizierung des Drosses anhand des ZfP-Befundes statt. Es finden zyklische Versuche unter Wechsel- und Zug-schwellbelastung statt und es zeigt sich, dass die Mittelspannungsempfindlichkeit des in /Kau98/ untersuchten GGG-40 von 0,3 für den ungänzenfreien Werkstoffzustand auf 0,5 für den mit Dross behafteten Zustand ansteigt. Als Streumaß wird $T_\sigma = 1:1,30$ für den ungänzenfreien Werkstoffzustand wie auch für den Fall vorliegender Ungänzen abgeleitet. Für die spätere Bauteilbeurteilung werden jedoch noch weitere Sicherheits- und Risikofaktoren eingeführt /Kau98/.



#1 Poren, leicht entartetes Gefüge mit Poren, Graphit-Entartungen (Form III), punktueller Dross
 #2 $N = 2 \cdot 10^6$ Schwingspiele, $HbV = 8000 \text{ mm}^3$, Vertrauenswahrscheinlichkeit $C = 90\%$, $P_U = 50\%$

Bild 16 Schwingfestigkeit und Mittelspannungsempfindlichkeit in Abhängigkeit von Ungängen nach /Kau98/

4.4 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren oder Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benötigt wurden

Während der Zeit der Projektdurchführung sind keine Verfahren oder Schutzrechte Dritter von der Fraunhofer Gesellschaft in Anspruch genommen worden.

4.5 Angabe der verwendeten Fachliteratur

Die im gesamten Abschlussbericht verwendete Literatur wird im Kapitel 13 gesammelt dargestellt.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit der einzelnen Projektpartner, deren Aufgaben und Verantwortlichkeiten im Vorhaben zeigt

Tabelle 1. Diese wird differenziert in eine koordinierende (K), ausführenden (A) und in eine beratende Funktion (B).

Tabelle 1 Aufgabenverteilung innerhalb des Vorhabens

		Fraunhofer LBF	Fraunhofer IZFP	I-Deal	BMB	Siempelkamp	Meuselwitz	Friedrich Wilhelms-Hütte	Enercon	TK Industrial Solutions	MAN Diesel & Turbo	Germanischer Lloyd
	Legende: K: Koordinierend; A: Ausführend; B: Beratend											
AP 0	Projektleitung	A										
AP 1	Bereitstellung von Versuchskörpern und Bauteilen mit Dross											
AP 1.1	Entwicklung einer drossfähigen Gussblockgeometrie (Versuchskörper) durch Partner Siempelkamp aus EN-GJS-400	K				A						
AP 1.2	Abguss des entwickelten Versuchskörpers bei den anderen Gießereien ebenfalls als EN-GJS-400	K				B	A	A			A	
AP 1.3	Herstellung von Proben mit und ohne Dross aus Versuchskörpern für statische und zyklische Versuche	AK	B			A	A	A			A	AB
AP 1.4	Bereitstellung von Bauteilen mit Dross	K	B			A	A		A	A	A	B
AP 1.5	Herstellung von Proben mit und ohne Dross aus Bauteilen für statische und zyklische Versuche	AK	B			A	A		A	A	A	AB
AP 2	Detektion von Dross mittels ZfP											
AP 2.1	Ultraschalluntersuchung (konventionelles Ultraschall und Sampling Phased Array) an Versuchskörpern	K	A	A		B	B	B			B	B
AP 2.2	Ultraschalluntersuchung (konventionelles Ultraschall und Sampling Phased Array) an Bauteilen	K	A	A		B	B		B	B	B	B
AP 2.3	Magnetpulver- und Farbeindringprüfung an Versuchskörpern	K			A	B	B	B			B	B
AP 2.4	Magnetpulver- und Farbeindringprüfung an Bauteilen	K			A	B	B		B	B	B	B
AP 2.5	„IZFP“-Verfahren (3MA, MFL, Oberflächenwellen) an Versuchskörpern	K	A			B	B	B			B	B
AP 2.6	„IZFP“-Verfahren (3MA, MFL, Oberflächenwellen) an Bauteilen	K	A			B	B		B	B	B	B
AP 2.7	Metallographische und computer-tomographische Referenzuntersu-	AK	A		A							B

	Legende: K: Koordinierend; A: Ausführend; B: Beratend	Fraunhofer LBF	Fraunhofer IZFP	I-Deal	BMB	Siempelkamp	Meuselwitz	Friedrich Wilhelms-Hütte	Enercon	TK Industrial Solutions	MAN Diesel & Turbo	Germanischer Lloyd
	chungen an Proben											
AP 3	Entwicklung eines Dross-Festigkeitsklassen-Systems											
AP 3.1	Schwingfestigkeitsuntersuchungen an defektfreien Proben aus Versuchskörpern und Bauteilen	A										AB
AP 3.2	Statische Versuche an Proben aus Versuchskörpern und Bauteilen mit und ohne Dross	A				A	A	A	A	A	A	AB
AP 3.3	Schwingfestigkeitsuntersuchungen an mit Dross behafteten Proben aus Versuchskörpern	A										AB
AP 3.4	Schwingfestigkeitsuntersuchungen an mit Dross behafteten Proben aus Bauteilen	A										AB
AP 4	Bemessungskonzept für drossbehaftete Bauteile											
AP 4.1	Festlegung der Betriebslasten auf die lokal mit Dross behaftete Bauteilgeometrie	AK				AB			AB	AB		AB
AP 4.2	Lokale Lebensdaueranalyse an ausgewählten Bauteilen	AK				A			AB	AB		AB
AP 4.3	Festlegen einer Methodik zum rechnerischen Umgang mit Dross	AK				A						AB
AP 5	Ableitung einer Freigabemethode für Dross mittels ZfP											
AP 5.1	Verfahrensbeschreibung des zu nutzenden zerstörungsfreien Prüfverfahrens für die optimale Drosserkennung	K	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B
AP 5.2	Verfahrensbeschreibung für die praxisrelevanten Verfahren UT, MP, PT zur Drossdetektion	K	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B
AP 5.3	Nachweis der Anwendbarkeit der Methode am Bauteil	K	A	A	A	B	B		B	B	B	B
AP 5.4	Empfehlungen für eine optimale Bauteilgestaltung zur verbesserten Prüf- und Anwendbarkeit des Konzepts	K	A	A	A							B
AP 5.5	Integration der Methoden in die Freigabepaxis mit Hinweisen für Richtlinien bzw. (Werks-)Normen	AK	A	A	A							B
AP 6	Überführung der Ergebnisse in die Praxis											
AP 6.1	Projektbegleitung durch einen Zertifizierer für die Diskussion von anwendungsrelevanten Fragen	K										A
AP 6.2	Abstimmung des Bemessungs- und Prüfkonzeptes mit der Praxis	AK	A	A	A	B	B	B	B	B	B	AB

Die Projektleitung wurde von Seiten des Fraunhofer LBF übernommen. Die Koordination sämtlicher Arbeitspakete oblag ebenfalls dem Fraunhofer LBF. Insbesondere die Kommunikation und bilaterale Abstimmung zwischen den einzelnen Partnern wurde von diesen jeweils eigenverantwortlich durchgeführt. Das Vorgehen im Projekt wurde bei den halbjährlich stattfindenden Projektsitzungen von allen Partnern abgestimmt.

Im Laufe des Projektes stellten die Projektpartner Meuselwitz Guss, Siempelkamp, ThyssenKrupp Industrial Solutions, die FWH und MAN Versuchskörper sowie teilweise Bauteile mit Dross für die Probenentnahme bereit. Zudem wurden zerstörungsfreie Untersuchungen an Bauteilen von Enercon und Siempelkamp durchgeführt, um die erarbeiteten ZfP-Methoden am Bauteil überprüfen zu können.

Die zerstörungsfreien Untersuchungen mittels Ultraschall, den magnetischen Verfahren, CT, MT und PT, die Aufbereitung und den Datenaustausch der Versuchsergebnisse sowie die Erarbeitung der notwendigen Prüfkonzepte erfolgte durch das Fraunhofer IZFP, BMB und ACS. Die Ergebnisse wurden anschließend vom Fraunhofer LBF im Bemessungskonzept aufgegriffen.

In mehreren Arbeitstreffen zwischen Fraunhofer IZFP und Fraunhofer LBF wurden Methoden zur Auswertung der zfP-Verfahren mit Blick auf Fehlstellen und deren Korrelation zur Schwingfestigkeit beleuchtet und diskutiert.

In enger Abstimmung mit dem DNV GL wurde das Vorgehen seitens der Projektleitung insbesondere im Versuchsumfang und in der Methodenentwicklung abgestimmt. Hierbei wurden auch die Gießereien und Anwender im Kreise der Projektpartner einbezogen, um neben dem wissenschaftlichen Interesse die industrielle Relevanz nicht aus den Fokus zu verlieren.

II. Eingehende Darstellung

6 Versuchskörper, Bauteile und Probenentnahme

Für die Untersuchung der Schwingfestigkeit von Dross kommen Schwingproben zum Einsatz, die dickwandigen Versuchskörpern aus EN-GJS-400-15 entnommen werden. Diese Versuchskörper wurden hinsichtlich der Geometrie, des Vermögens Dross bilden zu können sowie der Abgussbedingungen durch Projektpartner Siempelkamp entwickelt und von diesen wie auch durch Partner MAN und FWH abgegossen. Zur Einbringung von möglichst viel und dickem Dross werden die Versuchskörper mittels erhöhter Turbulenz vergossen, um den Sauerstoffeintrag und damit die Oxidbildung und die Drossbildung in der Schmelze und während der Erstarrung zu erhöhen. Die Versuchskörper sind würfelförmig und besitzen eine Kantenlänge von 500 mm, um hierdurch eine mit realen Bauteilen vergleichbare Mikrostruktur am Versuchskörper sowie ausreichend dicke Drossschichten für die Probenentnahme einzustellen. Der Abguss der Schmelze erfolgt bei einer Gießtemperatur von $\vartheta = 1520 \text{ °C}$ im Gießtumpel parallel in zwei Versuchskörper mit 2.000 kg Schmelze. Nach der Erstarrung werden bei jedem Versuchskörper von der Drossgegenseite her 300 mm abgetrennt, um Transport und Probenentnahme zu vereinfachen. Einen Versuchskörper nach dem Abguss und die Zeichnung zum Abguss zeigt Bild 17.

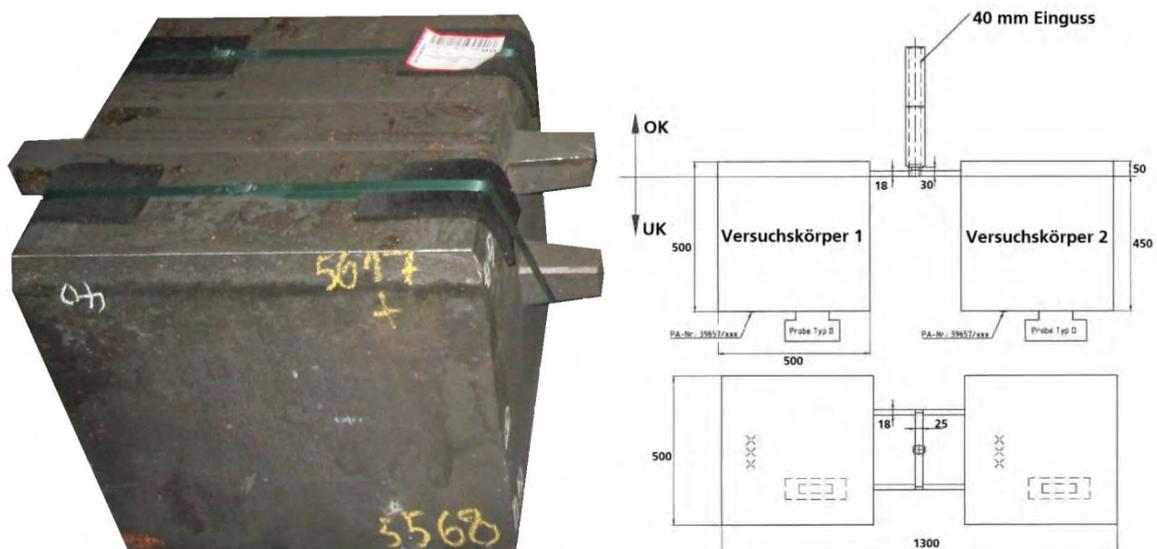


Bild 17 Versuchskörper nach dem Abguss (links) sowie Gießzeichnung (rechts /Sie15/)

Aktuell wird im Bereich der Windenergie und dem übrigen Großmaschinenbau vornehmlich der EN-GJS-400 in den Varianten EN-GJS-400-15 und EN-GJS-400-18U-LT (für Tieftemperaturanwendungen) eingesetzt, der sich in Bezug auf die Legierungselemente kostengünstig herstellen und bearbeiten lässt und gleichzeitig hohe Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften ausweist. Zur Vereinheitlichung der Untersuchungen werden alle Versuchskörper aus EN-GJS-400-15 abgegossen.

Zur Dokumentation des vorliegenden Werkstoffes werden neben der chemischen Zusammensetzung auch die quasi-statischen Werkstoffkennwerte für den Grundwerkstoff sowie für die Drossbereiche

dokumentiert. Die chemische Zusammensetzung der Versuchskörper aus EN-GJS-400-15 ist in Tabelle 2 als Sollwerte nach /Sie15/ zusammengefasst.

Tabelle 2 Die chemische Zusammensetzung der Versuchskörper /Sie15/

Werkstoff	Kohlenstoff C	Silizium Si	Mangan Mn	Phosphor P	Schwefel S	Magnesium Mg
	[Gew. %]	[Gew. %]	[Gew. %]	[Gew. %]	[Gew. %]	[Gew. %]
EN-GJS-400-15	3,650	2,350	0,230	0,025	0,010	0,070

Neben den Versuchskörpern werden auch Schwingproben aus einem Bauteil der FWH Eisenguss, Bild 18 und Bild 19, entnommen und zyklisch untersucht. Bei einem weiteren Bauteil, dass du Projektpartner Enercon zur Verfügung gestellt wird, zeigen die zerstörungsfreien Untersuchungen keinen Dross, sodass eine zerstörende Untersuchung entfällt. Die chemische Zusammensetzung des Bauteils von Partner FWH findet sich in Tabelle 3.

Tabelle 3 Chemischen Zusammensetzung des Bauteils

Werkstoff	Kohlenstoff C	Silizium Si	Mangan Mn	Phosphor P	Schwefel S	Magnesium Mg
	[Gew. %]	[Gew. %]	[Gew. %]	[Gew. %]	[Gew. %]	[Gew. %]
EN-GJS-400-18	3,55	2,550	< 0,300	< 0,040	< 0,020	0,060



Bild 18 Bauteil für Kunststoffspritzgießmaschine aus EN-GJS-400-18 mit einer Gießmasse von ca. 22 t mit herausgetrennten Bauteilbereichen



Bild 19 Herausgetrennte und mit Dross behaftete Bauteilabschnitte

Eine Übersicht über alle abgegosenen und für Untersuchungen zur Verfügung stehenden Versuchs-
körper und Bauteile nach Hersteller zeigt Tabelle 4.

Tabelle 4 Versuchskörper und Bauteile mit Beschriftung

Werkstoff		Hersteller	Nummer
EN-GJS-400-15	Versuchskörper	Siempelkamp	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11
		MAN	5261600, 5261601, 5261790, 5261791
		FWH	1,1, 1,2, 2,1, 2,2
EN-GJS-400-18	Bauteilabschnitt	FWH	1, 2

6.1 Zerstörungsfreie Untersuchungen an Versuchskörpern und Bauteilen

Nach dem Abguss der Versuchskörper und des Bauteils von Partner FWH findet zunächst in der jeweiligen Gießerei eine Ultraschalluntersuchung mittels handgeführtem Ultraschall statt, um die Drossbereiche in ihrer Ausdehnung abschätzen zu können. Dabei wird in allen Versuchskörpern sowie im Bauteil großflächiger Dross gefunden.

Anschließend finden am Fraunhofer IZFP umfangreiche Untersuchungen mit elektromagnetischen Verfahren und mit mechanisiertem Ultraschall sowie bei Projektpartner ACS mechanisierte Ultraschall-Sampling-Phased Array-Messungen statt.

6.1.1 Mechanisierte zerstörungsfreie Untersuchungen an Versuchskörpern aus GJS

An den von den Projektparten zur Verfügung gestellten Versuchskörpern werden mechanisierte zerstörungsfreie Untersuchungen durchgeführt. Abhängig von dem eingesetzten Prüfverfahren werden mechanisiert Messdaten von der Dross- bzw. von der Dross-Gegenseite aus aufgezeichnet. Dabei werden die mechanisierten Ultraschallprüfungen auch von beiden Seiten der Versuchskörper durchgeführt. Die Streufluss- und 3MA-Messdaten werden jeweils nur von der Dross-Seite durchgeführt, da bei beiden Verfahren die Eindringtiefe nicht ausreicht, um von der Gegenseite aus den Dross detektieren zu können. Hierbei gibt es abhängig von den Oberflächeneigenschaften der Versuchskörper ebenfalls Einschränkungen für den Einsatz der magnetischen Streufluss- und 3MA-Methode.

Zusätzlich zu den Versuchskörpern wurden zwei Bauteilsegmente und ein Bauteil, aus dem vier Teilsegmente herausgearbeitet wurden, von den Projektpartnern zur Verfügung gestellt und im Rahmen des Vorhabens zerstörungsfrei geprüft.

Als Überblick ist in Tabelle 5 dargestellt, welche Versuchskörper mit welchen Verfahren mechanisiert gemessen wurden und welchen Oberflächenzustand die jeweiligen Versuchskörper bei der Durchführung der mechanisierten Prüfungen hatten.

Tabelle 5 Übersicht der angewendeten zFP-Verfahren an den jeweiligen Prüfkörpern

	Testkörper / Bauteile	US von DGS	US von DS	US RW von DGS	US RW von DS	3MA	MFL
1	Siempelkamp 39579-3	X	X	X	X	X	X
2	Siempelkamp 39579-4	X	X	X	X	X	X
3	Siempelkamp 39579-5	X	X	X	X	X	X
4	Siempelkamp 39579-6	X	X	X	X	X	X
5	Siempelkamp 39579-7	X	X	X	X	X	X
6	Siempelkamp 39579-8 (überfräst)	X	X	X	X	X	X
7	Siempelkamp 39579-9	X	X	X	X	X	X
8	Siempelkamp 39579-10	X	X	X	X	X	X
9	Thyssen 39455-1	X	X	X	X	X	-
10	Thyssen 39455-2	X	X	X	X	X	-
11	Thyssen 39455-3	X	X	X	X	X	X
12	MAN 5261600 (überfräst)	X	X	X	X	X	X
13	MAN 5261600 (geviertelt & überfräst)	X	X	X	X	-	-
14	MAN 5261601 (überfräst)	X	X	X	X	X & X*	X
15	MAN 5261790	X	X	X	X	X	X
16	MAN 5261791	X	X	X	X	X	X
17	FWH 1.1	X	X	X	X	X & (X*)	(X)
18	FWH 1.2	X	X	X	X	X	-
19	FWH 2.1	X	X	X	X	X & (X*)	(X)
20	FWH 2.2	X	X	X	X	X	-
21	FWH Bauteilsegment 1	X	X	X	X	X*	-
22	FWH Bauteilsegment 2	X	X	X	X	X*	-
23	Enercon Bauteilsegment 1	X	X	X	X	X	-
24	Enercon Bauteilsegment 2	X	X	X	X	X	-
25	Enercon Bauteilsegment 3	X	X	X	X	X	-
26	Enercon Bauteilsegment 4	X	X	X	X	X	-

X: mit MikroMach gemessen

X*: mit 3MA-X8 gemessen

(X): an im Nachgang überfräster Gießoberseite gemessen

Überfräste Gießoberseiten

(X)*: an im Nachgang überfräster Gießoberseite mit 3MA-X8 gemessen

6.1.2 Anwendbarkeit und Randbedingungen für den Einsatz der Prüfmethoden

Allgemein haben mechanisiert aufgezeichnete zerstörungsfreie Prüfungen den Vorteil, dass eine räumliche Zuordnung der Messdaten in digitaler Form vorliegt. Diese digitalen Daten bieten eine Vielzahl von Möglichkeiten, die im Gegensatz zu flüchtigen, nicht digitalisierten und oft händisch ermittelten Prüfdaten von Vorteil sein können. So bietet sich die Möglichkeit eines digitalen Mappings mit der Bauteilgeometrie zum Beispiel über CAD-Daten. Die digitalen Prüfdaten können in Qualitäts-Sicherungs- und -Überwachungsprozessen sowie gegebenenfalls zur Optimierung der Produktion eingesetzt werden.

Werden Mehrachsmanipulationssysteme zur mechanisierten Prüfung eingesetzt, gibt es abhängig von dem Manipulationssystem Einschränkungen bezüglich der Geometrie der prüfbar Bauteile/Versuchskörper. Übliche Dreiachs-Systeme gehen zum Beispiel von ebenen Prüfflächen aus, sodass hierbei Unebenheiten, Balligkeiten, Oberflächenausbrüche und -Erhebungen sowie Schräglagen der Oberfläche zu einer Beeinflussung der Prüfung führen können. Abhängig von eingesetzten Prüfverfahren kann dies unterschiedlich gut toleriert werden, aber auch dazu führen, dass die mechanisierte Prüfung nicht oder nur teilweise durchführbar ist.

Die Anwendbarkeit und die Randbedingungen für den Einsatz der Prüfmethoden werden im Anschluss an eine exemplarische Ergebnisdarstellung für alle Verfahren anhand eines Beispiel-Versuchskörpers erläutert.

Als Beispiels-Versuchskörper wird in den folgenden Erläuterungen für alle eingesetzten Verfahren der vom Projektpartner MAN Diesel & Turbo SE zur Verfügung gestellte Versuchskörper Nummer 5261600 verwendet. Dieser Versuchskörper wird mit allen zuvor erwähnten Prüfmethoden mechanisiert geprüft.

Die Oberfläche auf der Dross-Seite dieses Versuchskörpers war leicht überfräst und somit eben, was den Einsatz aller Prüfmethode begünstigte.

Die restlichen Ergebnisse der eingesetzten Prüfmethode an allen Versuchskörpern und Bauteilsegmenten sind im Anhang aufgeführt und analog zu den Beispielergebnissen aufgebaut.

6.1.3 Mechanisierte Ultraschallprüfung

Die mechanisierten Ultraschalluntersuchungen werden von beiden Seiten der Versuchskörper durchgeführt. Für die Messungen von beiden Seiten wird jeweils ein am Fraunhofer IZFP vorhandenes, stationäres Mehrachs-Manipulationssystem eingesetzt, welches den Ultraschallprüfkopf bei den Messungen von beiden Seiten mit einer Auflösung von ca. 2 mm in beide Verfahrrichtungen (Scan- und Indexrichtung) über die Oberfläche der Versuchskörper geführt hat. Bei den eingesetzten Ultraschallprüfköpfen handelt es sich für die Messungen von beiden Seiten jeweils um piezobasierte Ultraschalleinzelschwinger zur Senkrechteinschallung von Longitudinalwellen. Der Schussabstand der Abrasterung in Scan- und Indexrichtung (ca. 2 mm) beträgt jeweils 10 % des Schwingerdurchmessers von 20 mm. Die Abtastung der Bauteiloberfläche erfolgte nach einem mäanderförmigen Scanmuster, Bild 20.

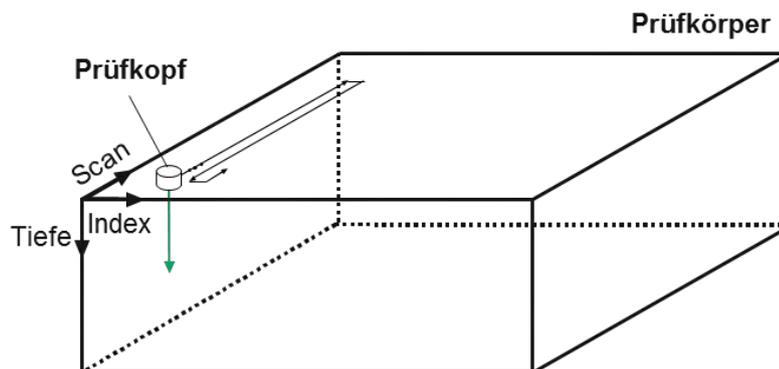


Bild 20 Mäanderförmiger Verfahrsweg während den mechanisierten Ultraschallprüfungen

Die aufgenommenen Ultraschalldaten, die zunächst als A-Bild vorliegen, werden durch die Prüfsoftware in farbcodierte B-, C-, und D-Bilder rekonstruiert, indem jedem aufgenommenen Amplitudenwert, unabhängig von Index- und Scanrichtung, ein entsprechend farbcodierter Wert zugeordnet wurde, Bild 21.

Die Auswertung der Ultraschalldaten erfolgte gemäß der Darstellung der aufgenommenen Amplitudenwerte in Scan-, Index- und Tiefenrichtung in Form von B-, C- und D-Bildern, Bild 22. Die Erstellung der Auswertebilder erfolgte sowohl über die Darstellung aller Amplitudenwerte in Scanrichtung (B-Bilder) als auch die Darstellung aller Amplitudenwerte in Indexrichtung (D-Bilder). C-Bilder wurden über softwareintegrierte flexible Blenden für beliebige Tiefen abgebildet.

Hierdurch können einerseits gesamte Bauteilvolumina als Summenbilder aller Amplitudenwerte über alle Spuren oder aber auch partielle Bauteilvolumina, die durch softwareintegrierte flexible Blenden definiert werden können, farblich dargestellt werden.

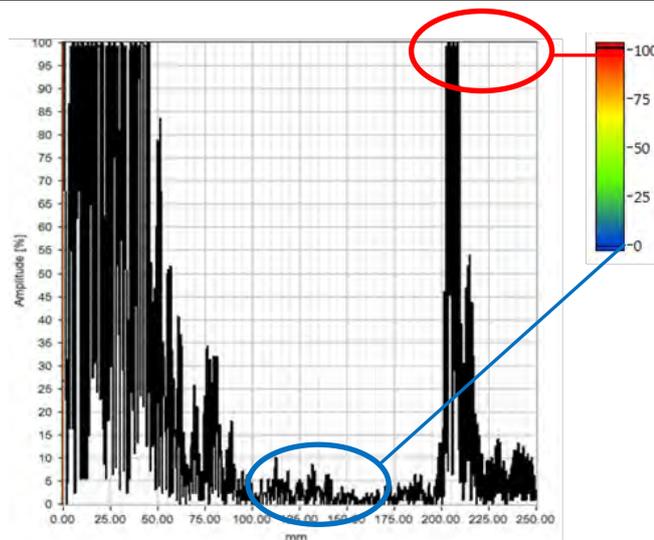


Bild 21 Zuordnung der US-Amplitude im A-Bild als farbcodierter Wert

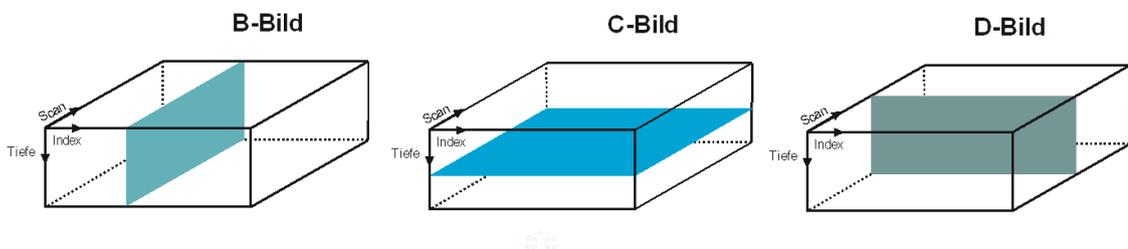


Bild 22 Erläuterung zur Darstellung in Form von B-, C- und D-Bildern

Zur Ultraschallanregung und -verarbeitung wird ein am Fraunhofer IZFP entwickelte PCUS11-Elektronik-Einschub verwendet, der in einem speziell dafür vorgesehenen Laptop integriert wurde. Zur mechanisierten Ultraschallprüfung mit Einschaltung von der **Dross-Gegenseite** aus wird der Ultraschall-Einzelschwinger-Prüfkopf B1S ($f = 1 \text{ MHz}$) in Impuls-Echo-Technik eingesetzt.

Dieser Einzelschwinger wird in Kontakttechnik mit einem Einschallwinkel von 0° (Senkrechteinschallung) betrieben und als Koppelmittel Fließwasser mit Korrosionsschutz verwendet. Bild 23 zeigt exemplarisch anhand des Versuchskörpers MAN 5261600 die Ergebnisse der mechanisierten Ultraschallprüfung von der Dross-Gegenseite.

Mechanisierte Ultraschallprüfungen von der **Dross-Gegenseite** ermöglichen die Ermittlung der Dross-Schichtdicke und -Verteilung. Da sich Dross üblicherweise als Gruppenanzeige kurz vor der Rückwand darstellt und diese auch unter Umständen ganz abschotten kann (siehe Auswertung Rückwandabschattung), wird zur Ermittlung der Dicke der Dross-Schicht die Anzeige mit der kürzesten Laufzeit ermittelt und die Differenz zur Wanddicke gebildet. Das entsprechende Vorgehen hierzu ist in der angefügten „Verfahrensbeschreibung zur mechanisierten Ultraschallprüfung von Großgussbauteilen mit Kugelgraphit (GJS) unter Einsatz von Einzelschwingern“, die im Rahmen des unverDROSSen-Projektes erarbeitet wurde, erläutert.

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass an den vorliegenden Versuchskörpern mittels mechanisierter Ultraschall-Messungen von der Dross-Gegenseite (Schnittfläche der Versuchskörper) die vorhandene Dross-Verteilung und die Dross-Schichtdicke nachweisbar sind. Die Ergebnisdarstellung ist folgendermaßen aufgebaut:

Im linken oberen Bereich von Bild 23 ist ein Foto der überfrästen Dross-Seite des vermessenen Versuchskörpers MAN 5261600 abgebildet. In dem Foto des Versuchskörpers wird die nach der Herstellung durch manuelle händische Ultraschall-Messungen vom Hersteller ermittelten Dross-Verteilung grob eingezeichnet. Auf der unteren linken Seite der Abbildung ist das D-Bild (Vorderansicht bzgl. des Fotos) der Ultraschall-Messung dargestellt. Im rechten Bereich der Abbildung befindet sich oben das C-Bild (Draufsicht) und darunter das B-Bild (Seitenansicht). Die zur C-Bilderzeugung verwendete Blende ist ebenfalls angegeben. Die maximale Dross-Stärke dieses Versuchskörpers von MAN Diesel & Turbo SE liegt bei 45 mm.

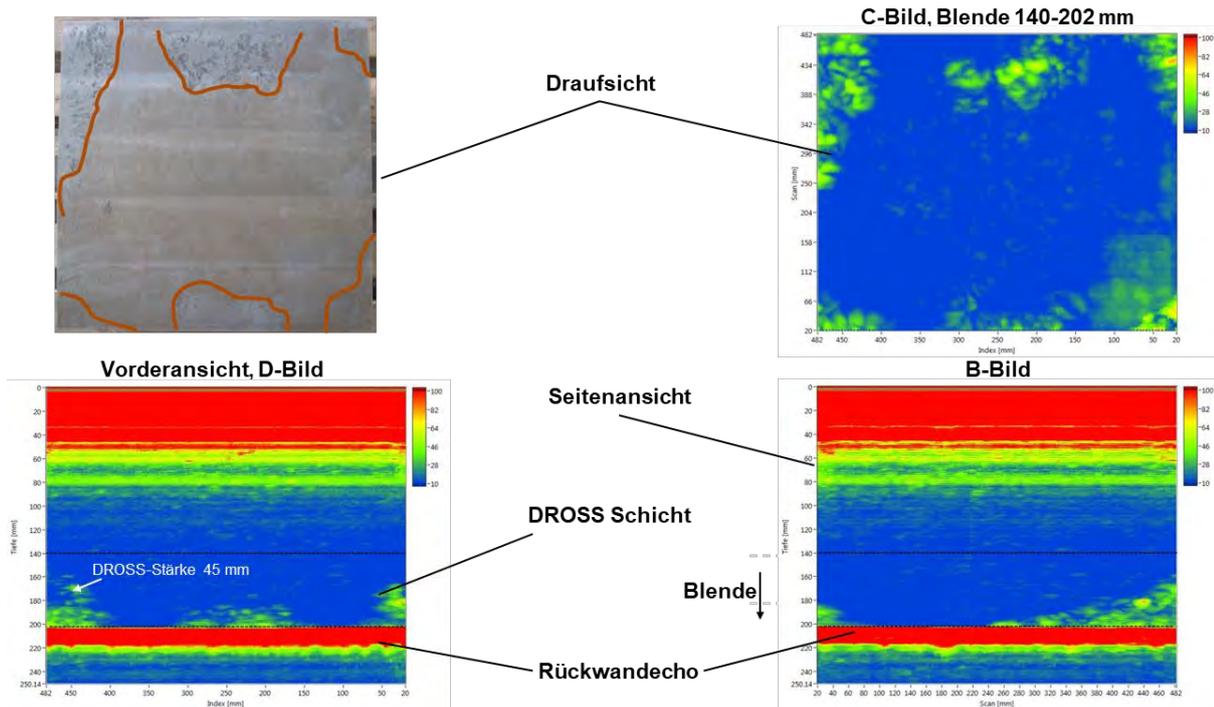


Bild 23 Ultraschalluntersuchungen; Einschallung von der Dross-Gegenseite. Prüfkopf: B1S. Versuchskörper: MAN 5261600

Da bei Dross-Schichten bzw. -Verteilungen davon auszugehen ist, dass sie einen Einfluss auf die Dichteverteilung haben, wird für die Ultraschalldaten ein weiterer Ansatz gesucht, der auf einer Informationsauswertung über die Dichteverteilung im Werkstoff basiert. Hierfür kommt die Ultraschall Rückwandabschattung in Frage.

Zur **Auswertung der Rückwandabschattung** werden die mechanisierten Ultraschalldaten (analog zu den in der angefügten Verfahrensbeschreibung erläuterten Vorgehen) ebenfalls Summenbildern aller Amplitudenwerte (C-Bilder) durch softwareintegrierte flexible Blenden erzeugt und ausgewertet. Der zur Auswertung der Rückwandabschattung zu analysierende Teil der Ultraschalldaten ist im Gegensatz zu den zuvor vorgestellten Auswertungen der Bereich der Rückwand. Das heißt in diesem Fall wird die Rückwand mittels Blenden gefenstert und die daraus resultierenden Summenbilder bezüglich der Abschattung der Rückwand ausgewertet, Bild 24.

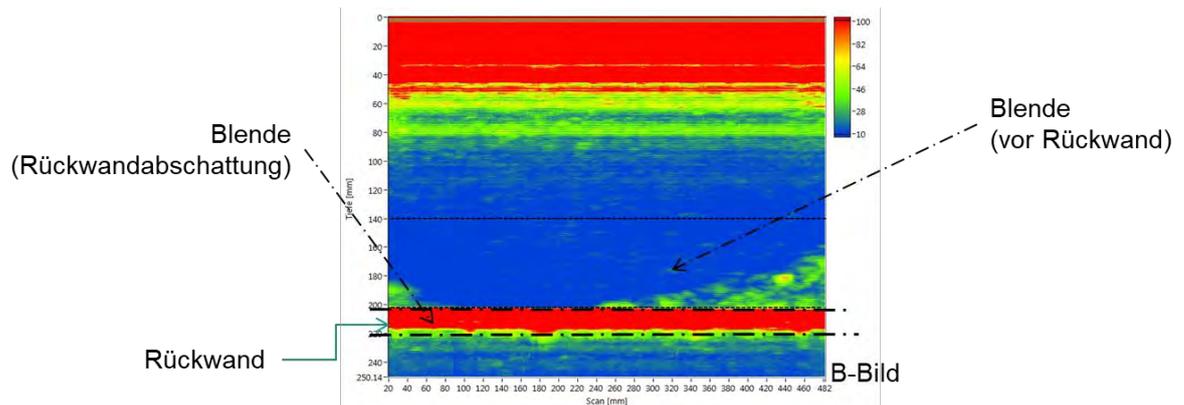


Bild 24 Beispiel zum Erzeugen der C-Bilder bei der Auswertung der Rückwandabschattung im Vergleich zum vorherigen Vorgehen bei der mechanisierten Ultraschall-Prüfung

Die Ergebnisdarstellung ist im Falle dieser Art der Auswertung konträr zu den vorherigen Darstellungen. Bei der Abschattung zeigen sich Bereiche mit Dross dadurch, dass keine Anzeigen der Rückwand vorhanden sind. Findet im Gegenzug eine Rückwandreflektion statt, ist davon auszugehen, dass an dieser Position kein Dross vorliegt, da die Ultraschallwellen sich ungestört von der Dross-Gegenseite (Ort der Einschallung) bis zu gegenüberliegenden Versuchskörperseite (Rückwand) ausbreiten konnten. Somit ist es mittels der Auswertung der Rückwandabschattung für mechanisierte Ultraschallprüfungen von der Dross-Gegenseite aus möglich, die Verteilung des Drosses im Versuchskörper zu ermitteln.

Bild 26 zeigt exemplarisch anhand eines Teilsegmentes des Versuchskörpers MAN 5261600 die Ergebnisse der mechanisierten Ultraschallprüfung von der Dross-Gegenseite und die Auswertung der Rückwandabschattung in Form von C-Bildern. Die mechanisierte Ultraschallprüfung an dem Teilsegment wird aufgrund der zum Zeitpunkt dieser Messdatenaufnahme bereits überarbeiteten Höhe des Teilsegmentes (ursprüngliche Abmessungen des Versuchskörpers: ca. 500 x 500 x 200 mm, Abmessungen der Teilsegmente (geviertelt und in der Höhe reduziert): ca. 250 x 250 x 68 mm, Bild 25) mit einem anderen Prüfkopf durchgeführt.

Hierbei handelt es sich um einen Einzelschwinger B2S (2 MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm). Dieser Einzelschwinger wurde ebenfalls in Kontakttechnik mit einem Einschallwinkel von 0° (Senkrechteinschallung) betrieben und als Koppelmittel wurde Fließwasser mit Korrosionsschutz verwendet.



Bild 25 Links: Foto der überfrästen Oberfläche des geviertelten Versuchskörpers MAN 5261600 (Teilsegment Nr. 1-4); Rechts: Reduzierte Versuchskörperhöhe (zuvor ca. 200 mm nach Bearbeitung ca. 68 mm)

In Bild 26 wird das Ultraschall C-Bild aufgezeichnet von der Dross-Gegenseite (links) sowie das ebenfalls von der Dross-Gegenseite aufgezeichnete C-Bild der ermittelten Abschattung der Rückwand (rechts) für ein Teilsegment des Versuchskörpers MAN 5261600 dargestellt. Die elastische Welle des Ultraschalls reagiert auf Impedanzkontraste (Produkt aus Dichte und Schallgeschwindigkeit). Das Ultraschall C-Bild (links) zeigt die Intensität der reflektierten Ultraschallwellen und die Rückwandabschattung die Bereiche, in denen keine bzw. kaum elastische Energie die Rückwand erreicht (rechts).

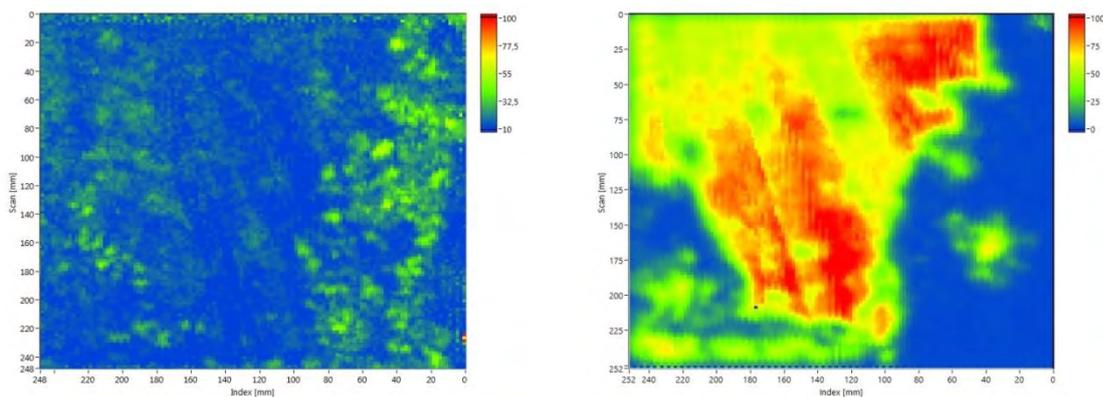


Bild 26 Ultraschalluntersuchungen; Einschallung von der Dross-Gegenseite, Prüfkopf: B2S, Versuchskörper: Teilsegment von MAN 5261600; Links: C-Bild Blende: 30,99 - 65,11 mm; Rechts: C-Bild Auswertung Rückwandabschattung Blende: 65,11 - 80 mm

Im Gegensatz zu den Ultraschalldatenauswertungen, die nicht die Rückwandabschattung ausnutzen, zeigen die Ergebnisbilder der Rückwandabschattung eine Dross-Verteilung durch einen geringen Amplitudenwert an. Somit sind in Bild 26 die in diesen Fällen grünlichen Bereiche auf der linken Seite mit den bläulichen Bereichen der rechten Seite der Abbildung (Rückwandabschattung) zu vergleichen.

Dieser Vergleich der beiden C-Bilder zeigt eine Korrelation auf und zeigt, dass sich die Dross-Verteilung auch durch die Auswertung der Rückwandabschattung bei Einschallung von der Dross-Gegenseite detektieren lässt.

Zur mechanisierten Ultraschallprüfung mit Einschallung von der Dross-Seite aus wird der folgende Ultraschall-Prüfkopf in Sende-Empfangs-Technik eingesetzt:

Einzelschwinger SEB1 (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm).

Der SEB1 Prüfkopf ist ein Sende-Empfangsprüfkopf mit zwei getrennten Einzelschwingern (einer zum Senden und einer zum Empfangen) und hat dadurch im Vergleich zum B1S Prüfkopf (Einzelschwinger), der von der Dross-Gegenseite der Testkörper eingesetzt wird, ein besseres Nahauflösungsvermögen. Dies ist bei den Messungen von der Dross-Seite aus von Vorteil, da hierdurch Dross-Anzeigen nicht durch den Sendimpuls überdeckt werden. Dieser Sende-Empfangsprüfkopf wird ebenfalls in Kontakttechnik mit einem Einschallwinkel von 0° (Senkrechteinschallung) betrieben und als Koppelmittel Fließwasser mit Korrosionsschutz verwendet. Bild 27 ist analog zu Bild 26 in welcher die Prüfung von der Dross-Gegenseite dargestellt wird, in Bereiche aufgeteilt. Im linken oberen Bereich ist erneut das gleiche Foto der leicht überfrästen Dross-Seite des vermessenen Versuchskörpers MAN 5261600 abgebildet. Im rechten Bereich befindet sich das C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Dross-Gegenseite (Schnittfläche), und darunter zum Vergleich das C-Bild (ebenfalls Draufsicht), aufgenommen von der Dross-Seite bzw. Gießoberseite. Die zur C-Bilderzeugung verwendeten Blenden sind ebenfalls in der Abbildung angegeben.

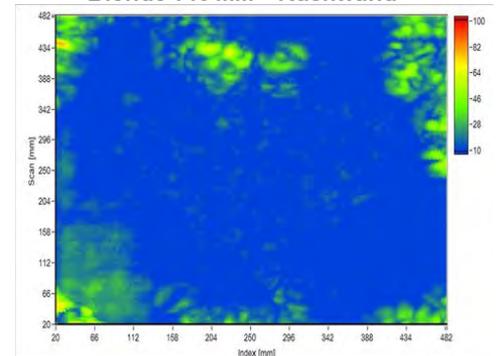


Prüfung von
Schnittfläche

Z

Prüfung von der
Gießoberseite

Blende 140 mm - Rückwand



Blende 0 mm - 120 mm

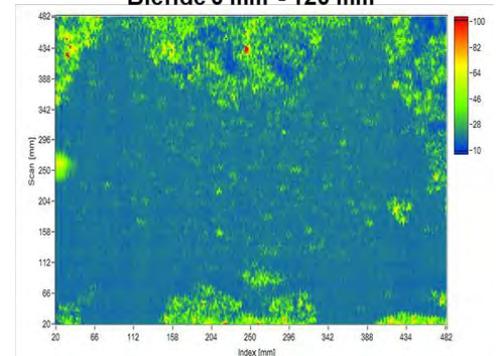


Bild 27 Ultraschalluntersuchungen von der Dross-Gegenseite bzw. Schnittfläche (oben rechts, Prüfkopf: B1S) und von der Gießoberseite bzw. Dross-Seite (unten rechts, Prüfkopf: SEB1). Versuchskörper: MAN 5261600

Der Vergleich beider C-Bilder zeigt anhand des Versuchskörpers MAN 5261600, dass die Verteilung des Drosses sowohl von der Dross-Gegenseite als auch von der Dross-Seite (Gießoberseite) aus mittels mechanisierter Ultraschall-Messungen nachgewiesen werden kann.

Der Ansatz der Rückwandabschattung wird ebenfalls für die mechanisierten Ultraschallprüfungen von der Dross-Seite aus untersucht, da auch hier analog zum Vorgehen bei Einschallung von der Dross-Gegenseite davon auszugehen ist, dass der Dross einen Einfluss auf die Dichteverteilung hat. Die Auswertung der Ultraschalldaten bezüglich der Rückwandabschattung erfolgt analog zu den zuvor für die Einschallung von der Dross-Gegenseite beschriebenen Vorgehen.

Bild 28 zeigt exemplarisch anhand des, ebenfalls für die Rückwandabschattungsuntersuchungen bei Einschallung von der Dross-Gegenseite, verwendeten Teilssegmentes des Versuchskörpers MAN 5261600 die Ergebnisse der mechanisierten Ultraschallprüfung von der Dross-Gegenseite und die Auswertung der Rückwandabschattung bei Einschallung von der Dross-Seite in Form von C-Bildern. Es wird auch hier mit dem Einzelschwinger B2S (2MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm) mechanisiert Ultraschalldaten aufgezeichnet. Dieser Einzelschwinger wird ebenfalls in Kontakttechnik mit einem Einschallwinkel von 0° (Senkrechteinschallung) betrieben und als Koppelmittel Fließwasser mit Korrosionsschutz verwendet.

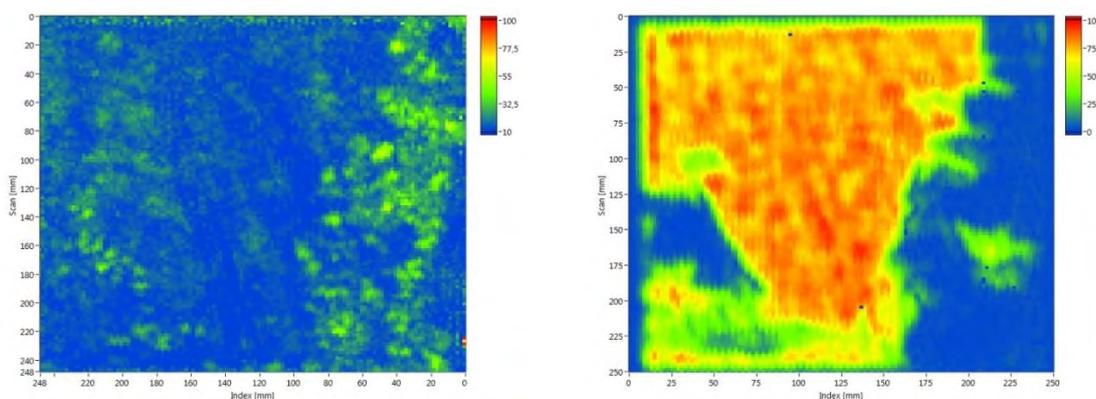


Bild 28 Ultraschalluntersuchungen; Prüfkopf: B2S, Versuchskörper: Teilssegment von MAN 5261600; Links: C-Bild Einschallung von der Dross-Gegenseite, Blende: 30,99 - 65,11 mm; Rechts: C-Bild Auswertung Rückwandabschattung bei Einschallung von der Dross-Seite, Blende: 65,11 - 80 mm

Die in Bild 26 gezeigte Gegenüberstellung der Ergebnisse der Rückwandabschattung bei Einschallung von der Dross-Gegenseite und der Dross-Seite mit dem C-Bild der mechanisierten Ultraschallprüfung von der Dross-Gegenseite zeigt eine Korrelation, Bild 28. Das bedeutet, dass sich die Dross-Verteilung auch durch die Auswertung der Rückwandabschattung, aufgezeichnet von der Dross-Seite und von der Dross-Gegenseite, detektieren lässt. *Ultraschallprüfungen können damit sowohl von der Dross-Gegenseite als auch von der Dross-Seite aus durchgeführt werden.*

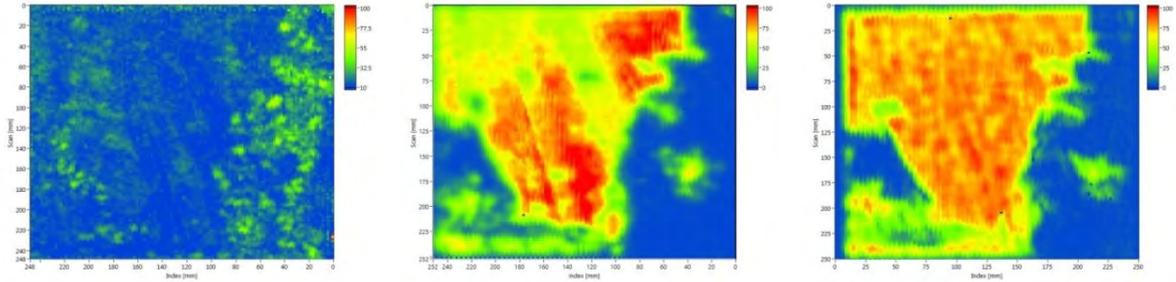


Bild 29 Ultraschalluntersuchungen; Prüfkopf: B2S, Versuchskörper: Teilsegment von MAN 5261600; Links: C-Bild Einschallung von der Dross-Gegenseite, Blende: 30,99 - 65,11 mm; Mitte: C-Bild Auswertung Rückwandabschattung bei Einschallung von der Dross-Gegenseite, Blende: 65,11 - 80 mm; Rechts: C-Bild Auswertung Rückwandabschattung bei Einschallung von der Dross-Seite, Blende: 65,11 - 80 mm

Die Randbedingungen der mechanisierten Ultraschallprüfung sind in der im Rahmen des Vorhabens erarbeiteten und dem Bericht angehängten Verfahrensbeschreibung (Anhang V) zur „mechanisierten Ultraschallprüfung von Großgussbauteilen mit Kugelgraphit (GJS) unter Einsatz von Einzelschwingern“ erläutert. Bei Einschallung von der Dross-Gegenseite ist eine Bestimmung der Dross-Schichtstärke bzw. der Tiefenausdehnung des Drosses durch Auswertung der Echoanzeigen, die vor der Rückwand angezeigt werden, möglich. Bildet man Laufzeitdifferenzen dieser Echoanzeigen zur Rückwand kann die Stärke der Dross-Schicht ermittelt werden. Zusätzlich kann mittels C-Bilder die Verteilung des Drosses in dem Prüfobjekt aufgezeigt werden. Im Gegensatz zur Einschallung von der Dross-Gegenseite kann bei Einschallung von der Dross-Seite nur die Verteilung durch C-Bild-Darstellungen aufgezeigt werden.

Die Auswertung der Rückwandabschattung kann für beide Einschallrichtungen angewandt werden und sie kann in beiden Fällen zur Darstellung der Dross-Verteilung mittels C-Bildern verwendet werden. Hierzu müssen die zur C-Bilderzeugung eingesetzten Blenden die jeweilige Rückwand fenstern.

6.1.4 Mechanisierte 3MA (Mikromagnetische Prüfungen)

Die mechanisierten mikromagnetischen Prüfungen werden von der Dross-Seite der Versuchskörper durchgeführt. Für die Messungen wird ebenfalls das bereits am Fraunhofer IZFP vorhandene und auch zur Ultraschall- und Streuflussprüfung verwendete stationäre Mehrachs-Manipulationssystem eingesetzt, Bild 30. Bei den mikromagnetischen Prüfungen wird der eingesetzte 3MA-Sensor im Gegensatz zu den beiden zuvor vorgestellten Prüfmethoden beim Anfahren der Messpunkte von der Versuchskörperoberfläche abgehoben und zur Datenaufnahme an der Messposition auf die Oberfläche der Versuchskörper aufgesetzt. Durch dieses Vorgehen wird eine Abnutzung des 3MA-Sensors durch den Oberflächenkontakt während der Positionierung vermieden. Die mechanisierte mikromagnetische Prüfung an dem Beispiel-Versuchskörper wurde mit einer Auflösung von ca. 3 mm in beide Verfahrensrichtungen durchgeführt. Für den Versuchskörper MAN 5261600 wird ein MikroMach-Prüfgerät und eine Magnetisierungsfrequenz von 60 Hz verwendet. Die Abtastung der Bauteiloberfläche erfolgte nach einem mäanderförmigen Scanmuster.

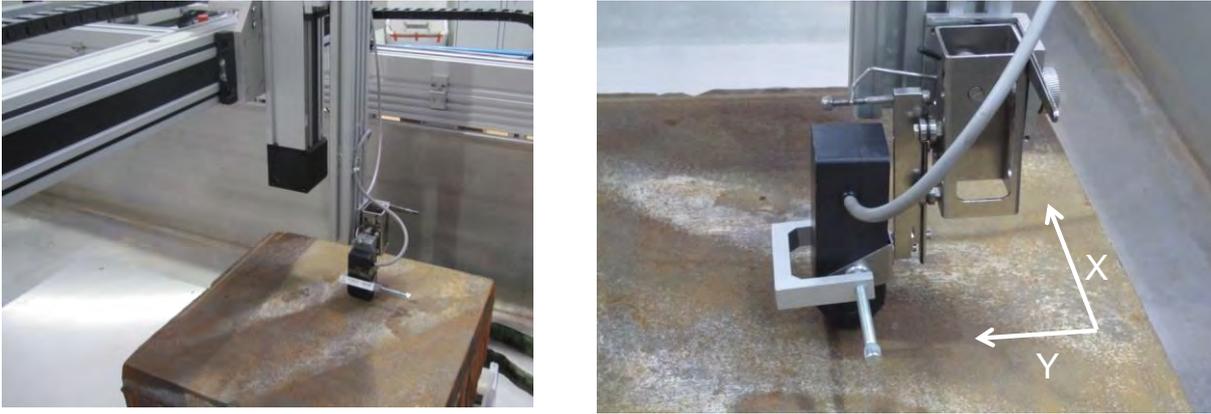
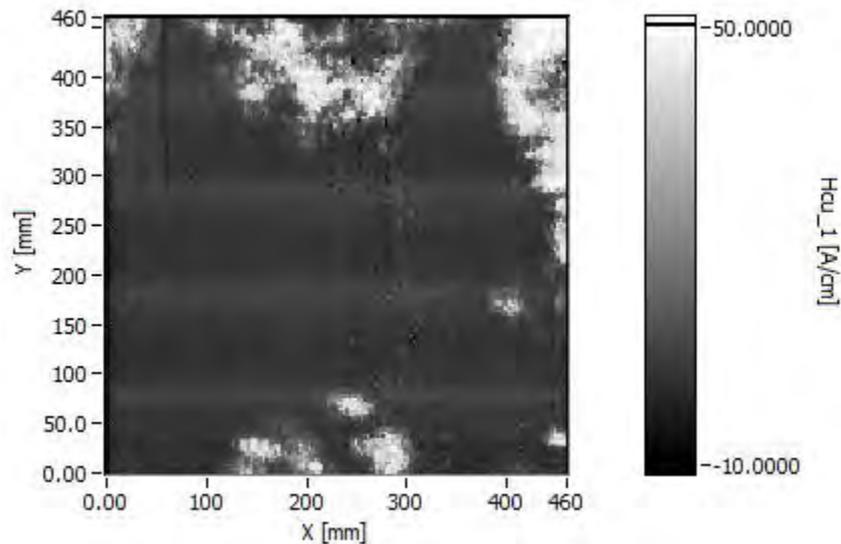


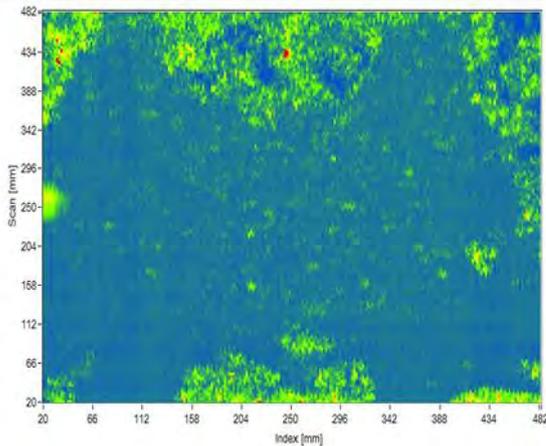
Bild 30 Links: Set-up der mikromagnetischen 3MA-Prüfung mittels mechanisierter Datenaufnahme, MikroMach-Prüfgerät; Rechts: Detailaufnahme des auf die Versuchskörperoberfläche aufgesetzten MikoMach-Prüfsystems

Die Ergebnisse in Bild 31 zeigen, dass an dem Versuchskörper MAN 5261600 mittels mechanisierter mikromagnetischer 3MA-Messungen von der Dross-Seite (Gießoberseite) die vorhandene Dross-Verteilung nachweisbar ist. Anhand der mechanisierten mikromagnetischen Prüfungen an weiteren Versuchskörpern zeigt sich jedoch, dass die Gussrauheit und Unebenheit einzelner Versuchskörper die mechanisierten 3MA-Messungen erschweren und zu einer Beeinflussung der Ergebnisdarstellung führen. Dies ist prinzipiell auch für das industriell etablierte Referenzverfahren MT-Prüfung der Fall. Da der Beispiel-Versuchskörper MAN 5261600 im leicht überfrästen Zustand vorliegt, zeigt sich keine Beeinflussung der 3MA-Messungen durch Rauheiten bzw. Unebenheiten.

Bild 31 ist analog zu den vorherigen Abbildungen der Ultraschall- und Streulicht-Prüfresultate in unterschiedliche Bereiche aufgeteilt. Im linken Bereich ist das Ergebnisbild der mechanisierten Datenaufnahme einer ausgewählten mikromagnetischen Kenngröße dargestellt, die sensitiv auf die oberflächennahe Dross-Verteilung reagiert. Bei der dargestellten Kenngröße handelt es sich um eine aus dem Überlagerungspermeabilitäts-Verfahren abgeleitete Kenngröße, die ein Analogon zur Koerzitivfeldstärke aus der magnetischen Hysterese repräsentiert. Im unteren linken Bereich befindet sich das Ultraschall-C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Dross-Seite. Im rechten unteren Bereich befindet sich das Ultraschall-C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Dross-Gegenseite. Die Ultraschall-Bilder dienen zum qualitativen Vergleich der Ultraschall-Ergebnisse mit dem Ergebnisbild der 3MA-Datenaufnahme.



**US-Prüfung von der Dross-Seite
C-Bild, Blende 0 mm - 120 mm**



**US-Prüfung von der Dross-Gegenseite
C-Bild, Blende 140 mm - Rückwand**

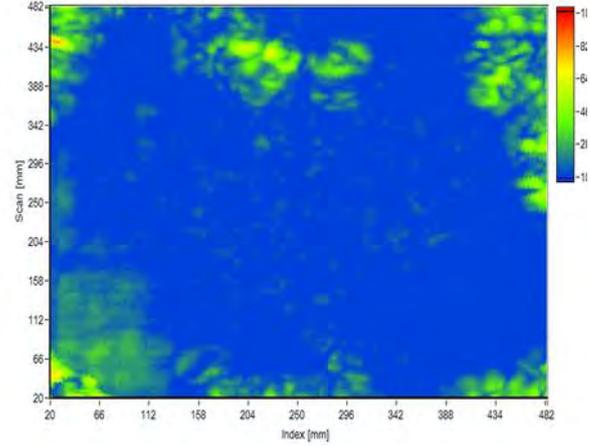


Bild 31 Magnetische 3MA-Untersuchungen mittels mechanisierter Datenaufnahme von der Dross-Seite (oben); Ultraschalluntersuchungen (C-Bild) von der Dross-Seite (unten links) und Ultraschalluntersuchung (C-Bild) von der Dross-Gegenseite (unten rechts).

Versuchskörper: MAN 5261600

Die Auswertung der mikromagnetischen Ergebnisbilder kann analog zur Auswertung der C-Bilder im Ultraschall erfolgen. Auch hier kann eine Anzeige als Dross-Anzeige gedeutet werden, die sich vom restlichen drossfreien Bereich der mechanisierten Messdatenaufnahme abhebt. Der Vergleich des mikromagnetischen Ergebnisbildes und der Ultraschall-C-Bilder zeigt, dass die Verteilung des Drosses von der Gießoberseite (Dross-Seite) aus mittels mechanisierter mikro-magnetischer 3MA-Messungen nachweisbar ist, sofern die Oberfläche des Versuchskörpers dies zulässt.

Aber auch im nicht überfrästen Zustand deutet sich das Potential der mikromagnetischen Messungen zum Nachweis der Dross-Verteilung an der Gießoberseite an (siehe Ergebnisse der mechanisierten mikromagnetischen Prüfungen im **Anhang V**).

Mechanisierte mikromagnetische Prüfungen können verfahrensbedingt nur von der Dross-Seite aus angewandt werden. Da die Eindringtiefe der mikromagnetischen Prüfung nicht ausreicht, um das Bau-

teilvolumen von Großgusskomponenten zu durchdringen und die Stärke der Dross-Schicht bestimmen zu können, kann mittels dieses Verfahrens lediglich die oberflächennahe Verteilung des Drosses nachgewiesen werden. Um eine Beeinflussung durch die Oberflächenrauheit der Dross-Seite (Gießoberseite) zu vermeiden, sollten mechanisierte mikromagnetische Prüfungen im überfrästen Oberflächenzustand durchgeführt werden.

Bei der mechanisierten mikromagnetischen Prüfung muss stets sichergestellt werden, dass die beiden Polschuhe des 3MA-Sensors während der Prüfung die Prüffläche im gleichen Winkel kontaktieren (Aufsetzen des Sensors in der Regel senkrecht auf die Prüffläche).

Trotz dieser Anforderungen an die Positionierung des 3MA-Sensors bietet dieses Verfahren Potential, direkt im Fräsprozess beim Abtrag des Zuschlags, der beim Herstellungsprozess von Großgusskomponenten üblich ist, eingesetzt werden zu können. Die Sensorik könnte prinzipiell entsprechend industrietauglich ausgelegt zu werden, um einen derartigen Einsatz zu ermöglichen. Dies wurde in der Vergangenheit bereits mehrfach in unterschiedlichsten industriellen Anwendungen der 3MA-Prüftechnik aufgezeigt und umgesetzt [Tsc11]. Zusätzlich stellt die Wechselfeldmagnetisierung im Gegensatz zu einer bei der magnetischen Streuflussprüfung oft eingesetzten Gleichfeldmagnetisierung eine kleinere ingenieurtechnische Herausforderung bezüglich der Anhaftung von Frässpänen dar, denn es ist von keiner großartigen Anhaftung auszugehen.

6.1.5 Magnetpulverprüfung

Um die Drossausdehnung an der Oberfläche der Versuchskörper zu ermitteln und damit eine Grundlage für die Positionierung der Schwing- und Zugproben zu haben, wird am Fraunhofer LBF mit Unterstützung von Projektpartner BMB an jedem Versuchskörper und Bauteil eine Magnetpulverprüfung sowohl fluoreszierend als auch schwarz/weiß durchgeführt. Damit soll die Struktur des Drosses einfach dargestellt werden, um anschließend die Position der Schwing- und Zugproben festlegen zu können. Im Laufe der ersten MT-Untersuchungen zeigt sich allerdings, dass die Gussoberfläche der Versuchskörper teilweise enorme Unebenheiten und Rauheiten aufweist, die die gesuchten Drossanzeigen überdecken. Ein Vergleich zu der für die MT zu Grunde liegenden Norm [DIN69] zeigt, dass die vorliegenden Oberflächen im unzulässigen Bereich liegen und abgearbeitet werden müssen, um den Dross besser detektieren zu können. Auch wenn dies bedeutet, dass Teile der Drossdicke mit entfernt werden müssen, findet ein gleiches Vorgehen auch in den Gießereien statt, wenn dort auf Grund zu hoher Rauheiten eine mit Dross behaftete Stelle zur näheren Untersuchung zunächst abgeschliffen wird.

Während des Abarbeitens der teilweise mehrere Millimeter hohen Oberflächenrauheit zeigt sich, dass die Versuchskörper eine hohe Balligkeit bzw. Krümmung der zu bearbeiteten Gießoberseite von bis zu 16 mm aufweisen. Wenn die Oberflächenrauheit nun komplett abgearbeitet werden soll, wird in der Mitte des Versuchskörpers überproportional viel Material und damit auch Dross abgetragen. Aus diesem Grunde werden einige der Versuchskörper zunächst geviertelt und dann jeder Abschnitt für sich mit minimalem Abtrag der Gesamtoberfläche komplett von den Unebenheiten befreit. Die so entstandenen Viertel werden mit x.1 bis x.4 fortlaufend nummeriert und markiert. Einen Versuchskörper mit unbearbeiteter Oberseite zeigt Bild 32 sowie mit bearbeiteter Oberfläche Bild 33 jeweils nach der MT-Untersuchung mit Methode schwarz/weiß. Durch die Oberflächennachbearbeitung treten die Anzeigen von Dross nun deutlich hervor und können für die weitere Bewertung der Drossart verwendet werden. Deutlich zu erkennen sind dabei sowohl linien- und kreisförmige Anzeigen auf der Oberfläche. Im Gegensatz zur MT-Prüfung ist mit der Farbeindringprüfung kein zufriedenstellendes Ergebnis

hinsichtlich der Drossdetektion zu erreichen, da die Anzeigen schon nach kurzer Zeit durch ein „Aufblühen“ des roten Penetrationsmittels an Schärfe verlieren und die Beurteilung der Anzeige unmöglich wird.

Alle Oberflächen werden nach den MT-Aufnahmen photographisch dokumentiert (Bild 32, Bild 33, Bild 34 und Bild 35) und als Grundlage für die Lage der Schwingproben herangezogen.



Bild 32 Unbearbeiteter Versuchskörper nach der Magnetpulverprüfung mit Methode schwarz/weiß und einer unzulässigen Anzeige



Bild 33 Versuchskörper nach der Magnetpulverprüfung mit Methode schwarz/weiß mit linien- und kreisförmigen Drossanzeigen

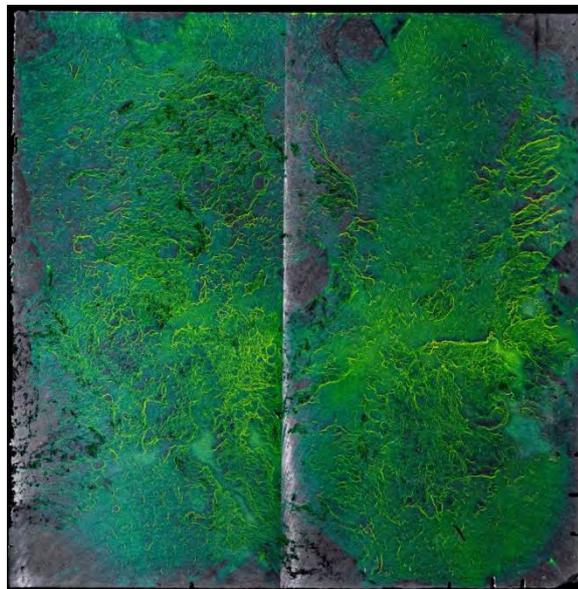


Bild 34 Versuchskörper mit linien- und wurmförmigen Drossanzeigen

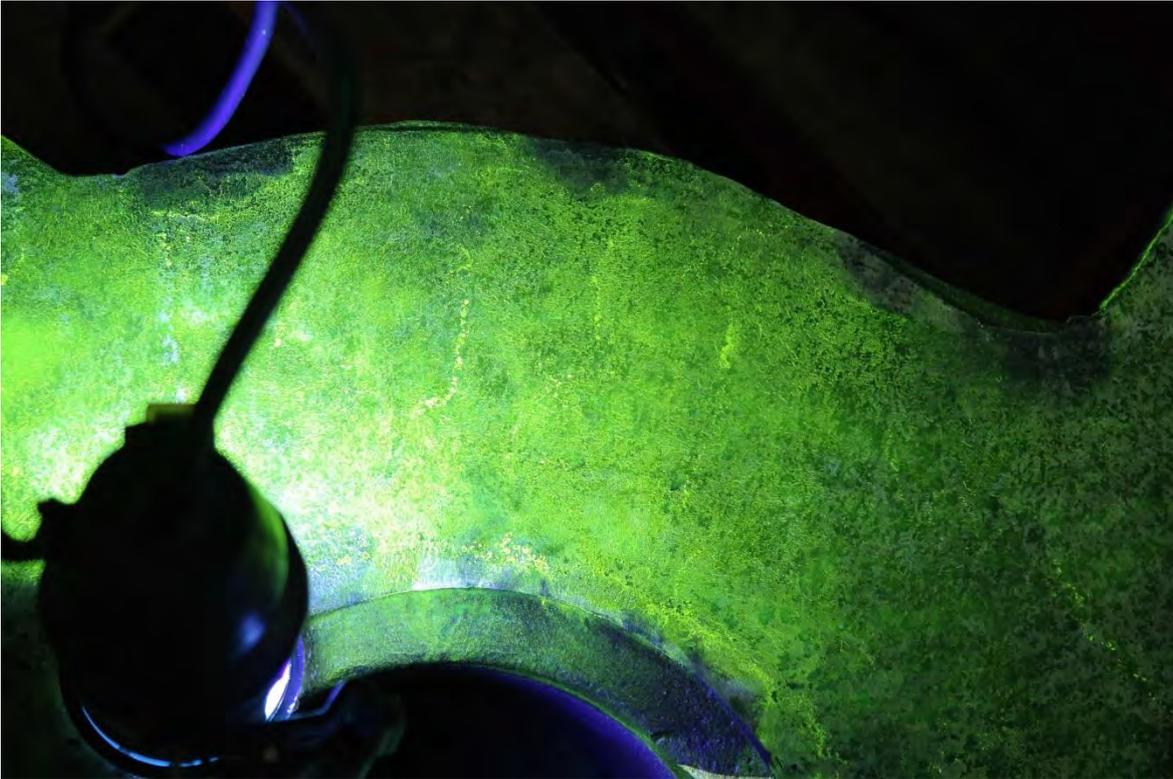


Bild 35 Bauteilabschnitt von FWH bei der fluoreszierenden Magnetpulverprüfung

6.1.6 Mechanisierten Streuflussprüfung von der Dross-Seite

Die mechanisierten Streuflussprüfungen werden von der Dross-Seite der Versuchskörper durchgeführt. Für die Messungen wird ebenfalls das auch zur Ultraschallprüfung verwendete stationäre Mehrachs-Manipulationssystem eingesetzt, Bild 36. Bei den Streuflussprüfungen wird die notwendige Magnetisierungseinheit im Verbund mit einem flexiblen Hall-Sonden-Träger mit einer Auflösung von 0,1 mm in Scan- und 1 mm in Index-Richtung über die Oberfläche der Versuchskörper geführt. Die eingesetzte Hall-Sonde ist in Normal-Richtung sensitiv, sie detektiert somit senkrecht aus der Versuchskörperoberfläche austretende elektromagnetische Felder. Die Ankopplung der Hall-Sonde wird über einen federnden Kontakt zur Versuchskörperoberfläche mittels eines flexiblen Hall-Sonden-Trägers gewährleistet, der durch eine keramische Schutzschicht eine Zerstörung der Hall-Sonde durch den Oberflächenkontakt während den mechanisierten Prüfungen verhindert. Hierbei ist festzuhalten, dass die federnde Ankopplung der Hall-Sonde, bedingt durch den Oberflächenzustand einzelner Versuchskörper wegen Unebenheiten, Balligkeiten und Oberflächenausbrüchen, für die mechanisierten Streuflussprüfungen nicht möglich war. Für das verfahrensbedingt notwendige Magnetfeld wurde eine Gleichfeld-Magnetisierung verwendet. Das magnetische Gleichfeld wird mittels eines Elektromagneten mit abgeschägten Polschuhen in die Oberfläche der Versuchskörper eingebracht. Um an jedem Messpunkt der Streuflussprüfung sicherzustellen, dass ein ausreichender und gleichbleibender lokaler Magnetisierungszustand vorliegt, wird der Elektromagnet bei den Messungen mitgeführt und der flexible Hall-Sonden-Träger im Zentrum des Elektromagneten (zwischen den Polschuhen) positioniert, sodass sich die daran angebrachte Hall-Sonde stets im Zentrum des angeregten Magnetfeldes befindet. Die Polschuhe des Elektromagneten hatten hierbei einen Abstand von ca. 2 mm zur Oberfläche der Versuchskörper. Der Elektromagnet wird für alle Messungen mit einer Stromstärke von ca. 0,55 A betrieben. Die Abtastung der Bauteiloberfläche erfolgte nach einem mäanderförmigen Scanmuster analog zum Vorgehen bei den mechanisierten Ultraschallprüfungen.

Mechanisierte magnetische Streuflussprüfungen können verfahrensbedingt nur von der Dross-Seite aus angewandt werden. Da die Eindringtiefe der magnetischen Streufluss-Prüfung nicht ausreicht um das Bauteilvolumen zu durchdringen und die Stärke der Dross-Schicht bestimmen zu können, kann mittels dieses Verfahrens lediglich die oberflächennahe Verteilung des Drosses nachgewiesen werden. Um eine Beeinflussung durch die Oberflächenrauheit der Dross-Seite (Gießoberseite) zu vermeiden, sollten mechanisierte magnetische Streufluss-Prüfungen im überfrästen Oberflächenzustand durchgeführt werden. Zudem muss bei der mechanisierten Streufluss-Prüfung stets sichergestellt werden, dass sowohl die beiden Polschuhe der verwendeten Magnetisierungseinheit (in der Regel ein Elektromagnet) während der Prüfung den gleichen Abstand zur Prüffläche haben und, dass die eingesetzte Hall-Sonde gleichbleibenden Kontakt zur Oberfläche hat und im Zentrum des Magnetfeldes positioniert ist.

Trotz dieser Anforderungen an die Führung und Positionierung der Sensorik bietet dieses Verfahren Potential direkt im Fräsprozess beim Abtrag des Zuschlags, der beim Herstellungsprozess von Großgusskomponenten üblich ist, eingesetzt werden zu können. Die Sensorik ist prinzipiell entsprechend industrietauglich auszulegen, um einen derartigen Einsatz zu ermöglichen. Hierbei muss die ingenieurtechnische Herausforderung der Anhaftung von Frässpänen an der Magnetisierungseinheit berücksichtigt werden, da diese in der Regel mit einem Gleichfeld betrieben wird und es somit zur Anhaftung von Frässpänen kommen könnte.

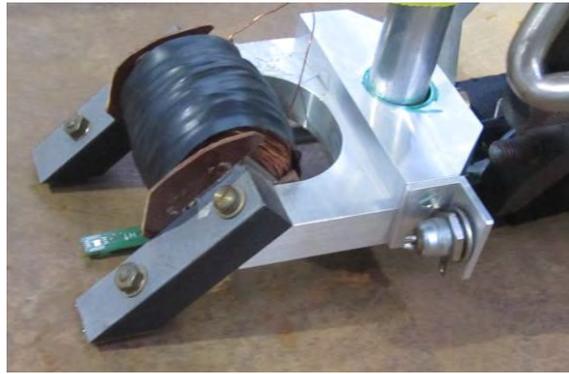
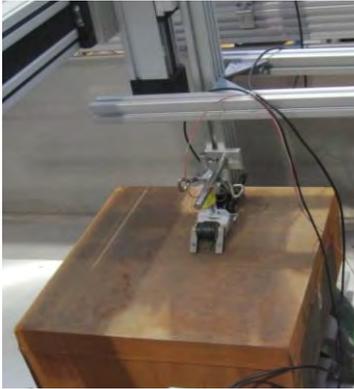


Bild 36 Links: Set-up der magnetischen Streufluss-Prüfung mittels mechanisierter Datenaufnahme; Rechts: Detailaufnahme des verwendeten Elektromagneten mit abgeschrägten Polschuhen und des mittig zwischen den Polschuhen positionierten flexiblen Hall-Sonden-Trägers

Bild 37 zeigt, dass an dem Versuchskörper MAN 5261600 mittels mechanisierter magnetischer Streufluss-Prüfung von der Dross-Seite (Gießoberseite) die vorhandene oberflächennahe Dross-Verteilung grundsätzlich nachweisbar ist. Es zeigte sich jedoch ebenfalls im Verlauf des Projektes durch mechanisierte Streufluss-Prüfungen an weiteren Versuchskörpern, dass die teils stark ausgeprägte Gussrauheit sowie die Unebenheit, Balligkeiten und die Oberflächenausbrüche einzelner Versuchskörper die mechanisierten magnetischen Streufluss-Messungen stören und zu einer Beeinflussung der Ergebnisdarstellung führen, wie es auch bei der MT-Prüfung der Fall wäre.

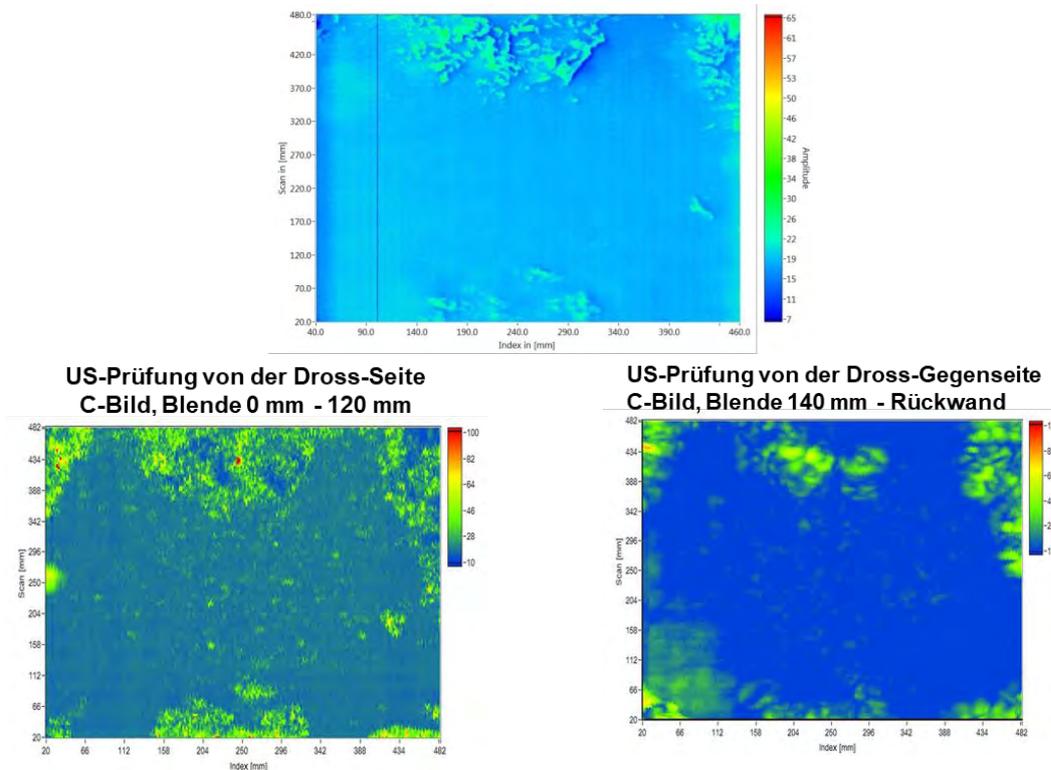


Bild 37 Magnetische Streufluss-Prüfung mittels mechanisierter Datenaufnahme von der Dross-Seite (oben); Ultraschalluntersuchungen (C-Bild) von der Dross-Seite (unten links) und Ultraschalluntersuchung (C-Bild) von der Dross-Gegenseite (unten rechts). Versuchskörper: MAN 5261600

Aus diesen Gründen wird die Streufluss-Prüfung im Verlauf des Projektes nur an Versuchskörpern mit passenden Oberflächeneigenschaften durchgeführt. Im Falle von durch die Oberflächeneigenschaften bzw. geometrischen Begebenheiten der Versuchskörper gestörten Ergebnisbildern lässt sich die Dross-Verteilung mit Hilfe von Skalierungsvariation und Vergleich des US-Ergebnisses erahnen, jedoch zeigt sich auch die starke Beeinflussung des Ergebnisbildes durch den Oberflächenzustand des Versuchskörpers (z.B. ungleichmäßiger Polschuhabstand durch Unebenheit bzw. Unplanheit, Sensorabhebungen durch Rauheit, usw.).

Im Folgenden wird das Ergebnisbild der Streufluss-Prüfung mit den Ultraschall-Ergebnissen, die an der Dross-Gegenseite/Schnittfläche und an der Dross-Seite des Versuchskörpers MAN 5261600 aufgenommen wird, verglichen. Die Auswertung der Streufluss-Ergebnisbilder kann analog zur Auswertung der C-Bilder der Ultraschall-Prüfung erfolgen. Auch hier kann eine Anzeige als Dross-Anzeige gedeutet werden, die sich vom restlichen drossfreien Bereich der mechanisierten Messdatenaufnahme abhebt.

Der Vergleich des Streufluss-Ergebnisbildes des Versuchskörpers 5261600 mit den korrespondierenden Ultraschall-C-Bildern zeigt, dass die Verteilung des Drosses von der Gießoberseite aus mittels mechanisierter magnetischer Streufluss-Prüfung nachgewiesen werden kann, sofern die Oberfläche des Versuchskörpers dies zulässt.

6.1.7 Zusammenfassung der Anwendbarkeit

Tabelle 6 fasst die Anwendbarkeit und Randbedingungen der erläuterten Prüfverfahren zusammen.

Tabelle 6 Anwendbarkeit und Randbedingungen der Prüfverfahren

Mechanisiertes zerstörungsfreies Prüfverfahren	Anwendungsort Prüfort	Dross- Stärke	Dross- Verteilung	Oberflächenzustand
Ultraschall	Dross-Gegenseite	√	√	gussrau (BNIF: ca. 3S1 -4S1)
Ultraschall Rückwandabschattung	Dross-Gegenseite	-	√	gussrau (BNIF: ca. 3S1 -4S1)
Ultraschall	Dross-Seite	-	√	gussrau (BNIF: ca. 3S1 -4S1)
Ultraschall Rückwandabschattung	Dross-Seite	-	√	gussrau (BNIF: ca. 3S1 -4S1)
Magnetischer Streufluss	Dross-Seite	-	√	gefräst*
Mikromagnetische Verfahren (3MA)	Dross-Seite	-	√	gefräst*

* hat das Potential zum in dem Fräsprozess integrierten Einsatz

6.2 Entnahme der Schwingproben aus Versuchskörpern und Bauteilen

Auf Basis der an den überfrästen Versuchskörpern und den beiden Bauteilabschnitten von Partner FWH durchgeführten MT-Prüfung werden anschließend Probenlagepläne erstellt. Diese stellen sicher, dass die an den Schwingproben ermittelten quasi-statischen und zyklischen Festigkeiten einen direkten

Vergleich zu den unterschiedlichen zerstörungsfreien Prüfmethoden zulassen. Durch die Beschriftung der Proben ist damit eine Rückverfolgbarkeit aller Ergebnisse zurück zum einzelnen Entnahmeort sichergestellt.

Durch die Wahl der Lage der Schwingproben im Versuchskörper werden zum einen die in der MT-Prüfung auffälligen Bereiche berücksichtigt und gleichzeitig in einer tieferen Lage des Versuchskörpers ungesättigtes Material für Referenzversuche ausgewählt. Bild 38 zeigt beispielhaft den Lageplan des Versuchskörpers 8 mit Zug- und Schwingproben im Bereich des Drosses sowie im Grundwerkstoff sowie Bild 39 die beiden Bauteilabschnitte von Projektpartner FWH mit den Schwingproben im Bereich des Drosses. Für beide Bauteilabschnitte werden zudem Schwingproben parallel zu denen mit Dross aus einer 100 mm tieferen Bauteilschicht entnommen. Alle Probenlagepläne und Abbildungen zur Lage von Schwing- und Zugproben finden sich im **Anhang B**. Die Nomenklatur für die Schwing- und Zugproben findet sich in Tabelle 7.

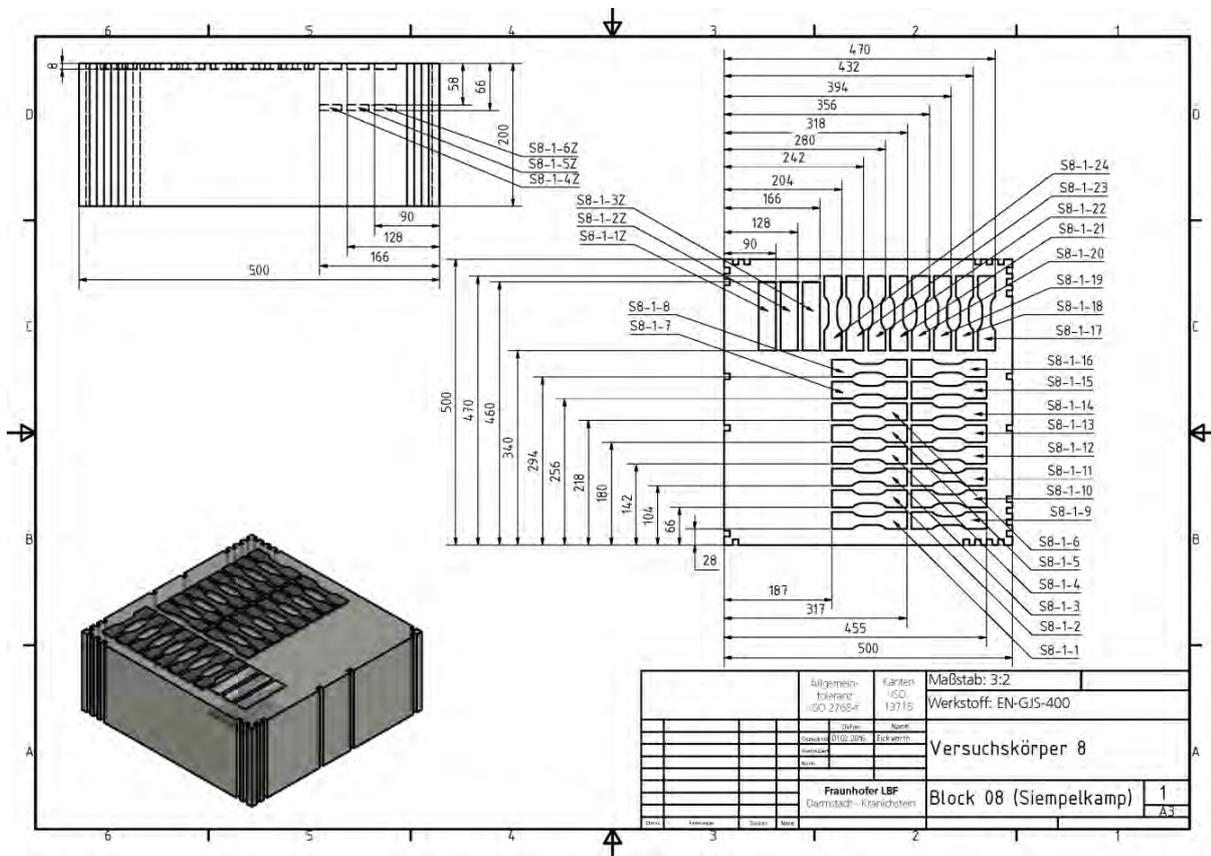


Bild 38 Versuchskörper 8 von Partner Siempelkamp mit eingezeichneter Probenlage



Bild 39 Bauteilabschnitt von Partner FWH mit eingezeichneter Probenlage

Tabelle 7 Nomenklaturen der Probenbeschriftung für die Versuchskörper und Bauteile

Werkstoff		Hersteller	Abkürzung	Nummer	Viertel	laufende Nummer	Dross / Grundwerkstoff	Zugprobenkennzeichen	Beispiel
EN-GJS-400-15	Versuchskörper	Siempelkamp	S	1 ... 11	1...4	1...	-	Z	S1-4-7
		MAN	-	5261790 5261791	-	1...	-	Z	5261790-2-7
		FWH	-	1,2	-	1...	-	Z	1,2-2-9
EN-GJS-400-18	Bauteilabschnitte	FWH	FWH	1 / 2	-	1...	D / GW	Z	FWH-D-1.6

6.3 Schwingprobe

Für die zyklischen Versuche kommen flache Schwingproben mit einer Prüflänge von $l = 25 \text{ mm}$ und einer Dicke von $d = 8 \text{ mm}$ sowie einem höchstbeanspruchten Werkstoffvolumen von $HBV_{90\%,NH} \approx 4.590 \text{ mm}^3$ zum Einsatz, Bild 40. Diese Geometrie ermöglicht die Probenentnahme zum einen aus den Bereichen mit Dross und damit nahe an der Oberfläche sowie aus dem Inneren des Versuchskörpers, also aus dem Grundwerkstoff, um einen Referenzzustand zu den gefundenen Drossanzeigen zu erhalten.

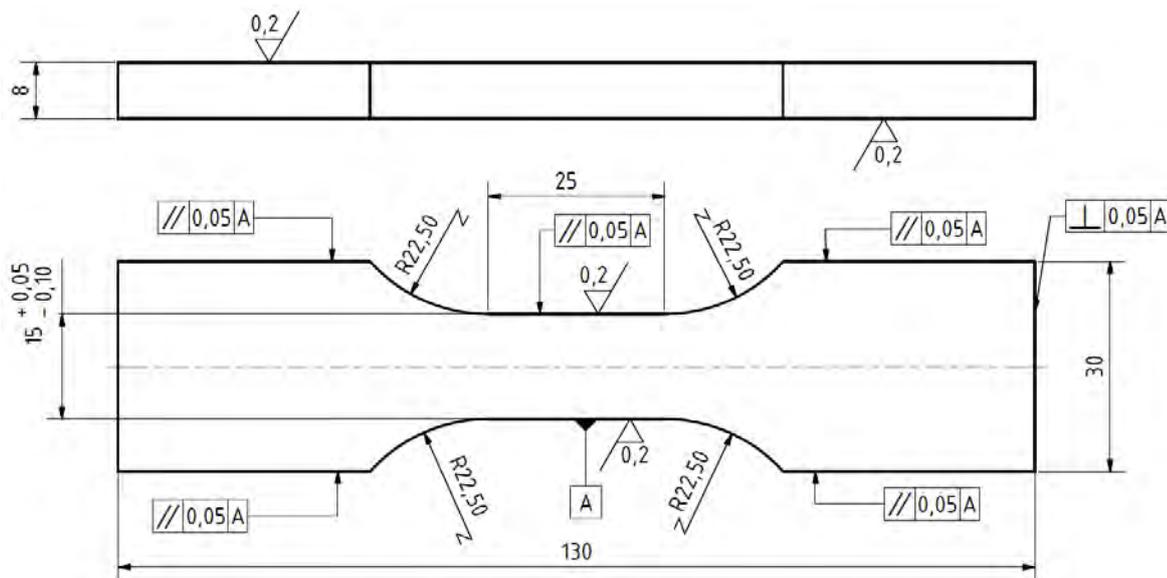


Bild 40 Runde Schwingprobe für Dross und Referenzversuche, $d = 8 \text{ mm}$, ungekerbt, $K_t = 1,12$, $HBV_{90\%,NH} \approx 4.590 \text{ mm}^3$

6.4 Quasi-statische Werkstoffkennwerte aus Zugversuchen

Die quasi-statischen Kennwerte werden an Zugproben ermittelt, die den Versuchskörpern im Bereich des Drosses und in drossfreien Bereichen oder aus Angusproben entnommen werden. Die genaue Lage der Zugproben wird in Kapitel 3.1 erläutert. Ermittelt werden neben der Zugfestigkeit R_m , die Streckgrenze $R_{p0,2}$ und die Bruchdehnung A . Die quasi-statischen Ergebnisse für den Grundwerkstoff finden sich in Tabelle 8 sowie in Tabelle 9 für die Drossbereiche anhand /ZLL16, ZLL86, SIC16, BDG17/. Es zeigt sich, dass alle ermittelten Messgrößen für die mit Dross behafteten Zugproben teilweise deutlich niedriger liegen als für den Grundwerkstoff. Insbesondere die Bruchdehnung weist mit $A = 5,0 \%$ im Vergleich zum Grundwerkstoff mit durchschnittlich $A = 18,9 \%$ einen wesentlich geringeren Wert aus, was auf die hohe versprödende Wirkung des Drosses zurückzuführen ist. Aber auch die Zugfestigkeit R_m und die Dehngrenze $R_{p0,2}$ verringern sich im Bereich des Drosses. Darüber hinaus ist eine deutliche Zunahme der Streuung der Kennwerte, je nach Drossausprägung, festzustellen. So liegt bei einem Mittelwert der Bruchdehnung von $A = 5,0 \%$ der Maximalwert bei $A = 10 \%$. Bei einigen Zugproben kann dahingegen gar kein Wert für die Bruchdehnung erfasst werden. Die im Bereich des Grundwerkstoffs gemessenen Ergebnisse für Zugfestigkeit R_m , Streckgrenze $R_{p0,2}$ sowie Bruchdehnung A liegen jedoch im Vergleich zur /DIN63/ für die Wanddicke von 500 mm in einem sehr guten Bereich.

Insbesondere werden die für eine Wanddicke bis 200 mm /DIN63/ vorgegebenen Mindestwerte von $R_m = 370$ MPa, $R_{p0,2} = 240$ MPa und $A = 11$ % teilweise deutlich übertroffen.

Tabelle 8 Quasistatische Materialkennwerte des untersuchten Werkstoffes ohne Dross

Werkstoff	EN-GJS-400-15			EN-GJS-400-18
	Versuchskörper Siempelkamp	Versuchskörper FWH	Versuchskörper MAN	Bauteil FWH
Lage	Vollkörper	Anguss	Vollkörper	Anguss
Zugfestigkeit R_m [MPa]	384,7	402,0	374,0	~ 400,0
0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$ [MPa]	257,1	273,0	244,0	~ 280,0
Bruchdehnung A_5 [%]	19,5	22,5	14,8	21,0
Streckgrenzenverhältnis [-]	0,7	0,7	0,7	0,7
Anzahl der Einzelversuche	23	4	5	-

Tabelle 9 Quasistatische Materialkennwerte der untersuchten Werkstoffe mit Dross

Werkstoff	EN-GJS-400-18
Zugfestigkeit R_m [MPa]	253,3
0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$ [MPa]	227,9
Bruchdehnung A_5 [%]	5,0
Streckgrenzenverhältnis [-]	0,9
Anzahl der Einzelversuche	17

6.5 Röntgen-Computertomographie an den Schwingproben

Im Anschluss an die Entnahme der Schwingproben aus den Versuchskörpern werden die Schwingproben im Bereich des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens zerstörungsfrei mittels Röntgen-Computertomographie untersucht. Damit werden Möglichkeiten geschaffen, die Schwingproben anhand des gefundenen Drosses zu klassifizieren und im Nachgang zu den Schwingfestigkeitsuntersuchungen die ermittelten Schwingfestigkeiten mit den Drossklassen zu korrelieren.

Für die Aufnahmen wird eine Röntgenröhre mit einer maximalen Betriebsspannung von 220 kV eingesetzt und eine Auflösung von etwa 77 μm erreicht, sodass auch feinere Strukturen im Bereich des Drosses und auch die Graphitkugeln gut aufgelöst werden. Ein Beispiel für eine durchstrahlte Schwingprobe aus dem Grundwerkstoff sowie aus dem Bereich des Drosses zeigt Bild 41 als Summenbild der Grauwertschichten in Dickenrichtung der Schwingproben.

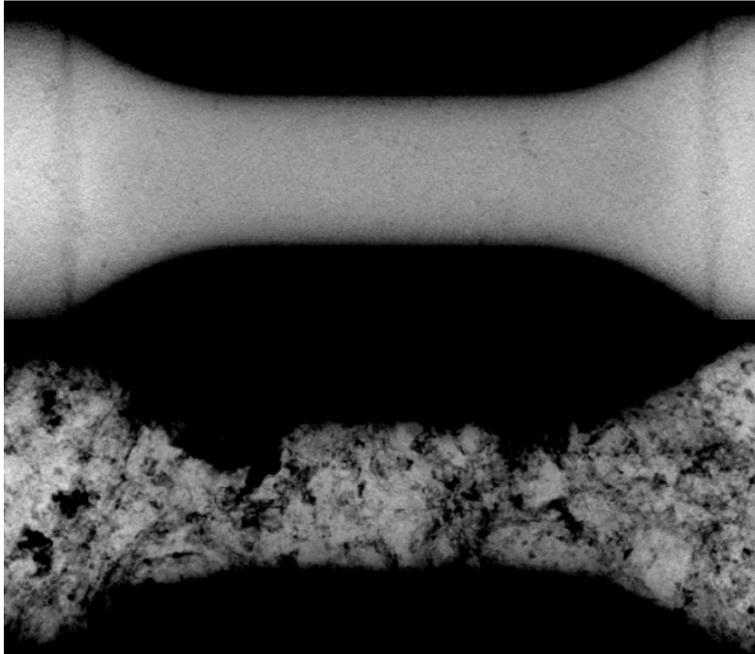


Bild 41 Aus der Röntgen-Computertomographie rekonstruiertes Summenbild einer Schwingprobe ohne Dross (oben) sowie mit Dross (unten)

Deutlich sind die unterschiedlichen Werkstoff- bzw. Drossstrukturen zu erkennen, die teilweise gar keinen Grundwerkstoff mehr erkennen lassen. Vielmehr fehlt an einigen Stellen sogar Material, was zu hohen Kerbwirkungen führt. In den Röntgenaufnahmen bildet sich dabei der Dross auf Grund seiner geringeren Dichte als dunklere Flecken ab, während der Grundwerkstoff auf Grund der höheren Dichte von mindestens $7,0 \text{ g/cm}^3$ deutlich heller erscheint. Die Ergebnisse der CT-Untersuchung dienen im ersten Schritt dazu, die Schwingproben genauer hinsichtlich der Drossausprägung zu charakterisieren und gegebenenfalls für die Ermittlung eines Dross-Festigkeitsklassensystems verwenden zu können.

6.6 Baumann-Abdrücke an den Schwingproben

Für eine Vielzahl von Schwingproben mit Dross werden die Schwefel- bzw. Baumann-Abdrücke durchgeführt, um die resultierenden Bilder des Drossverlaufs mit den passenden MT-Aufnahmen der Schwingproben zu vergleichen und die Bilder in einen Fehlervergleichskatalog zu übertragen. Aufnahmen der Baumannabdrücke mit Vorder- und Rückseite der Proben zeigt Bild 42. Dabei weisen die dunklen Stellen auf den Proben auf einen hohen Schwefelgehalt hin, der ein kennzeichnendes Merkmal des Drosses ist. Dabei zeigt der Nachweis jedoch häufig großflächige Anzeigen des Drosses. Feine rissartige Strukturen des Drosses lassen sich jedoch nicht nachweisen. Zeigen sich beim Baumann-Abdruck keine dunklen Stellen, so ist dort kein Schwefel und somit Dross nachweisbar, wie dies etwa bei der Probe S7-4-9 in Bild 42 erkennbar ist.

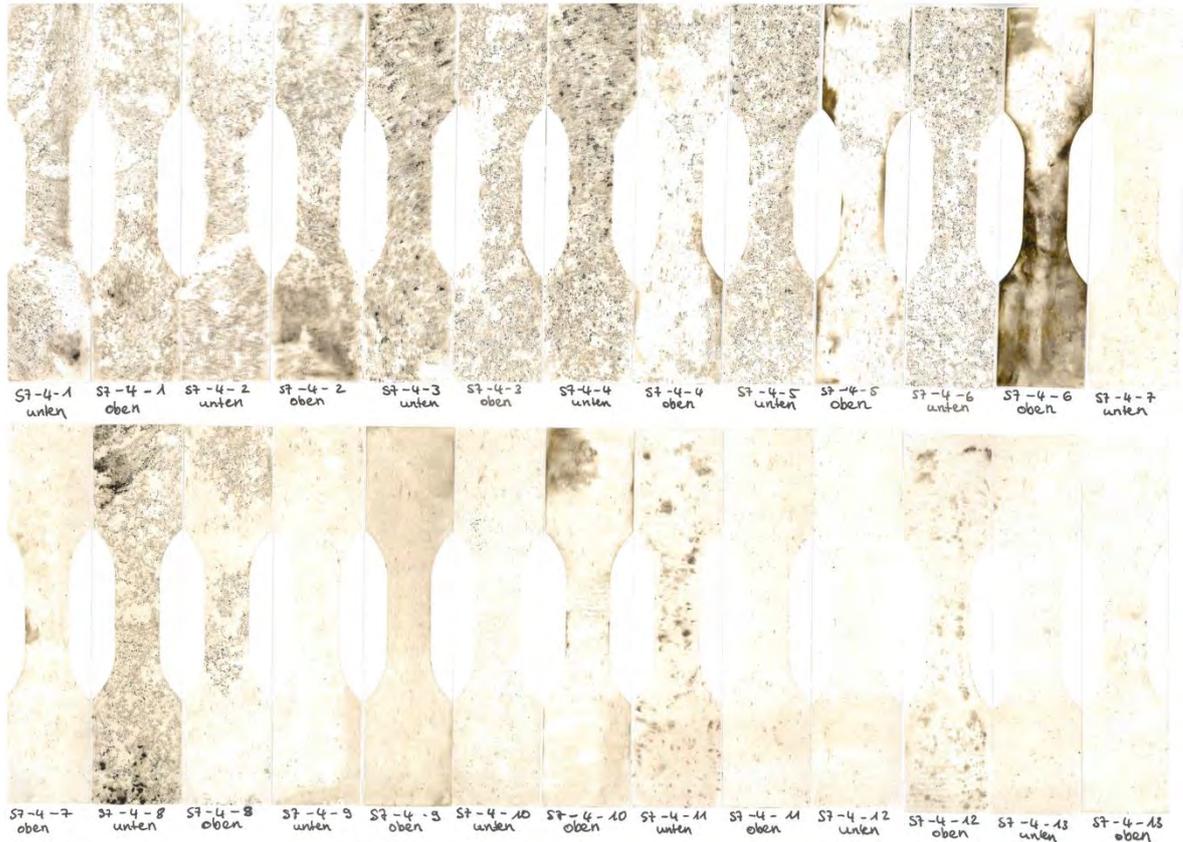


Bild 42 Beispiele der Baumann-Abdrücke

6.7 Magnetpulverprüfung an den Schwingproben

Im Gegensatz zu den Baumann-Abdrücken kann die Magnetpulverprüfung insbesondere die für Dross charakteristischen faden-, linien- und kreisförmigen Anzeigen gut detektieren. Zudem ist der Nachweis mittels MT in den Gießereien weit verbreitet und schneller, als der Baumann-Abdruck. Aus diesem Grund wird eine Großzahl von Schwingproben mittels MT-Aufnahmen von beiden Seiten her charakterisiert. Die MT-Aufnahmen finden teilweise auch für Schwingproben statt, die bereits vorher mit Baumann-Abdrücken charakterisiert werden. Dies ermöglicht einen Vergleich der Ergebnisse beider Verfahren für den später zu erstellenden Fehlervergleichskatalog der Schwingproben mit Dross. Ein Beispiel für die Ergebnisse der MT-Aufnahmen im Vergleich zum Baumann-Abdruck zeigt Bild 43. Dabei zeigen speziell die MT-Aufnahmen ein hohes Potential, gerade rissartige Anzeigen gut zu detektieren, während der Schwefelnachweis nur Indikatoren für eventuell vorliegenden Dross auf Grund des Schwefels liefern.

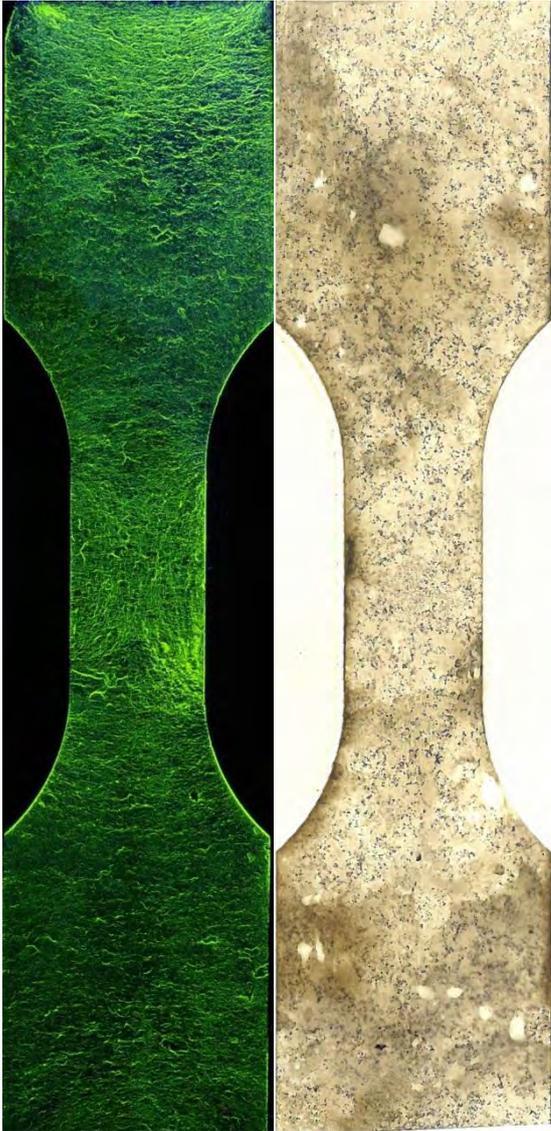


Bild 43 Vergleich Ergebnis MT-Aufnahme und Baumann-Abdruck

7 Ergebnisse der Werkstoffuntersuchungen

7.1 Schwingfestigkeit des Grundwerkstoffes

Zunächst wird von den Versuchskörpern und den Bauteilabschnitten der Grundwerkstoff unter konstanten Dehnungsamplituden untersucht, um die jeweilige zyklische Spannungs-Dehnungskurve und Dehnungswöhlerlinie abzuleiten. Als Ergebnis dieser Untersuchungen zeigt Bild 44 die Erstbelastungskurve, die zyklische Spannungs-Dehnungskurve sowie die Dehnungswöhlerlinie ermittelt nach der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie *Wag07/* für den Versuchskörper 7 von Siempelkamp (SR01), die Versuchskörper 5261790 und 5261791 von MAN (MANR01), den Versuchskörper 1,2 von FWH sowie die Bauteilabschnitte (FWHR03).

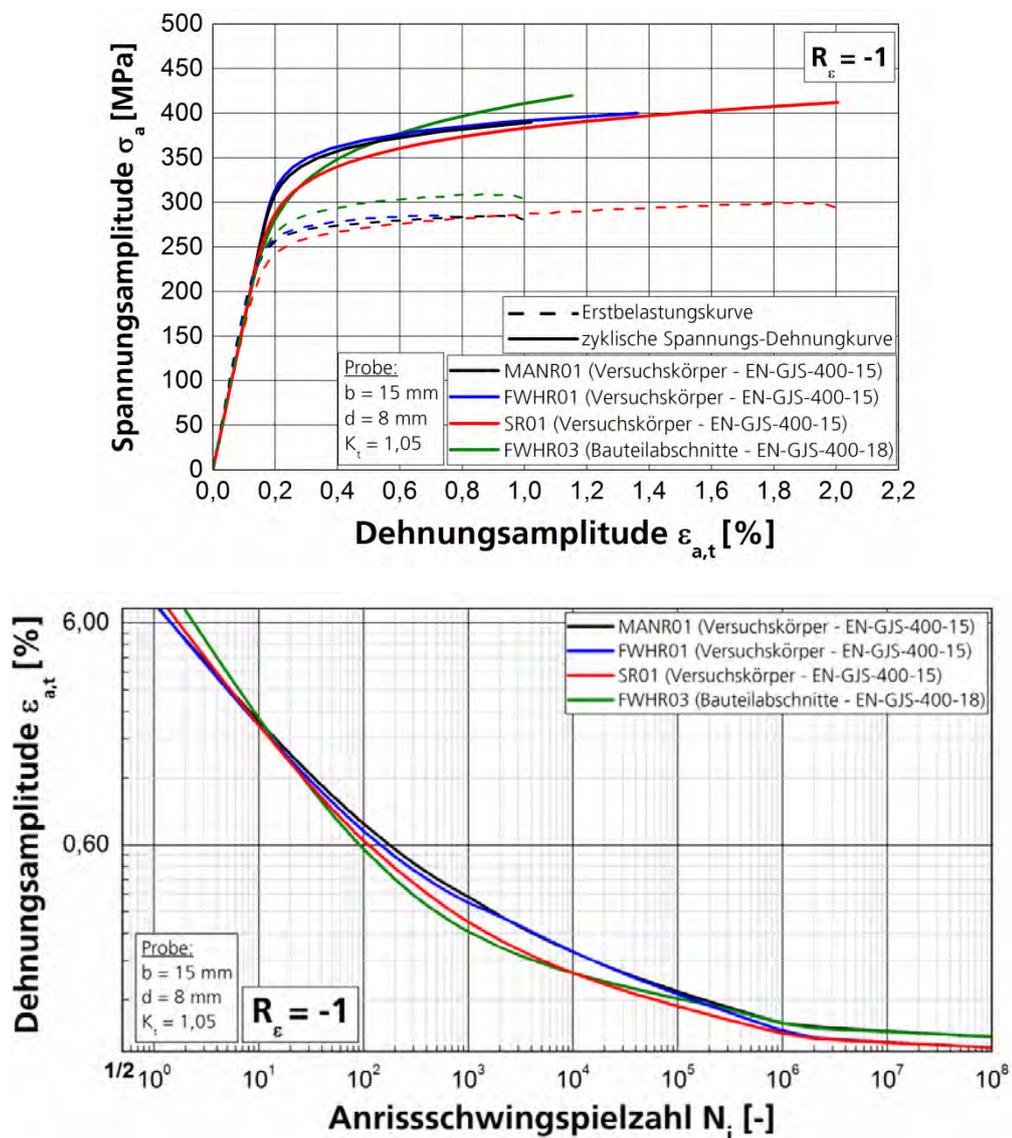


Bild 44 Vergleich der zyklischen Spannungs-Dehnungskurven und der tri-linearen Dehnungswöhlerlinien für den EN-GJS-400-15 (SR01, MANR01 und FWHR01) aus den Versuchskörpern sowie den EN-GJS-400-18 (FWHR03) für die Bauteilabschnitte

Zum Vergleich zeigt Bild 44 auch die Dehnungswöhlerlinie nach /Cof54, Man65, Bas10, Mor65/. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Versuchskörper aus EN-GJS-400-15, die Bauteilabschnitte jedoch aus EN-GJS-400-18 bestehen, Bild 44.

Alle weiteren Diagramme, Einzelversuchsergebnisse und die Parameter der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve sowie der Dehnungswöhlerlinie für die ungespannten Werkstoffe finden sich getrennt nach Hersteller von Versuchskörpern und Bauteilen im **Anhang B** sowie **Anhang T**.

7.2 Charakterisierung des Drosses anhand fiktiver Elastizitätsmoduln

Für die Ermittlung des fiktiven Elastizitätsmoduls E_f und die spätere Korrelation zur Dichte ρ können nur diejenigen Schwingproben herangezogen werden, die im 25 mm langen Prüfquerschnitt gebrochen sind, da nur in diesem Bereich der Dehnungsaufnehmer aufgesetzt und gleichzeitig ein Heraustrennen der beiden Probenbruchhälften für eine Dichtermittlung möglich ist. Dies ist insgesamt für nur etwa 40 % aller überhaupt zyklisch untersuchten Schwingproben der Fall.

Für diese sowohl mit Dross behafteten als auch ungespannten Schwingproben wird der hyperbolische Elastizitätsmodul bzw. der fiktive Elastizitätsmodul E_f zunächst für einen und in weiteren Versuchen für zwei Dehnungsaufnehmer ermittelt. Dabei ergeben sich Werte zwischen ca. 8 und 184 GPa. Drei Beispiele für den Verlauf der Erstbelastungskurve im dehnungsgeregelten Versuch zeigt Bild 45.

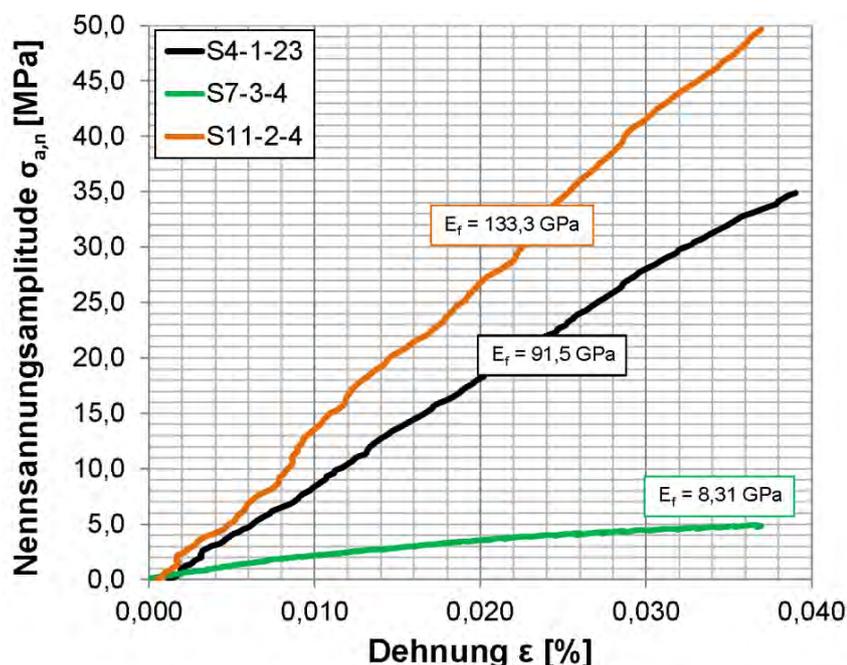


Bild 45 Auswertung des fiktiven Elastizitätsmoduls für die untersuchten Schwingproben mit und ohne Dross

Bei der Ermittlung des fiktiven Elastizitätsmoduls zeigen sich Auffälligkeiten dahingehend, dass teilweise kein linear-elastischer Anstieg im Spannungs-Dehnungsverhalten auch bei sehr niedrigen Totaldehnungsamplituden vorliegt, Bild 46, z.B. Probe S7-3-4. Dementsprechend liegt ein eher zu GJL bzw. zu spröderen Werkstoffen vergleichbares Werkstoffverhalten vor, was den teilweise stark versprödhenden Charakter des Drosses bestätigt, Bild 45.

Bild 46 vergleicht unterschiedliche Hystereseverläufe der Schwingproben miteinander. Dabei sind einer ungänzenfreien Probe vier Schwingproben mit Dross gegenübergestellt, die eine mindestens um den Faktor 10 geringere Lebensdauer aufweisen als die ungänzenfreie. Der Vergleich bestätigt noch einmal den geringeren fiktiven Elastizitätsmodul der Schwingproben mit Dross. Wie bereits vermutet zeigt sich, dass auch bei Vorhandensein von Dross kein rein linear-elastisches Werkstoffverhalten in den Hysteresen vorliegt. Charakteristisch für den Dross scheint das Abflachen der Zug-Anteile der Hysteresen zu sein. Dies bedeutet andererseits, dass der fiktive E-Modul im Druckbereich deutlich höher ist als im Zugbereich, wenn gleich auch dieser vom tatsächlichen Elastizitätsmodul des ungänzenfreien Werkstoffes abweicht. Die weiterführenden Auswertungen, insbesondere des fiktiven Elastizitätsmoduls wie auch der Schwingfestigkeit, beziehen sich auf die Steifigkeit, die im Zugbereich ermittelt wird. Es ist anzunehmen, dass für einen konservativen Ansatz zur Bauteilbemessung der ermittelte Wert für E_f in Zugrichtung auch im Druckbereich übernommen werden kann. Dies ist jedoch in weiteren Untersuchungen nachzuweisen.

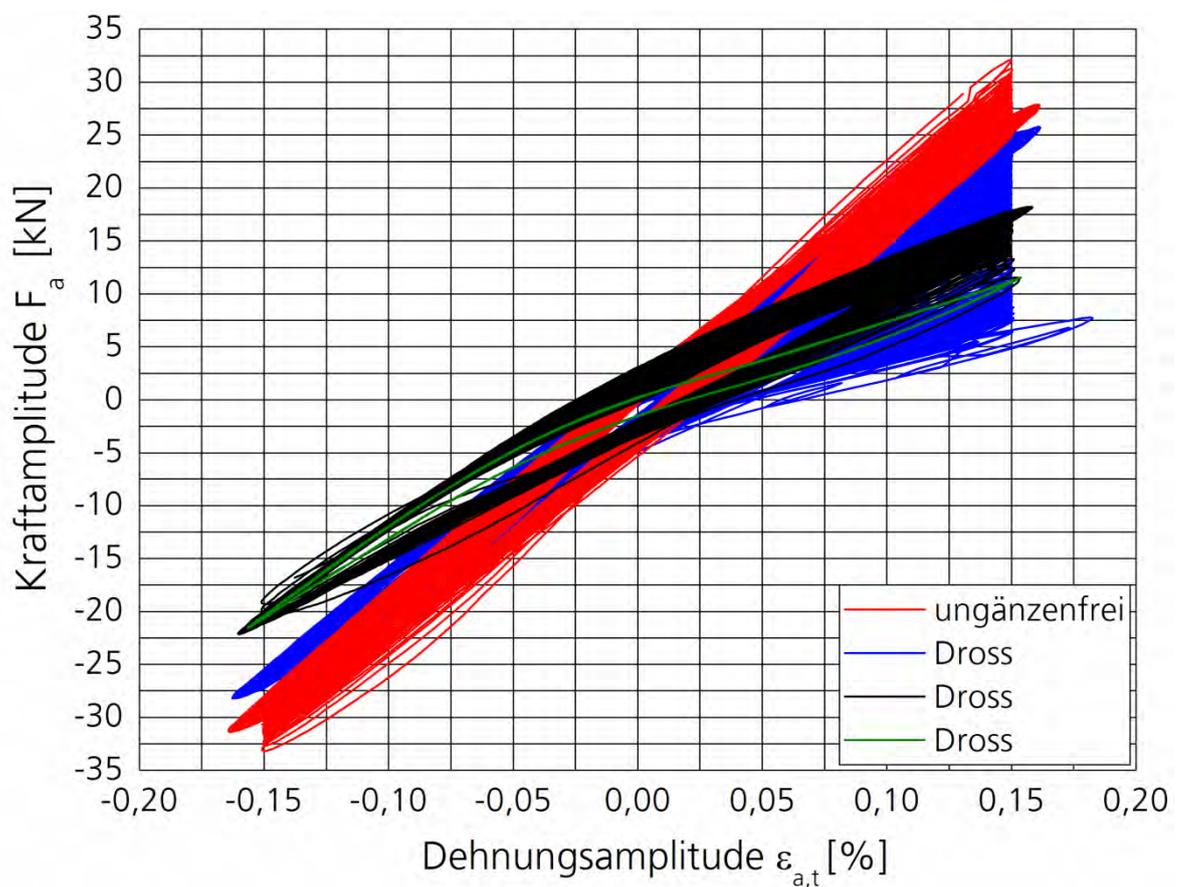


Bild 46 Vergleich der Kraft-Dehnungshysteresen

Um dem fiktiven Elastizitätsmodul E_f die Dichte ρ gegenüberstellen zu können, werden nach der Schwingprüfung die Schwingproben gebrochen und die beiden Reststücke von den Einspannbereichen durch mechanische, CNC-unterstützte Bearbeitung getrennt, Bild 47.

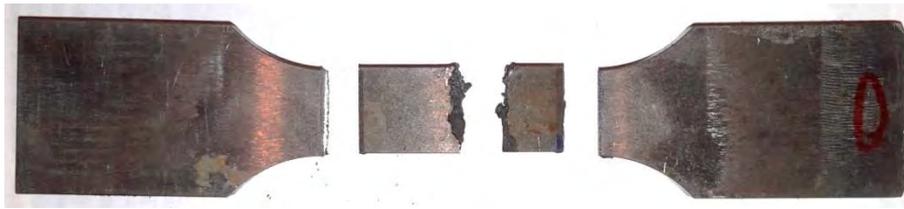


Bild 47 Schwingprobe mit den nach der Schwingprüfung abgetrennten Probenprüfbereichen

Dies ist jedoch wiederum nur für die Schwingproben möglich, die einen Bruch im Prüfbereich aufweisen. Die verbleibenden Bruchstücke des Prüfvolumens werden mit Hilfe einer kalibrierten Feinwaage mit einer Anzeigegenauigkeit von 0,01 g gewogen. Mit Hilfe des Nennvolumens jeder Schwingprobe im Probenprüfbereich (25 mm x 8 mm x 15 mm) von 3.000 mm³ lässt sich anschließend die Dichte ρ für jede Schwingprobe bestimmen. Die so ermittelten Werte für die Dichte ρ und den fiktiven Elastizitätsmodul E_f finden sich für jede Schwingprobe im **Anhang T**.

Wie in /Ble16/ werden nun auch hier die Kennwerte Dichte ρ und fiktiver Elastizitätsmodul E_f einander gegengestellt. Dies geschieht zunächst für die Schwingproben, die zu Beginn der Untersuchungen nur mit einem Dehnungsaufnehmer versehen untersucht werden. Dabei ergibt sich der in Bild 48 gezeigte Zusammenhang beider Werte zunächst noch für die Schwingproben, die nur mit einem Dehnungsaufnehmer besetzt sind.

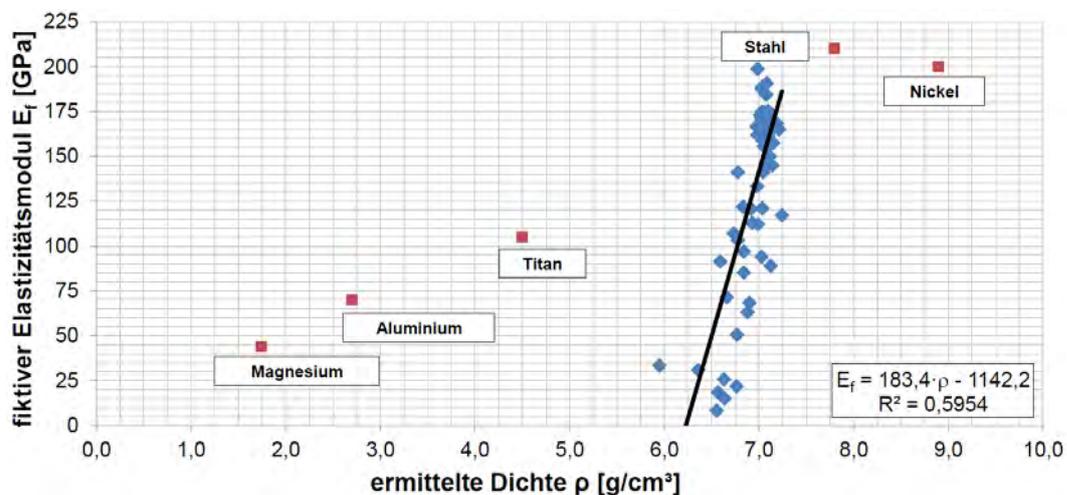


Bild 48 Vergleich der Dichte zum fiktiven Elastizitätsmodul (einseitige Messung der Dehnung)

Wie schon für Lunker /Ble16/ zeigt sich, dass ein relativ guter Zusammenhang zwischen beiden Kennwerten besteht und der fiktive Elastizitätsmodul mit der Dichte ansteigt. Dennoch liegen die Streuungen vergleichsweise /Ble16/ hoch, was zu einem geringen Regressionskoeffizienten führt. Hierbei ist jedoch im Vergleich zu den Untersuchungen von /Ble16/ zu berücksichtigen, dass für die Ergebnisse in Bild 48 je Schwingprobe lediglich eine Messung des fiktiven Elastizitätsmoduls erfolgte und nicht mehrere Messungen von unterschiedlichen Seiten der Schwingprobe. Die unterschiedliche Verteilung des Drosses in der Schwingprobe und die damit verbundene lokale Ausbildung einer Biegung kann somit nicht wie in /Ble16/ durch Mittelwertbildung mehrerer Messungen kompensiert werden, was die Streuung anhebt.

Dies verbessert sich dann, wenn der Dichte der gemittelte fiktive Elastizitätsmodul E_f der beiden ermittelten Steifigkeiten je Probe gegenübergestellt wird, Bild 49. Dies zeigt, dass die Mittelung der gemessenen Steifigkeiten für eine optimierte Auswertung zwingend notwendig ist. Bild 49 zeigt zudem einige Ausreißer im Bereich von 100 GPa. Ohne diese Messpunkte wird zudem das Ergebnis weiter verbessert, Bild 50.

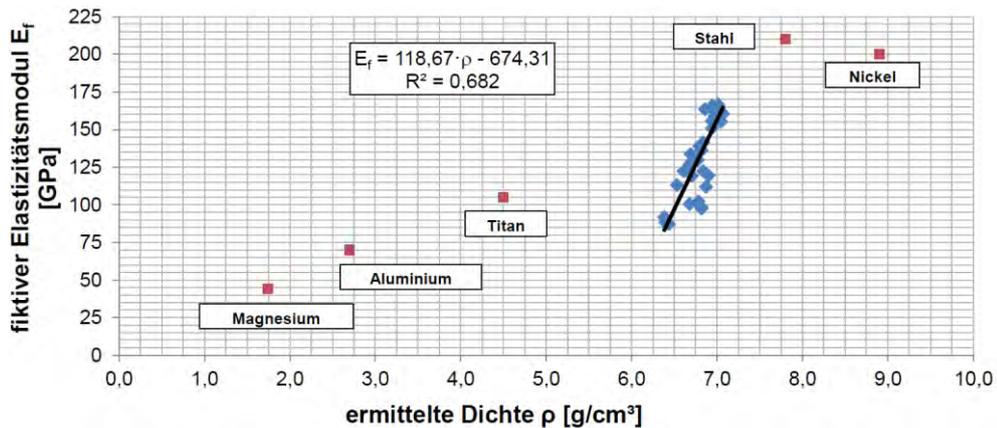


Bild 49 Vergleich der Dichte zum gemittelten, fiktiven Elastizitätsmodul (beidseitige Messung der Dehnung)

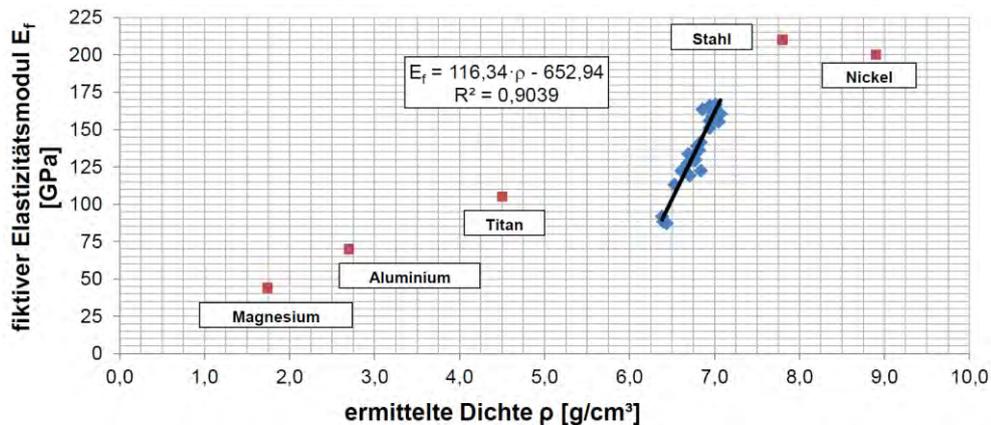


Bild 50 Vergleich der Dichte zum gemittelten, fiktiven Elastizitätsmodul ohne Berücksichtigung von Ausreißern (beidseitige Messung der Dehnung)

Die Auswertungen zeigen, dass sofern die Dichte aus einer zerstörungsfreien Prüfung, wie der Röntgen-Computertomographie, der Durchstrahlung /Ble16/ oder dem Ultraschall /Kur14/ ermittelt werden kann, eine Abschätzung der lokalen Bauteilsteifigkeit gelingt. Damit stehen nun Möglichkeiten zur Verfügung, lokale Beanspruchungen auf Grund einer feineren Bauteilmodellierung mit unterschiedlichen Elastizitätsmoduli besser bestimmen oder bei Dehnungsmessungen am Bauteil die richtige lokale Steifigkeit zur Ermittlung der lokalen Spannung heranziehen zu können. Damit ergibt sich für den Konstrukteur eine erweiterbare Möglichkeit für den Bauteilfestigkeitsnachweis von realistischen Gegebenheiten am Bauteil ausgehen zu können, statt mit einem Nennelastizitätsmodul für Simulation und DMS-Analyse arbeiten zu müssen.

7.3 Schwingfestigkeit des Drosses

Die Beurteilung des zyklischen Werkstoffverhaltens der Schwingproben mit Dross ist ungleich schwieriger im Vergleich zum Grundwerkstoff, da der Dross die Schwingproben ungleichmäßig durchsetzt und sich somit auch Biegeanteile bei reiner Axialbelastung in den Proben ausbilden, die nicht quantifizierbar sind. Auf Grund der teilweise starken Drossanzeigen in der kompletten Schwingprobe, versagen nicht alle im Prüf- und damit Messbereich des Dehnungsaufnehmers, sondern teilweise auch im Übergangs- und Einspannbereich der Schwingproben, Bild 51.

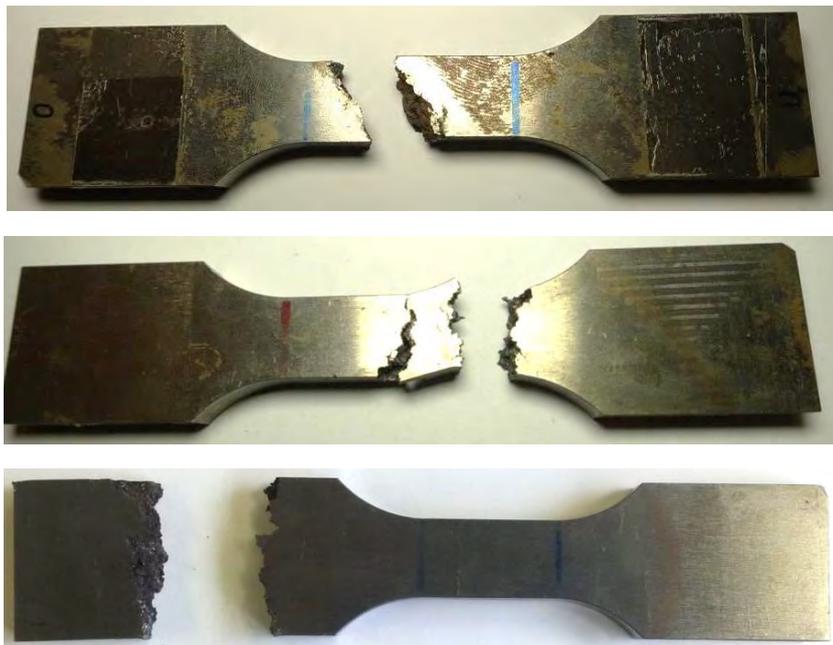


Bild 51 Schwingproben mit und ohne Dross nach der Prüfung mit Bruchlage im Prüfbereich (oben) und im Übergangsbereich (Mitte) bzw. Einspannbereich (unten)

Zudem ist auf Grund der Ergebnisse der Steifigkeitsbestimmung an den Schwingproben anzunehmen, dass jede Schwingprobe einen eigenen und darüber hinaus teilweise sehr geringen fiktiven Elastizitätsmodul E_f besitzt, was die Ermittlung einer gemeinsamen Spannungs-Dehnungskurve je Drossausprägungsform nicht möglich macht. Für einen Vergleich des zyklischen Werkstoffverhaltens des mit Dross behafteten und des drossfreien Werkstoffzustandes, zeigt Bild 52 beispielhaft für einige Schwingproben von Siempelkamp die Einzelergebnisse der Schwingproben mit Dross eingetragen in das Dehnungs-Wöhlerdiagramm des Grundwerkstoffes.

Durch die Gegenüberstellung zum ungespannten Werkstoffzustand am Beispiel der Dehnungswöhlerlinie in Bild 52 zeigt sich, dass erhöhte Streuungen in Richtung der Beanspruchbarkeit auftreten, was bereits Untersuchungen von /Kau98, Tro14, Ble16/ zeigen. Hinzu kommt nun, dass insbesondere bei höheren Dehnungsamplituden keinerlei Schwingfestigkeit mehr vorhanden ist, was auf die bereits gezeigte, teilweise sehr geringe Werkstoffsteifigkeit zurückzuführen ist. Insbesondere bei hohen Beanspruchungsamplituden kann für zahlreiche Schwingproben nicht einmal ein Schwingspiel nachgewiesen werden. Die Schwingproben versagen unmittelbar zu Beginn der Lasteinleitung oder innerhalb von ein bis zwei Schwingspielen. In diesem Falle ist von Dross mit zahlreichen Anrissen auszugehen, die nur noch bruchmechanisch und damit nicht im Rahmen dieses Vorhaben zu untersuchen sind. Ein Beispiel

für solche Schwingproben sind in Bild 53 gezeigt. Hierbei ist deutlich eine sehr scharfe Materialtrennung zu erkennen, die die Schwingfestigkeit auf ein Minimum reduzieren.

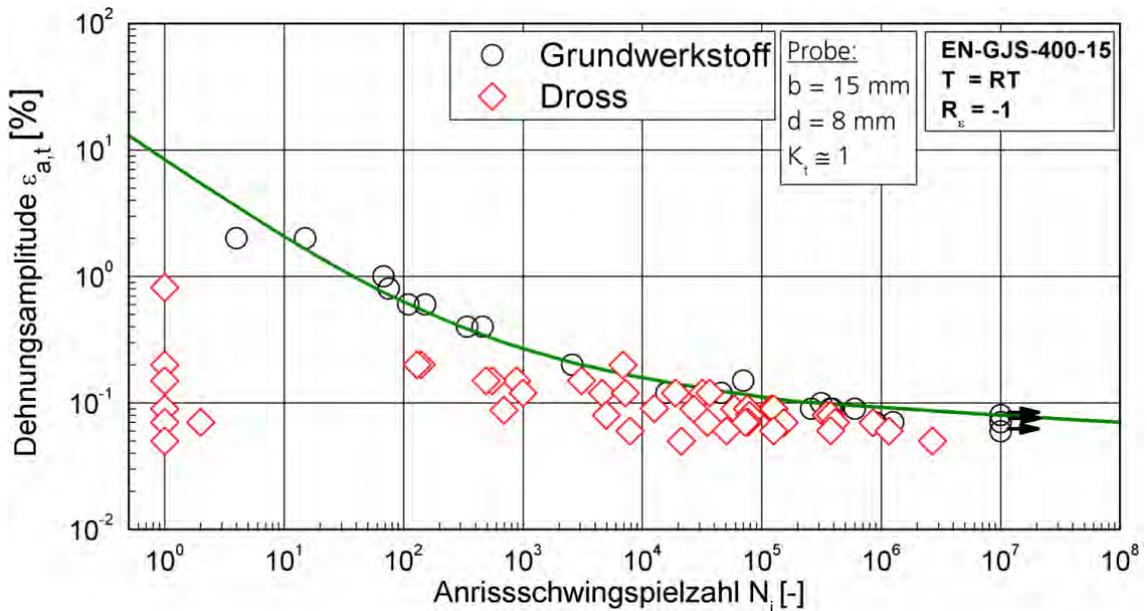


Bild 52 Einzelergebnisse der Schwingproben mit Dross im Vergleich zur Schwingfestigkeit des Grundwerkstoffs

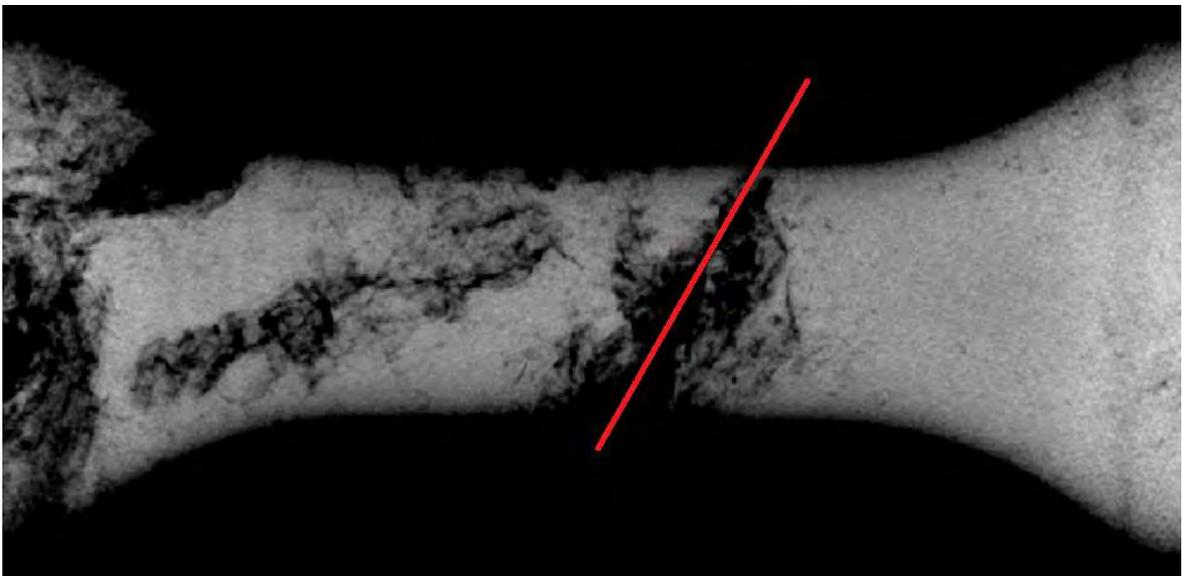


Bild 53 Schwingprobe mit deutlicher Materialtrennung in der Durchstrahlung

Dabei dient als Unterscheidungskriterium dieses Drosses mit sehr schlechten Eigenschaften beispielweise der fiktive Elastizitätsmodul. So zeigt sich, dass alle Schwingproben mit lediglich ein bis zwei erreichten Schwingspielen gerade einmal Werte für den fiktiven Elastizitätsmodul bis etwa 50 GPa aufweisen. Somit kann die dazu entsprechende Dichte als Einteilungskriterium für den bruchmechanisch zu beurteilenden sehr schlechten Dross und den unter Betriebsfestigkeitsaspekten zu bewertenden Dross genutzt werden, wenn die Dichte am Bauteil mit ZfP-Verfahren detektiert wird.

Bleiben die Schwingproben mit sehr schlechter Schwingfestigkeit bzw. fiktiven Elastizitätsmoduli unter 50 GPa für die Schwingfestigkeitsbeurteilung unberücksichtigt, zeigen sich dennoch sehr hohe Streuungen der Schwingproben mit Dross im Vergleich zum ungänzenfreien Werkstoffzustand.

Um die Streuungen reduzieren zu können, bieten sich generell, ähnlich zum Vorgehen an Lunkern in /Ble16/, zwei Wege an. Dabei kann in einem Fall eine Abschätzung der zulässigen zyklischen Nennspannungsamplitude, ausgehend von Wöhlerlinien für unterschiedliche, noch zu definierende Drossklassen oder im anderen Fall eine stufenlose Abschätzung der Schwingfestigkeit für jede untersuchte Schwingprobe erfolgen.

Dabei bietet die stufenlose Abschätzung der zulässigen Beanspruchbarkeit den Vorteil eines reinen rechnerischen Nachweises der Schwingfestigkeit, ausgehend von der Dichte-Messung und dem Abgleich zum fiktiven Elastizitätsmodul, der dann noch mit der Schwingfestigkeit zu verknüpfen ist. Hierfür muss jedoch z.B. eine Dichtebestimmung am Bauteil erfolgen. Liegt diese nicht vor, kann der rein visuelle Abgleich von z.B. repräsentativen MT-Aufnahmen für unterschiedliche Drossklassen mit der am Bauteil vorliegenden Drossstruktur immerhin eine Abschätzung der Schwingfestigkeit mit Hilfe der Drossklassen-Wöhlerlinien ermöglichen.

Für beide Betrachtungen ist es sinnvoll zunächst die ermittelten Versuchspunkte aus unterschiedlichen Versuchskörpern gemeinsam auszuwerten. Dies wird auf Basis von Nennspannungen getan.

Hierzu werden zunächst die ermittelten Schwingfestigkeitsergebnisse aus dem dehnungskontrollierten Versuch in den Spannungsraum übertragen. Dazu werden alle Einzelversuchsergebnisse am ungänzenfreien Werkstoff der Versuchsreihen SR01, FWHR01, FWHR03 und MANR02, die nur elastische Dehnungsanteile im zyklisch stabilisierten Werkstoffzustand aufweisen, herangezogen. Da die im zyklisch stabilisierten Zustand vorliegenden Nennspannungsamplituden teilweise in Zug- oder Druckrichtung verschoben sind, wird jede Nennspannungsamplitude zunächst mit einer Mittelspannungsempfindlichkeit von $M = 0,51$ nach /Ble16/ auf ein Lastverhältnis von $R_\sigma = -1$ umgerechnet. Hieraus ergibt sich dann die Wöhlerlinie für den ungänzenfreien Werkstoffzustand in Bild 54.

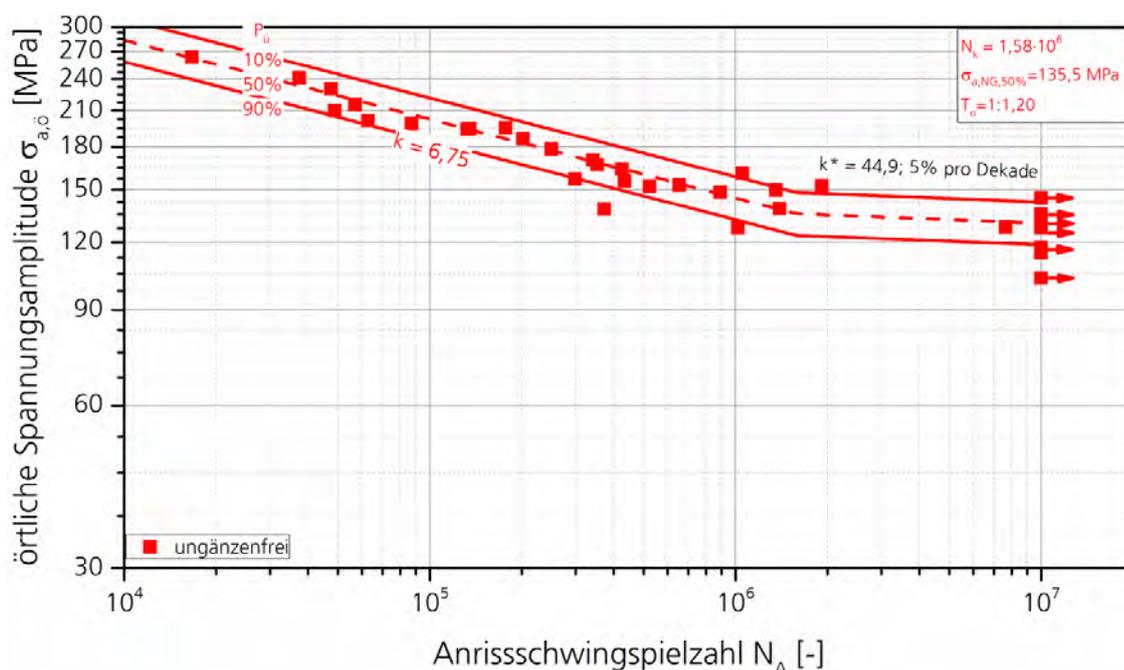


Bild 54 Wöhlerlinie für den ungänzenfreien Werkstoffzustand für den EN-GJS-400

7.4 Ermittlung einer Dross-abhängigen Kerbwirkungszahl K_{fD}

Für die Ableitung lokaler Bauteilschwingfestigkeiten wird bereits in /Ble16/ eine Methode vorgeschlagen, um ausgehend von gemessener Dichte bzw. fiktivem Elastizitätsmodul eine Kerbwirkungszahl des Lunkers K_{fS} abzuleiten, um so die ungespannte Spannungswöhlerlinie abzumindern. Auch beim Dross ist prinzipiell ein vergleichbarer Weg denkbar.

Hierfür werden zunächst alle Versuchsergebnisse herangezogen, bei denen mit zwei Dehnungsaufnehmern gemessen wurde und für die ein Anriss im Probenprüfvolumen vorliegt. Da die Auswertung des fiktiven Elastizitätsmoduls für die Messung mit zwei Dehnungsaufnehmern in Gegenüberstellung zur Dichte deutlich bessere Werte ergibt, als dies für nur einen Dehnungsaufnehmer der Fall ist, wird aus Gründen der zu erwartenden Genauigkeit fortan nur mit diesen, wenn auch wenig Ergebnissen weitergearbeitet.

Zunächst werden auch diese Ergebnisse von Dehnungen in Spannungen überführt. Hierzu wird, ausgehend von den Schwingproben ohne Dross, davon ausgegangen, dass alle Versuche, die eine Schwingspielzahl oberhalb von 30.000 Schwingspielen erreichen nur rein linear-elastisches Werkstoffverhalten aufweisen. Die Spannungen ergeben sich dann für jede Schwingprobe durch Multiplikation des gemessenen fiktiven Elastizitätsmoduls E_f mit der Dehnungsamplitude aus dem Versuch und sind dann örtliche Spannungen.

Wird nun für eine Schwingprobe bei erreichter Lebensdauer die vorliegende Nennspannungsamplitude mit derjenigen des ungespannten Werkstoffzustandes ins Verhältnis gesetzt, ergibt sich eine neue Kerbwirkungszahl des Drosses K_{fD} für jede einzelne Schwingprobe, Bild 55.

Die Gegenüberstellung der Kerbwirkungszahl des Drosses K_{fD} zum gemessenen fiktiven Elastizitätsmodul zeigt dabei deutliche Korrelationen, Bild 56. Insbesondere wird richtig abgeschätzt, dass bei niedrigerem fiktivem Elastizitätsmodul, also bei mehr Dross, K_{fD} ansteigt. Somit kann nun ausgehend von der gemessenen Dichte am Bauteil oder der gemessenen lokalen Steifigkeit ein Faktor in Form von K_{fD} abgeleitet werden, der ausgehend von der ungespannten Spannungswöhlerlinie die Abschätzung örtlich aufgelöster Beanspruchbarkeiten im örtlichen System möglich macht.

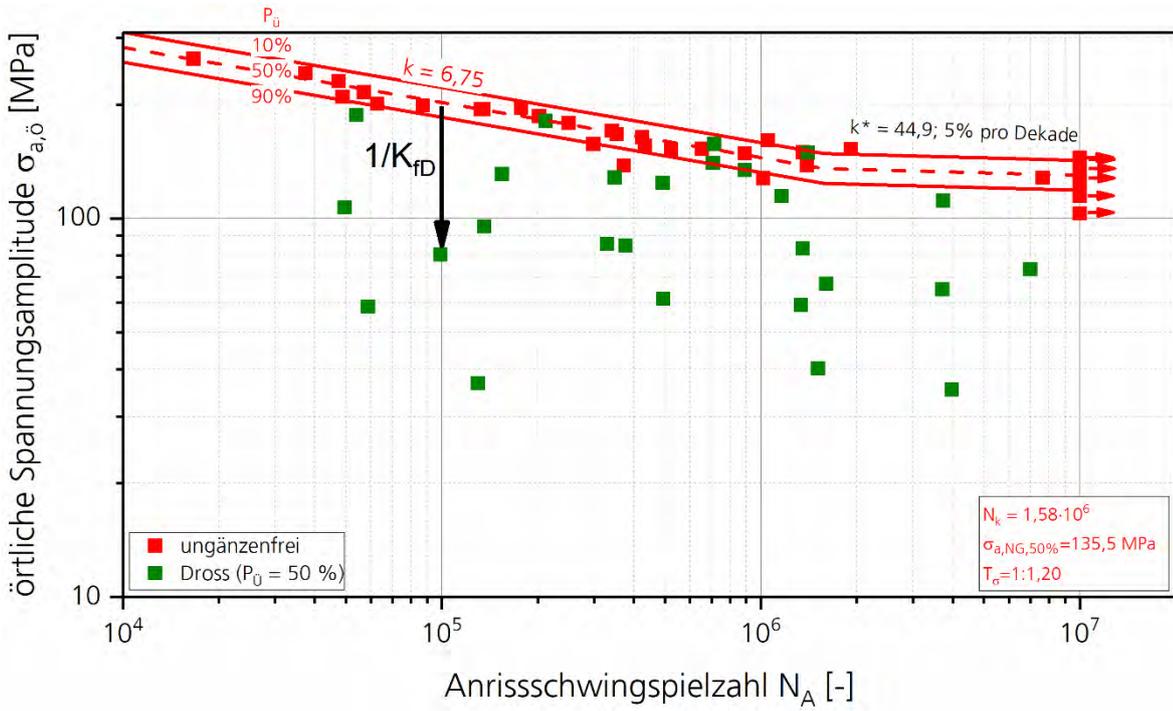


Bild 55 Ermittlung der Kerbwirkungszahl des Drosses K_{fD}

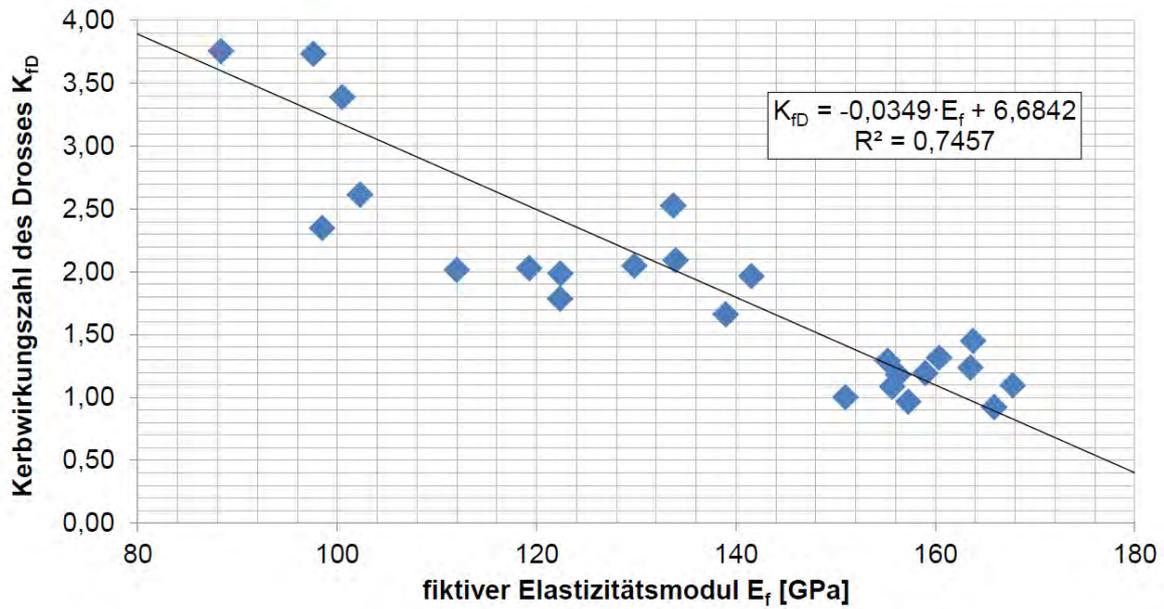


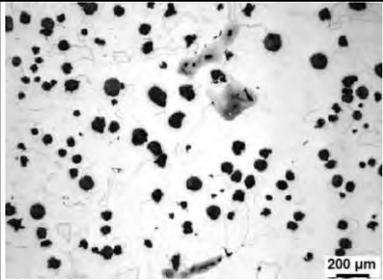
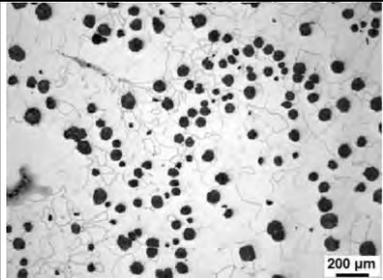
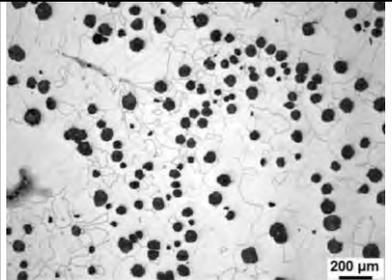
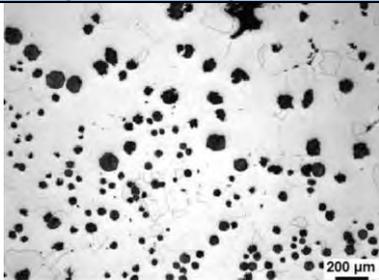
Bild 56 Abhängigkeit der Kerbwirkungszahl des Drosses K_{fD} vom fiktiven Elastizitätsmodul E_f

7.5 Metallographie des Grundwerkstoffes

Begleitend zu den Beanspruchbarkeitsuntersuchungen finden metallographische Untersuchungen zur Bestimmung der Parameter der Werkstoffmatrizen statt. Dabei werden vier Schwingproben je Halbzeug bzw. Bauteil untersucht und neben Ferrit- und Perlitgehalt auch die Graphitmenge, -form sowie -größe und die Nodularität bestimmt.

Eine Zusammenstellung der Ergebnisse gemittelt aus den vier einzelnen Proben zeigt Tabelle 10. Dabei zeigen die untersuchten Proben im Mittel zu den anderen Versuchskörpern vergleichbare Kennwerte. Lediglich der Perlitanteil in den Versuchskörpern von MAN liegt mit durchschnittlich 13,1 % um einiges höher als bei den Versuchskörpern von Siempelkamp und FWH. Der Perlitgehalt bei den Bauteilabschnitten von FWH ist mit 2,5 % am geringsten und spiegelt die beim EN-GJS-400-18 leicht erhöhte Bruchdehnung im Vergleich zum Versuchskörper-Werkstoff EN-GJS-400-15 wieder.

Tabelle 10 Schliffbilder (Durchschnittswerte aus jeweils 4 Schliffen)

EN-GJS-400-15	EN-GJS-400-15	EN-GJS-400-15
Versuchskörper Siempelkamp	Versuchskörper MAN	Versuchskörper FWH
geätzt mit 3%-igem Nital	geätzt mit 3%-igem Nital	geätzt mit 3%-igem Nital
		
<i>Graphitform nach DIN EN ISO 945-1 /DIN45/</i>		
98,6 % (V + VI)	94,6 % (V + VI)	99,0 % (V + VI)
<i>Graphitgröße nach DIN EN ISO 945-1 /DIN45/</i>		
61,8 % (5 + 6)	75,2 % (5 + 6)	79,7 % (5 + 6)
<i>Nodularitätskennzahl</i>		
72,6	68,6	84,1
<i>Ferrit- / Perlit- / Graphitanteil</i>		
83,8; 5,0; 11,2	78,3; 13,1; 8,6	80,9; 7,9; 11,2
EN-GJS-400-18		
Bauteilsegmente (FWH)		
geätzt mit 3%-igem Nital		
		
<i>Graphitform nach DIN EN ISO 945-1 /DIN45/</i>		
97,7 % (V + VI)		
<i>Graphitgröße nach DIN EN ISO 945-1 /DIN45/</i>		
76,3 % (5 + 6)		
<i>Nodularitätskennzahl</i>		
76,3		
<i>Ferrit- / Perlit- / Graphitanteil</i>		
87,1; 2,5; 10,4		

Die höchste Nodularitätskennzahl erreichen die Proben aus dem Versuchskörper der FWH mit 84,1 %, während die anderen Versuchskörper und Bauteile durchschnittlich 61,8 % bis 76,3 % erreichen, Tabelle 10. Eine Zusammenstellung aller metallographischen Ergebnisse hinsichtlich der Gefügeparameter nach /DIN45/ zeigen Bild 57, Bild 58, Bild 59, Bild 60 und Bild 61.

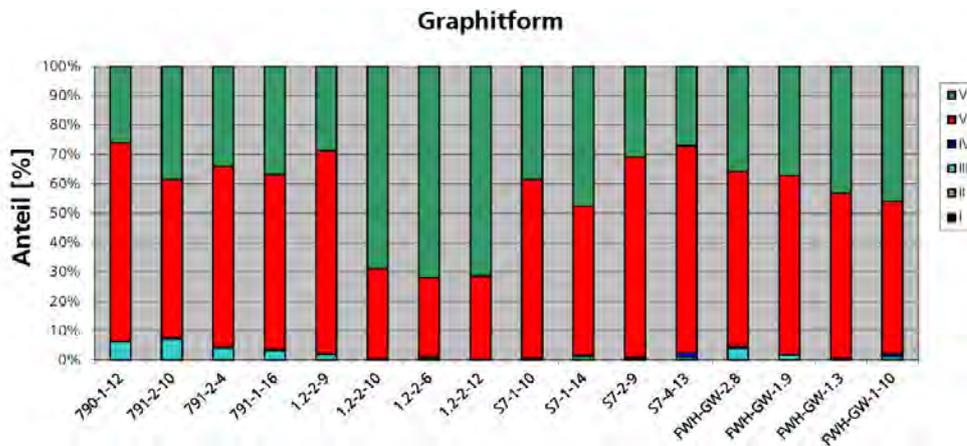


Bild 57 Gegenüberstellung aller untersuchter Schwingproben: Graphitform

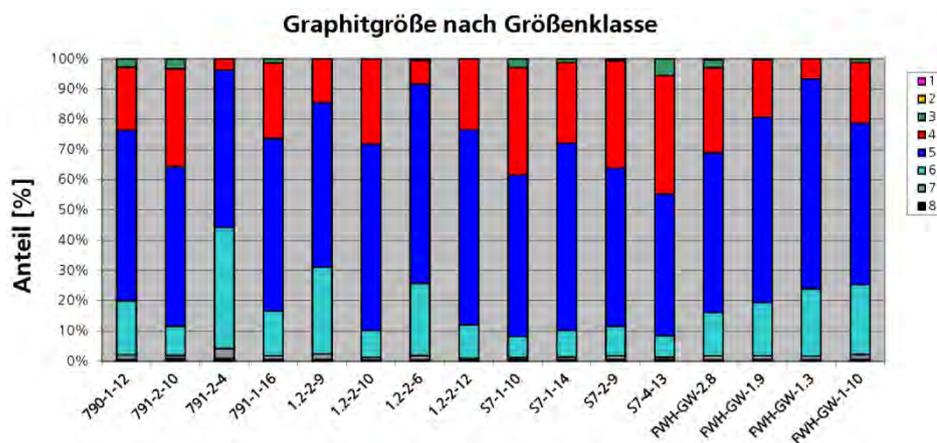


Bild 58 Gegenüberstellung aller untersuchter Schwingproben: Graphitgröße

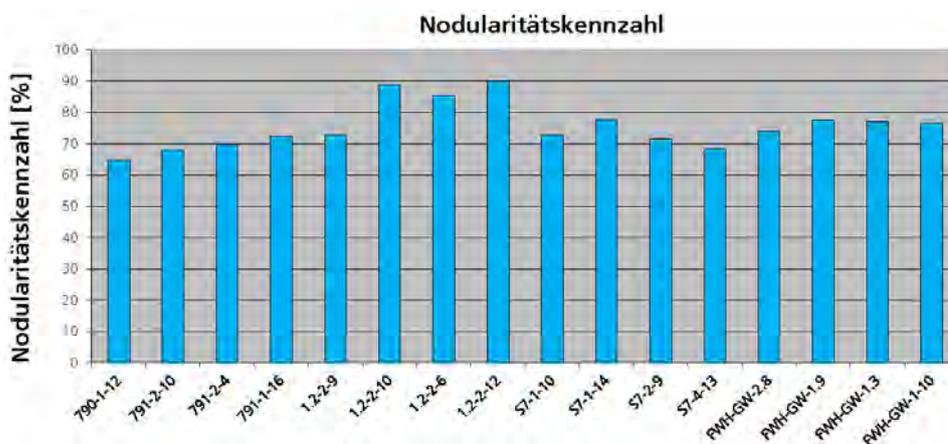


Bild 59 Gegenüberstellung aller untersuchter Schwingproben: Nodularitätskennzahl

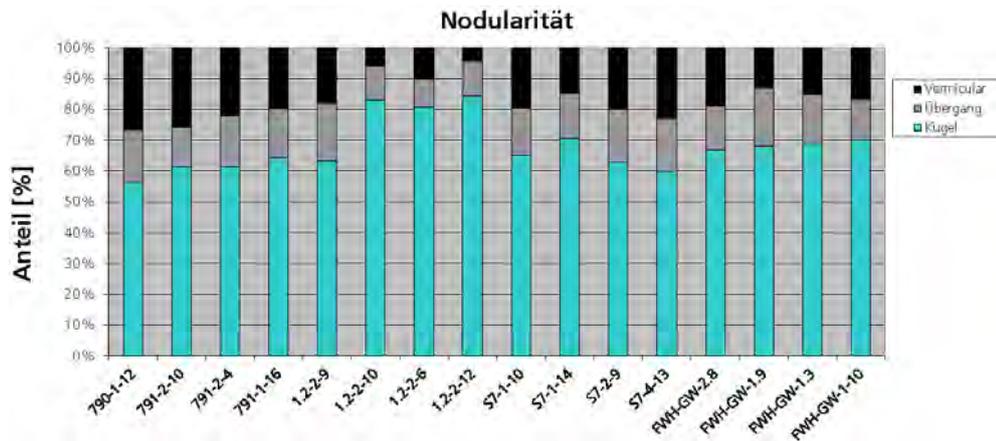


Bild 60 Gegenüberstellung aller untersuchter Schwingproben: Nodularität

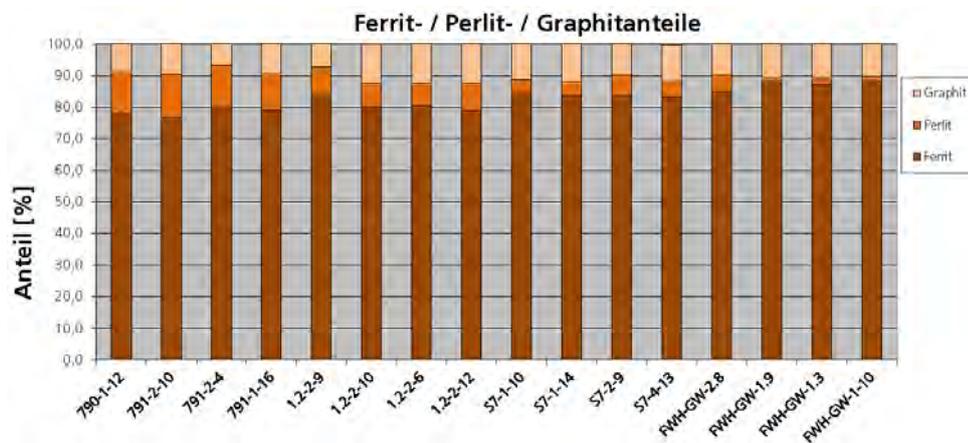


Bild 61 Gegenüberstellung aller untersuchter Schwingproben: Ferrit- / Perlit- und Graphitanteil

7.6 Metallographie des Drosses

Begleitend zu den Schwingfestigkeitsuntersuchungen an Dross finden auch metallographische Untersuchungen statt. Hierzu werden sowohl Schliff- als auch REM- und EDX-Analysen durchgeführt, um den Dross zu charakterisieren. In diesem Zusammenhang charakterisiert /Weh16/ im Rahmen des Vorhabens die vorliegenden Erscheinungsformen des Graphits näher. Dabei werden drei unterschiedliche Klassen ermittelt, bei denen sich der Dross neben Kugel-, Lamellen- und Vermikulargraphit bildet, Bild 62. Es zeigt sich, dass diese Formen dadurch entstehen, dass sich der Dross entweder zuerst bildet und dem umgebenden Gefüge Magnesium für die Kugelbildung entzieht (Typ C), sich der Dross zum Schluss bildet und das umgebende Gefüge bereits Kugelgraphit gebildet hat (Typ B), oder sich die Bildung von Dross und Graphit parallel vollzieht, sodass eher wurmförmiger Graphit entsteht (Typ A), Bild 62.

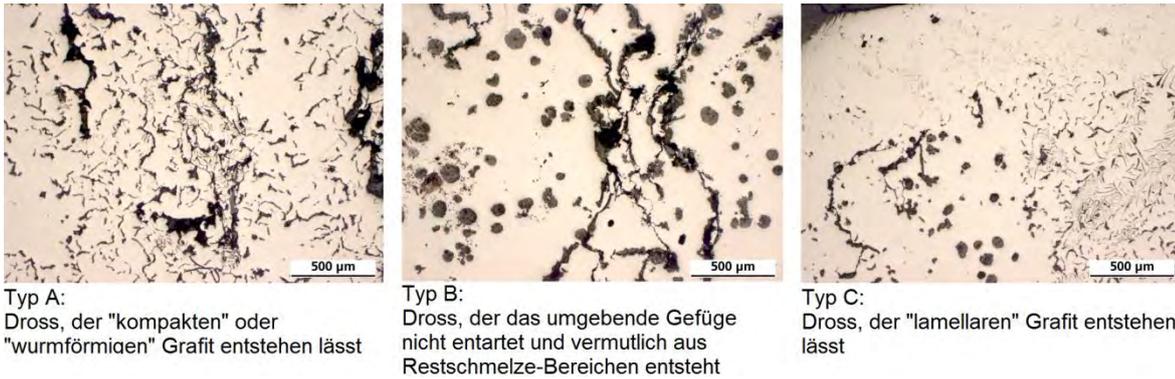


Bild 62 Einteilung des Drosses /Weh16/

Im Rahmen der metallographischen Untersuchungen werden unterschiedliche Arten der Drosserscheinung definiert, die mit hoher Regelmäßigkeit in den Proben auftreten, Tabelle 11 und Bild 63. Dabei zeigt insbesondere der „chunk shaped dross“ hohe Anteile an Magnesium, Silizium und Aluminium von bis zu 16 Gewichts-% im Falle des Aluminiums. Beim Typ „surface pit dross“ liegen hohe Anteile an Magnesium, Schwefel und Mangan für „surface pit I“ und hohe Anteile an Magnesium, Stickstoff und Silizium für „surface pit II“ vor. Dabei zeigen Analysen der gefundenen Elemente insbesondere für den „surface pit II“ eine gute Korrelation aller drei Elemente zueinander /Din17/.

Tabelle 11 Erscheinungsformen des Drosses nach /Din17/

Cluster	String	Chunk in the string	surface pit
normal Cluster	with vermicular graphite surroundings (Typ A)	flat chunk	surface pit I
	with lamellar graphite surroundings (Typ B)	smooth chunk	surface pit II
	with nodular graphite surroundings (Typ C)		

Für die Form „String“ werden insbesondere Analysen der Gehalte von Magnesium und Kohlenstoff durchgeführt, Bild 64. Dabei ergeben sich zwar keine direkten Korrelationen beider Elemente im Hinblick auf deren Anteile. Dennoch zeigt sich, dass das Verhältnis von Kohlenstoff zu Magnesium in den einzelnen Erscheinungsformen nicht wahllos ist, Bild 64. Darüber hinaus werden insbesondere beim Typ C sehr hohe Anteile an Kohlenstoff bei nur mäßigem Magnesiumanteil detektiert. Dies stützt die These, dass das Magnesium bereits zur Bildung des den Dross umgebenden Kugelgraphits verbraucht wurde und der Dross nachträglich mit hohen Anteilen an Kohlenstoff entsteht. Dagegen liegen beim Typ A und Typ B vergleichsweise hohe Magnesiumanteile vor, Bild 64.

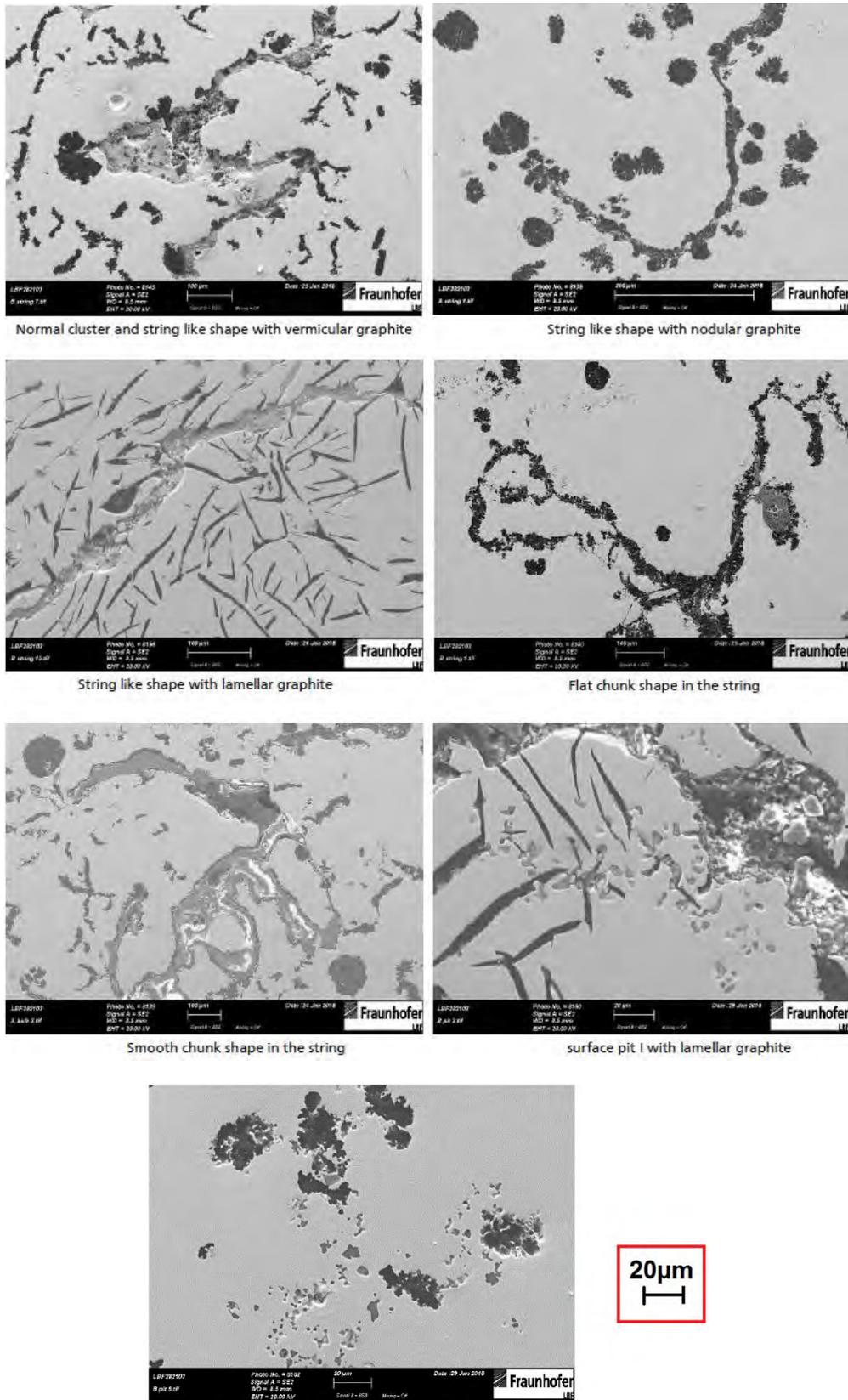


Fig 9: surface pit II with irregular nodular graphite

Bild 63 Erscheinungsformen des Drosses nach /Din17/

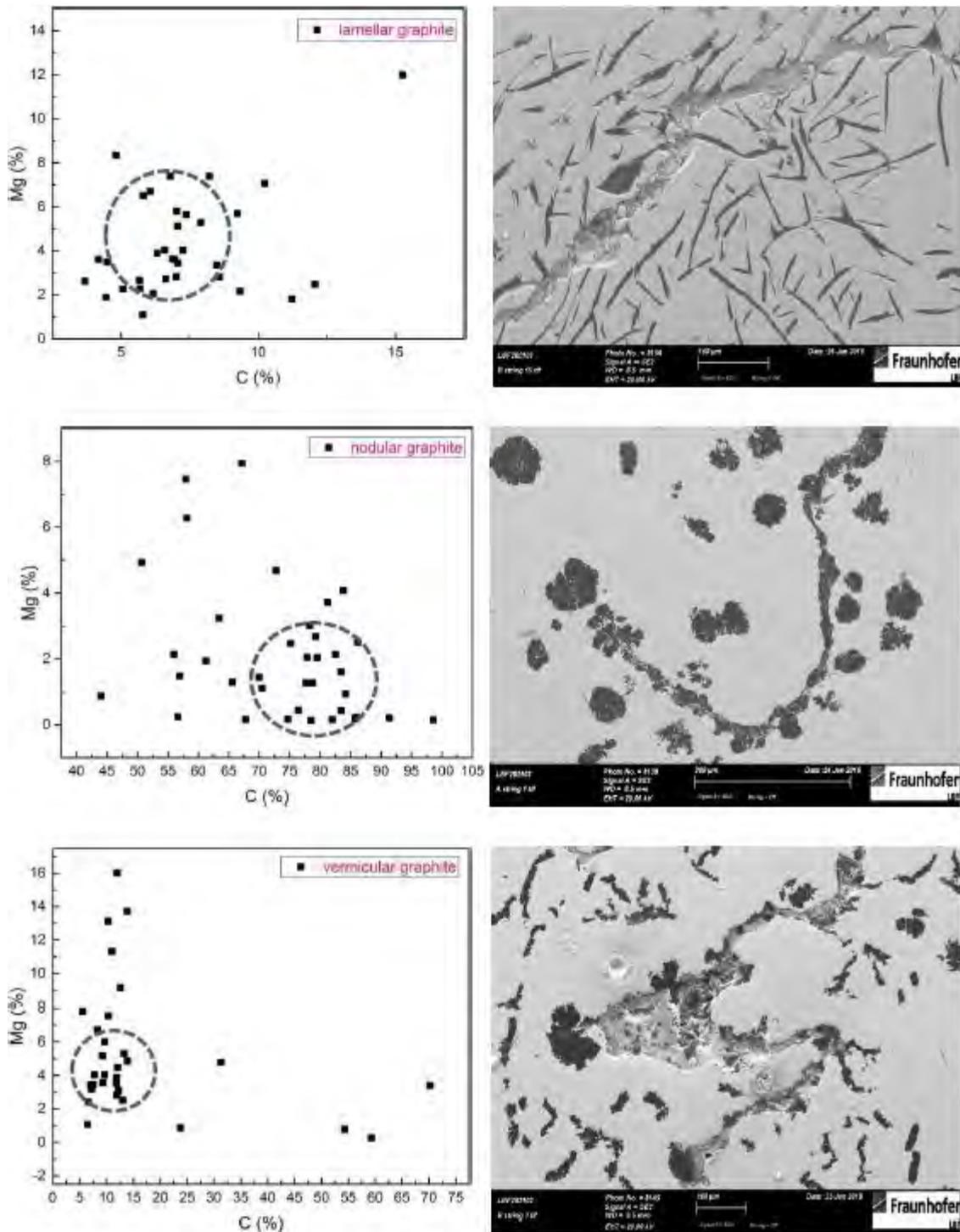


Bild 64 Verteilung des Magnesiums und des Kohlenstoffs in der Drosserscheinungsform „string shaped“ /Din17/

8 Auswertung der zFP-Daten

Im Zuge des Projektes unverDROSSen wurden am Fraunhofer IZFP und bei weiteren Projektpartnern unterschiedliche zerstörungsfreie Prüfverfahren angewandt und auf deren Eignung zur Detektierung von Dross in Großgussbauteilen hin getestet, vgl. Abschnitt 3. Dies sind das Ultraschallverfahren (UT), die Computertomographie (CT) und die 3MA-Methode.

Das Ultraschallverfahren bietet die Möglichkeit in Tiefenrichtung des Bauteils die Drossoberfläche, d.h. die Grenzschicht zwischen Dross und Ausgangswerkstoff, dreidimensional darzustellen. Aufgrund von Impedanzsprüngen beim Eintritt der Ultraschallwellen in den Prüfkörper und durch Abschattungen ist eine Detektierung von Dross von jeder Oberfläche des Prüfkörpers jedoch nicht möglich. Es kann keine Aussage über die gesamte dreidimensionale Ausprägung des Dross getätigt werden. Auch feinste Strukturen können nicht aufgelöst werden. Im Projekt wurde mit einem Abtastraster von 2 mm x 2 mm die Ultraschallprüfung durchgeführt. Im Idealfall wären somit Strukturen mit dieser Genauigkeit auflösbar. Aufgrund des Auffächerns des Strahles und von Reflexionen ist dieser Wert jedoch nicht erreichbar. Als primär genutzte Prüfmethode für Großgussbauteile wird jedoch auf Basis der UT gearbeitet und somit wird dieses Verfahren auch für das Bemessungskonzept eingesetzt.

Die Computertomographie-Daten haben für die verwendeten Proben die höchste räumliche Auflösung der genutzten Prüfverfahren, sind aber aufgrund der sogenannten Strahlaufhärtung teilweise schlecht für Vergleiche untereinander nutzbar. Hier könnten weitere Algorithmen für die Anpassung der Strahlaufhärtung zu einer besseren Vergleichbarkeit führen. Außerdem sind keine CT-Anlagen für Großgussbauteile vorhanden, sodass nur Proben durchstrahlt werden können. Im Vergleich hierzu können die Verfahren UT und 3MA auch an Großgussbauteilen durchgeführt werden und wurden im Rahmen des Projektes auf die gegossenen Blöcke angewendet. Der Einsatz auf Probenebene ist jedoch möglich. Da eine dreidimensionale Darstellung des Dross mit Hilfe der CT möglich ist, wird diese Methode als Vergleichsmethode und Richtgröße genutzt, um die weiteren Verfahren zu validieren und somit dem Bemessungskonzept eine genauere Datenbasis zu Grunde zu legen. Zudem kann mit einer in diesem Projekt entwickelten Methode die lokale Dichte von Schwingproben auf Basis von CT-Aufnahmen bestimmt werden.

Als Möglichkeit der zerstörungsfreien Randschichtcharakterisierung auf Basis der Mikromagnetik wird die Mikromagnetische Multiparameter-Mikrostruktur- und Spannungs-Analyse (3MA) als Vergleichsverfahren eingesetzt. Als auf Großgussbauteilen einsetzbare Verfahren wird zudem die UT eingesetzt, um sie auf die Tauglichkeit zur Dichtevorhersage hin zu prüfen.

Alle Verfahren zielen darauf ab, aus der zerstörungsfreien Prüfung möglichst genaue Informationen zu den variierenden Dichten im Prüfkörper zu erlangen, da auf deren Basis eine Bemessung von Drossbehafteten Gusswerkstücken ermöglicht werden soll.

8.1 Ultraschall

Die Untersuchungen an den Prüflöcken in diesem Projekt haben zwei Hauptziele. Zum einen soll die Güte des Verfahrens zur Ermittlung der Tiefenausbreitung des Dross festgestellt werden. Dazu werden die aus den Ultraschallmessungen gewonnenen Daten mit den aus den CT-Messungen erhaltenen Daten abgeglichen. Zum anderen soll eine mögliche Korrelation zwischen Ultraschallmessung und Dichte des Drosses abgeleitet werden. Aus beiden Punkten ergibt sich im Idealfall zusätzlich eine Aussage über Form und Beschaffenheit des Drosses. Insbesondere im Hinblick auf Anwendung der Ultraschallprüfung an Großgussbauteilen, die beispielsweise nicht durch eine CT-Prüfung zerstörungsfrei geprüft werden können, ist das Ultraschallverfahren neben den magnetischen Verfahren (3MA) hier von hervorgehobener Bedeutung.

Im allgemeinen Gebrauch sind die UT-Daten nicht für die oben beschriebenen quantitativen Aussagen vorgesehen, sondern vielmehr um eine Aussage zum Vorhandensein des Drosses und dessen Verteilung und Ausprägung zu treffen. Diese müssen im Rahmen des Projektes geschaffen werden.

Um die aus der UT Messung am Fraunhofer IZFP gewonnenen Daten am Fraunhofer LBF in der numerischen Umgebung Matlab® verarbeiten zu können, musste eine Schnittstelle erstellt werden, die das .rec Format (Binärdatei) der Messung in eine Matrixstruktur überführt, die in den Voxeln die Informationen der Messung beinhaltet. Hierfür muss die Struktur des Datei-Headers bekannt sein sowie die Kodierung der gesamten Datei. Auch muss beachtet werden, dass die bei der Messung verwendete Software „UltrasonicLab“ die Datei in der mittlerweile ungebräuchlichen „Big-endian ordering“ Reihenfolge abspeichert. Der Header beinhaltet alle Informationen zur Erstellung einer dreidimensionalen Matrix. Dies sind die Angaben der Anzahl der Voxel in den drei unterschiedlichen Raumrichtungen sowie der Abstand der Voxel zueinander. Für eine weitere Verarbeitung der Daten muss eine genaue Dokumentation der Angaben in der Headerdatei vorgenommen werden. Des Weiteren müssen die Daten von einem 8-bit signed Integer Wert (Wertebereich -128 bis 127) in einen unsigned Integer Wert (Wertebereich 0 bis 127) überführt werden, da sich die Aufzeichnung im Signal zwar im Vorzeichen unterscheidet, dies physikalisch jedoch keine Bedeutung hat.

Nach der Erstellung der dreidimensionalen Matrix der Voxelwerte muss diese in einem ersten Schritt neu angeordnet werden, da die vorhandene Ausrichtung der Matrix nicht zwangsweise mit den zu erwartenden Bezugskoordinatensystemen des Versuchskörpers übereinstimmt. Es bestehen Unterschiede der Koordinatensysteme in Bezug auf Aufnahmen von der Drossseite und der Drossgegensseite. Hinzu kommen unterschiedliche Ausrichtungen der Koordinatensysteme je nach Messkörper. Hier sind insbesondere die Nullpunkte der Ultraschallmessungen in Bezug auf an die Ecke eines Prüfkörpers zu nennen, auf die sich beispielsweise die Probenentnahme bezieht. Auch für einen Vergleich mit 3MA Messungen muss eine Umrechnung erfolgen. Für alle diese Umrechnungen müssen die entsprechenden Transformationen angegeben werden. Eine Umrechnung auf das Versuchskörper-Koordinatensystem, welches als Bezugskoordinatensystem fungiert, von allen Messdaten ist anzuraten.

In Folge der Messmethode der mechanisierten Ultraschallprüfung an den Versuchskörpern ergeben sich für die erhaltenen Daten unterschiedliche Unsicherheiten und Ungenauigkeiten, welche bei deren Interpretation beachtet werden müssen. Diese Unsicherheiten sind in die Kategorien Positionsabweichung, verfahrensbedingte Messabweichung und Grenzwertsetzung zu unterteilen. Bei der Prüfung von Großgussbauteilen haben diese Abweichungen eine geringere Auswirkung, da es sich um Abweichungen von einigen Millimetern handelt. In Bezug auf die Positionierung von Schwingfestigkeitsproben und insbesondere des auszuwertenden Prüfbereichs der Probe können diese Abweichungen je-

doch zu gravierenden Abweichungen zwischen erwartetem, virtuellen Entnahmebereich und wirklichem Entnahmebereich der Schwingproben führen.

Die Positionsabweichung ist insbesondere durch die Abweichungen in der Ist-Geometrie von der Soll-Geometrie der Blöcke beeinflusst. Das verwendete rechteckige Raster von 2 mm x 2 mm der mechanisierten Prüfung muss exakt parallel zu den Kanten des Versuchskörpers ausgerichtet sein, da es sonst zu einer Winkelabweichung zwischen Versuchskörper und UT Koordinatensystem kommt. Bei einer beispielweisen Abweichung von 1° zur Prüfrichtung (Scanrichtung) kommt es bei einer Prüflänge von 500 mm zu einer maximalen Abweichung von 8,72 mm in Indexrichtung zur erwarteten Prüfkopfposition. Da zusätzlich der Prüfkopf nach Augenmaß auf den Versuchskörper aufgesetzt werden muss und dieser in einem zusätzlichen Gestell fixiert ist, kommt es hier zu weiteren Abweichungen von ca. 1 – 4 mm sowohl in Scan- als auch in Indexrichtung.

Die verfahrensbedingte Messabweichung hat sowohl auf die Scan- und Indexrichtung Einfluss, da durch das Auffächern der Ultraschallwellen hier nur eine Genauigkeit von ca. 1 – 2 mm zulässt, als auch auf die Tiefenzordnung der Messergebnisse. Hinzu kommt die Notwendigkeit der Beschneidung des Tiefensignals. Bei der Messung mit Ultraschallwellen wird auch ein Teil der unter dem Versuchskörper befindlichen Auflage mitgemessen, sodass die Tiefenmessung auf die wirkliche Versuchskörperdicke kalibriert werden muss. Dies geschieht durch Festsetzung des Abstands des gemessenen Rückwandechos auf die reale Versuchskörperdicke. Allerdings ist das Rückwandecho keine diskrete, parallel zur Oberfläche laufende, Abgrenzung. Durch einen Inklinationswinkel und einen sich über bis zu 10 mm erstreckende Anzeige der Rückwand muss hier eine Rückwand gesetzt werden, die dadurch eine Abweichung in der gesamten Tiefenmessung des Versuchskörpers zur Folge hat. Insbesondere bei der Messung von der Drossgegenseite wird hier die maximale Abweichung im Bereich des Drosses an der Oberfläche erzeugt.

Die Grenzwertsetzung betrifft zum einen das Rückwandecho, vor allem jedoch die Abgrenzung von Drossbereich und Grundwerkstoffbereich. Als Anzeige und somit als Dross ist die doppelte Amplitude des Grundrauschens definiert. Eine Messung des Grundrauschens ergibt jedoch an unterschiedlichen Stellen eines Versuchskörpers unterschiedliche Werte im Bereich von 5 – 10 % der sogenannten Bildschirmhöhe, die die maximale Amplitude beschreibt und bei den verwendeten Speicherformaten mit 8-bit signed Integer den Bereich von -128 bis 127 abdeckt, welcher auf 0 bis 128 transformiert werden kann. Da alle Messungen so eingeregelt sind, dass alle Werte erreicht werden, liegt der Unterschied hier bei einem Voxelwert zwischen 6 und 13. Dadurch ist die wirkliche Anzeige eines Drosses abhängig von der gesetzten Grenze. Im Sinne der Konservativität wird hier der Wert von 5% der Bildschirmhöhe gewählt, um größere Drossbereiche zu erhalten.

Aufgrund der Anzahl von beispielsweise 86.732.800 Messwerte pro Prüfkörper ergeben sich Matrizen sehr großer Abmessungen, hier 220 Messpunkte in Scanrichtung, 220 Messpunkte in Indexrichtung und 1792 Messpunkte in Tiefenrichtung. Zwar ist eine Berechnung auf aktuellen Computersystemen in Matlab® ohne Probleme durchführbar, jedoch ist eine notwendige Darstellung zur optischen Kontrolle des Berechnungsalgorithmus nur mit großem Zeitaufwand und großen Einschränkungen im Handling der Darstellungen möglich. Daher werden die Daten für die Darstellung stark reduziert.

Die Verarbeitung der Daten hat somit folgende Schritte:

1. Header der Datei einlesen
2. Matrixdimensionen bestimmen
3. Voxelwerte einlesen und der Matrix zuordnen
4. Transformation Matrix auf das Vergleichskordinatensystem
5. Beschneiden der Matrix in Tiefenrichtung durch Festlegung des Rückwandechos
6. Zuordnung der Voxelwerte zu Raumkoordinaten
7. Reduktion der Datenmenge für die optische Darstellung
8. Virtuelle Entnahme der erforderlichen Daten in den Bereichen der Prüfquerschnitte

Für die weiteren Schritte müssen daraufhin die Daten an den entsprechenden Probenpositionen erfasst und gegebenenfalls an die Grenzen der Probe interpoliert werden.

Zur Dichteabschätzung wird ein allseitig überfräster Versuchskörper von ThyssenKrupp verwendet. An diesem Versuchskörper wird eine UT-Messung von der Drossgegenseite durchgeführt. Aus dem Versuchskörper werden anschließend Stäbe herausgerodiert, Bild 65, und gewogen. Insgesamt werden 10 Stäbe mit den Abmessungen 20 mm x 20 mm x 65 mm entnommen.

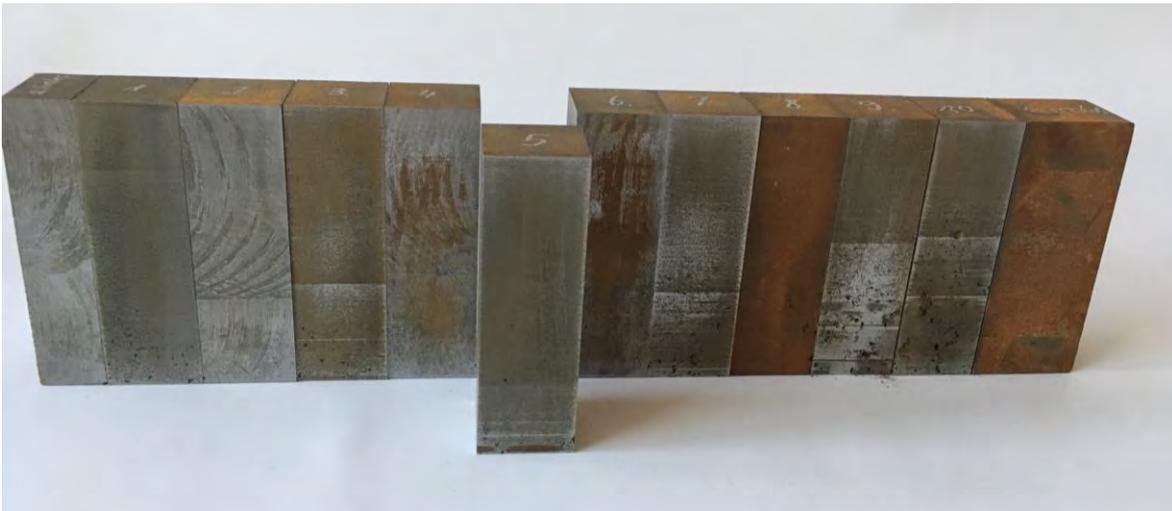


Bild 65 Zur Dichtebestimmung aus dem TK39455-2 Versuchskörper entnommene Stäbe

In der Korrelation werden die Dichte der Stäbe und die Rückwandabschattung an der Position der Stäbe verwendet. In Bild 66 ist die Rückwandabschattung mit den eingezeichneten Probenpositionen dargestellt. Zur besseren Übersichtlichkeit sind alle Voxel mit einer Bildschirmhöhe kleiner als 10 % ausgeblendet. Zur Auswertung der Rückwand werden lediglich die Voxel verwendet, die mittig unterhalb des Prüfkopfes liegen, Bild 67. Dies ist dadurch begründet, dass sich die Schallwellen im Bauteil auffächern und die Reflexionen aus dem gesamten Bereich des entnommenen Stabes in den mittig liegenden Voxel der Rückwand einfließen. Da die Position der Rückwand je nach Drossgehalt variiert, werden aus mehreren übereinanderliegenden Voxel (Bild 66) der Voxel mit dem maximalen Wert in

der Gegenüberstellung von Dichte und Voxelwerten verwendet, Bild 68. Dabei lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Rückwandabschattung und der integralen Dichte der Stäbe erkennen.

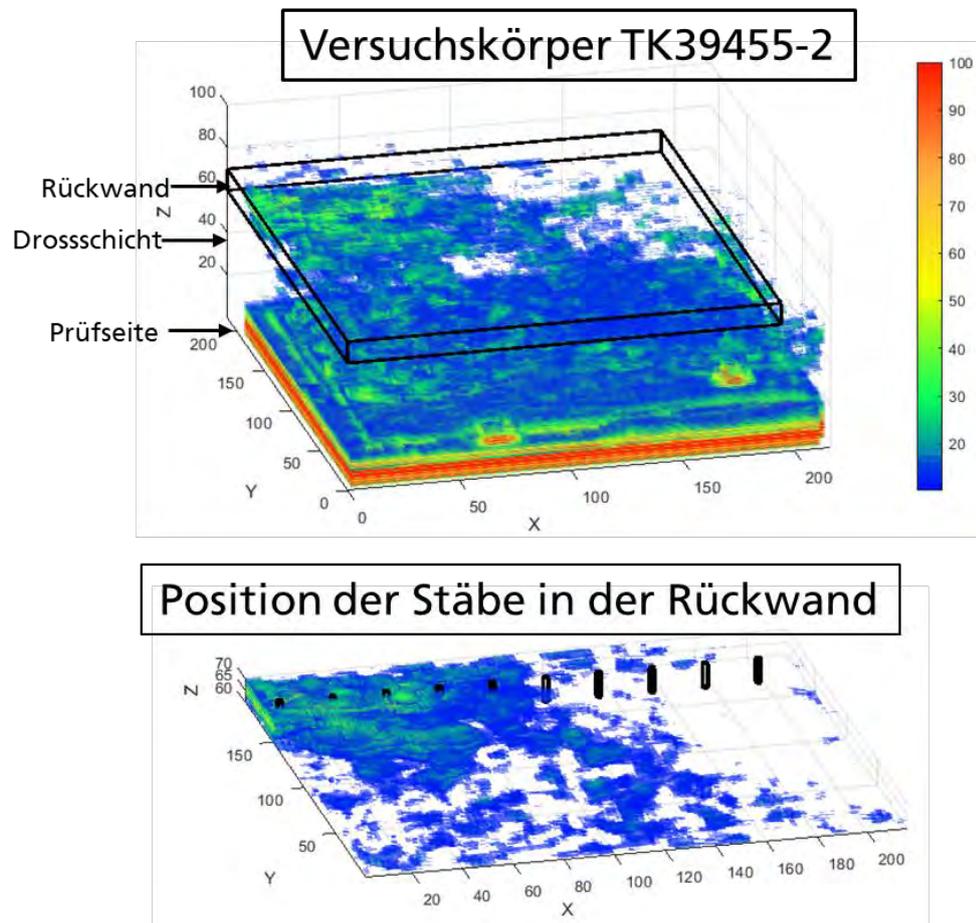


Bild 66 UT-Messung des Versuchskörpers TK39455-2 mit Probenposition

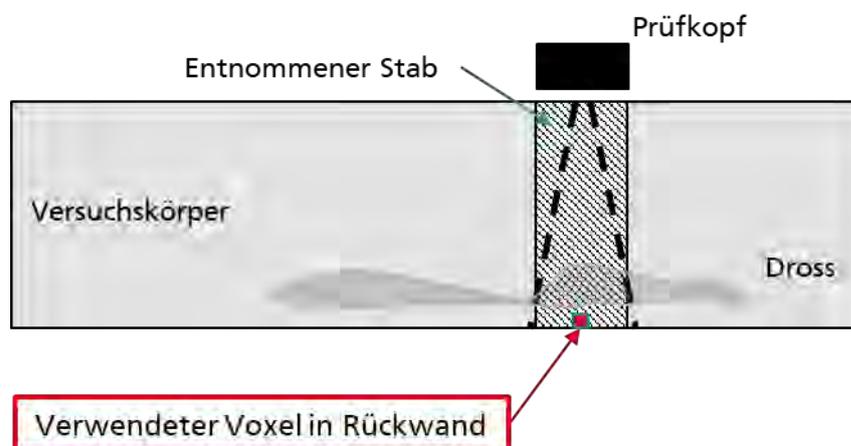


Bild 67 Schematische Darstellung des ausgewertet Voxel der UT-Messung

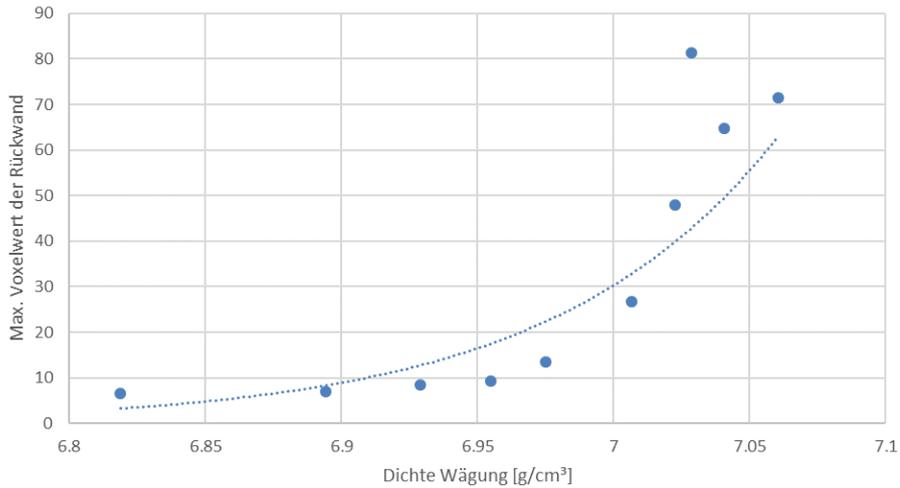


Bild 68 Vergleich zwischen lokale Dichte und lokaler Rückwandabschätzung am Versuchskörper TK39455-2

8.2 Computer-Tomographie

Die vom Projektpartner BMB erzeugten CT-Scans der Flachproben, siehe Seite 53, und Rundproben, dienen als Referenzgröße, da die CT-Scans eine deutlich höhere Auflösung besitzen als die anderen zfP-Verfahren (CT: 77 μm , UT: 2000 μm). Im Gegensatz zu den anderen zfP-Verfahren, die an dem Gussversuchskörper angewendet werden, wird die Computer Tomographie nur an den entnommenen Proben angewandt.

Das Ergebnis der CT-Scans ist eine Verteilung der Abschwächung der Röntgenstrahlung in der Probe. Wie bereits in Kapitel 7.2 dargestellt ist, kann eine Abhängigkeit der Schwingfestigkeit von der Dichte beobachtet werden. Daher werden die Werte der Voxel (3-dimensionaler Pixel) im ersten Schritt in eine Dichte umgerechnet. Dies wird am Beispiel der Flachprobe S11-2-1 gezeigt. Es wird ein linearer Zusammenhang zwischen Voxelwert und Dichte angenommen. Zur Umrechnung sind daher zwei Stützstellen ausreichend. Diese ergeben sich aus dem Histogramm, Bild 69a.

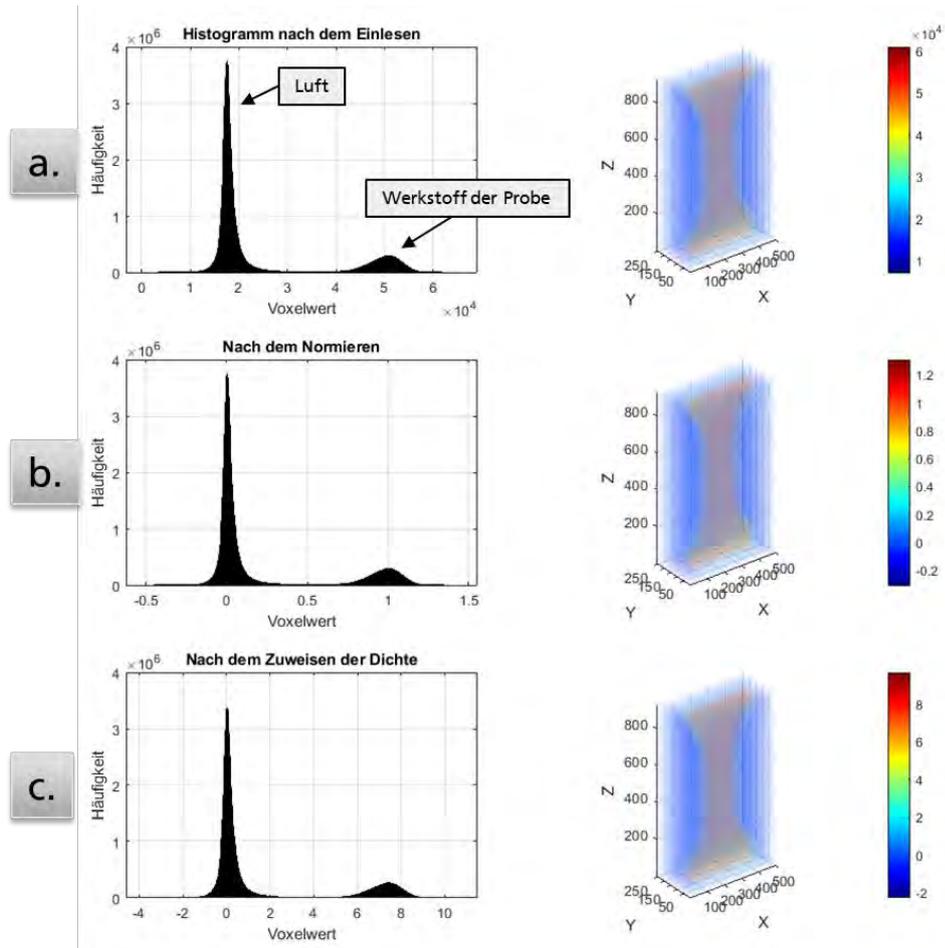


Bild 69 Schritte zur Aufbereitung der CT-Daten

Das Histogramm zeigt die Häufigkeit der Voxelwerte an, die im CT-Scan vorhanden sind. Die höchste Häufigkeit besitzt die Luft (das erste Maxima), das zweite Maxima entspricht Eisen in Verbindung mit den Zusatzstoffen (z.B.: Kohlenstoff, Silizium, Mangan, usw.). Die unterschiedlichen Proben weisen die Maxima an unterschiedlichen Voxelwerten auf. Das bedeutet, dass eine Dichte von Luft in den einzelnen CT-Scans einen unterschiedlichen Voxelwert besitzt. Diese Unterschiede sind auf die Software zur Bildgebung des 3D-Scanners zurückzuführen. Um jedoch eine Vergleichbarkeit aller CT-Scans untereinander zu gewährleisten, müssen die Voxelwerte aller Proben angepasst werden. Dazu wird der Bereich zwischen den beiden Maxima auf 1 Normiert, Bild 69b, und anschließend mit der Dichte des Gusswerkstoffs multipliziert, Bild 69c. Dadurch wird die Dichte von Luft auf null gesetzt, was aber aufgrund der im Vergleich zu den metallischen Elementen vernachlässigbar kleinen Dichte zu einem vernachlässigbaren Fehler führt. Bei der Zuordnung einer Dichte für den Gusswerkstoff ist zu beachten, dass ein Voxel eine Kantenlänge von 77 μm hat. Aus metallographischen Untersuchungen wird ersichtlich, dass die Graphitausscheidungen deutlich größer als die Kantenlänge des Voxels sein können.

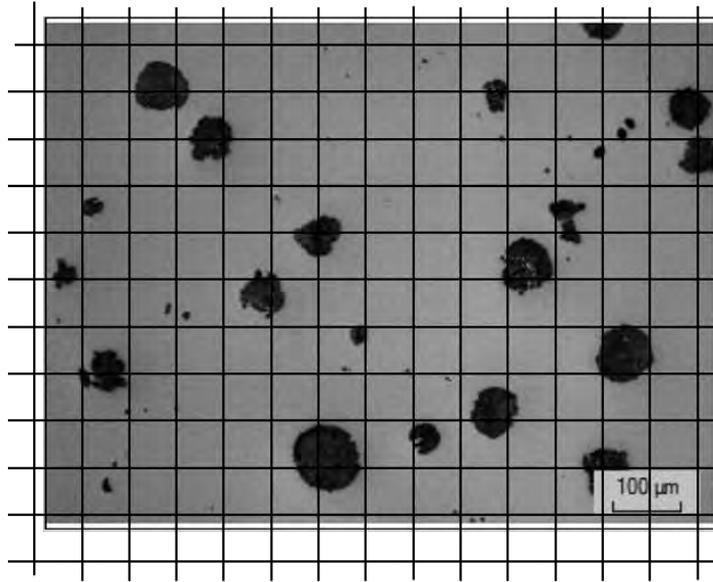


Bild 70 Schliffbild mit Gitter zur Darstellung der Voxelgröße (Probe S7-1-10)

Es wird daher angenommen, dass der Graphit nicht homogen innerhalb der Voxel verteilt ist, sondern, dass viele Voxel deutlich weniger als die etwa 10% Graphit (Bild 61) beinhalten. Die rechnerische Dichte der Voxel liegt damit oberhalb der von Gusseisen ($7,2 \text{ g/cm}^3$). Da jedoch Silizium innerhalb der Fe-Elemente gelöst ist und somit die Elementarzelle des Eisens vergrößert wird, wird eine Dichte zwischen $7,0$ und $7,8 \text{ g/cm}^3$ erwartet. Bei Verwendung einer Dichte von $7,4 \text{ g/cm}^3$ für die zweite Stützstelle wird ein Dichteniveau erreicht, das teilweise mit der aus der Wägung berechneten Dichte vergleichbar ist, Bild 71. Bei dem Vergleich der Dichten ist zu beachten, dass die mittels Wägung ermittelte Dichte auf Basis des rechnerischen Volumens von 3 cm^3 basiert. Bereits eine Abweichung der Kantenlänge des Volumens um $1/10 \text{ mm}$ kann zu einer Abweichung von ca. $0,1 \text{ g/cm}^3$ führen. Dies Messunsicherheit kann zu einer größeren Abweichung zwischen den Dichtewerten führen.

In Bild 72 ist der CT-Scan der Probe S11-2-1 und die reale Probe nach dem Schwingfestigkeitsversuch beispielhaft dargestellt. Dabei zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Anrissen, die im Bereich des Dross auf der Probe zu sehen sind und der Bereiche mit geringer Dichte im CT-Scan.

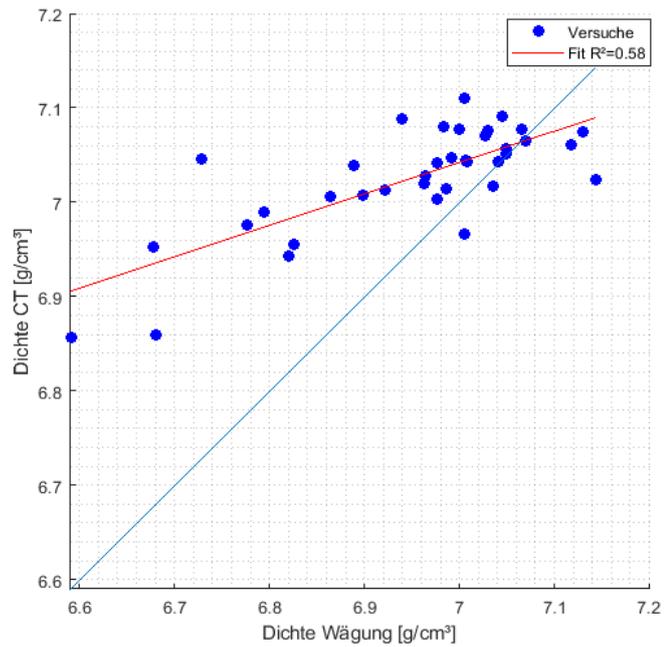


Bild 71 Vergleich der mit CT-Scan und der mittels Wägung ermittelten Dichten

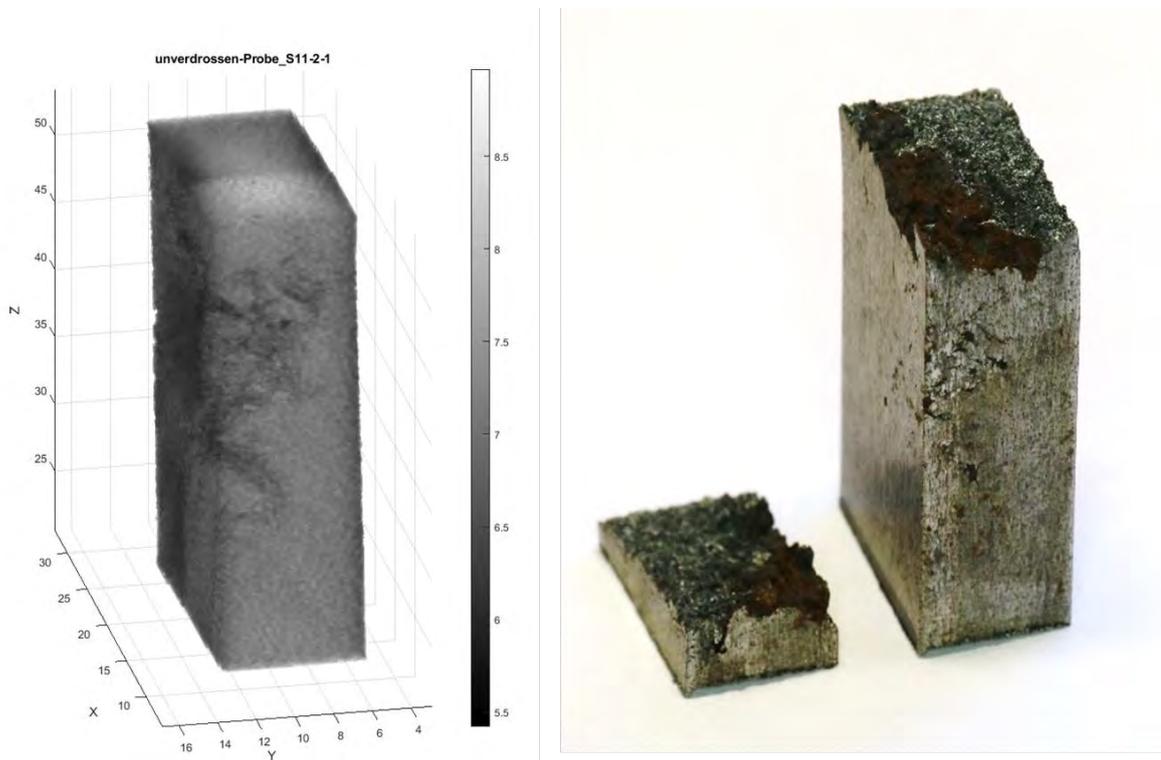


Bild 72 Beispielhafter Vergleich zwischen einem CT-Scan und dem realen Prüfbereich einer Probe

In Bild 71 ist zu beobachten, dass bei geringen Dichten die Abweichung zwischen Dichte aus der Wägung und Dichte aus dem CT zunimmt. Eine mögliche Ursache dafür kann in der Strahlauhfärtungskorrektur des CT-Scanners liegen. Bei den CT-Scans ist zu beobachten, dass trotz der verwendeten Algorithmen zur Strahlauhfärtungskorrektur sich die Voxelwerte vom Rand hin ins Innere der Probe

erhöhen, Bild 73. Dies führt dazu, dass in der Probenmitte höhere Dichtewerte ausgegeben werden als am Rand der Probe. Die in Bild 73 dargestellte Probe ist aus Reineisen, bei dieser werden keine unterschiedlichen lokalen Dichtewerte erwartet. Dennoch zeigt diese im CT-Scan Dichteunterschiede von etwa 1 g/cm^3 über die Probenbreite. Eine präzise Dichtermittlung scheint daher auf Basis der CT-Scans nicht möglich.

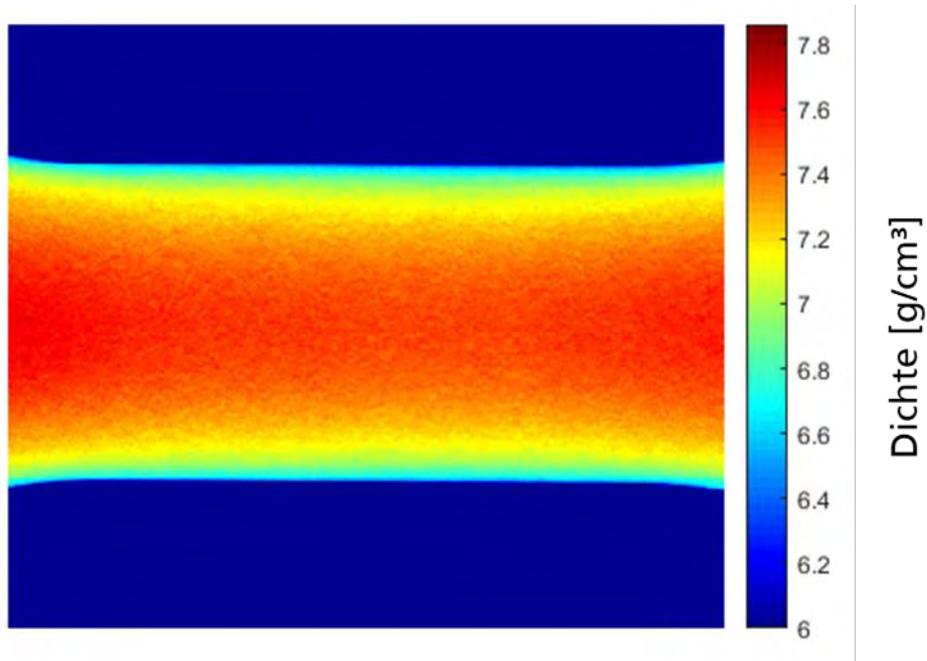


Bild 73 Dichteverteilung im Prüfbereich der Reineisenprobe

8.3 Ermittlung der Tiefenausdehnung des Drosses

Zur Ermittlung der Ausdehnung des Drosses in die Bauteiltiefe werden Rundstäbe aus dem geviertelten Versuchskörper MAN 5261600 entnommen und mittels CT-Scan untersucht. Die Probenentnahmepositionen und die Viertel des Versuchskörpers sind in Bild 74 dargestellt.

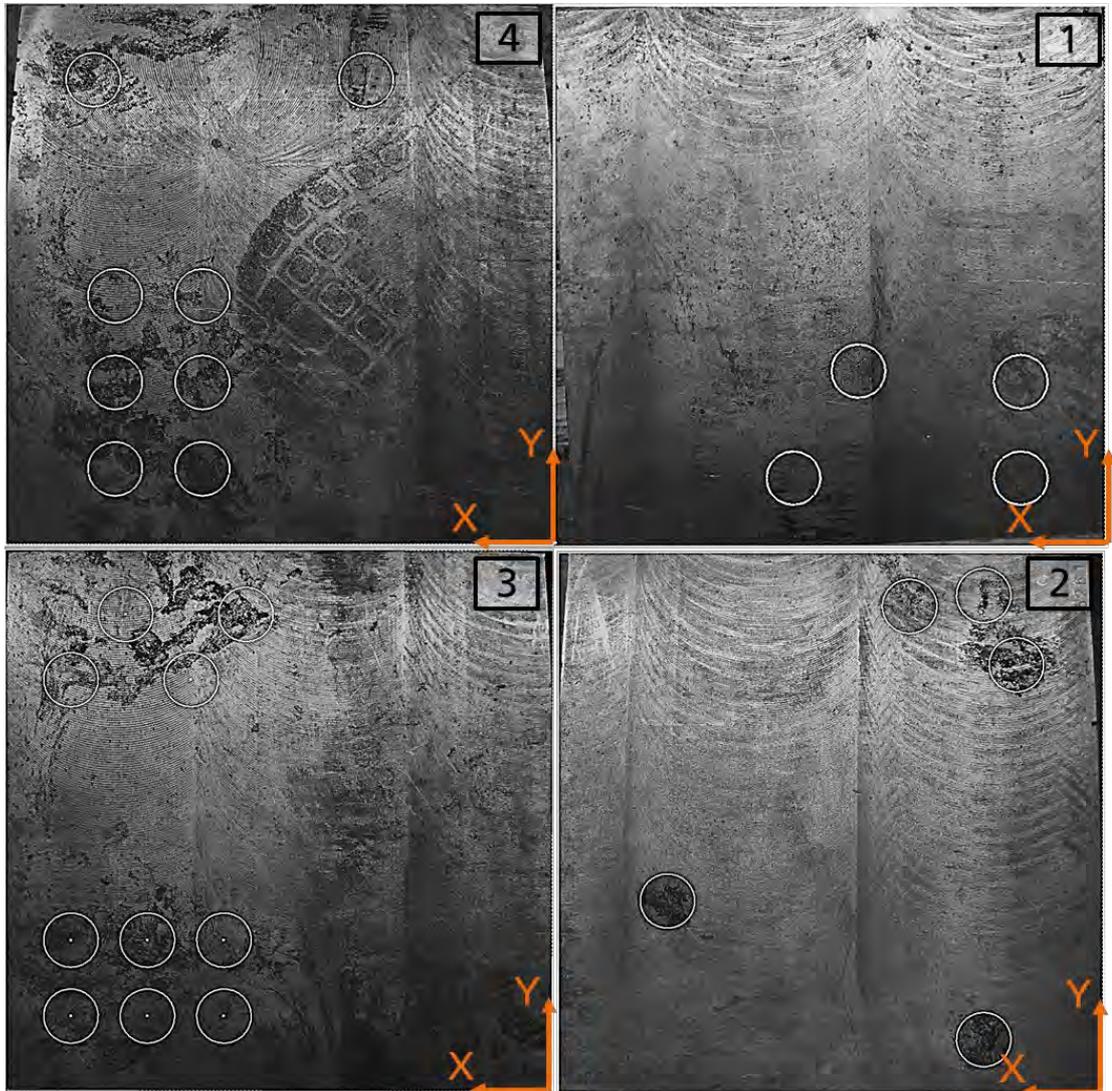


Bild 74 Entnahmepositionen der Rundstäbe

Die Rundstäbe haben eine Länge von etwa $l = 67$ mm und einen Durchmesser von $d = 25$ mm. In Bild 75 ist der CT-Scan der Probe V1-4 beispielhaft dargestellt. Aufgrund der Markierungsnut auf der Drossseite ist die Ermittlung der Drosstiefe nicht immer zweifelfrei möglich.

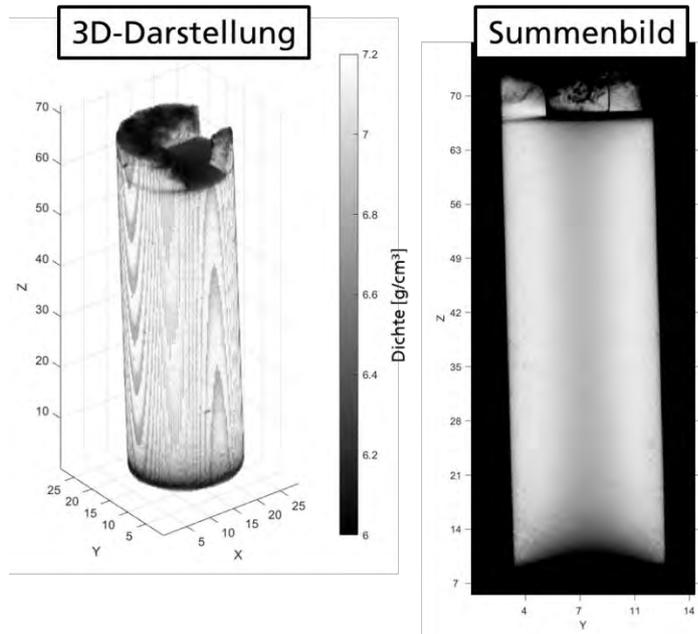


Bild 75 CT-Scan eines Rundstabes zur Ermittlung der Tiefenausdehnung des Drosses

Die UT-Messungen zu den geviertelten Blöcken, werden mit den CT-Scans verglichen. Bild 76 zeigt das Ergebnis der UT-Messung mit den Positionen der Rundstäbe. In den Übersichtsdarstellungen auf der linken Seite ist zur besseren Übersichtlichkeit das Grundrauschen ausgeblendet (alle Voxel mit einer Bildschirmhöhe unter 10%).

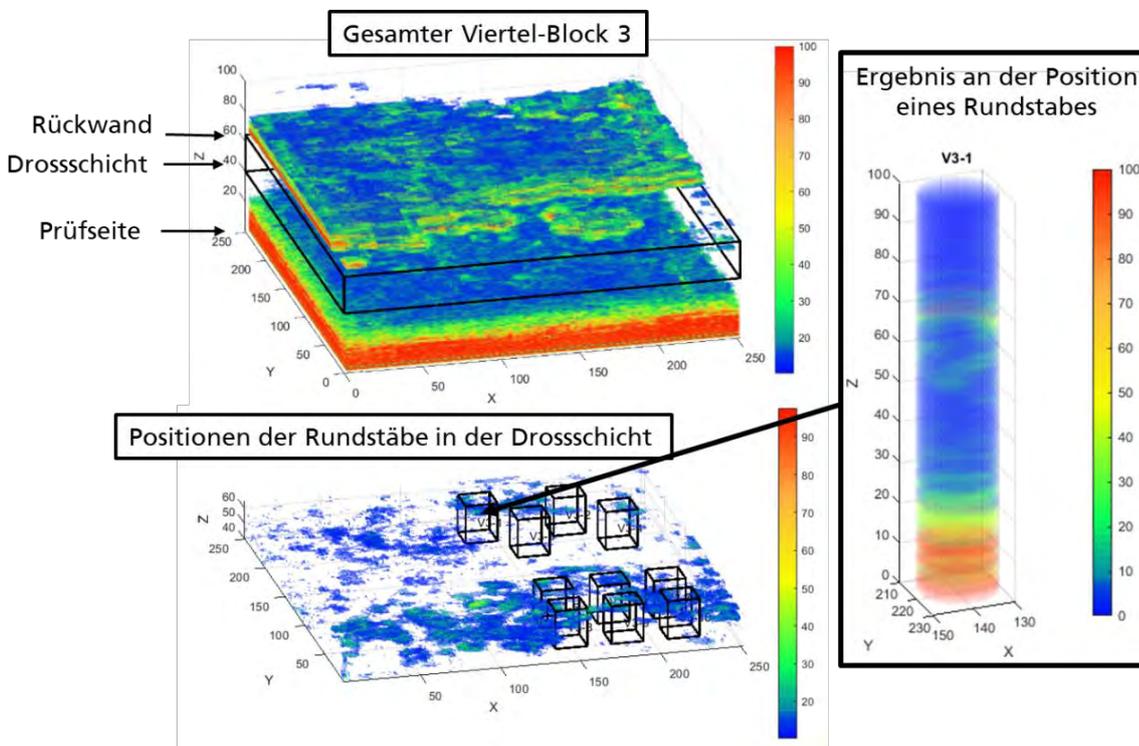


Bild 76 Probenpositionen und UT-Messungen (3. Viertel)

In Bild 77 sind beispielhaft 3 UT-Messungen und CT-Scans gegenübergestellt. In dem Bereich von 0 – 38 mm ist bei allen Proben aufgrund des Impedanzsprunges beim Eintritt der Schallwellen in das Bauteil eine starke Störung zu sehen. Bei der Probe V3-2 ist kein Dross zu erkennen, was mit dem CT-Scan übereinstimmt. Die Rückwand ist bei der Probe V3-2 in einer Tiefe von etwa 65 mm gut zu erkennen. Bei den Proben V3-7 und V3-10 hingegen ist das Rückwandecho nicht zu erkennen. Dies liegt daran, dass der Dross die Rückwand stark abschirmt. Bei der Probe V3-10 liegt der Dross in einer Tiefe von etwa 48 - 66 mm, was gut mit dem CT-Scan übereinstimmt. Bei der Probe V3-7 kann anhand der UT-Messung nicht zweifelsfrei die Tiefenausdehnung des Drosses ermittelt werden, da Dross teilweise in dem Störfeld des Schallwelleneintritts liegt.

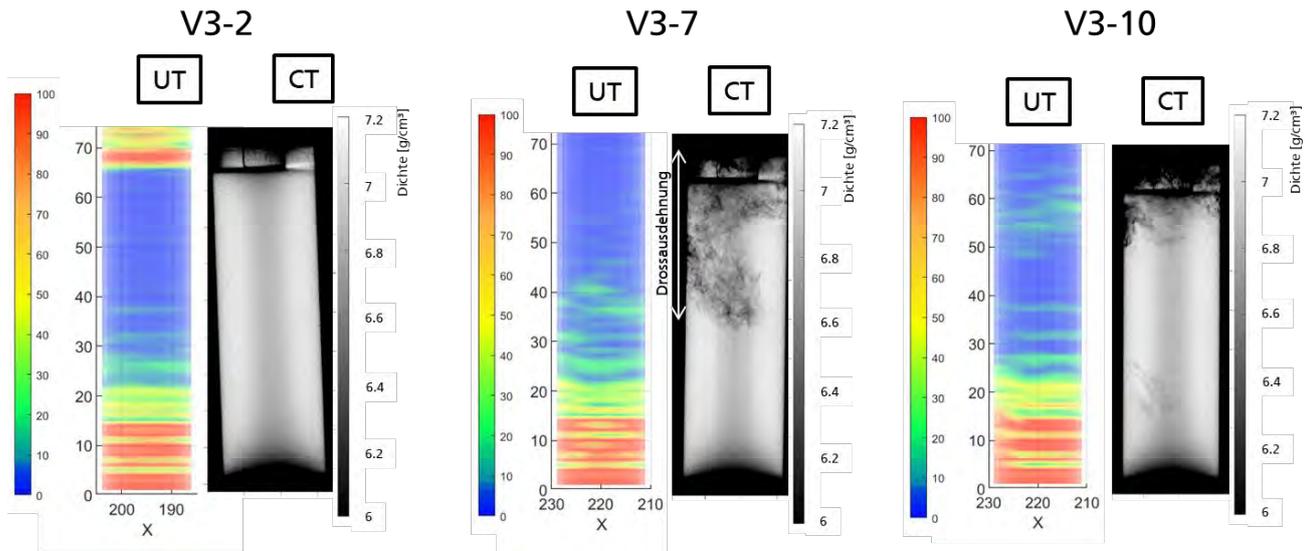


Bild 77 Tiefenausdehnung des Drosses, UT-Messung vs. CT-Scan

Ein Vergleich aller Proben ist in Bild 78 dargestellt. Dies zeigt überwiegend eine gute Übereinstimmung der Tiefenausdehnung des Drosses zwischen CT-Scan und UT-Messung. Die Abweichungen sind überwiegend kleiner als $d_{abw} = 4$ mm.

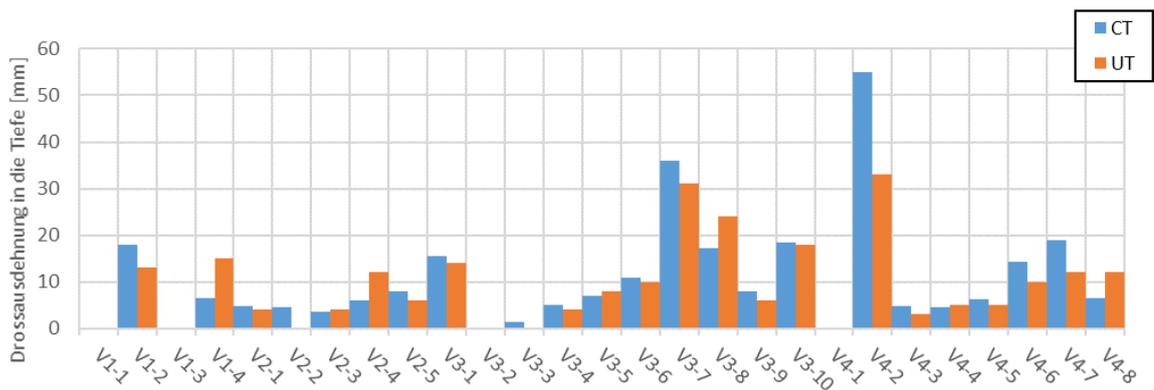


Bild 78 Tiefenausdehnung des Drosses, UT-Messung vs. CT-Scan aller Proben

9 Bauteilbeurteilungskonzept

Im Rahmen des Projekts wird ein Bemessungskonzept zur Lebensdauerabschätzung drossbehafteter Bauteile erarbeitet. Das Konzept basiert auf dem Dehnungskonzept und verwendet zur Beschreibung der lokalen Beanspruchbarkeit des Drosses dichteabhängige synthetische Dehnungswöhlerlinien. Da der Dross eine geringere Steifigkeit als der Grundwerkstoff besitzt wird die lokale Beanspruchung mittels numerischer Simulationen unter Berücksichtigung der Steifigkeit des Drosses ermittelt.

9.1 Numerische Untersuchungen zum Bemessungskonzept

Die Bewertung drossbehafteter Bauteile setzt die Kenntnis der versagensrelevanten Spannungen und Dehnungen in Folge der Störung des ansonsten als homogen angenommenen Gefüges durch den Dross voraus. Die Gestalt und Ausprägung des Drosses hat dabei entscheidende Auswirkungen auf das Spannungsbild, insbesondere im Bereich des Übergangs von Grundwerkstoff zu Dross. Aufgrund der stark unterschiedlichen und komplexen Geometrie von Dross ist eine analytische Beschreibung des Spannungsfeldes infolge des Drosses nicht möglich. Daher bietet sich die Modellierung von Dross in der Finite-Elemente-Methode an. Hierbei werden folgende **Annahmen** getroffen:

1. Es besteht eine diskrete Abgrenzung zwischen Grundwerkstoff und Dross
 - a. Es wird nur zwischen Grundwerkstoff und Dross unterschieden. Eine feinere Abstufung ist nicht vorhanden.
 - b. Eine gradierte und stückweise stetige Modellierung („Zwiebelschalenmodell“) beschreibt einen weiterhin diskreten (nicht kontinuierlichen), jedoch sanfteren Übergang von Grundwerkstoff zum Drosskern.
2. Die räumliche Abgrenzung ist bekannt.
3. Dross kann als Volumenkörper beschrieben werden.
4. Aufgrund der verringerten Dichte von Dross im Vergleich zum Grundwerkstoff ändert sich die Steifigkeit. Diese Änderung der Steifigkeit lässt sich über unterschiedliche E-Moduli darstellen.
 - a. Der E-Modul des Drosses ist bekannt oder kann abgeschätzt werden.
 - b. Der E-Modul-Verlauf von Grundwerkstoff zu Dross ist bekannt oder kann abgeschätzt werden.

Sowohl Ultraschalldaten als auch CT-Daten lassen vermuten, dass **Annahme 1** eine Vereinfachung ist, vgl. Abschnitte 5.1 und 5.3. Jedoch zeigt sich auch, dass der Abstand der Übergänge von reinem Grundwerkstoff zum Dross gering sind (wenige Millimeter). Auf Basis von Ultraschalldaten ist jedoch die exakte Position der Grenzfläche nicht bestimmbar, da das Grundrauschen im Scan eines Prüfkörpers veränderlich ist. Die Bestimmung einer Anzeige einer Fehlstelle im Ultraschall ist direkt abhängig vom Grundrauschen. Dadurch ergibt sich immer eine gewisse Spanne, in der die Grenze zwischen Grundwerkstoff und Dross liegen kann. In Bezug auf die Gesamtsteifigkeit eines Großgussbauteils können diese Übergänge vernachlässigt werden. Eine Möglichkeit einer Annäherung an die realen Begebenheiten bietet das in Punkt 1b beschriebene „Zwiebelschalenmodell“.

Im Zuge der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass **Annahme 2** mit der zur Verfügung stehenden Prüftechnik nicht erfassbar ist. Insbesondere mit der Ultraschalltechnik, vgl. vorangegangenen Absatz. Um eine Prüfgeschwindigkeit zu erreichen, die den industriellen Einsatz ermöglicht, wurden die Bauteile mit einem Schussabstand von 2 mm mit Hilfe des mechanisierten Ultraschalls untersucht. Durch Ablenkungen der Schallwellen innerhalb des Prüfkörpers wird die Genauigkeit der Ergebnisse weiter reduziert. D.h., bei der Prüfung mit Hilfe eines senkrecht eingeschallten Rasters mit definierter Kantenlänge, z.B. 2 mm mal 2 mm, wird der Dross nicht mit exakt dieser Rasterauflösung erfasst. Die Prüfung mittels SPA Verfahren kann diese Probleme potentiell zwar reduzieren, eine Auflösung zur exakten Bestimmung des Drosses ist jedoch auch hier verfahrensbedingt nicht möglich. Ein weiteres Problem stellen Abschattungen dar. Am Versuchskörper ergibt sich bei der Einstrahlung ein bis zu 20 mm tiefes Einstrahlecho, in dessen Bereich mit der Messung keine Aussagen zu Fehlstellen getroffen werden können, vgl. ab Seite 74. Bei einer Einstrahlung von der Drossseite liegt jedoch genau in diesem Bereich zumindest ein Teil des Drosses. Bei der Einstrahlung von der Drossgegenseite ist der Dross zwar detektierbar, der Impedanzsprung im Übergangsbereich der unterschiedlichen Dichten des Drosses schirmt jedoch die dahinterliegenden Bereiche bis zur Rückwand ab, Bild 77. Somit ist eine Oberfläche des Drosses detektierbar, eine dreidimensionale Ausprägung des Drosses jedoch nicht. Im Falle von realen Bauteilen mit zueinander abgewinkelten gekrümmten Flächen fallen diese Probleme noch stärker ins Gewicht.

Aufgrund der für die Ultraschallprüfung genannten Einschränkungen kann **Annahme 3** nur angenähert werden, indem davon ausgegangen wird, dass sich der Dross durchgängig von der detektierten Oberfläche bis zur Rückwand erstreckt.

CT Untersuchungen können nur auf Probenebene Aufschluss über die Gestalt des Drosses geben, da Großgussbauteile nicht mit Hilfe dieser Methode durchstrahlt werden können. Die Auswertung der untersuchten Proben zeigt den Dross nicht als Volumenkörper, sondern als unregelmäßig angeordnete flächige Shell Elemente, Bild 79. Hierbei erfolgt die Trennung von Grundwerkstoff und Drosswerkstoff auf Basis eines Algorithmus, der automatisiert den Grenzwert ermittelt, der in einer kommerziellen Software hinterlegt ist.

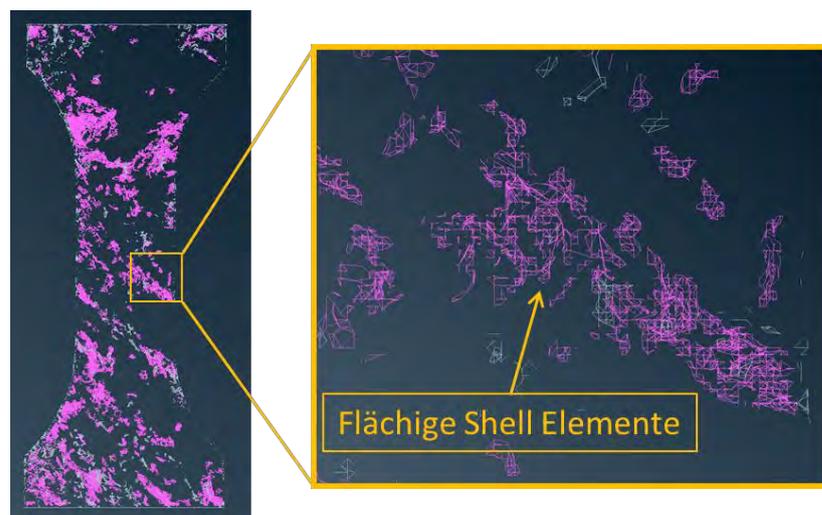


Bild 79 CT-Aufnahme der Probe Siempelkamp S4-1-6, Ausgabe als stl-Datei, Dross in hell lila als flächige Shell Elemente

Annahme 4 setzt voraus, dass für eine Zuweisung unterschiedlicher Dichten, respektive E-Moduli, in der FE-Simulation Volumen notwendig sind. Flächige Shell Elemente würden zu Singularitäten aufgrund des extremen Steifigkeitssprungs führen. Eine weitere Möglichkeit könnte eine Einhüllende um bestimmte Drossgebiete darstellen. Aufgrund der durchweg variablen Ausprägung einzelner Bereiche des Drosses und der eher flachen Gestalt könnte hier zwar ein Drossgebiet abgeleitet werden, dies wäre letztendlich jedoch nicht repräsentativ. Zudem liegen alle Proben, an denen Dross festgestellt wurde in Blöcken mit global flächig ausgeprägten Drossfeldern, sodass die in den Proben vorhandenen Drossanzeigen immer nur einen Ausschnitt darstellen können.

9.1.1 Synthetischer Dross

Um eine Aussage über das Verhalten von Dross ähnlichen Strukturen mit einer geringen Dichte, respektive einem anderen E-Modul, im Vergleich zum nicht entarteten Grundwerkstoff machen zu können, wird daher ein synthetischer Dross erzeugt, Bild 80. Hierzu wird mit Hilfe einer Matlab-Routine ein Ellipsoid durch die Überlagerung mit mehreren Sinusfunktionen unterschiedlicher Amplituden und Periodenlängen deformiert. Durch Vorgabe der Parameter ist eine Reproduzierbarkeit gegeben. Der gezeigte synthetische Dross ist charakterisiert durch ein Verhältnis der senkrecht zur stehenden längsten Ausdehnung von 1 zu 0,8 und 1 zu 0,25.

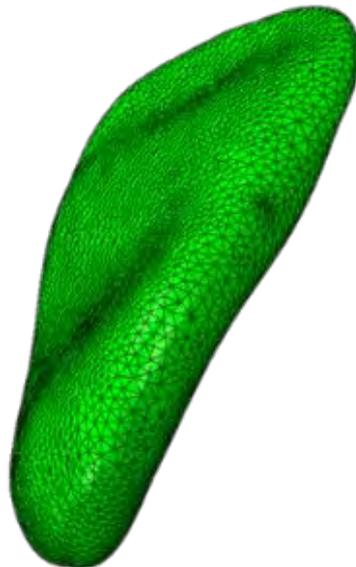


Bild 80 Synthetisch erstellter Dross für die Berechnung in der Finite-Elemente Methode

Die Belastungssimulation beinhaltet den in einem hinreichend großen Prüfvolumen platzierten Dross, sodass die Ränder des Prüfvolumens als unendlich weit entfernt angesehen werden können und keinen Einfluss auf das Spannungsfeld um den Dross haben. Das Prüfvolumen wird mit einer nach außen wirkenden (Zug-)Nennspannung auf einer Seite belastet, während die gegenüberliegende Seite gelagert wird, Bild 81.

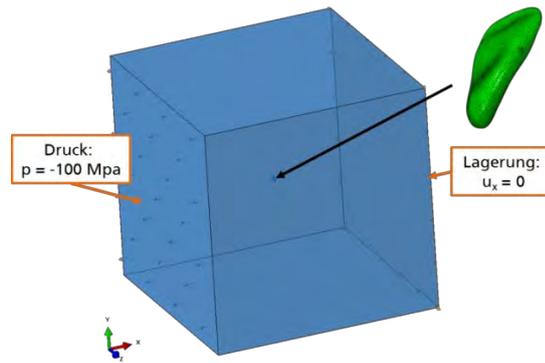


Bild 81 Dross innerhalb eines Prüfvolumens mit Randbedingungen

Da die Dichte für Dross nicht pauschal angegeben werden kann und somit eine Zuordnung zu einem bestimmten E-Modul nicht durchgeführt werden kann, wird im Vergleich zum fix gesetzten E-Modul des Grundwerkstoffes im Prüfvolumen der E-Modul des Drosses variiert. Der geringste E-Modul $E_1 = 23$ GPa stellt dabei eine sehr geringe Dichte dar. Der E-Modul $E_2 = 110$ GPa bildet eine wesentlich größere Dichte ab, die sich jedoch entscheidend von der Dichte des Grundwerkstoffes unterscheidet. Der E-Modul $E_3 = 150$ GPa liegt nur noch 20 GPa unterhalb des E-Moduls $E_G = 170$ GPa des Grundwerkstoffes. Hierbei wird von ähnlichen Dichten zwischen Grundwerkstoff und Dross ausgegangen. Eine Übersicht ist in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12 Verwendete E-Moduln im Drosswerkstoff und im Grundwerkstoff

Drosswerkstoff [GPa]		
$E_1 = 23$	$E_2 = 110$	$E_3 = 150$
Grundwerkstoff [GPa]		
$E_G = 170$		

Die Berechnungen werden mit einem linear elastischen Berechnungsansatz durchgeführt.

In Folge des größten Unterschiedes in der Dichte bei Variante 1 ($E_1 = 23$ GPa) bzw. in der Steifigkeit und somit im E-Modul stellt sich an der Grenzfläche zwischen Grundwerkstoff und Dross die größte Spannungsüberhöhung ein. Da aufgrund des sehr geringen E-Moduls des Drosses von diesem keine hohen Lasten aufgenommen werden können, wird die maximale Hauptspannung im Dross im Vergleich zum auf das Prüfvolumen angelegte 100 MPa Feld auf $\sigma_{I,Dross,23GPa} = 62$ MPa reduziert. Der Grundwerkstoff hingegen wird an der Grenzfläche zum Dross mit $\sigma_{I,GW} = 390$ MPa deutlich höher beansprucht. Es kommt hier zu einer Spannungsverteilung, Bild 82.

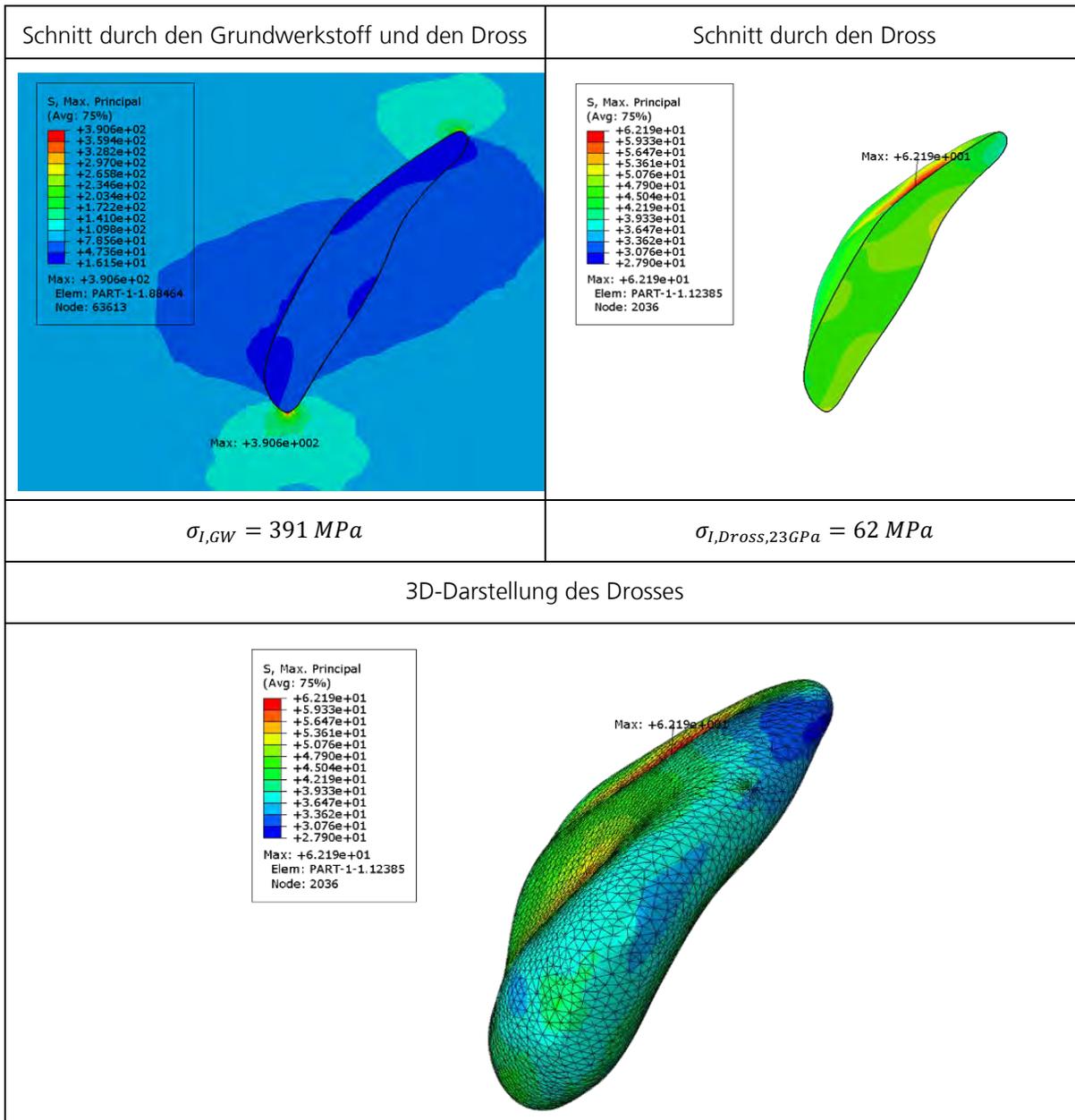


Bild 82 Spannungsverteilung an der Grenzfläche zwischen Grundwerkstoff und Dross mit $E_{Dross} = 23 \text{ GPa}$

Durch eine Erhöhung des E-Moduls im Dross auf $E_{Dross} = 110 \text{ GPa}$ wird die maximale Spannung im Grundwerkstoff im Vergleich zum vorher beschriebenen Fall deutlich auf $\sigma_{I,GW} = 148 \text{ MPa}$ gesenkt, Bild 83. Die Wirkung der durch den Steifigkeitsunterschied induzierten Werkstoffkerbe nimmt ab.

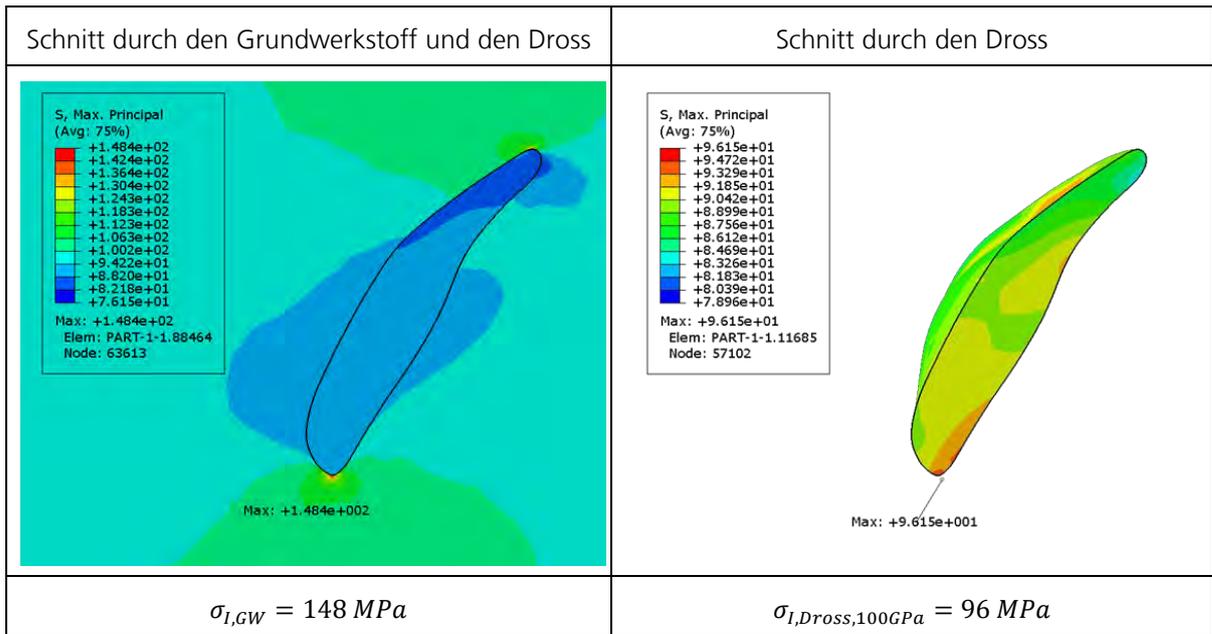


Bild 83 Spannungsverteilung an der Grenzfläche zwischen Grundwerkstoff und Dross mit $E_{Dross} = 110 \text{ GPa}$

Durch Änderung des Dross E-Moduls auf $E_{Dross} = 150 \text{ GPa}$ und somit auf 88 % des Grundwerkstoff E-Modul entspricht die Maximalspannung im Dross in etwa der Nennspannung, die Spannungsüberhöhung im Grundwertstoff beträgt mit einer Maximalspannung von $\sigma_{I,GW} = 113 \text{ MPa}$ jedoch noch 13 %, Bild 84

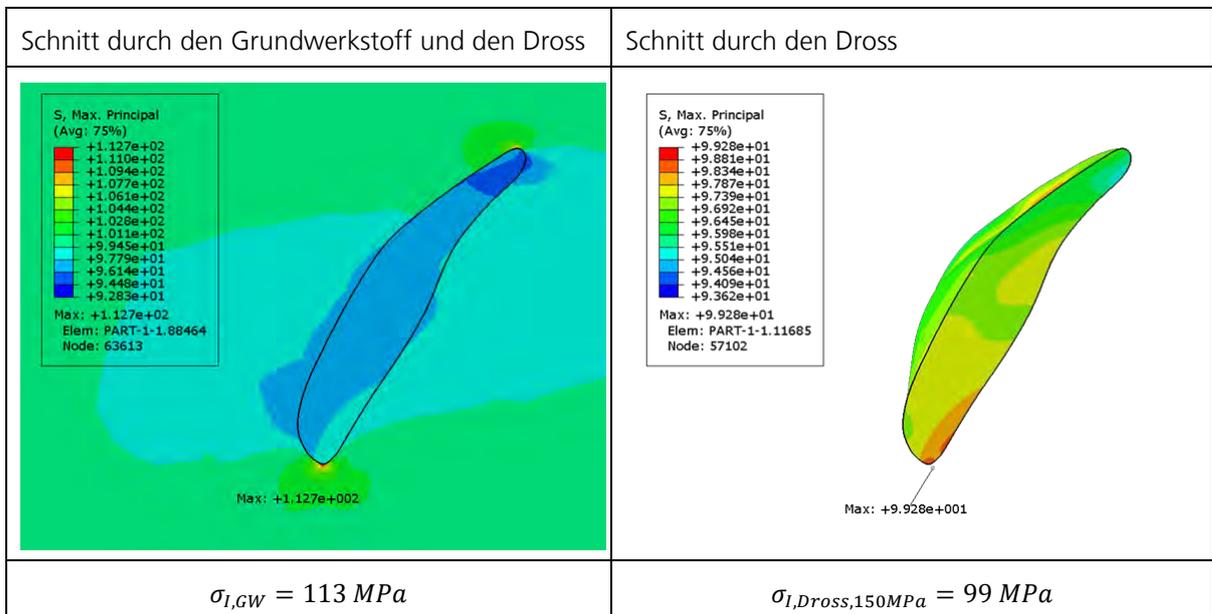


Bild 84 Spannungsverteilung an der Grenzfläche zwischen Grundwerkstoff und Dross mit $E_{Dross} = 150 \text{ GPa}$

Um die Abbildung eines Drosses mit einem weniger großen Sprung der E-Moduln abzubilden und so eine möglicherweise realitätsnähere Modellierung aufzuzeigen, wird der Dross in einen Bereich der Drossschale und einen Bereich des Drosskerns aufgeteilt („Zwiebelschalen-Modell“), Bild 85

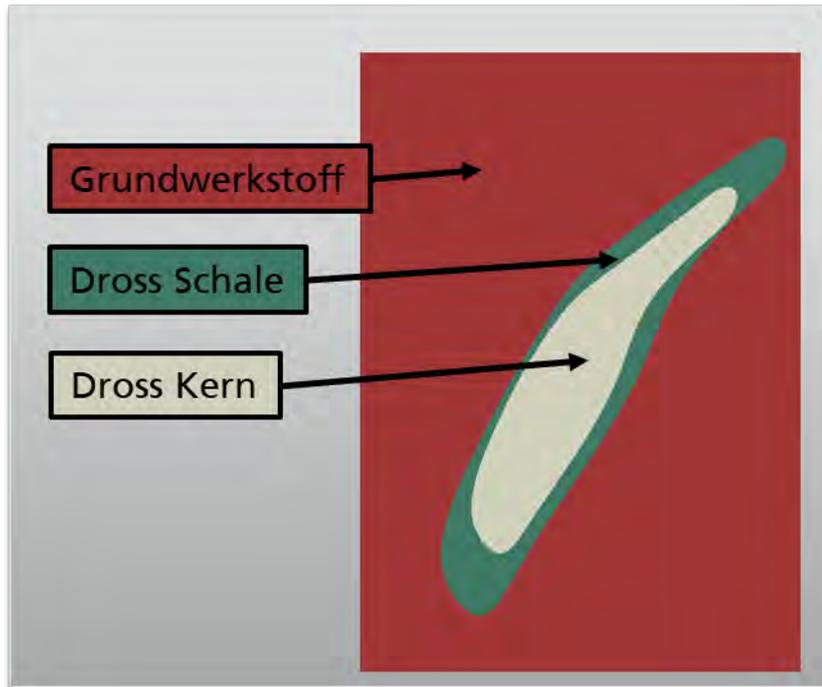


Bild 85 Aufteilung in des Drosses in drei Bereiche

Die Auswertung der maximalen Spannungen an den Grenzflächen der drei Komponenten, Bild 86, ergibt die höchste Beanspruchung von $\sigma_{I,Dross,150GPa} = 131 MPa$ in der Drossschale, obwohl ihr E-Modul mit $E_{Drossschale} = 150 GPa$ nur leicht unter dem E-Modul des Grundwerkstoffs mit $E_{Grundwerkstoff} = 170 GPa$ liegt und dies nur zu einer Erhöhung auf 113 MPa geführt hat, vgl. Bild 84.

Schnitt durch den Dross (Schale und Kern)	Schnitt durch die Schale	Schnitt durch den Kern
<p>S, Max. Principal (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +1.306e+02 +1.263e+02 +1.220e+02 +1.177e+02 +1.134e+02 +1.091e+02 +1.048e+02 +1.005e+02 +9.618e+01 +9.188e+01 +8.757e+01 +8.326e+01 +7.895e+01 <p>Max: +1.306e+02 Elem: PART-3-1.107407 Node: 236974</p> <p>Max: +1.306e+002</p>	<p>S, Max. Principal (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +1.306e+02 +1.263e+02 +1.220e+02 +1.177e+02 +1.134e+02 +1.091e+02 +1.048e+02 +1.005e+02 +9.618e+01 +9.188e+01 +8.757e+01 +8.326e+01 +7.895e+01 <p>Max: +1.306e+02 Elem: PART-3-1.107407 Node: 236974</p> <p>Max: +1.306e+002</p>	<p>S, Max. Principal (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +9.635e+01 +9.509e+01 +9.383e+01 +9.256e+01 +9.130e+01 +9.004e+01 +8.877e+01 +8.751e+01 +8.625e+01 +8.499e+01 +8.372e+01 +8.246e+01 +8.120e+01 <p>Max: +9.635e+01 Elem: PART-3-1.176772 Node: 236978</p> <p>Max: +9.635e+001</p>
$\sigma_{I,GW} = 116 MPa$	$\sigma_{I,Dross,150GPa} = 131 MPa$	$\sigma_{I,Dross,110GPa} = 96 MPa$

Bild 86 Spannungsverteilung an der Grenzfläche zwischen Grundwerkstoff, Drossschale und Drosskern mit $E_{Drossschale} = 150 GPa$ und $E_{Drosskern} = 110 GPa$

Die Spannung entlang eines Pfades durch die drei Komponenten, beginnend im Grundwerkstoff, zeigt zum einen Spannungssprünge am Übergang von einer Materialqualität in die nächste, Bild 87.

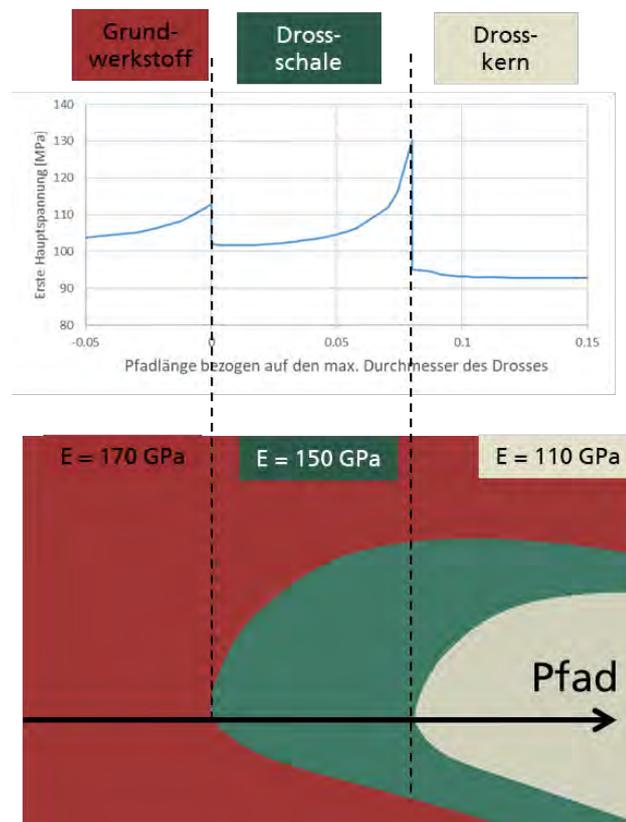


Bild 87 Spannungsverlauf entlang eines Pfades aus dem Grundwerkstoff über die Drossschale bis hin zum Drosskern

In Bild 88 ist der Spannungsverlauf entlang des Pfades von Grundwerkstoff in den Dross dargestellt. Im Vergleich zum Spannungssprung in Folge des direkten Übergangs von $E_{\text{Grundwerkstoff}} = 170 \text{ GPa}$ zu $E_{\text{Dross}} = 110 \text{ GPa}$ verteilen sich die Spannungsspitzen durch die Zwischenstufe $E_{\text{Drossschale}} = 150 \text{ GPa}$ auf beide Übergänge.

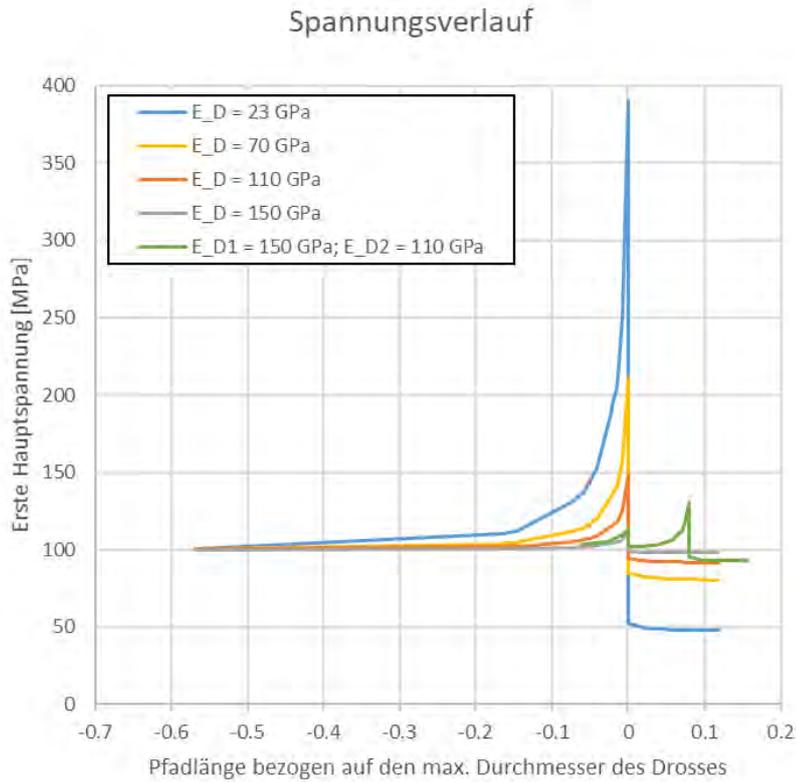


Bild 88 Spannungsüberhöhung am Übergang von Grundwerkstoff zum Dross und von Grundwerkstoff in die Drossschale weiter in den Drosskern (grün) in Folge unterschiedlicher Annahmen des E-Moduls des Dross bzw. der Drossschale und des Drosskerns

Je größer der Unterschied zwischen den E-Moduln im Grundwerkstoff und im Dross ist, desto höher ist die Beanspruchung im Grundwerkstoff und geringer die Beanspruchung im Dross, wenn Annahme 1a vorausgesetzt wird: „Es besteht eine diskrete Abgrenzung zwischen Grundwerkstoff und Dross. Es wird nur zwischen Grundwerkstoff und Dross unterschieden. Eine feinere Abstufung ist nicht vorhanden“, vgl. Tabelle 13.

Tabelle 13 Beanspruchung im Grundwerkstoff und Dross in Folge unterschiedlicher E-Moduln

E-Modul Grundwerkstoff [GPa]	E-Modul Dross [GPa]	Steifigkeitsunterschied [%]	Spannungsüberhöhung im Grundwerkstoff	Spannungsüberhöhung im Dross
170	23	86	3.9	0.62
170	70	59	2.1	0.88
170	110	35	1.48	0.96
170	150	12	1.13	0.99

Für die betrachteten Beispiele zum synthetischen Dross lässt sich ein nichtlinearer Verlauf ableiten, der die Spannungsüberhöhung in Folge des Steifigkeitsunterschieds beschreibt, Bild 89. Dabei kann das „Zwiebelschalen Modell“ in diesen Verlauf eingefügt werden.

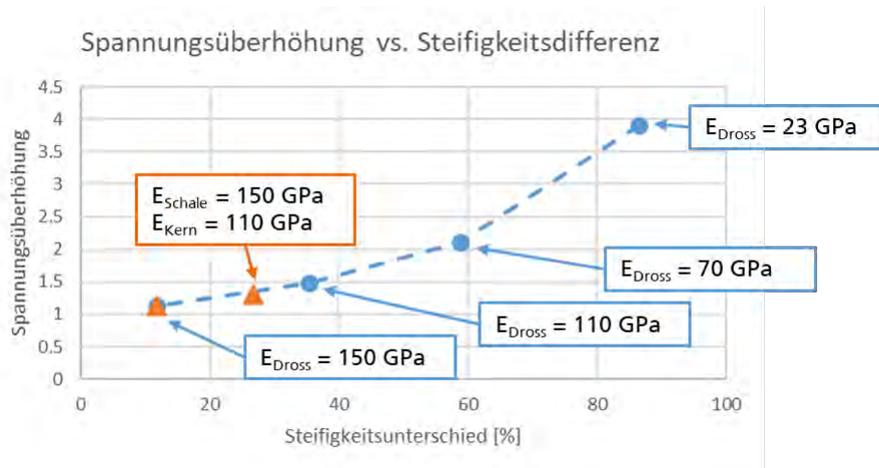


Bild 89 Spannungsüberhöhung im Dross in Folge des Steifigkeitsunterschieds zum Grundwerkstoff

Bei Kenntnis des Dichtegradientsen und somit des ungefähren Steifigkeitsgradienten der Spannungsüberhöhung wäre es dann möglich die Auswirkung des Drosses auf die Schwingfestigkeit exakter abzuschätzen. Hierzu müssten wie gezeigt Finite-Elemente Berechnungen des durch die zerstörungsfreie Prüfung detektierten Dross erstellt werden.

9.1.2 Numerische Untersuchung an einem Dross behafteten Bauteil

Eine weitere numerische Untersuchung hat zum Ziel, den Einfluss von Dross auf das Spannungsfeld in einer realen Bauteilgeometrie zu betrachten. Dabei wird ein aus Eisenguss bestehender Stempel einer Presse mit linear elastischem Werkstoffverhalten berechnet. Die Abmaße des gesamten Gussteils betragen ca. 4,5 m x 4,5 m x 2,1 m. An einer mit der zerstörungsfreien Prüfung detektierten Stelle am Rand einer Bohrung (Durchmesser ca. 40 cm) wird Dross mit unterschiedlichen E-Moduln modelliert, Bild 90.

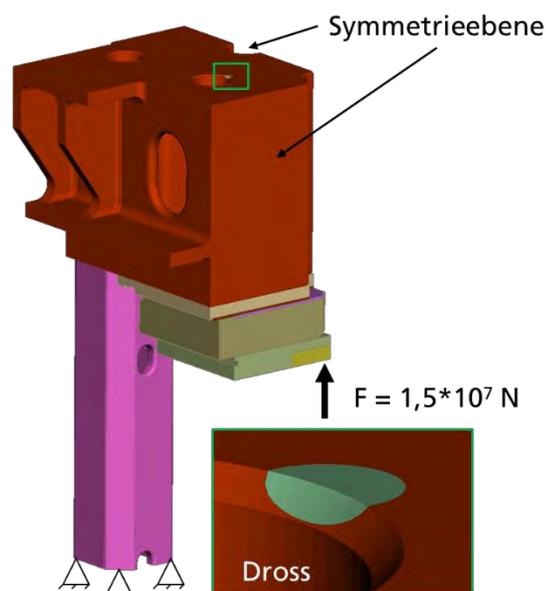


Bild 90 Viertelmodell einer Presse aus Gusseisen mit Drossfeld an detektierter Position

Die E-Modul sind Tabelle 12 zu entnehmen. Die geometrische Modellierung des Drosses wird durch einfach beschreibbare rotationssymmetrische Körper vorgenommen, die an ihren Enden unterschiedliche Radien und dadurch unterschiedlichen Formzahlen aufweisen, Bild 91. Körper V1 ist ein Ellipsoid, die Körper V2 und V3 sind zylindrisch mit unterschiedlich abgerundeten Endflächen.

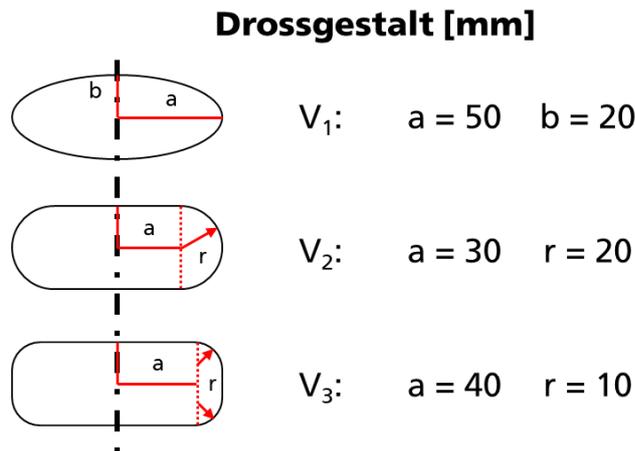


Bild 91 Vereinfachte Drossgestalten mit unterschiedlich scharfer Gestalt

In einer ersten Rechnung wird die Spannung im Bereich der Bohrung, an die später der Dross modelliert wird, bestimmt, Bild 92. Im gezeigten Ausschnitt liegt genau an der Stelle des detektierten Dross die höchste Spannung im Grundwerkstoff von $\sigma_{GW} = 47,2 \text{ MPa}$ vor.

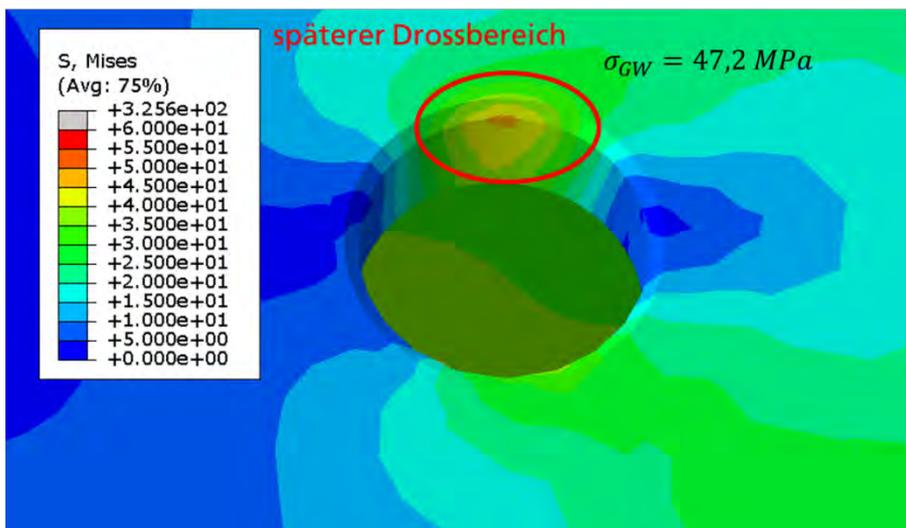


Bild 92 Spannungsfeld ohne eingebrachten Dross, Vergleichswert

Auch in dieser Berechnung mit Dross innerhalb eines Bauteils fällt auf, dass die Spannungen im Dross sehr gering sind, wenn der E-Modul ebenfalls als gering angenommen wird, Bild 93. Das Spannungsfeld verlagert sich und der Grundwerkstoff gleicht die fehlende Steifigkeit des Drosses durch höhere

Spannungsaufnahme aus, Bild 94. Dieser Effekt ist wie zu erwarten bei dem geringsten Dross E-Modul E_1 (23 MPa) am größten ausgeprägt, beim höchsten Dross E-Modul E_3 (150 MPa) am geringsten. Die Auswirkung der getesteten Drossgestalt auf die Maximalspannungen ist allgemein als gering anzusehen.

Die Kombinationen $E_1 - V_1$, $E_1 - V_2$ und $E_1 - V_3$ zeigen im Drossbereich das erwartete Verhalten. Die Drossgestalt V_1 des Ellipsoides mit der geringsten Kerbwirkung zeigt die geringste Spannungsüberhöhung. Drossgestalt V_3 eine leicht höhere Überhöhung als die mit milderen Radien abgerundete Drossform V_2 .

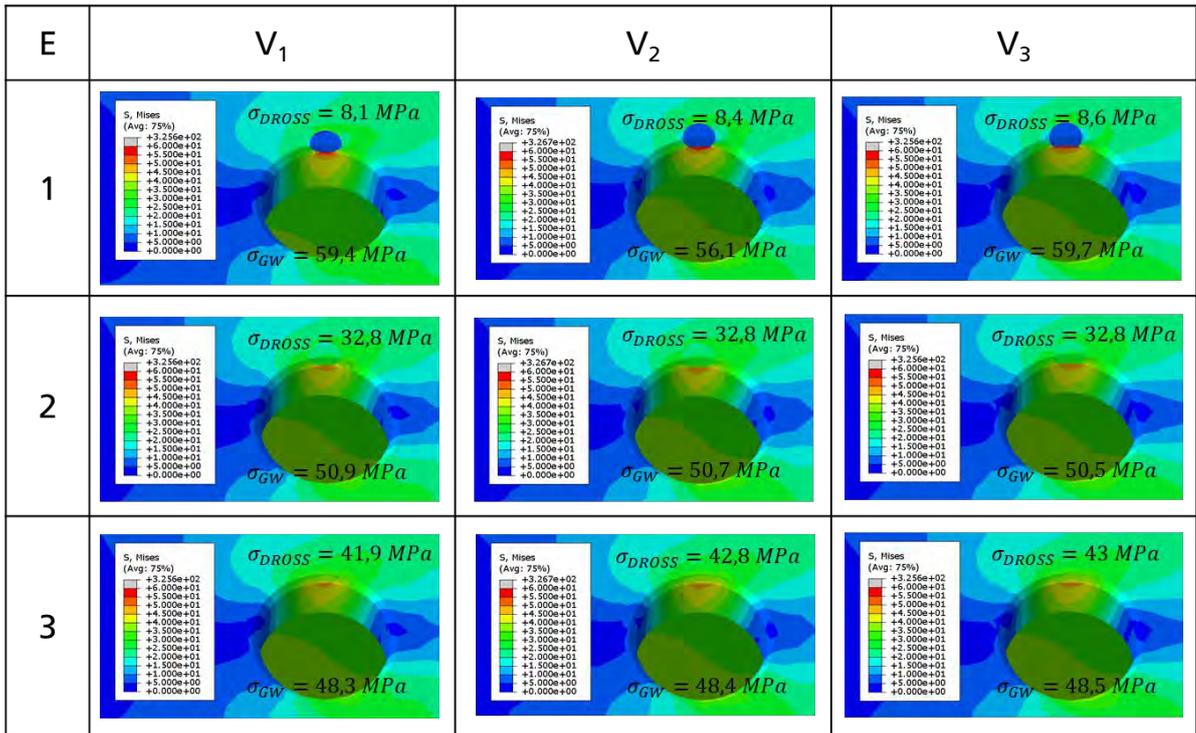


Bild 93 Spannungsfelder durch Kombination unterschiedlicher Drossformen und E-Moduli, Darstellung der Spannungsspitzenwerte

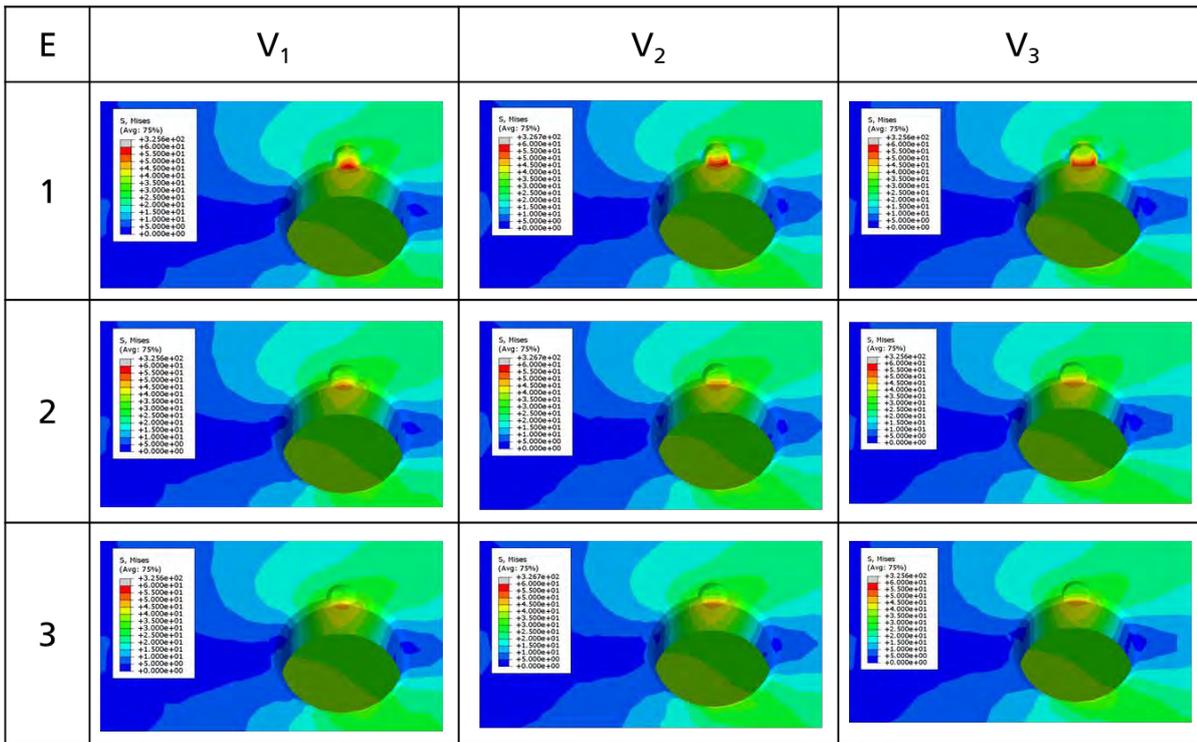


Bild 94 Spannungsfelder durch Kombination unterschiedlicher Drossformen und E-Moduli, Spannungen im Grundwerkstoff, ausgeblendeter Dross.

Insgesamt ergibt sich auch in dieser Untersuchung das Bild, dass im Dross durch dessen geringen E-Modul im Vergleich zum Grundwerkstoff geringere Spannungen entstehen. Eine Randbedingung, die beim Übergang von Grundwerkstoff zum Dross erfüllt werden muss ist die Stetigkeit der Verschiebung, da es sonst zu Ablösungen des Drosses kommen würde. Der Dross wird in seinen Dehnungen durch den umgebenen Grundwerkstoff gestützt. Aufgrund des geringeren E-Moduls des Drosses bei in etwa gleicher Dehnung des Grundwerkstoffes reagiert der weniger steife Dross somit mit geringeren Spannungen auf Kosten des Grundwerkstoffes. Dort steigen die Spannungen.

Die Lokalität der Spannungsüberhöhung und des induzierten Spannungsgradienten in Folge der Fase als auch des Drosses wird im Folgenden untersucht.

Dazu wird ein Pfad, beginnend von der Oberfläche des Bauteils entlang der Oberfläche der Fase, wobei die Oberfläche des Drosses überstrichen wird, in Tiefenrichtung der Bohrung gelegt. Entlang dieses Pfades werden die Spannungen ausgewertet, Bild 95,

Der in Schwarz dargestellte Spannungsverlauf des ungestörten Grundwerkstoffes zeigt jeweils die Spannungsüberhöhung in Folge des Übergangs zur Fase der Bohrung auf. Nach diesem Spannungsmaximum fällt der die Spannung in Tiefenrichtung langsam ab von 47,2 MPa auf ca. 40 MPa in 175 mm Entfernung.

Durch die unterschiedlichen E-Moduli, die für den Dross angenommen werden, die zu unterschiedlich hohen Spannungsüberhöhungen führen, stellen sich auch unterschiedlich steile Gradienten im Spannungsverlauf ein.

Für Drossform V_1 liegen alle Spannungsverläufe in ca. 50 mm Entfernung von Drossende auf dem Spannungsverlauf der drossfreien Berechnung, Bild 95. Für Drossform V_2 ist dies in 70 mm Entfernung von Drossende der Fall, Bild 96. Drossform V_3 mit den kleinsten Radien und führt zu einer Zusammenführung der Spannungsverläufe in ca. 90 mm Entfernung vom Drossende, Bild 97.

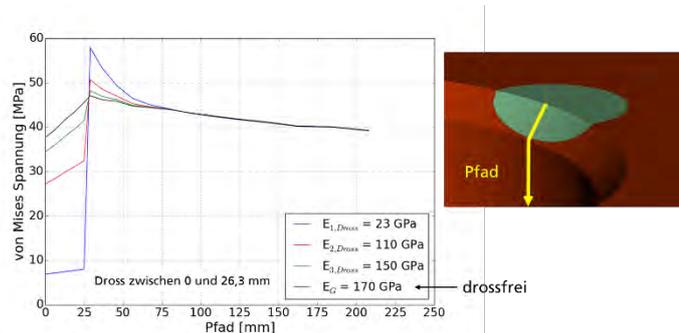


Bild 95 Spannungsverlauf entlang eines Pfades durch Dross und Grundwerkstoff in die Bohrung hinein für die Drossgestalt V_1

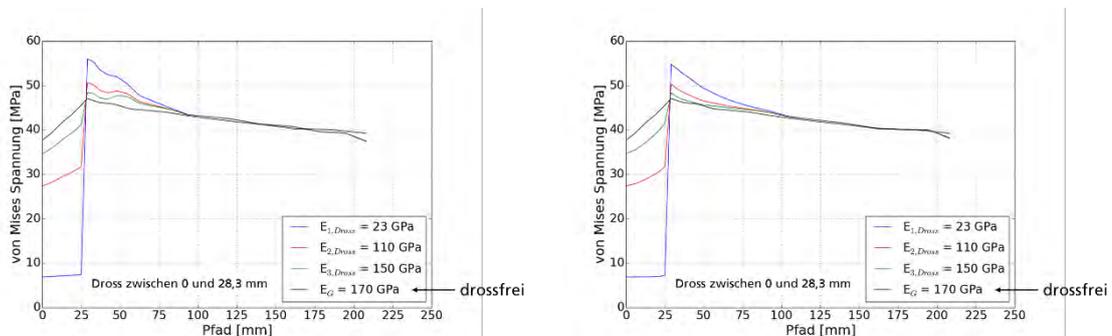


Bild 96 Spannungsverlauf entlang eines Pfades durch Dross und Grundwerkstoff in die Bohrung hinein für die Drossgestalt V_2

Bild 97 Spannungsverlauf entlang eines Pfades durch Dross und Grundwerkstoff in die Bohrung hinein für die Drossgestalt V_3

Die Spannungsumlagerung ist somit lokal beschränkt und hat im Fernfeld des Bauteils keine Auswirkungen.

9.1.3 Zusammenfassung zur Modellierung von Dross in einer Finiten-Elemente Umgebung

Um Dross in einer Finiten-Elemente Umgebung abbilden zu können sind unterschiedliche Annahmen zu treffen. Die Bewertung von Dross auf Spannungsbasis setzt die Kenntnis der Drossgestalt und des E-Moduls aus der zerstörungsfreien Prüfung voraus, da ein Unterschied in diesen Parametern direkte Auswirkungen auf die Spannungshöhe im Dross und vor allem im Grundwerkstoff hat. Die Auflösung des Ultraschallverfahrens und die zu setzenden Grenzen zwischen Dross und Grundwerkstoff schränken die Genauigkeit einer Drossmodellierung ein. Ein synthetisch modellierter Dross kann dabei helfen, grundlegende Aussagen zum Verhalten eines Bauteils bei Vorhandensein von Dross zu treffen.

Die Spannungsverläufe des Drosses und die Änderung der E-Moduln zeigt, dass insbesondere im Grundwerkstoff die Spannungen von der Steifigkeit des Drosses abhängen. Es kommt zu Spannungsumlagerungen, sodass der Dross auf Spannungsebene bei Weitem nicht so hoch belastet wird wie der

Grundwerkstoff. Da durch den Dross auch im Grundwerkstoff eine Spannungsüberhöhung auftritt, müssen beide Werkstoffzustände bewertet werden.

Die Fernwirkung eines lokalen Drosses ist gering. Dadurch kann es nur zu einer Beeinflussung unterschiedlicher Fehlstellen (z.B. Dross) kommen, wenn diese dicht zusammenliegen. Sind keine kritischen Stellen, wie z.B. äußere Kerben in hinreichend großer Nähe zum Dross vorhanden, so muss nur der Dross und der umgebende Grundwerkstoff bewertet werden.

9.2 Synthetische Spannungswöhlerlinien

Für die Bauteilbeurteilung kann auf Basis der Forschungsergebnisse nun spannungsbasiert vorgegangen werden. Hierzu wurde bereits gezeigt, dass eine Abhängigkeit zwischen Kerbwirkung K_{fD} und dem fiktiven Elastizitätsmodul E_f besteht. Mit diesem Zusammenhang wurde ferner aus einer ungespannten Spannungsreferenzwöhlerlinie die Schwingfestigkeit von Schwingproben mit Dross abgeleitet. Dieses Vorgehen ist dann möglich, wenn Messergebnisse für die Dichte oder die Steifigkeit im Bereich des Drosses vorliegen. Damit besteht nun die Möglichkeit, Großgussbauteile aus EN-GJS-400-15 zutreffend zu beurteilen.

Ausgangspunkt für das Beurteilungskonzept ist die Dichte- oder Steifigkeitsbestimmung durch zerstörungsfreie Prüfmethode wie dem Ultraschall. Liegen lokale Werte für die Dichte oder den fiktiven Elastizitätsmodul im Bauteil vor, sind im nächsten Schritt die lokalen Kerbwirkungszahlen K_{fD} für jedes lokale Bauteilvolumen auf Basis der ZfP zu bestimmen. Daraus ergeben sich für die Beurteilung der Bauteilschwingfestigkeit auf Basis der Dichte bzw. des fiktiven Elastizitätsmoduls zwei Möglichkeiten. Zum einen wird der Konstrukteur mit den Informationen über die Verteilung von Dichte und Steifigkeit aus dem Ultraschall in die Lage versetzt, die lokal mit Dross behafteten Bauteilbereiche direkt und präziser über die Finite-Element-Methode (FEM) zu modellieren und diesen jeweils einen fiktiven Elastizitätsmodul E_f zuzuweisen. Liegen Informationen zur örtlichen Drosscharakteristik vor, sind für die Beurteilung der lokal auftretenden Spannungen σ die Beanspruchbarkeiten aus den für die drei untersuchten Werkstoffe werkstoffübergreifend ermittelten Drossklassenwöhlerlinien der lokalen Beanspruchung gegenüberzustellen. Dies setzt jedoch eine Magnetpulverprüfung voraus, die zumindest an der Oberfläche und damit im für die Bauteillebensdauer meist kritischen Randbereich eine Drossklasse abschätzbar macht.

Die zweite Möglichkeit besteht darin, das zu beurteilende Bauteil mit Hilfe der FEM hinsichtlich der lokal vorliegenden Spannungen zu analysieren, indem zunächst nur der Elastizitätsmodul E des ungespannten Werkstoffs in der Berechnung angesetzt wird. Weichen die tatsächlichen Elastizitätsmoduli z.B. an Spannungs-Hot-Spots auf Grund vorliegenden Drosses vom Elastizitätsmodul E ab, wird die Spannungsreferenzwöhlerlinie mit der lokal gemessenen Dichte über den fiktiven Elastizitätsmodul und die Kerbwirkungszahl K_{fD} abgemindert.

Für die Bauteilbeurteilung wird somit nur eine Dichte- oder Steifigkeitsinformation aus dem Ultraschall benötigt. Da die Ermittlung der Regression zwischen Kerbwirkungszahl K_{fD} und fiktivem Elastizitätsmodul E_f (Bild 56) von der Spannungsreferenzwöhlerlinie für eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_0 = 50\%$ ausgeht, wird unterstellt, dass auch der experimentell ermittelten Schwingfestigkeit für die Schwingproben mit Dross eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_0 = 50\%$ zu Grunde liegt. Für die Schwingfestigkeitsabschätzung des lokal vorliegenden Drosses aus der 50%-Spannungsreferenzwöhlerlinie

steht damit nur ein 50 %-Wert der abgeschätzten Schwingfestigkeit gegenüber, was eine Sicherheitsbetrachtung notwendig macht, Bild 98.

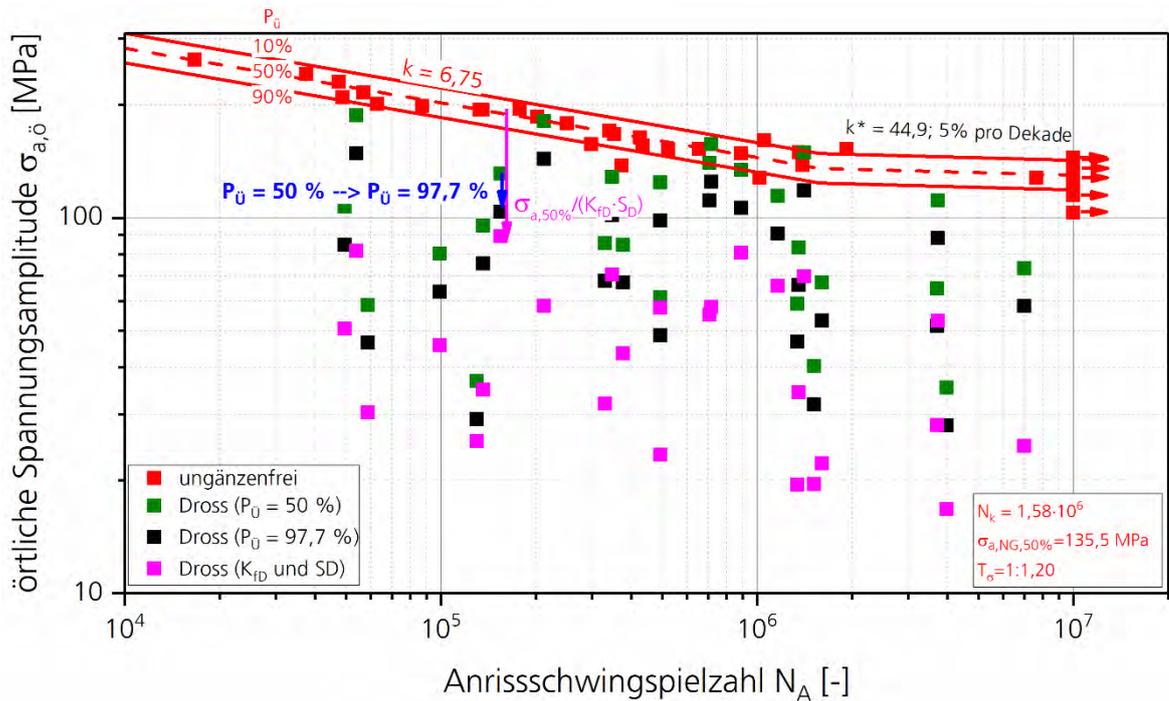


Bild 98 Experimentelle und rechnerische Schwingfestigkeit der Schwingproben mit Dross

Die Berücksichtigung von Sicherheiten vollzieht sich wie schon in /Ble16/ für Lunker beschrieben in zwei Schritten. Dabei wird eine für die Bemessung von Windenergieanlagen genutzte Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{0}} = 97,7\%$ angenommen.

Zunächst werden alle Schwingfestigkeiten der Schwingproben mit Dross von angenommenen 50 % mit einer aus /Kau98, Ble16/ ermittelten Streuspanne von $T_{\sigma} = 1:1,30$ für den ungespannten Werkstoffzustand auf 97,7 % umgerechnet, Bild 98. Es wird angenommen, dass dieses Streumaß auch für die Schwingproben mit Dross gültig ist. Bei dieser Annahme ist zu berücksichtigen, dass bei der Ermittlung einer Drosswöhlerlinie für Schwingproben mit vergleichbarer Drosscharakteristik das Streumaß $T_{\sigma} = 1:1,30$ angenommen werden darf, da in diesem Fall das Versagen der Schwingproben nicht durch den Dross, sondern durch den umgebenden Grundwerkstoff bestimmt wird. Dieser jedoch unterliegt einer Streuung von eben $T_{\sigma} = 1:1,30$.

Um eine Abschätzung der Schwingfestigkeit für $P_{\bar{0}} = 97,7\%$ über die Spannungsreferenzwöhlerlinie und die Beziehung zwischen K_{fD} und E_f herzustellen, wird ein Sicherheitsfaktor S_D (Sicherheitsfaktor Dross) in Höhe von $S_D = 2,2$ eingeführt. Dieser Wert ergibt sich durch folgendes Vorgehen. Die Spannungsamplituden der Spannungsreferenzwöhlerlinie für $P_{\bar{0}} = 50\%$ werden über K_{fD} und S_D abgemindert, sodass diese mit einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von 90 % eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{0}} = 97,7\%$ entsprechen. Dazu sind zunächst die Spannungsamplituden der Schwingproben mit Dross über das Streumaß $T_{\sigma} = 1:1,30$ von $P_{\bar{0}} = 50\%$ auf $P_{\bar{0}} = 97,7\%$ umzurechnen. Durch eine weitere Abminderung durch die Sicherheitszahl j_{σ} ($j_{\sigma} = 1,14$ nach /Hai06/) wird dann erreicht, dass die resultierende Spannungsamplitude mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,7 % entspricht, Bild 98. Die S_D ist mit 2,2 nunmehr so hoch bemessen, dass alle diese auf $P_{\bar{0}} = 97,7\%$ umgerechneten Spannungsamplituden der Schwingproben mit Dross abgedeckt sind. Alle

über K_{fD} und S_D bestimmten Nennspannungsamplituden aus der Spannungsreferenzwöhlerlinie für $P_{\bar{U}} = 50\%$ haben dann Gleichung (13) zu erfüllen. Damit ist sichergestellt, dass die über S_D und K_{fD} bestimmten Spannungsamplituden bei einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von 90 % mindestens einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{U}} = 97,7\%$ entsprechen.

$$\frac{\sigma_{a,n,50\%}}{K_{fD} \cdot S_D} \leq \frac{\sigma_{a,n,Dross,97,7\%}}{j_{\sigma}} \quad (13)$$

Die Sicherheit S_D ist natürlich entsprechend anzupassen, wenn andere Überlebens- bzw. Vertrauenswahrscheinlichkeiten auf Basis der hier gezeigten Schwingfestigkeitsergebnisse abzudecken sind. Weitere Sicherheitsfaktoren für erhöhte oder niedrige Temperaturen oder Sonderereignisse sind zusätzlich zu berücksichtigen.

Die Bestimmung der lokalen Schwingfestigkeit ist somit automatisch an die Neigungen der Spannungsreferenzwöhlerlinie gekoppelt und ermöglicht die Bestimmung der Schwingfestigkeit eines Drossbereichs für verschiedene Lebensdauern anhand einer abgeminderten Spannungsreferenzwöhlerlinie. Die Vorteile liegen darin, dass nun eine stufenlose Beurteilung des Drosses anhand der Messung von Dichte und oder Steifigkeit am Bauteil erfolgen kann. Bisher war Dross am Bauteil nicht zulässig und eine Bemessung nicht möglich. Zudem umgeht das Vorgehen direkt den Einfluss von Gütestufen und kommt auch ohne Drossklassen mit entsprechend hinterlegten Wöhlerlinien aus.

Eine Herabstufung der Beanspruchbarkeit bzw. der Lebensdauer eines kompletten Bauteils ist zugunsten der Möglichkeit einer lokalen Bewertung der Lebensdauer zu verwerfen. Ein Bauteil ist damit nicht zwingend zu verwerfen, wenn Drossbereiche gefunden werden.

9.3 Synthetische Dehnungswöhlerlinien

Zur Beschreibung der Beanspruchbarkeit drossbehafteter Gussbauteile können synthetische Dehnungswöhlerlinien verwendet werden. Die Parameter des Konzepts der synthetischen Dehnungswöhlerlinien basieren auf den ab Seite 57 beschriebenen Ergebnissen der Schwingfestigkeitsversuche an drossbehafteten Flachproben. Der Dross wird im Konzept über die Dichte berücksichtigt.

Als Ausgang für die Untersuchung wird die Dehnungswöhlerlinie des ungespannten GJS-400-15 (Versuchsreihe SR01) verwendet, Bild 44. Die synthetische Dehnungswöhlerlinie wird mit Gleichung (14) beschrieben:

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_f' \cdot f_{\sigma f'}}{E \cdot f_E} \cdot (2 \cdot N)^{b \cdot f_b} + \varepsilon_f' \cdot f_{\varepsilon f'} \cdot (2 \cdot N)^c \quad (14)$$

Diese ist angelehnt an die Dehnungswöhlerlinie, wie sie in Gleichung (2) beschrieben ist. Sie wird dabei mit vier zusätzlichen dichteabhängigen Skalierungsfaktoren für den Schwingfestigkeitskoeffizient ($f_{\sigma f'}$), den Duktilitätskoeffizient ($f_{\varepsilon f'}$), den zyklischen Spannungsexponenten (f_b) und den Elastizitäts-

modul (f_E) verändert. Aufgrund der geringen Anzahl an Versuchen im Kurzzeitfestigkeitsbereich, bleibt die Neigung des plastischen Anteils der Dehnungswöhlerlinie dichteunabhängig.

Ermittlung der Skalierungsfaktoren

Zur Beschreibung der dichteabhängigen Skalierungsfaktoren werden Ansatzfunktionen ausgewählt, die einen sinnvollen Kurvenverlauf ermöglichen. Der Skalierungsfaktor f_E wird aufgrund des auf Seite 58 dargestellten linearen Zusammenhanges zwischen Dichte und fiktivem Elastizitätsmodul mit einem Polynom erster Ordnung beschrieben, Gleichung (15). Die Skalierungsfaktoren $f_{\sigma f}$ und $f_{\epsilon f}$ werden mit den Potenzfunktionen (16) und (17) beschrieben.

$$f_E = 1,41 \cdot \rho - 9,16 \quad (15)$$

$$f_{\epsilon f} = (-6,19 \cdot \rho)^{3,3} - 0,03 \quad (16)$$

$$f_{\sigma f} = (-6,195 \cdot \rho)^{2,75} - 0,01 \quad (17)$$

$$f_b = 0,01 \cdot \rho^2 + 0,65 \cdot \rho - 4,198 \quad (18)$$

Die Parameter der Skalierungsfunktionen werden mittels eines Optimierers ermittelt. Da nur wenige Proben mit niedriger Dichte verhältnismäßig vielen Proben mit hoher Dichte gegenüberstehen, Bild 99, werden die Proben mit geringer Dichte höher gewichtet. In Bild 100 sind die Skalierungsfaktoren für den Dichtebereich von 6,6 bis 7,2 g/cm³ dargestellt.

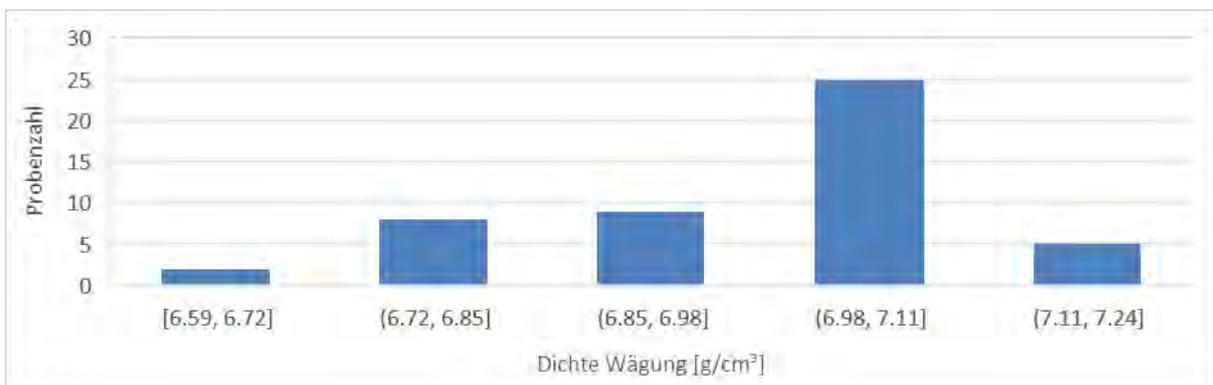


Bild 99 Anzahl der Proben nach Dichteklasse

In Bild 101 sind 4 synthetische Dehnungswöhlerlinien mit den entsprechend klassierten Versuchspunkten dargestellt. Diese zeigen im Bereich von ungänzenfreiem Gusseisen ($\rho = 7,2 \text{ g/cm}^3$) bis hin zu Dichten von 6,6 g/cm³ eine gute Übereinstimmung.

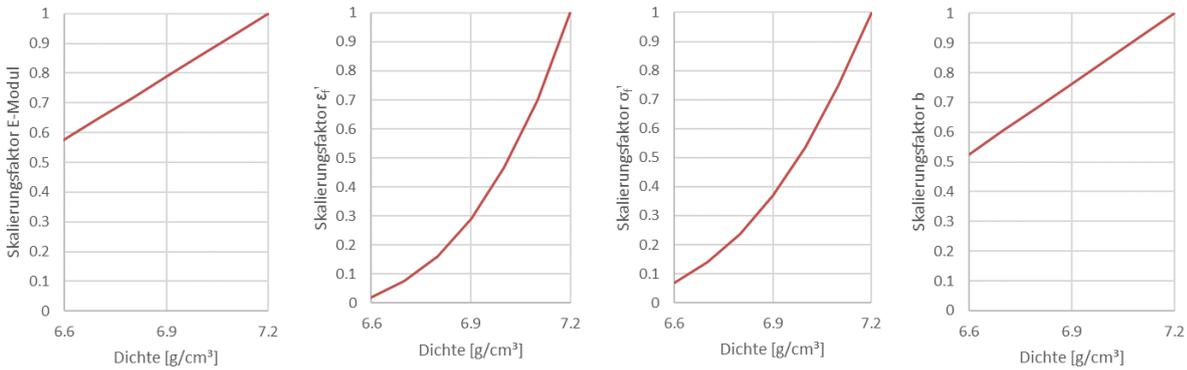


Bild 100 Skalierungsfaktoren in Abhängigkeit der Dichte

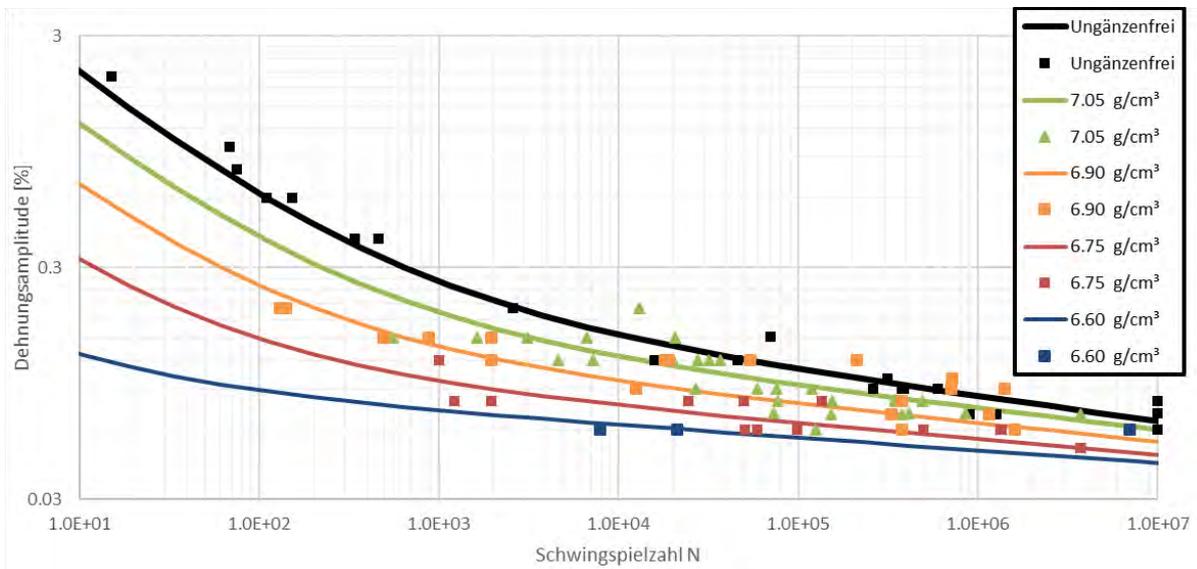


Bild 101 Vergleich der synthetischen Dehnungswöhlerlinien (P_ü = 50%) mit den Versuchspunkten

Zur Anwendung des Konzepts auf Bauteile muss eine Sicherheitsbetrachtung stattfinden. Dazu werden Werkstoff- und konzeptbedingt folgende Einflüsse berücksichtigt:

- **Werkstoffstreuung**

Diese berücksichtigt Schwankungen in der Beanspruchbarkeit des Werkstoff. In Anlehnung an /DNV16/ wird eine Überlebenswahrscheinlichkeit von P_ü = 97,7 % gewählt. Die Werkstoffstreuung wird über die Sicherheitszahl j_W berücksichtigt. Diese wird mit dem Streuband T_ε und der bezogene Sicherheitsspanne u_o berechnet, Gleichung (18).

$$j_W = \left(\frac{1}{T_\epsilon}\right)^{-u_o \cdot 0.39} \tag{19}$$

In Tabelle 14 sind zu ausgewählten rechnerischen Überlebenswahrscheinlichkeiten die bezogene Sicherheitsspanne u_o bei logarithmischer Normalverteilung angegeben.

Tabelle 14 Bezogene Merkmalsgröße zu ausgewählten Überlebenswahrscheinlichkeiten /Hai06/

$P_{\bar{0}}$	90 %	95 %	97,7 %	99 %	99,9 %
$-u_0$	1,28	1,64	2	2,33	3,09

Das Streuband wird auf Basis der ungeschnittenen Versuche ermittelt (Versuchsreihen SR01, MANR01, FWHR01) und wird stets für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{0}} = 10$ bzw. 90% angegeben. Insgesamt fließen die Ergebnisse aus $n = 46$ Schwingfestigkeitsversuchen in Berechnung des Streubandes ein, Gleichung (20). Die Standardabweichung σ wird nach Gleichung (21) berechnet. $\varepsilon_{\text{Versuch}}$ ist die im Versuch verwendete Dehnungsamplitude und ε_{DWL} ist die Dehnungsamplitude, die sich mit der im Versuch erreichten Schwingspielzahl N_{Versuch} und Gleichung (14) ergibt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zur Berechnung der Dehnungsdifferenz die Dehnungswöhlerlinie der entsprechenden Versuchsreihe verwendet wird.

$$\left(\frac{1}{T_{\varepsilon}}\right) = 10^{2.56 \cdot \sigma} \quad (20)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\log \left(\frac{\varepsilon_{\text{Versuch}}}{\varepsilon_{\text{DWL}}} \right) \right)^2} \quad (21)$$

Bei der Betrachtung der Streuung in Abhängigkeit der Schwingspielzahl wird ersichtlich, dass die Streuung bei niedrigen Schwingspielzahlen größer ist als bei hohen Schwingspielzahlen. Dies wird bei der Klassierung der Versuche in Schwingspielzahlklassen sichtbar, Bild 102. Dazu werden die einzelnen Schwingfestigkeitsversuche je nach erreichter Schwingspielzahl einer Klasse zugeordnet. Bei Verwendung einer Klasse, d.h. alle 46 Versuche werden zur Berechnung eines Streubandes verwendet, beträgt das Streuband 1: $T_{\varepsilon} = 1,54$. Bei der Einteilung in zwei Klassen (Klasse 1: $N < 10^4$, Klasse 2: $N \geq 10^4$) betragen die Streubänder 1: $T_{\varepsilon, \text{Klasse1}} = 1,66$ und 1: $T_{\varepsilon, \text{Klasse2}} = 1,43$. Bei der Verwendung von drei Klassen (Klasse 1: $N < 10^3$, Klasse 2: $10^3 \leq N < 10^5$, Klasse 3: $N \geq 10^5$) ergeben sich Streubänder von 1: $T_{\varepsilon, \text{Klasse1}} = 1,68$, 1: $T_{\varepsilon, \text{Klasse2}} = 1,60$ und 1: $T_{\varepsilon, \text{Klasse3}} = 1,31$. In /Kaf17/ wird gezeigt, dass je größer die Streuung der Grundgesamtheit ist, desto größer muss die Anzahl der Versuche sein, um eine zuverlässige Abschätzung machen zu können. Da bei der klassenweisen Berechnung der Streubänder diese teilweise eine große Streuung besitzen und nur noch auf 13 Versuchen basieren, ist mit einer vorhandenen Unsicherheit zu rechnen. Dennoch zeigt die klassenweise Auswertung der Streubänder einen schwingspielzahlabhängigen Verlauf der Streubänder, der dem Konzept berücksichtigt werden soll.

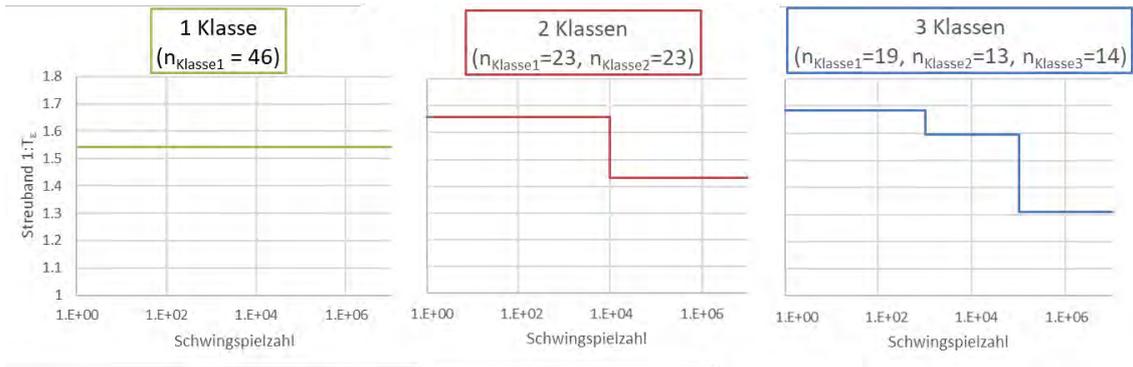


Bild 102 Streuband in Abhängigkeit der Schwingspielzahlklasse (ungänzenfreie Versuche)

Zur Beschreibung des schwingspielzahlabhängigen Verlaufs wird Gleichung (22) verwendet:

$$1: T_g = -0,077 \cdot \log(N) + 1,88 \tag{22}$$

Dieser basiert auf den Streubändern aus zwei Schwingspielzahlklassen, da diese mit $n = 23$ Versuchen pro Klasse eine höhere Zuverlässigkeit besitzt als die mit drei Klassen. Der schwingspielzahlabhängige Verlauf des Streubandes ist auf Bild 103 dargestellt. Die beiden Stützpunkte ergeben sich aus den jeweiligen Streubändern der Klassen und der mittleren Schwingspielzahl der Versuche der Klassen.

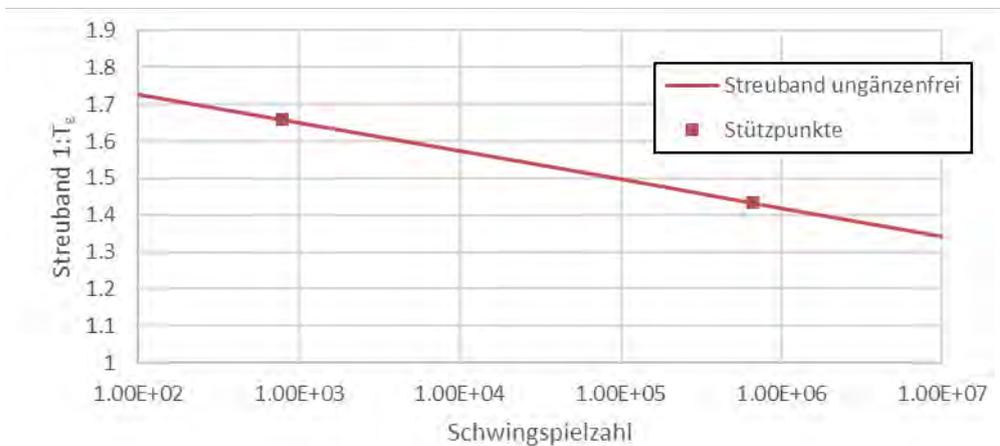


Bild 103 Streuband in Abhängigkeit der Schwingspielzahl

In Bild 104 sind beispielhaft für die Versuchsreihe SR01 ein konstantes ($1: T_g = 1,54$) und ein schwingspielzahlabhängiges Streuband eingezeichnet, beide entsprechen einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{0}} = 10$ bzw. 90 %.

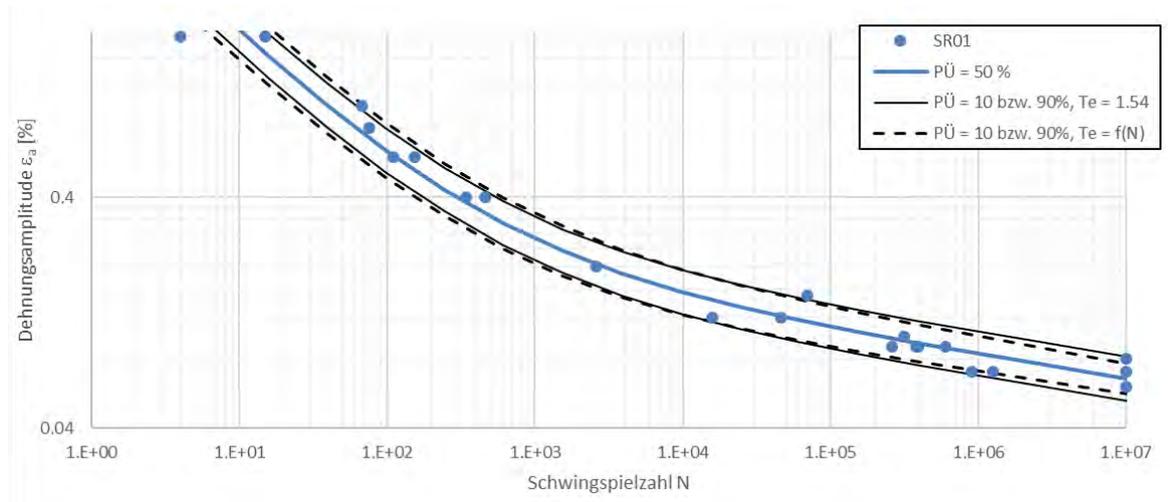


Bild 104 Konstantes Streuband vs. schwingspielzahlabhängiges Streuband

- Konzeptstreuung

Die Konzeptstreuung berücksichtigt die Unsicherheit, dass die analytische Beschreibung der dichteabhängigen Schwingfestigkeit von der tatsächlichen Schwingfestigkeit abweicht. Da bei der verwendeten Vorgehensweise zur Ermittlung der Parameter der synthetischen Dehnungswöhlerlinie die Konzeptstreuung nicht von der Werkstoffstreuung getrennt werden kann, wird ein Streuband berechnet, das Werkstoffstreuung und Konzeptstreuung berücksichtigt. Dazu wird analog zur Ermittlung der Werkstoffstreuung vorgegangen, jedoch mit den Schwingfestigkeitsversuchen an drossbehafteten Proben und dem Konzept der synthetischen Dehnungswöhlerlinie. In Gleichung (23) ist der schwingspielzahlabhängige Verlauf des Streubandes für drossbehaftete Proben dargestellt (Werkstoff- und Konzeptstreuung)

$$1: T_{\epsilon} = -0,054 \cdot \log(N) + 2,07 \quad (23)$$

Auch hier ist eine Abhängigkeit des Streubandes von der Schwingspielzahl festzustellen. In Bild 105 sind die schwingspielzahlabhängigen Streubänder des ungänzefreien und des drossbehafteten Werkstoffs dargestellt.

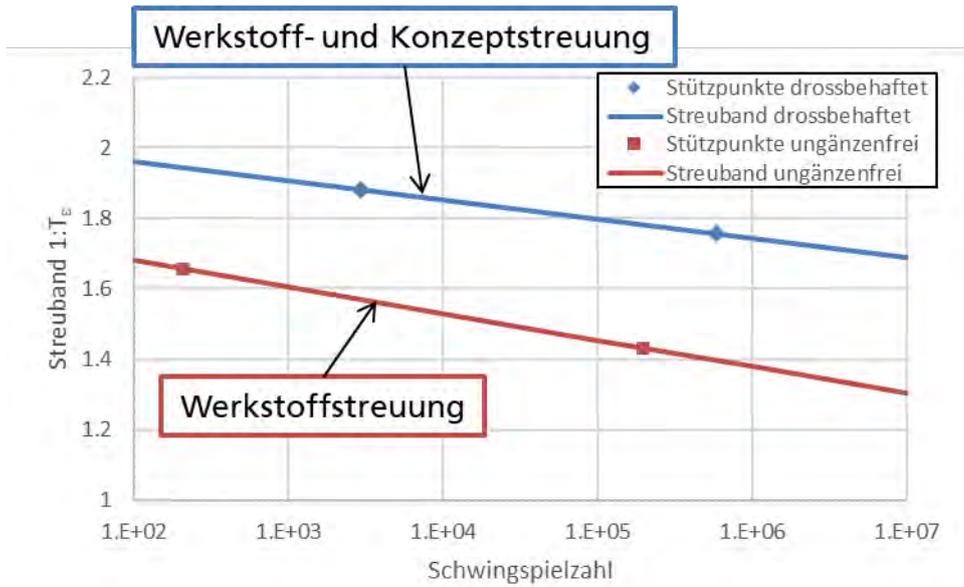


Bild 105 Vergleich der schwingspielzahlabhängigen Streubänder

Die Differenz zwischen den beiden Verläufen ist auf die Konzeptstreuung zurückzuführen. Die Konzeptstreuung führt also zu einer schwingspielabhängigen Zunahme des Streubandes. Diese prozentuale Zunahme ist in Bild 106 dargestellt.

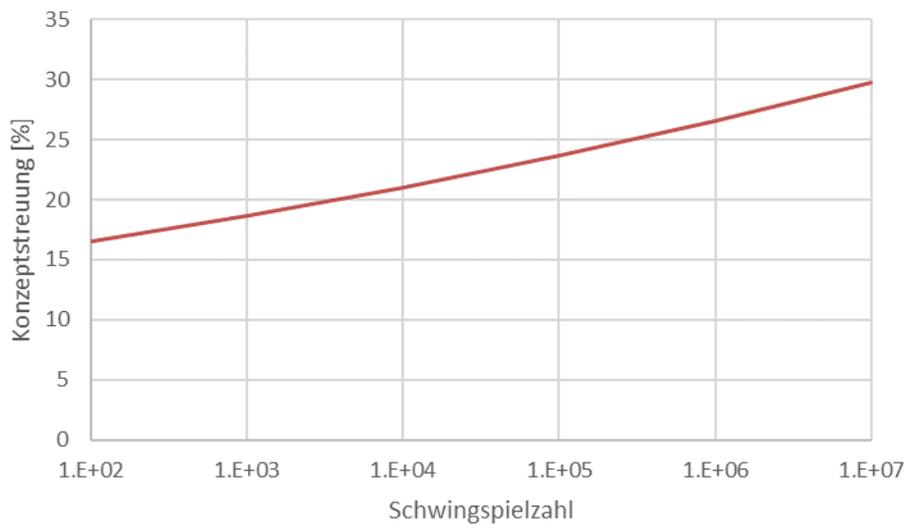


Bild 106 Anteil der Konzeptstreuung an der Werkstoffstreuung und Konzeptstreuung

Bei der Anwendung des Konzepts ist die Konzeptstreuung nicht gesondert zu berücksichtigen, da diese bereits in der Gleichung (23) zur Berechnung des Streubandes enthalten ist.

- Vertrauenswahrscheinlichkeit

Die Ergebnisse der n = 49 Schwingfestigkeitsversuche an drossbehafeteten Proben stellt nur eine Stichprobe aus der Grundgesamtheit dar. Da diese Versuchsergebnisse nicht zwangsläufig den

tatsächlichen Mittelwert repräsentieren, wird die Dehnungswöhlerlinie um einen Risikoabstand $j_{C,n}$ mit der gewählten Vertrauenswahrscheinlichkeit $C = 90\%$ vermindert, Gleichung (24). Das Streuband ist auch hier schwingenspielzahlabhängig zu berücksichtigen.

$$j_{C,n} = \left(\frac{1}{T_\epsilon}\right)^{\frac{-u_\alpha \cdot 0.39}{\sqrt{n}}} \quad (24)$$

Die aufgeführten Faktoren zur Sicherheitsbetrachtung werden mit Gleichung (25) zur Abminderung der Dehnungswöhlerlinie verwendet

$$\epsilon_{a,C,P\ddot{U}=97,7} = \frac{\epsilon_a}{j_w \cdot j_{C,n}} \quad (25)$$

9.4 Bemessungskonzept

Anwendungs- und Gültigkeitsbereich

Das Bemessungskonzept ist ein vereinfachtes Verfahren zur Bewertung der Schwingfestigkeit drossbehafteter Bauteile aus Gusseisen mit Kugelgraphit, wobei von folgenden Randbedingungen ausgegangen wird:

- 1) Die Bewertung von ausgeprägten mehrachsigen Beanspruchungszuständen wird in diesem Konzept nicht behandelt. Innerhalb eines Beanspruchungszyklus sollte die Richtung der ersten Hauptnormalspannung nicht mehr variieren als: $\alpha = 20^\circ$
- 2) Die integrale Dichte eines Drossvolumens von $V_D = 3 \text{ cm}^3$ beträgt mindestens: $\rho = 6,6 \text{ c/cm}^3$
- 3) Wenn der Temperaturbereich unter $t = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ oder über $t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ liegt, ist dieser gesondert zu berücksichtigen.
- 4) Korrosion wird in diesem Konzept nicht berücksichtigt.
- 5) Die dem Konzept zugrunde gelegten Versuchsergebnisse weisen Schwingenspielzahlen $N > 100$ auf, für den Bereich $N < 100$ kann daher keine Aussage getroffen werden.

Die Auslegung eines drossbehafteten Bauteils ist in 3 Schritte unterteilt.

1. Detektion des Dross mittels zfP

Der Dross muss mittels geeigneter zfP-Verfahren im Bauteil quantifiziert werden. Dabei sind besonders die Lage, die Form und die Dichte für den Auslegungsprozess relevant.

Die Dichte wird dabei integral für ein Volumen von $V = 3 \text{ cm}^3$ ermittelt.

2. Überführen der zfP-Daten in die numerische Berechnung

Die Ergebnisse der zfP-Verfahren fließen zur Berechnung der lokalen Spannungen sowie zur Berücksichtigung des spannungsmechanischen Einflusses des Drosses in die Beanspruchungssimulation ein. Dazu wird der Dross geometrisch in das Bauteil modelliert. Entsprechend der ermittelten Dichte werden diesem dann Werkstoffkennwerte zugewiesen. In den FE-Berechnungen werden lokale Beanspruchungen im Bereich des Drosses ermittelt. Dabei werden sowohl die Beanspruchungen im Dross als auch die im Grundwerkstoff betrachtet.

3. Schwingfestigkeitsbewertung

Entsprechend der mittels zfP-Verfahren ermittelten Dichte wird eine Wöhlerlinie für den Dross ermittelt. Unabhängig vom zu bewertenden Bauteil wird empfohlen, die Werkstoffstreuung, die Konzeptstreuung und die Vertrauenswahrscheinlichkeit zu berücksichtigen. Ggf. ist die Anwendung weiterer Übertragbarkeits- oder Sicherheitsfaktoren notwendig. Entsprechend /DNV16/ wird eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{0}} = 97,7 \%$ empfohlen.

Die Schwingfestigkeitsbewertung wird einmal für den Dross und einmal für den Grundwerkstoff durchgeführt.

9.5 Anwendung des Bemessungskonzepts

Am Beispiel des Unterholms einer Schmiedepresse wird das Bemessungskonzept angewandt. Vom Projektpartner Siempelkamp wurde für dieses Bauteil bereits eine Auslegung nach dem Stand der Technik /Kau98/ durchgeführt. Nach dieser Auslegung ist der Dross nicht zulässig, da die zulässige Spannungsamplitude für Dross überschritten wird. Im Folgenden wird die Auslegung zum einen nach dem neuen Dehnungsansatz und zum anderen nach dem neuen Spannungsansatz durchgeführt.

Beanspruchbarkeit

In der Auslegung nach dem neuen Bewertungsansatz muss eine Annahme zur Dichte getroffen werden, da aus den am Unterholm angewandten zfP-Verfahren keine Dichte abgeleitet werden kann. Um eine Vergleichbarkeit mit dem Stand der Technik zu erhalten, wird die Dichte gewählt, die zu einer mit dem Stand der Technik vergleichbaren Beanspruchbarkeit führt. In Tabelle 15 sind die Beanspruchbarkeiten vergleichend dargestellt.

Tabelle 15 Vergleich der Eckwerte der Beanspruchbarkeit (ohne Sicherheitsbetrachtung)

	Stand der Technik	Neuer Bewertungsansatz	
		Dehnungsansatz	Spannungsansatz
Spannungs- bzw. Dehnungsamplitude	$\sigma_{1,a} = 60 \text{ MPa}$	$\sigma_{1,a} = 80 \text{ MPa}$ ($\epsilon_{1,a} = 0,06 \%$)	$\sigma_{1,a} = 71,9 \text{ MPa}$
Schwingspielzahl	$N = 2 \cdot 10^6$	$N = 2 \cdot 10^6$	$N = 1,58 \cdot 10^6$
Spannungsverhältnis	$R = -1$	$R = -1$	$R = -1$
Überlebenswahrscheinlichkeit	$P_{\bar{0}} = 50 \%$	$P_{\bar{0}} = 50 \%$	$P_{\bar{0}} = 50 \%$
Dichte des Dross	-	$6,9 \text{ g/cm}^3$	$6,9 \text{ g/cm}^3$

Die synthetischen Dehnungswöhlerlinien (Kap. 9.3) und die mittels Kompatibilitätsbedingungen, Gleichung (3) und (4), abgeleitete Spannungs-Dehnungskurve für den Dross und den Grundwerkstoff sind in Bild 107 dargestellt.

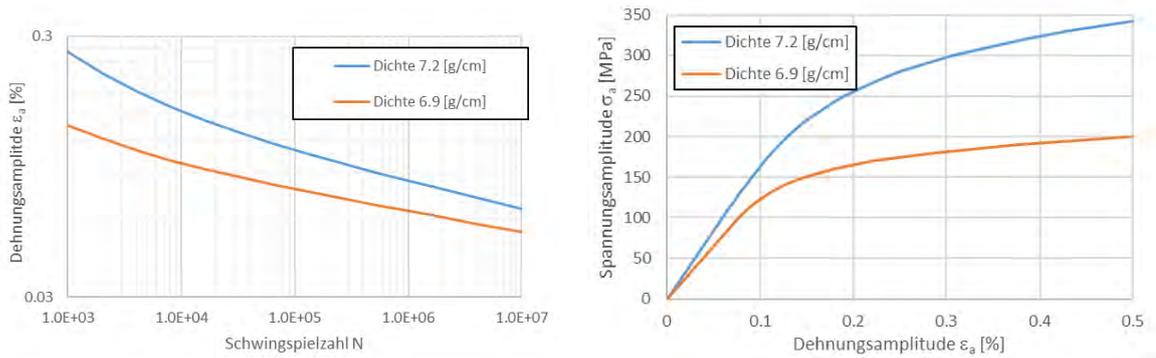


Bild 107 Dehnungswöhlerlinien und Spannungs-Dehnungskurven für den Dross und den Grundwerkstoff (ohne Sicherheitsfaktoren)

Die synthetischen Spannungswöhlerlinien für den Dross und den Grundwerkstoff sind auf Bild 108 dargestellt.

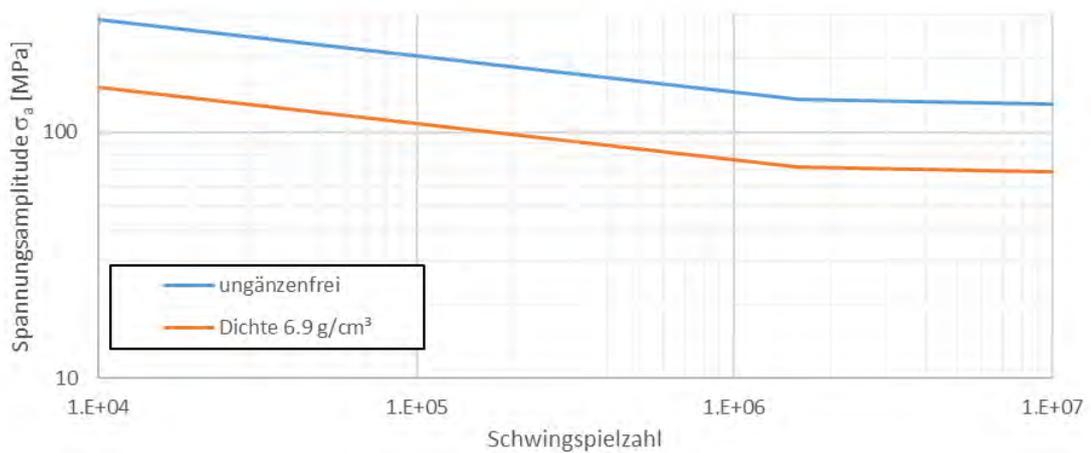


Bild 108 Spannungswöhlerlinien für den Dross und den Grundwerkstoff (ohne Sicherheitsfaktoren)

Beanspruchung

Die örtlichen Beanspruchungen am Bauteil werden mittels FE-Berechnungen für konstante Lastamplituden ermittelt. Nach dem Stand der Technik wird kein Dross im FE-Modell berücksichtigt. Im neuen Bemessungsansatz wird der Dross mit einem reduzierten E-Modul berücksichtigt. Folgende Spannungs- und Dehnungsamplituden werden in der Schwingfestigkeitsbewertung verwendet, Bild 109.

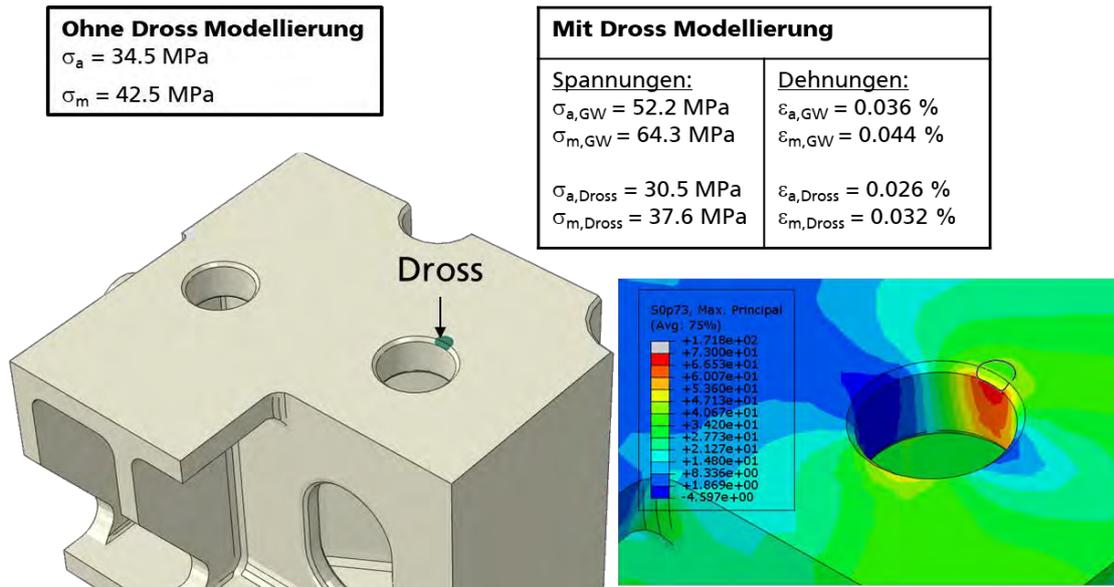


Bild 109 Spannungs und Dehnungsamplituden für die Schwingfestigkeitsbewertung und FE-Berechnung zum Dross

Lebensdauerbewertung

In der Lebensdauerbewertung wird nach dem Stand der Technik eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{u}} = 99,9 \%$ und ein Streuband von $T_{\sigma} = 1:1,3$ verwendet. Daraus ergibt sich nach Gleichung (19) eine Sicherheitszahl von $j_{\sigma} = 1,37$. Bei einer rechnerischen Ausfallwahrscheinlichkeit von $P_{\bar{u}} = 99,9 \%$ beträgt die bezogene Merkmalsgröße $u_o = 3,09$.

Neben der Ausfallwahrscheinlichkeit wird nach dem Stand der Technik ein Anpassungsfaktor verwendet, der das höchstbeanspruchte Werkstoffvolumen berücksichtigt. Dieser wird mit $f_{N,V} = 0,95$ abgeschätzt.

Die Mittelspannung wird nach dem Stand der Technik in einer Mittelspannungstransformation berücksichtigt. Die Mittelspannungsempfindlichkeit wird mit $M = 0,48$ abgeschätzt.

Nach dem Stand der Technik /Kau98/ wird unter Berücksichtigung der genannten Faktoren eine ertragbare Spannungsamplitude von $\sigma_{ert} = 27 \text{ MPa}$ bei $N = 2 \cdot 10^6$ Schwingspielen berechnet. Da die berechnete Spannungsamplitude bei $\sigma_{vorh} = 34,5 \text{ MPa}$ liegt, ist der Dross im Bauteil nicht zulässig.

Entsprechend /DNV16/ wird für den neuen Bewertungsansatz eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $97,7 \%$ verwendet. Für den dehnungsbasierten Ansatz wird ein schwingspielzahlabhängiges Streuband verwendet, Gleichung (23). Für den Spannungsansatz wird ein Streuband von $T_{\sigma} = 1:1,3$ verwendet.

Im neuen Bemessungsansatz wird die Werkstoffstreuung, die Konzeptstreuung, die Vertrauenswahrscheinlichkeit und die Stützwirkung nach FKM-Richtlinie mit der Stützzahl nach Stieler berücksichtigt. Diese wird für den Dross und für den Grundwerkstoff berechnet. Zur Berücksichtigung der Mittelspannung wird im dehnungsbasierten Ansatz der Schädigungsparameter P_{SWT} verwendet. Beim spannungsbasierten Ansatz wird analog zum Stand der Technik vorgegangen.

Unter Berücksichtigung der genannten Faktoren werden mit dem dehnungsbasierten Ansatz Lebensdauern für den Dross von $N_{\text{Dross}} = 5 \cdot 10^6$ und für den Grundwerkstoff von $N_{\text{GW}} = 1,6 \cdot 10^7$ berechnet und erreicht damit die veranschlagten $N = 2 \cdot 10^6$ Schwingspiele werden somit erreicht.

Der neue spannungsbasierte Bemessungsansatz führt zu Lebensdauern für den Dross von $N_{\text{Dross}} = 1,8 \cdot 10^5$ und für den Grundwerkstoff von $N_{\text{GW}} = 1,3 \cdot 10^{12}$. Die veranschlagten $N = 2 \cdot 10^6$ Schwingspiele werden somit nicht erreicht.

In Tabelle 16 sind die verwendeten Faktoren und die berechneten Lebensdauern gegenübergestellt.

Tabelle 16 Berücksichtigte Kennwerte und Ergebnisse der Schwingfestigkeitsbewertung

	Stand der Technik	Neuer Bemessungsansatz			
		Dehnungsbasierter Ansatz		Spannungsbasierter Ansatz	
		Dross	Grundwerkstoff	Dross	Grundwerkstoff
Streuband T_σ bzw. T_ε	1:1,3	1:1,68	1:1,32	1:1,3	1:1,3
Sicherheitsfaktor j_σ (Werkstoffstreuung+Konzeptstreuung)	1,37	1,50	1,54	1,86	1,23
Risikofaktor $j_{c,n}$ (Vertrauenswahrscheinlichkeit)	1,053	1,047	1,041	1,14	1,014
Anpassungsfaktor	0,95	-	-	-	-
Stützzahl	-	1,019	1,02	1,019	1,02
Faktor zur Mittelspannungs- transformation (R = -1 auf R = 0,104)	0,64	-	-	0,64	0,64
Ertragbare Spannungsamplitude bzw. P_{SWT} -Wert (inkl. Sicherheiten) bei $N = 2 \cdot 10^6$	54 MPa	51 MPa	100 MPa	34 MPa	110 MPa
Schwingspielzahl	$4,1 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^7$	$1,8 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^{12}$

10 Bezug zum Bericht des DNV GL

Der DNV GL beurteilt die Projektergebnisse im Rahmen von unverDROSSen in einem Bericht /Mai18/. Darin erachtet der DNV GL das vorgeschlagene Bemessungskonzept als geeignet, um den Einfluss von Dross abzuschätzen, wie es im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführt wurde. Natürlich sind die Anwendbarkeit von spannungs- und dehnungsbasiertem Konzept nochmals für weitere GJS-Werkstoffe und unterschiedliche Wanddicken zu überprüfen. Auch die statistische Absicherung muss, wie vom DNV GL bemerkt, noch weiter vorangetrieben werden. Trotz der hohen Versuchsumfänge konnte durch den Ausfall zahlreicher Schwingproben im Bereich des Übergangs vom Prüfbereich zum Einspannbereich sowie im Bereich der Einspannung selbst, eine statistische Absicherung im Rahmen von unverDROSSen insbesondere für unterschiedliche Drossklassen nicht erfolgen. Im Rahmen des Vorhabens selbst konnte jedoch die Drossklassierung begonnen, ein Vorschlag für die stufenlose Abschätzung von Bemessungswöhlerlinien etwa über K_{FD} gezeigt und somit ein Mehrwert gegenüber Drossklassen-Wöhlerlinien erreicht werden.

Der DNV GL weißt in seinem Bericht auf einen fehlenden Nachweis von gemessener Dichte am Bauteil durch UT und den Abgleich zur tatsächlich ermittelten Dichte hin. Dies wurde im Rahmen des Abschlussberichtes aufgegriffen und ein entsprechender Nachweis der Korrelation beider Kennwerte in Kapitel 8.1 erarbeitet.

11 Nachweis von Veröffentlichungen

Die Ergebnisse des Vorhabens wurden bisher veröffentlicht in:

1. Bleicher, Ch.: Analyse des Schwingfestigkeitsverhaltens von drossbehaftetem Gusseisen mit Kugelgraphit. GIESSEREI Special – Forschung und Innovation, Nr. 02, 2018, S. 38 – 55
2. Wehling, C.: Vergleich von metallographischen und ultraschallunterstützten Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der bauteilgebundenen Verteilung von Dross im Bereich von Großgussbauteilen. Masterarbeit, TU Darmstadt, November 2016
3. Bleicher, Ch.: Fatigue Behavior of Dross in Thick-walled Nodular Cast Iron. Konferenz-Beitrag, 19th International ASTM/ESIS Symposium on Fatigue and Fracture Mechanics (42nd National Symposium on Fatigue and Fracture Mechanics), May 15-17, 2019, Denver, CO, USA.
4. Bleicher, Ch.: Beitrag beim Aachener Gießerei-Kolloquium zur Beurteilung der Schwingfestigkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit unter besonderer Berücksichtigung von Ungänzen wie Lunker und Dross, 14. und 15. März 2019

Zusätzlich sind Veröffentlichungen in Vorbereitung:

5. Bleicher, Ch.: Beitrag in der GIESSEREI zur Beurteilung des Schwingfestigkeit sowie des Drossausprägung am Beispiel von Fehlervergleichsbildern. In Planung für 2019
6. Bleicher, Ch.: Beitrag beim 26. Metallurgie Kolloquium: Beurteilung des Einflusses von Dross auf die zyklische Beanspruchbarkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit unter der Berücksichtigung zerstörungsfreier Prüfergebnisse, 26. und 27. September 2019, Beitrag angenommen

12 Zusammenfassung und Ausblick

Um Bauteile aus Gusseisen mit Kugelgraphit auch bei Vorhandensein von Dross sicher beurteilen und für die Nutzung freigeben zu können, wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens unverDROSSen exemplarisch an Versuchskörpern und Bauteilen aus EN-GJS-400 die zerstörungsfreie Prüfbarkeit von Dross in oberflächennahen Bauteilschichten mit unterschiedlichen ZfP-Methoden untersucht. Dabei zeigt sich, dass insbesondere die Ultraschalltechnik in der Lage ist, von der Drossgegenseite die Drosstiefe zu detektieren sowie auch von der Drossseite die Verteilung von Dross sicher zu detektieren. Auch wenn die Auflösung einzelner feiner Drossstrukturen im Randbereich durch den nachgeschalteten Einsatz der Magnetpulverprüfung sehr viel genauer zu bestimmen ist, konnte dennoch gezeigt werden, dass die in den Gießereien standardmäßig eingesetzte Ultraschallprüftechnik ebenfalls in der Lage ist Dross auch oberflächennah zu bestimmen. Auch andere digitale mikromagnetische Verfahren wie Streufluss oder 3MA sind hierzu in der Lage.

Basierend auf den zerstörungsfreien Messungen an den Versuchskörpern und Bauteilen wurden Schwingproben im ungespannten und im mit Dross behafteten Bereich entnommen und das zyklische Werkstoffverhalten unter Dehnungsregelung unter Wechselbelastung untersucht. Dabei zeigt sich, dass einige Schwingproben direkt beim Aufziehen der Last oder schon nach sehr wenigen Schwingspielen brechen. Eine nachgeschaltete Betrachtung der probenspezifischen Steifigkeit im Sinne eines fiktiven Elastizitätsmoduls zeigt, dass diese Schwingproben im Prüfvolumen gerade einmal über eine Steifigkeit von wenigen 10 GPa im Vergleich zu etwa 170 GPa des ungespannten Werkstoffes verfügen. In weiteren Schritten kann gezeigt werden, dass ähnlich wie bei Lunkern, der fiktive Elastizitätsmodul gut mit der Dichte korreliert, sodass nach der zerstörungsfreien Messung der Dichte eine lokale Zuweisung von Steifigkeiten am Bauteil für eine bessere Schwingfestigkeitsbeurteilung umsetzbar ist. Dabei sind insbesondere solche Schwingproben mit Dross, die lediglich ein bis drei Schwingspiele bis zum Bruch ertragen, mit einem fiktiven Elastizitätsmodul bis maximal 50 GPa behaftet. Diese Bereiche sind am Bauteil bruchmechanisch zu untersuchen, da direkt von einem vorliegenden Anriss auszugehen ist.

Anschließend wird gezeigt wie auf Basis eines dehnungsbasierten sowie eines spannungsbasierten Ansatzes die lokale Schwingfestigkeit am Bauteil beurteilt werden kann. Dazu wird für den spannungsbasierten Ansatz eine Kerbwirkungszahl K_{ID} eingeführt, die die spezifische Ableitung lokaler Bauteilschwingfestigkeiten auf Basis der gemessenen Dichte oder Steifigkeit erlaubt. Um unterschiedliche Bauteilüberlebenswahrscheinlichkeiten abzusichern, wird zusätzlich der Sicherheitsfaktor S_D eingeführt.

Durch die Untersuchungen und Ergebnisse im Rahmen von unverDROSSen konnten für die bestehenden Herausforderungen in

- der Nachweisbarkeit von Dross an Großgussbauteilen,
- dem Fehlen von Methoden für einen standardisierten Lebensdauernachweis für mit Dross behafteten Bauteile,
- dem Fehlen von zyklischen und quasi-statischen Werkstoffkennwerten und
- der Verknüpfung von ZfP-Daten mit diesen Werkstoffdaten

durch

- die Ertüchtigung und den Nachweis der Detektionsfähigkeit von Dross durch die zerstörungsfreien Prüfverfahren Ultraschall für das Bauteilvolumen sowie Magnetpulverprüfung, 3MA und Streufluss für oberflächennahe Bauteilbereiche,
 - die Erarbeitung von Zusammenhängen zwischen der an den Schwingproben sowie später am Bauteil gemessenen Dichte und des fiktiven Elastizitätsmoduls,
 - die Ableitung lokaler Kerbwirkungszahlen K_{fD} für Dross auf Basis von gemessener Dichte und fiktivem Elastizitätsmodul,
 - den Aufbau eines dehnungs- sowie eines spannungsbasierten Beurteilungskonzeptes,
- sowie praxisgerechte Lösungen erarbeitet werden.

Die erarbeiteten Ergebnisse zeigen Möglichkeiten und Ansätze auf, die Lebensdauer bzw. Beanspruchbarkeit von Dross bei dickwandigem EN-GJS-400-15 sowie EN-GJS-400-18 innerhalb der gegebenen Randbedingungen abschätzen zu können. Dabei sind die Ergebnisse und das Beurteilungskonzept exemplarisch und sind in weiterführenden Vorhaben auch für andere GJS-Werkstoffe, aber auch Betriebslasten, überlagerte Mittellasten und multiaxiale Beanspruchungen hinsichtlich ihrer Gültigkeit zu überprüfen.

13 Literatur

- /Alt02/ Altpeter, I.; Becker, R.; Dobmann, G.; Kern, R.; Theiner, W.A.; Yashan, A.: „Robust solutions of inverse problems in electromagnetic non-destructive evaluation“, *Inverse problems* 18, p. 1907-1921, 2002
- /Bar17/ Barbian, O.A.; Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP): „Handbuch Automatische Ultraschall-Prüfsysteme“, 3. Aufl. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS), 2017, ISBN 978-3-945023-95-2
- /Bar19/ Barkhausen, H.: „Zwei mit Hilfe der neuen Verstärker entdeckte Erscheinungen“, *Physikalische Zeitschrift* 20, S. 401-403, 1919
- /Bas10/ Basquin, O. H.: The exponential law of endurance tests. *American Society Test, Materials Proceedings*, Nr. 10, 1910, S. 625 – 630
- /BDG17/ BDG Service GmbH: Prüfbericht S17-22220-3, 15.09.2017
- /Ber13/ Bergmann, J. W.; Thumser, R.: Synthetische Wöhlerlinien für Eisenwerkstoffe – Synthetische Wöhlerlinien 1999. Aktualisierte Fassung vom 31.07.2013, (überarbeitet durch Dr. T. Richter), Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar, F-45/044/99, Weimar, 2013
- /Ber83/ Zur Betriebsfestigkeitsbemessung gekerbter Bauteile auf der Grundlage örtlicher Beanspruchungen, 1983.
- /Bis14/ Bisping, J. R.: Entwicklung einer Bemessungsmethode für Mahlanlagen in der Zementindustrie am Beispiel von Vertikalrollenmühlen. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt, LBF-Bericht Nr. FB-242, 2014
- /Ble16/ C. Bleicher: Ein Beitrag zur Beurteilung der Schwingfestigkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit mit besonderer Berücksichtigung der Auswirkungen von Lunkern auf die Bauteillebensdauer, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Fraunhofer LBF, Darmstadt, LBF-Bericht FB-246, 2016
- /Bux92/ Buxbaum, O.: Betriebsfestigkeit – Sichere und wirtschaftliche Bemessung schwingbruchgefährdeter Bauteile. 2., erweiterte Auflage, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 1992
- /Clo86/ U.H. Clormann und T. Seeger, „RAINFLOW – HCM Ein Zählverfahren für Betriebsfestigkeitsnachweise auf werkstoffmechanischer Grundlage,“ *Stahlbau*, Bd. 55, pp. 65-71, 1986.
- /Cof54/ Coffin, L. A.: A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal. *Trans. ASME*, Nr. 76, 1954, S. 931 – 950
- /Cul72/ Cullity, B.D.: „Introduction to magnetic materials“, Addison-Wesley - ISBN 0-201-01218-9, 1972
- /Cul72/ Cullity, B.D.: „Introduction to magnetic materials“, Addison-Wesley - ISBN 0-201-01218-9, 1972

- /Dib78/ Dobmann, G.: „Streuflussverfahren“, IZFP-Bericht Nr. 780333-TW, Saarbrücken, 1978
- /DIN06/ Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 6506-1: Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Brinell – Teil 1: Prüfverfahren (ISO 6506-1:2005). Deutsche Fassung EN ISO 6506-1:2005, ICS 77.040.10, Beuth Verlag, Berlin, März 2006
- /DIN10/ DIN, Deutsches Institut für Normung e.V.: Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung - Allgemeine Grundsätze. Deutsche Fassung EN ISO 16810:2014, Berlin: Beuth, 2014. – Normnr. DIN EN ISO 16810:2014-07
- /DIN11/ DIN, Deutsches Institut für Normung e.V.: Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung - Empfindlichkeits- und Entfernungsjustierung. Deutsche Fassung EN ISO 16811:2014, Berlin: Beuth, 2014. – Normnr. DIN EN ISO 16811:2014-06
- /DIN12/ DIN, Deutsches Institut für Normung e.V.: Zerstörungsfreie Prüfung - Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung. Deutsche Fassung EN ISO 9712:2012, Berlin: Beuth, 2012. – Normnr. DIN EN ISO 9712:2012-12
- /Din17/ Ding, H.: The study of the relation between dross shape and Mg content, TU Darmstadt, 2017
- /DIN23/ DIN, Deutsches Institut für Normung e.V.: Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung - Durchschallungstechnik. Deutsche Fassung EN ISO 16823:2014, Berlin: Beuth, 2014. – Normnr. DIN EN ISO 16823:2014-07
- /DIN30/ DIN, Deutsches Institut für Normung e.V.: Magnetisches Streufluß-Verfahren. DIN 54130 : Zerstörungsfreie Prüfung, Allgemeines, Berlin: Beuth, 1974 04. - Normnr. DIN 54130
- /DIN36/ DIN, Deutsches Institut für Normung e.V.: Magnetische Streuflußprüfung mit Sondenabtastung. DIN 54136, Teil 1: Zerstörungsfreie Prüfung, Grundlagen, Berlin: Beuth, 1988 10. - Normnr. DIN 54136, Teil 1
- /DIN45/ Normenausschuss Gießereiwesen (GINA) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 945-1: Mikrostruktur von Gusseisen – Teil 1: Graphitklassifizierung durch visuelle Auswertung (ISO 945-1:2008 + Cor. 1:2010). Deutsche Fassung EN ISO 945-1:2008 + AC:2010, Beuth Verlag, Berlin, September 2010
- /DIN63/ Normenausschuss Gießereiwesen (GINA) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 1563: Gießereiwesen – Gusseisen mit Kugelgraphit. Deutsche Fassung EN 1563:2011, ICS 77.080.10, Beuth Verlag, Berlin, März 2012
- /DIN64/ Normenausschuss Gießereiwesen (GINA) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 1564: Gießereiwesen – Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit. Deutsche Fassung EN 1564:2011, ICS 77.080.10, Beuth Verlag, Berlin, Januar 2012
- /DIN68/ DIN, Deutsches Institut für Normung e.V.: Zerstörungsfreie Prüfung - Charakterisierung und Verifizierung der Ultraschall-Prüfausrüstung (Teil 1 – 3). Deutsche Fassung EN 12668, Berlin: Beuth, – Normnr. DIN EN 12668
- /Din74/ DIN, Deutsches Institut für Normung e.V.: Magnetisches Streufluß-Verfahren. DIN 54130 : Zerstörungsfreie Prüfung, Allgemeines, Berlin : Beuth, 1974 04.

- /DIN80/ DIN, Deutsches Institut für Normung e.V.: Gießereiwesen - Ultraschallprüfung - Teil 3: Gussstücke aus Gusseisen mit Kugelgraphit. Deutsche Fassung EN 12680-3:2011, Berlin: Beuth, 2012. – Normnr. DIN EN 12680-3:2012-02
- /Din88/ DIN, Deutsches Institut für Normung e.V.: Magnetische Streuflußprüfung mit Sondenabtastung. DIN 54136, Teil 1: Zerstörungsfreie Prüfung, Grundlagen, Berlin: Beuth, 1988 10.
- /DNV16/ DNV GL: "Machinery for wind turbines, DNVGL-ST-0361," DNV GL AS, September 2016
- /Dob78/ Dobmann, G.: Streuflussverfahren, IZFP-Bericht Nr. 780333-TW, Saarbrücken, 1978
- /Dob80/ Dobmann, G.; Höller, P.: „Physical Analysis Methods of Magnetic Flux Leakage“, Hrsg.: Sharpe, R. S.: Research techniques in NDT, London, Academic Press, 1980, S. 39-69
- /Dob85/ Dobmann, G.: Magnetic Leakage Techniques in NDT. A State-of-the-Art Survey of the Capabilities for Defect Detection and Sizing. Hrsg.: Lord, W.: Electromagnetic methods of NDT, London, Gordon&Breach, 1985, S. 71-95
- /Dob88/ Dobmann, G.; Pitsch, H.: „Verfahren zum zerstörungsfreien Messen magnetischer Eigenschaften eines Prüfkörpers sowie Vorrichtung zum zerstörungsfreien Messen magnetischer Eigenschaften eines Prüfkörpers“, deutsches Patent DE3037932A1, 23. April 1988
- /DVM07/ Pollicino, F.: Bruchmechanische Fragestellung bei der Lebensdauerberechnung von Windenergieanlagen. In: DVM-Bericht 239, Bruchmechanik und Bauteilsicherheit, Themenschwerpunkt: Ermüdungsbruch, Berlin, 2007.
- /DVM10/ Lagemann, C.: Qualifizierung von höherfestem Gusseisen in Getriebestrukturen von Windenergieanlagen (WEA). Sitzung der DVM AG Industrielle Anwendung der Bruchmechanik vom 11.5.2010, <http://www.dvm-berlin.de/index.php?id=59>, 2010.
- /DVM14/ Kamps, A.; Chassanidis, S.: Die Betriebsfestigkeit im simulationsbasierten Auslegungsprozess von Strukturkomponenten in Windkraftgetrieben. In: Tagungsband, DVM-Workshop „Numerische Simulation in der Betriebsfestigkeit“, Mannheim, 2014.
- /Edw72/ Edwards, A. W. F.: Likelihood. Cambridge University Press, 1972
- /Fan95/ Fang, L.-Y.; Metzloff, K. E.; Voigt, R. C.; Loper jr., C. R.: Factors Affecting Measurement of Modulus of Elasticity of Ductile Irons. American Foundry Society Transactions, Nr. 12, 1995, S. 31 – 39
- /Fis12/ Fisher, R. A.: On an absolute criterion for fitting frequency curves. Messenger of Mathematics, Nr. 41, 1912, S. 155 – 160
- /FKM12/ FKM-Richtlinie – Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen, 6., überarbeitete Ausgabe, Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM), Frankfurt am Main, 2012
- /FKM18/ Arbeitsstand der unveröffentlichten FKM- Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile unter expliziter Erfassung nichtlinearen Werkstoffverformungsverhaltens“ vom 26.03.2018

- /Gli85/ G. Glinka. Energy Density Approach to Calculation of Inelastic Strain-Stress Near Notches and Cracks. Eng. Frac. Mech., 22:485_508, 1985.
- /Gud99/ Gudehus, H.; Zenner, H.: Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsberechnung – Empfehlungen zur Lebensdauerabschätzung von Maschinenbauteilen. 4. Auflage aktualisiert und erweitert von H. Gudehus und H. Zenner, Verein zur Förderung der Forschung und der Anwendung von Betriebsfestigkeits-Kenntnissen in der Eisenhüttenindustrie (VBFeh) im Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh), Verlag Stahleisen, Düsseldorf, ISBN 3-514-00584-2, 1999
- /Hai06/ Haibach, E.: Betriebsfestigkeit, Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. 3., korrigierte und ergänzte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, ISBN-10 3-540-29363-9, 2006
- /Has08/ Hasse, S.: Gefüge der Gusseisenlegierungen, Verlag Schiele und Schön, Berlin 2008
- /Hel15/ Hell, M; Wagener, R.; Kaufmann, H.; Melz, T.: Fatigue Life Design of Components under Variable Amplitude Loading with Respect to Cyclic Material Behaviour, Procedia Engineering: Elsevier 101, 2015
- /Hep72/ Heptner, H.; Stroppe, H.: „Magnetische und magnetinduktive Werkstoffprüfung“, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1972
- /Hue81/ Hück, M.; Thrainer, L.; Schütz, W.: Berechnung von Wöhlerlinien für Bauteile aus Stahl, Stahlguß und Grauguß – Synthetische Wöhlerlinien. Bericht Nr. ABF 11, 2., überarbeitete Fassung, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1981
- /Kaf17/ Kaffenberger, M; Störzel, K.: Bauteilauslegung unter Berücksichtigung von Beanspruchungen mit variablen Amplituden und sehr hohen Schwingungszahlen, 2017
- /Kau57/ Kauczor, E.: Metallographische Arbeitsverfahren, Heft 119, Springer-Verlag Berlin Göttingen Heidelberg 1957
- /Kau98/ Kaufmann, H.: Zur schwingfesten Bemessung dickwandiger Bauteile aus GGG-40 unter Berücksichtigung gießtechnisch bedingter Gefügeengängen. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt, LBF-Bericht Nr. FB-214, 1998
- /Klo08/ Kloster, A.: „Aufbau einer Entwicklungsplattform für niederfrequente magnetische Prüfverfahren“, Doktorarbeit, Saarbrücken, 2008
- /Kne62/ Kneller, E.: „Ferromagnetismus“, Springer-Verlag, 1962
- /Koe12/ Köhler, M.; Jenne, S.; Pötter, K.; Zenner, H.: Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit. Springer-Verlag, Berlin, 2012
- /Kur14/ Kurz, J. et al.: Untersuchungen von Schwindungsporositäten mittels mechanisierter Ultraschallprüfung mit Sampling Phased Array Technik an Sphäroguss von Windkraftanlagenkomponenten zur Abschätzung ihrer Schwingfestigkeit. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Potsdam, 26. bis 28. Mai, 2014
- /Lan37/ Langer, B. F.: Fatigue failure from stress cycles of varying amplitude. In: Journal of Applied Mechanics. Band59, 1937, S.A160–A162.

- /Mai18/ Maier, O. M.; Schmidt, P.: Abschlussbericht-UnverDROSSen-04452-0. DNV GL Renewables Certification, 18.12.2018
- /Man65/ Manson, S. S.: Fatigue: A complex subject – some simple approximations. *Experimental Mechanics*, 5, Nr. 7, 1965, S. 45 – 87
- /Mau99/ Mauch, H.: Statistische Methoden zu Beurteilung von Bauteillebensdauer und Zuverlässigkeit und ihre beispielhafte Anwendung auf Zahnräder. Abschlußbericht. Forschungsvorhaben AiF-Nr. 11154 / N, "Lebensdauerstatistik", Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit IMAB, TU Clausthal, 1999
- /Meg04/ Meggiolaro, M. A.; Castro, J. T. P.: Statistical evaluation of strain-life fatigue crack initiation predictions, *Int. J. Fatigue*, Band 26, Seite 463 – 476, 2004
- /Min45/ Miner, M. A.: Cumulative damage in fatigue. In: *Journal of applied mechanics*. Band 12, Nr. 3, 1945, S. 159–164
- /Möl17/ Möller, B. et al.: Fatigue Life Assessment of Welded Joints by the Notch Strain Concept Considering Transient Effects of the Cyclic Material Behavior, *Proc. Of the 5th Int. Conf. on Steels in Cars and Trucks*, Amsterdam, June 18-22, 2017
- /Mor65/ Morrow, J. D.: Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals, *ASTM STP 378*, American Society for Testing and Materials, 1965, S. 45 – 87
- /Nie08/ Nieslony, A.; el Dsoki, C.; Kaufmann, H.; Krug, P.: New method for evaluation of the Manson-Coffin-Basquin and Ramberg-Osgood equations with respect to compatibility. *International Journal of Fatigue*, Nr. 30, 2008, S. 1967 – 1977
- /Pal26/ Palmgren, A.: Die Lebensdauer von Kugellagern. In: *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*. Band 68, Nr. 14, 1924, S. 339–341.
- /Pit90/ H. Pitsch: „Die Entwicklung und Erprobung der Oberwellenanalyse im Zeitsignal der magnetischen Tangentialfeldstärke als neues Modul des 3MA-Ansatzes“, Kennziffer 900107-TW, 1990
- /Rad07/ Radaj, D.; Vormwald, M.: *Ermüdungsfestigkeit, Grundlagen für Ingenieure*. 3., neubearbeitete und erweiterte Auflage mit 453 Abbildungen, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, ISBN 978-3-540-71458-3, 2007
- /Ram43/ Ramberg, W; Osgood, W. R.: Description of stress–strain curves by three parameters. *NACA Techn. Rep. 902*, NACA, 1943
- /Rip01/ Ripka, P.: „Magnetic Sensors and Magnetometers“, Boston/London, Artech House, 2001
- /See77/ T. Seeger und A. Beste, „Zur Weiterentwicklung von Näherungsformeln für die Berechnung von Kerbbeanspruchungen im elastisch-plastischen Bereich (Improvement of approximation formulae for calculating notch stresses and strains in the elastic-plastic range),“ in *Fortschrittsbericht der VDI Zeitschriften: Kerben und Bruch (Notches and fracture)*, Reihe 18, Nr. 2, VDI-Verlag, 1977.
- /See96/ Seeger, T.: Grundlagen für Betriebsfestigkeitsnachweise. In: *Stahlbau-Handbuch – Für Studium und Praxis*, Band 1, Stahlbau-Verlagsgesellschaft, Köln, 1996

- /SEPO6/ Stahlinstitut VDEh: Prüf- und Dokumentationsrichtlinie für die experimentelle Ermittlung mechanischer Kennwerte von Feinblechen aus Stahl für die CAE-Berechnung. Stahl-Eisen-Prüfblatt SEP 1240, 1. Ausgabe, Düsseldorf, 2006
- /Sic16/ Sichala, P.: unverDROSSen – Beschreibung der Versuchsdurchführung. Friedrich Wilhelms-Hütte Eisenguss GmbH, 11.02.2016
- /Sie15/ Mikoleizik, P.; Bösch, D.; Howe, D.: Arbeitsbericht SGK-GE2015/09, Siempelkamp Gießerei, 2015
- /Sjo07/ Sjögren, T.: Influences of the Graphite Phase on Elastic and Plastic Deformation Behaviour of Cast Irons. Dissertation, School of Engineering, Jönköping University, 2007
- /Smi70/ Smith, K. N.; Watson, P.; Topper, T. H.: A stress-strain function for the fatigue of metals. *Journal of Materials*, 5, Nr. 4, 1970, S. 767 – 778
- /So05a/ Sonsino, C. M.; Berg, A.; Grubišić, V.: Betriebsfestigkeit von Aluminium-Sicherheitsbauteilen – Stand der Technik. *Materialprüfung* 47 (7-8), S. 404-409, 2005.
- /So05b/ Sonsino, C. M.: „Dauerfestigkeit“ – Eine Fiktion. *Konstruktion*, 57, Nr. 4, 2005, S. 87 – 92
- /Son07/ Sonsino, C. M.: Course of SN-curves especially in the high-cycle fatigue regime with regard to component design and safety. *International Journal of Fatigue*, Nr. 29, 2007, S. 2246 – 2258
- /Son08/ Sonsino, C. M.: Betriebsfestigkeit – Eine Einführung in die Begriffe und ausgewählte Bemessungsgrundlagen. *MP Materials Testing*, Hanser Verlag, 50, Nr. ½, 2008, S. 77 – 90
- /Son10/ Sonsino, C. M.: Vorlesungs-Skript Betriebsfestigkeit – Bauteilauslegung unter Schwingbeanspruchung mit konstanten und variablen Amplituden. Technische Universität Darmstadt, Sommersemester, 2010
- /Son90/ Sonsino, C. M.; Kaufmann, H.; Engels, A.: Schwingfestigkeit von festgewalzten, induktionsgehärteten sowie kombiniert behandelten Eisen-Graphit-Gußwerkstoffen unter konstanten und zufallsartigen Belastungen. Sonderdruck aus „Giessereiforschung“, 42, Nr. 3, 1990, S. 110 – 121
- /Spi78/ Spindel, J. E.; Haibach, E.: The method of maximum likelihood applied to the statistical analysis of fatigue data including run-outs. S.E.E. International Conference, University of Warwick, Coventry, 3. bis 6. April, 1979, S. 7.1 – 7.23
- /Tsc11/ Tschuncky, Ralf: „Sensor- und geräteunabhängige Kalibrierung elektromagnetischer zerstörungsfreier Prüfverfahren zur praxisorientierten Werkstoffcharakterisierung“, Saarbrücken, 2011. (Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät III Chemie, Pharmazie, Bio- und Werkstoffwissenschaften der Universität des Saarlandes, Dissertation, 2011)
- /VDM13/ VDMA 23902:2013-10: Leitlinie für den bruchmechanischen Nachweis von Planetenträgern aus EN-GJS-700-2 für Getriebe von Windenergieanlagen. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA), 2013.
- /Vor89/ Vormwald, M. Anrißlebensdauervorhersage auf der Basis der Schwingbruchmechanik kurzer Risse, 1989.

-
- /Wag07/ | Wagener, R. W.: Zyklisches Werkstoffverhalten bei konstanter und variabler Beanspruchungsamplitude, Dissertation, Clausthal-Zellerfeld, Papierflieger, 2007
- /Wei07/ | Weiss, P: „L’Hypothese du Champ Moléculaire et de la Propriété Ferromagnétique“, Journal de Physique 6, S. 661-690, 1907
- /Who11/ | Wohlfahrt, M.; Oberwinkler, C.; Tunzini, S.; Rauscher, A.; de la Prida Caballero, R.; Eichelseder, W.: Einflüsse auf die Schwingfestigkeit von Gusseisen und deren Einbindung in die Berechnung der Bauteillebensdauer. VDI-Bericht 2122, Gießtechnik im Motorenbau – Anforderungen an die Automobilindustrie, VDI Verlag, 2011
- /Zen00/ | Zenner, H.; Esderts, A.; Pötter, K.; Hübner, K.; Traupe, M.: Betriebsfestigkeit I – Skript zur Vorlesung, Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit, Technische Universität Clausthal, 2000
- /ZLL16/ | Freyer: Prüfbericht 64516, Zentrallabor GmbH Leipzig, 07.06.2016
- /ZLL86/ | Freyer: Prüfbericht 66886, Zentrallabor GmbH Leipzig, 07.12.2016

14 Bildverzeichnis

Bild 1 Projektplan.....	5
Bild 2 Kenngrößen der Spannungs-Dehnungs-Hysterese in Anlehnung an /Hai06/	7
Bild 3 Bestimmung von K' und n' /Ble16/	8
Bild 4 Zyklische Spannungs-Dehnungskurve und Erstbelastungskurve für einen EN-GJS-400 /Ble16/	9
Bild 5 Darstellung der elastischen, plastischen und der summierten Dehnungswöhlerlinie.....	10
Bild 6 Regression über elastische Dehnungsanteile aus 179 Einzelversuchen	12
Bild 7 Werkstoffverhalten in den 3 Bereichen der elastischen Dehnungswöhlerlinie	12
Bild 8 Die tri-lineare Dehnungswöhlerlinie.....	13
Bild 9 Zyklische Spannungsdehnungskurven im Vergleich /Ble16/.....	13
Bild 10 Servo-hydraulische Prüfmaschine (63 kN Maximallast), Schwingprobe und zwei Dehnungsaufnehmer	14
Bild 11 Regression zwischen Dichte und fiktivem Elastizitätsmodul E_f /Ble16/	15
Bild 12 Ermittlung des hyperbolischen Elastizitätsmoduls nach /Sjo07/	16
Bild 13 Prinzip-Skizze eines magnetisierten ferromagnetischen Bauteils: Störung des Magnetfeldverlaufes durch einen rissartigen Fehler	17
Bild 14 MikroMach-Prüfgerät (Bauform E1030)	22
Bild 15 3MA-X8-Prüfgerät inklusive Sensor (Bauform 1030-X8) und Laptop mit Software zur Ansteuerung und Auswertung.....	23
Bild 16 Schwingfestigkeit und Mittelspannungsempfindlichkeit in Abhängigkeit von Ungängen nach /Kau98/.....	25
Bild 17 Versuchskörper nach dem Abguss (links) sowie Gießzeichnung (rechts /Sie15/).....	29
Bild 18 Bauteil für Kunststoffspritzgießmaschine aus EN-GJS-400-18 mit einer Gießmasse von ca. 22 t mit herausgetrennten Bauteilbereichen.....	31
Bild 19 Herausgetrennte und mit Dross behaftete Bauteilabschnitte	31
Bild 20 Mäanderförmiger Verfahrensweg während den mechanisierten Ultraschallprüfungen	34
Bild 21 Zuordnung der US-Amplitude im A-Bild als farbcodierter Wert	35
Bild 22 Erläuterung zur Darstellung in Form von B-, C- und D-Bildern	35
Bild 23 Ultraschalluntersuchungen; Einschallung von der Dross-Gegenseite. Prüfkopf: B1S. Versuchskörper: MAN 5261600	36
Bild 24 Beispiel zum Erzeugen der C-Bilder bei der Auswertung der Rückwandabschattung im Vergleich zum vorherigen Vorgehen bei der mechanisierten Ultraschall-Prüfung.....	37
Bild 25 Links: Foto der überfrästen Oberfläche des geviertelten Versuchskörpers MAN 5261600 (Teilsegment Nr. 1-4); Rechts: Reduzierte Versuchskörperhöhe (zuvor ca. 200 mm nach Bearbeitung ca. 68 mm).....	38

Bild 26	Ultraschalluntersuchungen; Einschallung von der Dross-Gegenseite, Prüfkopf: B2S, Versuchskörper: Teilsegment von MAN 5261600; Links: C-Bild Blende: 30,99 - 65,11 mm; Rechts : C-Bild Auswertung Rückwandabschattung Blende: 65,11 - 80 mm	38
Bild 27	Ultraschalluntersuchungen von der Dross-Gegenseite bzw. Schnittfläche (oben rechts, Prüfkopf: B1S) und von der Gießoberseite bzw. Dross-Seite (unten rechts, Prüfkopf: SEB1). Versuchskörper: MAN 5261600	39
Bild 28	Ultraschalluntersuchungen; Prüfkopf: B2S, Versuchskörper: Teilsegment von MAN 5261600; Links: C-Bild Einschallung von der Dross-Gegenseite, Blende: 30,99 - 65,11 mm; Rechts : C-Bild Auswertung Rückwandabschattung bei Einschallung von der Dross-Seite, Blende: 65,11 - 80 mm40	
Bild 29	Ultraschalluntersuchungen; Prüfkopf: B2S, Versuchskörper: Teilsegment von MAN 5261600; Links: C-Bild Einschallung von der Dross-Gegenseite, Blende: 30,99 - 65,11 mm; Mitte: C-Bild Auswertung Rückwandabschattung bei Einschallung von der Dross-Gegenseite, Blende: 65,11 - 80 mm; Rechts: C-Bild Auswertung Rückwandabschattung bei Einschallung von der Dross- Seite, Blende: 65,11 - 80 mm	41
Bild 30	Links: Set-up der mikromagnetischen 3MA-Prüfung mittels mechanisierter Datenaufnahme, MikroMach-Prüfgerät; Rechts: Detailaufnahme des auf die Versuchskörperoberfläche aufgesetzten MikoMach-Prüfsystems.....	42
Bild 31	Magnetische 3MA-Untersuchungen mittels mechanisierter Datenaufnahme von der Dross-Seite (oben); Ultraschalluntersuchungen (C-Bild) von der Dross-Seite (unten links) und Ultraschalluntersuchung (C-Bild) von der Dross-Gegenseite (unten rechts). Versuchskörper: MAN 5261600	43
Bild 32	Unbearbeiteter Versuchskörper nach der Magnetpulverprüfung mit Methode schwarz/weiß und einer unzulässigen Anzeige	45
Bild 33	Versuchskörper nach der Magnetpulverprüfung mit Methode schwarz/weiß mit linien- und kreisförmigen Drossanzeigen	45
Bild 34	Versuchskörper mit linien- und wurmförmigen Drossanzeigen	45
Bild 35	Bauteilabschnitt von FWH bei der fluoreszierenden Magnetpulverprüfung	46
Bild 36	Links: Set-up der magnetischen Streufluss-Prüfung mittels mechanisierter Datenaufnahme; Rechts: Detailaufnahme des verwendeten Elektromagneten mit abgeschrägten Polschuhen und des mittig zwischen den Polschuhen positionierten flexiblen Hall-Sonden-Trägers	48
Bild 37	Magnetische Streufluss-Prüfung mittels mechanisierter Datenaufnahme von der Dross-Seite (oben); Ultraschalluntersuchungen (C-Bild) von der Dross-Seite (unten links) und Ultraschalluntersuchung (C-Bild) von der Dross-Gegenseite (unten rechts). Versuchskörper: MAN 5261600	48
Bild 38	Versuchskörper 8 von Partner Siempelkamp mit eingezeichneter Probenlage	50
Bild 39	Bauteilabschnitt von Partner FWH mit eingezeichneter Probenlage	51
Bild 40	Runde Schwingprobe für Dross und Referenzversuche, $d = 8$ mm, ungekerbt, $K_t = 1,12$, $HBV_{90\%,NH} \approx 4.590$ mm ³	52

Bild 41 Aus der Röntgen-Computertomographie rekonstruiertes Summenbild einer Schwingprobe ohne Dross (oben) sowie mit Dross (unten)	54
Bild 42 Beispiele der Baumann-Abdrücke	55
Bild 43 Vergleich Ergebnis MT-Aufnahme und Baumann-Abdruck	56
Bild 44 Vergleich der zyklischen Spannungs-Dehnungskurven und der tri-linearen Dehnungswöhlerlinien für den EN-GJS-400-15 (SR01, MANR01 und FWHR01) aus den Versuchskörpern sowie den EN-GJS-400-18 (FWHR03) für die Bauteilabschnitte	57
Bild 45 Auswertung des fiktiven Elastizitätsmoduls für die untersuchten Schwingproben mit und ohne Dross	58
Bild 46 Vergleich der Kraft-Dehnungshysteresen	59
Bild 47 Schwingprobe mit den nach der Schwingprüfung abgetrennten Probenprüfbereichen	60
Bild 48 Vergleich der Dichte zum fiktiven Elastizitätsmodul (einseitige Messung der Dehnung)	60
Bild 49 Vergleich der Dichte zum gemittelten, fiktiven Elastizitätsmodul (beidseitige Messung der Dehnung)	61
Bild 50 Vergleich der Dichte zum gemittelten, fiktiven Elastizitätsmodul ohne Berücksichtigung von Ausreißen (beidseitige Messung der Dehnung)	61
Bild 51 Schwingproben mit und ohne Dross nach der Prüfung mit Bruchlage im Prüfbereich (oben) und im Übergangsbereich (Mitte) bzw. Einspannbereich (unten)	62
Bild 52 Einzelergebnisse der Schwingproben mit Dross im Vergleich zur Schwingfestigkeit des Grundwerkstoffs	63
Bild 53 Schwingprobe mit deutlicher Materialtrennung in der Durchstrahlung	63
Bild 54 Wöhlerlinie für den ungespannten Werkstoffzustand für den EN-GJS-400	64
Bild 55 Ermittlung der Kerbwirkungszahl des Drosses K_{fD}	66
Bild 56 Abhängigkeit der Kerbwirkungszahl des Drosses K_{fD} vom fiktiven Elastizitätsmodul E_f	66
Bild 57 Gegenüberstellung aller untersuchter Schwingproben: Graphitform	68
Bild 58 Gegenüberstellung aller untersuchter Schwingproben: Graphitgröße	68
Bild 59 Gegenüberstellung aller untersuchter Schwingproben: Nodularitätskennzahl	68
Bild 60 Gegenüberstellung aller untersuchter Schwingproben: Nodularität	69
Bild 61 Gegenüberstellung aller untersuchter Schwingproben: Ferrit- / Perlit- und Graphitanteil	69
Bild 62 Einteilung des Drosses /Weh16/	70
Bild 63 Erscheinungsformen des Drosses nach /Din17/	71
Bild 64 Verteilung des Magnesiums und des Kohlenstoffs in der Drosserscheinungsform „string shaped“ /Din17/	72
Bild 65 Zur Dichtebestimmung aus dem TK39455-2 Versuchskörper entnommene Stäbe	76
Bild 66 UT-Messung des Versuchskörpers TK39455-2 mit Probenposition	77
Bild 67 Schematische Darstellung des ausgewertet Voxel der UT-Messung	77

Bild 68 Vergleich zwischen lokale Dichte und lokaler Rückwandabschattung am Versuchskörper TK39455-2	78
Bild 69 Schritte zur Aufbereitung der CT-Daten.....	79
Bild 70 Schliffbild mit Gitter zur Darstellung der Voxelgröße (Probe S7-1-10)	80
Bild 71 Vergleich der mit CT-Scan und der mittels Wägung ermittelten Dichten	81
Bild 72 Beispielhafter Vergleich zwischen einem CT-Scan und dem realen Prüfbereich einer Probe.....	81
Bild 73 Dichteverteilung im Prüfbereich der Reineisenprobe	82
Bild 74 Entnahmepositionen der Rundstäbe	83
Bild 75 CT-Scan eines Rundstabes zur Ermittlung der Tiefenausdehnung des Drosses.....	84
Bild 76 Probenpositionen und UT-Messungen (3. Viertel)	84
Bild 77 Tiefenausdehnung des Drosses, UT-Messung vs. CT-Scan.....	85
Bild 78 Tiefenausdehnung des Drosses, UT-Messung vs. CT-Scan aller Proben	85
Bild 79 CT-Aufnahme der Probe Siempelkamp S4-1-6, Ausgabe als stl-Datei, Dross in hell lila als flächige Shell Elemente.....	87
Bild 80 Synthetisch erstellter Dross für die Berechnung in der Finite-Elemente Methode.....	88
Bild 81 Dross innerhalb eines Prüfvolumens mit Randbedingungen	89
Bild 82 Spannungsverteilung an der Grenzfläche zwischen Grundwerkstoff und Dross mit $E_{Dross} = 23 \text{ GPa}$	90
Bild 83 Spannungsverteilung an der Grenzfläche zwischen Grundwerkstoff und Dross mit $E_{Dross} = 110 \text{ GPa}$	91
Bild 84 Spannungsverteilung an der Grenzfläche zwischen Grundwerkstoff und Dross mit $E_{Dross} = 150 \text{ GPa}$	91
Bild 85 Aufteilung in des Drosses in drei Bereiche	92
Bild 86 Spannungsverteilung an der Grenzfläche zwischen Grundwerkstoff, Drossschale und Drosskern mit $E_{Drossschale} = 150 \text{ GPa}$ und $E_{Drosskern} = 110 \text{ GPa}$	92
Bild 87 Spannungsverlauf entlang eines Pfades aus dem Grundwerkstoff über die Drossschale bis hin zum Drosskern	93
Bild 88 Spannungsüberhöhung am Übergang von Grundwerkstoff zum Dross und von Grundwerkstoff in die Drossschale weiter in den Drosskern (grün) in Folge unterschiedlicher Annahmen des E- Moduls des Dross bzw. der Drossschale und des Drosskerns.....	94
Bild 89 Spannungsüberhöhung im Dross in Folge des Steifigkeitsunterschieds zum Grundwerkstoff ..	95
Bild 90 Viertelmodell einer Presse aus Gusseisen mit Drossfeld an detektierter Position	95
Bild 91 Vereinfachte Drossgestalten mit unterschiedlich scharfer Gestalt	96
Bild 92 Spannungsfeld ohne eingebrachten Dross, Vergleichswert	96
Bild 93 Spannungsfelder durch Kombination unterschiedlicher Drossformen und E-Moduli, Darstellung der Spannungsspitzenwerte	97

Bild 94 Spannungsfelder durch Kombination unterschiedlicher Drossformen und E-Moduli, Spannungen im Grundwerkstoff, ausgeblendeter Dross.....	98
Bild 95 Spannungsverlauf entlang eines Pfades durch Dross und Grundwerkstoff in die Bohrung hinein für die Drossgestalt V_1	99
Bild 96 Spannungsverlauf entlang eines Pfades durch Dross und Grundwerkstoff in die Bohrung hinein für die Drossgestalt V_2	99
Bild 97 Spannungsverlauf entlang eines Pfades durch Dross und Grundwerkstoff in die Bohrung hinein für die Drossgestalt V_3	99
Bild 98 Experimentelle und rechnerische Schwingfestigkeit der Schwingproben mit Dross	101
Bild 99 Anzahl der Proben nach Dichteklasse	103
Bild 100 Skalierungsfaktoren in Abhängigkeit der Dichte	104
Bild 101 Vergleich der synthetischen Dehnungswöhlerlinien ($P_0 = 50\%$) mit den Versuchspunkten ..	104
Bild 102 Streuband in Abhängigkeit der Schwingspielzahlklasse (ungänzenfreie Versuche)	106
Bild 103 Streuband in Abhängigkeit der Schwingspielzahl	106
Bild 104 Konstantes Streuband vs. schwingspielzahlabhängiges Streuband	107
Bild 105 Vergleich der schwingspielzahlabhängigen Streubänder.....	108
Bild 106 Anteil der Konzeptstreuung an der Werkstoffstreuung und Konzeptstreuung	108
Bild 107 Dehnungswöhlerlinien und Spannungs-Dehnungskurven für den Dross und den Grundwerkstoff (ohne Sicherheitsfaktoren)	111
Bild 108 Spannungswöhlerlinien für den Dross und den Grundwerkstoff (ohne Sicherheitsfaktoren)	111
Bild 109 Spannungs und Dehnungsamplituden für die Schwingfestigkeitsbewertung und FE-Berechnung zum Dross	112

15 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Aufgabenverteilung innerhalb des Vorhabens	26
Tabelle 2 Die chemische Zusammensetzung der Versuchskörper /Sie15/	30
Tabelle 3 Chemischen Zusammensetzung des Bauteils.....	30
Tabelle 4 Versuchskörper und Bauteile mit Beschriftung.....	32
Tabelle 5 Übersicht der angewendeten zFP-Verfahren an den jeweiligen Prüfkörpern.....	33
Tabelle 6 Anwendbarkeit und Randbedingungen der Prüfverfahren	49
Tabelle 7 Nomenklaturen der Probenbeschriftung für die Versuchskörper und Bauteile.....	51
Tabelle 8 Quasistatische Materialkennwerte des untersuchten Werkstoffes ohne Dross.....	53
Tabelle 9 Quasistatische Materialkennwerte der untersuchten Werkstoffe mit Dross	53
Tabelle 10 Schliffbilder (Durchschnittswerte aus jeweils 4 Schliffen)	67
Tabelle 11 Erscheinungsformen des Drosses nach /Din17/	70
Tabelle 12 Verwendete E-Moduln im Drosswerkstoff und im Grundwerkstoff	89
Tabelle 13 Beanspruchung im Grundwerkstoff und Dross in Folge unterschiedlicher E-Moduln	94
Tabelle 14 Bezogene Merkmalsgröße zu ausgewählten Überlebenswahrscheinlichkeiten /Hai06/	105
Tabelle 15 Vergleich der Eckwerte der Beanspruchbarkeit (ohne Sicherheitsbetrachtung).....	110
Tabelle 16 Berücksichtigte Kennwerte und Ergebnisse der Schwingfestigkeitsbewertung	113

16 Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

3MA	Mikromagnetische Multiparameter- Mikrostruktur- und Spannungsanalyse
ADI	Austempered Ductile Iron (Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit)
BZF	Beanspruchungszeitfunktion
C	Kohlenstoff
CT	Computer Tomographie
Cu	Kupfer
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EN	Europäische Norm
FKM	Forschungskuratorium Maschinenbau
HBV	höchstbeanspruchtes Werkstoffvolumen
GJS	Gusseisen mit Kugelgraphit (neue Bezeichnung)
GL	Germanischer Lloyd
ISO	International Organization for Standardization
Mg	Magnesium
Mn	Mangan
MW	Megawatt
Ni	Nickel
P	Phosphor
S	Schwefel
Si	Silizium
UT	Ultraschall-Prüftechnik
WEA	Windenergieanlage
zfP	Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
a	mm	Halbachsenlänge der Ellipse
b	mm	Halbachsenlänge der Ellipse
b, b_1, b_2, b_3	-	Zyklischer Spannungsexponent
c	-	Zyklischer Dehnungsexponent
d	mm, m	Prüfdurchmesser
f	Hz, 1/s	(Prüf-)frequenz
$f_E, f_{\sigma}, f_{\sigma'}$	-	Skalierungsfaktoren der synthetischen Dehnungswöhlerlinie
$j_{c,n}$	-	Sicherheitszahl zur Berücksichtigung der Vertrauenswahrscheinlichkeit
j_w, j_{σ}	-	Sicherheitszahl zur Berücksichtigung der Werkstoff- und Versuchsstreuung
k	-	Wöhlerlinienneigung im Bereich der Zeitfestigkeit
\bar{k}	-	Gaßnerlinienneigung im Bereich der Zeitfestigkeit
k^*	-	Wöhlerlinienneigung im Bereich der Langzeitfestigkeit
l	mm, m	Länge
m	kg, t	Masse
n'	-	zyklischer Verfestigungsexponent
r	mm, m	(Kerb-)Radius
v	-	Kollektivformparameter, Neigung im Diagramm des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens (Volumenexponent)
A, A_5	%	Bruchdehnung
D	-	Schadenssumme
D_{krit}	-	kritische Schadenssumme
E	GPa	Elastizitätsmodul
F	N	Kraft
H	-	Summenhäufigkeit
H_0	-	Kollektivumfang
$HBV_{90\%}$	mm^3	höchstbeanspruchtes Werkstoffvolumen für 90% der maximalen Spannung
K_V	[J]	Kerbschlagarbeit
K'	GPa	zyklischer Verfestigungskoeffizient

K_t	-	Kerbformzahl
M	-	Mittelspannungsempfindlichkeit
N, N_B, N_i	-	Schwingspielzahl
N_{BL}	-	Schwingspielzahl der Beanspruchungszeitfunktion
N_k	-	Schwingspielzahl am Abknickpunkt
N_G	-	Grenzschwingspielzahl
$N_{S-el-pl}$	-	Lebensdauer am Schnittpunkt von elastischer und plastischer Dehnungswöhlerlinie
N_G	-	Grenzschwingspielzahl
P_i, P_{ges}	-	Wahrscheinlichkeit
P_{SWT}	%	Schädigungsparameter nach Smith, Watson und Topper
$P_{\bar{U}}$	-	Überlebenswahrscheinlichkeit
$R, \bar{R}, R_\epsilon, R_\sigma$	-	Lastverhältnis
R_m	MPa	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	MPa	0,2 %-Dehngrenze
$R'_{p0,2}$	MPa	zyklische 0,2 %-Dehngrenze
R_z	μm	mittlere Rauheit
T	s	Periode / Schwingspiel / Temperatur
T_ϵ	-	Streuband in Dehnungsrichtung
T_N	-	Streuung in Lebensdauerrichtung
T_σ	-	Streuung in Spannungsrichtung
\bar{T}_ϵ	-	Streumaß Gaßnersversuch in Dehnungsrichtung
V	mm^3	Volumen
Z	%	Brucheinschnürung
$\Delta\sigma$	MPa	Schwingbreite
$\Delta\epsilon$	%	Dehnungsschwingbreite
ϵ	%	Dehnung
$\epsilon_a, \bar{\epsilon}_a$	%	Dehnungsamplitude
$\epsilon_{a,BL}$	%	Dehnung durch die Betriebslast
$\epsilon_{a,t}, \epsilon_t$	%	Totaldehnung
$\epsilon_{a,\bar{U}L}$	%	Dehnung durch die Überlast

$\epsilon_{a,e}$	%	elastische Dehnungsamplitude
$\epsilon_{a,p}$	%	plastische Dehnungsamplitude
ϵ_e	%	elastische Dehnung
ϵ'_f	%	zyklischer Dehnungskoeffizient
ϵ'_{fs}	%	Dehnungsamplitude am Schnittpunkt von elastischer und plastischer Dehnungswöhlerlinie
ϵ_{lin}	%	örtliche Dehnung bei linear-elastischer Maximalspannung
ϵ_m	%	Mitteldehnung
ϵ_p	%	plastische Dehnung
ρ	g/cm ³	Dichte
σ_1	MPa	Erste Hauptspannung
$\sigma_a, \overline{\sigma_a}, \sigma_{a,GW}, \sigma_{a,D}$	MPa	Spannungsamplitude
$\sigma'_f, \sigma'_{f1}, \sigma'_{f2}, \sigma'_{f3}$	MPa	Zyklischer Spannungskoeffizient
σ_m	MPa	Mittelspannung, Mittelspannungsamplitude
σ_{max}	MPa	Spannungsüberhöhung
σ_{min}	MPa	minimale Spannung
σ_{om}	MPa	Spannungsamplitude der Omission
χ	-	Spannungsgradient
χ^*	1/MPa	bezogener Spannungsgradient

Anhang T

Tabellen

Inhalt	Tabelle	Seite
Versuchsmatrix	Tabelle T 1	T 2
Ermittelte, probenspezifische Daten	Tabelle T 2	T 3 bis T 4
Zusammenfassung der Wöhlerlinienparameter	Tabelle T 3; Tabelle T 4	T 5
Einzelversuchsergebnisse der Wöhlerlinien	Tabelle T 5 bis Tabelle T 8	T 6 bis T 9

Tabelle T 1 Versuchsmatrix

Ver- suchsreihe	Versuchsart	Dross	Werkstoff	Entnahmeort
SR01	DWL	-	EN-GJS-400-15	Versuchskörper
MANR01	DWL	-	EN-GJS-400-15	Versuchskörper
FWHR01	DWL	-	EN-GJS-400-15	Versuchskörper
FWHR03	DWL	-	EN-GJS-400-18	Bauteilsegment
SR02	DWL	Dross	EN-GJS-400-15	Versuchskörper
MANR02	DWL	Dross	EN-GJS-400-15	Versuchskörper
FWHR02	DWL	Dross	EN-GJS-400-15	Versuchskörper
FWHR04	DWL	Dross	EN-GJS-400-18	Bauteilsegment

Tabelle T 2 Ermittelter fiktiver Elastizitätsmodul, ermittelte Dichte ρ , Dehnungsamplitude aus dem Schwingversuch und rechnerische Spannungsamplitude

Probe	Fiktiver Elastizitätsmodul E_f	Dichte ρ	Dehnungsamplitude	Spannungsamplitude	Lebensdauer
	[GPa]	[g/cm ³]	[%]	[MPa]	[-]
S4-1-4	keine Daten	6,75	-	-	-
S4-1-6	71,5	6,66	0,05	35,7	23.504
S4-1-8	107,0	6,73	0,12	128,4	1.112
S4-1-9	103,2	6,78	0,06	61,9	56.299
S4-1-11	171,4	7,02	0,12	205,7	5.161
S4-1-13	168,4	7,03	0,06	101,1	193.994
S4-1-16	112,8	6,93	0,09	101,5	14.517
S4-1-20	18,4	6,57	0,05	9,2	0
S4-1-21	175,4	7,10	0,12	210,4	35.705
S4-1-22	154,7	7,08	0,05	77,4	5.000.000
S4-1-23	91,5	6,59	0,06	54,9	8.632
S7-1-1	167,5	7,06	0,07	117,3	458.641
S7-1-2	145,5	7,10	0,15	218,3	3.405
S7-1-3	89,0	7,12	0,50	445,1	877
S7-1-4	121,0	7,03	0,09	108,9	129.136
S7-1-7	164,7	7,13	0,20	329,5	7.588
S7-1-8	161,7	7,10	0,60	-	181
S7-1-12	165,0	7,21	0,12	-	390
S7-2-8	168,0	7,06	0,09	-	425.490
S7-3-1	33,4	5,95	0,15	50,1	0
S7-3-2	30,9	6,36	0,09	27,8	0
S7-3-3	25,7	6,63	0,07	18,0	1
S7-3-4	8,3	6,55	0,07	5,8	3
S7-3-8	156,1	7,05	1,00	-	84
S7-3-10	161,1	7,04	0,60	-	134
S7-3-11	159,2	7,04	2,00	-	18
S7-4-1	keine Daten	6,60	-	-	-
S7-4-3	121,9	6,83	0,15	182,9	995
S7-4-4	141,1	7,04	0,09	126,9	65.202
S7-4-6	157,5	7,15	0,07	110,2	36.082
S7-4-10	159,5	7,06	0,80	-	90
S7-4-12	150,4	7,10	0,40	-	390
S8-1-1	174,9	7,03	0,06	104,9	1.396.703
S8-1-2	184,3	7,08	0,09	165,9	29.054
S8-1-4	68,3	6,90	0,20	136,5	158
S8-1-14	63,1	6,88	0,20	126,2	141
S8-1-15	117,1	7,24	0,09	105,4	138.292
S8-1-20	168,2	7,19	0,08	134,5	87.853
S8-1-21	162,6	7,07	0,08	130,1	367.881
S8-1-22	157,9	7,07	0,05	78,9	3.064.348
S8-1-23	174,5	7,11	0,12	209,3	40.720
S9-1-2	167,3	7,05	0,06	100,4	423.324
S9-1-4	161,3	7,04	0,12	193,6	8.159
S9-1-5	144,9	7,14	0,08	115,9	5.471
S9-1-8	keine Daten	6,64	-	-	-
S9-1-9	112,1	6,99	0,09	100,9	82.679
S9-1-12	141,0	6,78	0,04	56,4	-
S9-1-13	150,0	7,11	0,20	299,9	-
S9-1-17	21,8	6,76	0,08	17,4	1
S11-1-2	96,9	6,84	0,12	116,3	20.135
S11-1-3	50,5	6,77	0,15	75,8	1
S11-2-1	94,0	7,03	0,15	141,0	634
S11-2-2	120,7	6,92	0,15	181,1	555
S11-2-4	133,3	6,98	0,07	93,3	961.412

Probe	Fiktiver Elastizitätsmodul E_f	Dichte ρ	Dehnungs- amplitude	Spannungs- amplitude	Lebensdauer
	[GPa]	[g/cm ³]	[%]	[MPa]	[-]
S11-3-1	166,3	7,05	0,07	116,4	83.534
S11-3-3	166,2	7,03	0,07	116,4	185.199
S11-3-4	162,0	6,98	0,07	113,4	81.253
S11-4-2	15,0	6,64	0,82	123,2	1
S11-4-5	85,2	6,84	0,08	68,1	421.641
FWH-GW-1.4	174,7	7,05	0,12	-	62.786
FWH-GW-1.11	173,1	7,01	0,15	-	5.586
FWH-GW-2.2	174,2	7,10	1,00	-	44
FWH-GW-2.9	169,4	7,03	1,00	-	47
FWH-GW-2.12	172,0	7,03	0,20	-	3.571
FWH-GW-2.13	166,8	-	0,20	-	13.058
791-2-14	166,6	6,98	0,12	-	87.278
790-1-11	190,6	7,08	0,10	-	201.879
790-1-13	173,7	7,05	0,36	-	728
791-2-6	187,6	7,03	0,20	-	3.202
791-2-7	184,9	7,06	0,80	-	113
1.2-2-1	188,8	7,04	0,60	-	153
1.2-2-11	198,7	6,99	0,40	-	546
S1-2-4	170,9	7,09	0,12	-	72.074
790-1-3	163,5	7,01	0,15	245,3	1.620
790-1-4	151,0	6,94	0,12	181,2	211.555
790-1-6	115,5	-	0,12	138,6	27.483
791-1-10	165,9	-	0,09	149,3	1405174
790-1-7	162,4	7,01	0,15	243,6	6.691
791-1-14	159,0	6,98	0,07	111,3	3.732.285
791-1-15	163,8	6,98	0,08	131,0	154.548
791-1-18	155,7	6,94	0,09	140,1	707.830
1.2-1-4	keine Daten	-	0,12	-	194.633
1.2-1-5	165,3	7,00	0,12	198,3	20.160
S1-1-2	100,5	6,68	0,04	40,2	1.511.061
S1-1-6	160,4	7,07	0,08	128,3	348.168
S1-2-2	167,8	-	0,08	134,2	891.539
S1-3-2	155,2	7,05	0,08	124,2	492.353
S1-3-4	97,6	6,82	0,06	58,6	58.783
S1-3-5	98,5	6,82	0,06	59,1	1.336.680
S1-3-6	102,3	6,78	0,06	61,4	494.722
S1-3-8	119,4	6,90	0,12	143,3	1.949
S1-4-2	112,0	6,87	0,06	67,2	1.601.310
1.2-1-10	164,0	-	0,12	196,8	18.123
1.2-1-13	keine Daten	-	-	-	-
1.2-1-16	157,3	-	0,10	157,3	716.337
1.2-1-1	162,1	-	0,15	243,2	20.603
791-1-19	122,4	-	0,07	85,7	330.487
791-1-1	77,0	-	0,05	38,5	4
791-1-2	129,8	-	0,05	64,9	3.708.834
791-2-13	182,1	-	1,00	1.821,3	64
791-1-25	keine Daten	-	0,15	-	10.894
791-1-17	163,53	-	0,07	114,5	1.160.734
791-1-26	163,85	7,05	0,15	245,8	1.950
FWH-GW-2.13	166,7	7,01	0,20	333,4	13.058
FWH-D-1.11	127,3	6,68	0,08	101,8	24.410
FWH-D-1.12	139,0	6,80	0,06	83,4	1.354.167
FWH-D-1.13	133,7	6,69	0,06	80,2	99.139
FWH-D-1.7	129,7	6,76	0,08	103,8	1.948
FWH-D-1.8	141,5	6,84	0,06	84,9	376.541
FWH-D-1.9	134,0	6,77	0,08	107,2	49.608
FWH-D-2.1	88,3	6,40	0,04	35,3	3.965.865
FWH-D-2.10	122,4	6,61	0,06	73,4	7.000.000
FWH-D-2.12	136,3	6,82	0,08	109,0	1.220
FWH-D-2.2	91,8	6,38	0,04	36,7	129.733
FWH-D-2.6	87,2	6,44	0,06	52,3	109
FWH-D-2.7	113,1	6,53	0,06	67,9	73
FWH-D-2.8	119,3	6,71	0,08	95,4	136.055
791-1-38	156,3	6,97	0,12	187,5	53.981

Tabelle T 3 Parameter der Dehnungswöhlerlinien für die untersuchten Werkstoffe nach Coffin, Manson, Basquin, Morrow sowie Ramberg-Osgood

Versuchsreihe	Anzahl Einzelversuche	zyklische Kennwerte nach Coffin, Manson und Basquin				zyklische Kennwerte nach Ramberg, Osgood		
		Schwingfestigkeitskoeffizient σ'_f / [MPa]	Schwingfestigkeitsexponent b	Duktilitätskoeffizient ϵ'_f / [m/m]	Duktilitätsexponent c	Dehngrenze $R'_{p0,2}$ / [MPa]	Verfestigungskoeffizient K' / [MPa]	Verfestigungsexponent n'
SR01	22	626,7	-0,1038	0,1277	-0,6475	322,0	871,8	0,1604
MANR01	16	684,7	-0,1022	0,3599	-0,7993	352,0	780,3	0,1279
FWHR01	13	780,6	-0,1177	0,3149	-0,7993	365,0	928,9	0,1505
FWHR03	16	683,0	-0,0952	0,1515	-0,7137	357,0	828,9	0,1334

Tabelle T 4 Parameter der Dehnungswöhlerlinien für die untersuchten Werkstoffe nach Wagener sowie Ramberg-Osgood

Versuchsreihe	Anzahl Einzelversuche	zyklische Kennwerte der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie nach Wagener				zyklische Kennwerte nach Ramberg, Osgood		
		Schwingfestigkeitskoeffizient $\sigma'_{f1}; \sigma'_{f2}; \sigma'_{f3}$ / [MPa]	Schwingfestigkeitsexponent $b_1; b_2; b_3$	Duktilitätskoeffizient ϵ'_f / [m/m]	Duktilitätsexponent c	Dehngrenze $R'_{p0,2}$ / [MPa]	Verfestigungskoeffizient K' / [MPa]	Verfestigungsexponent n'
SR01	22	460,3; 676,2; 187,3	-0,0568; -0,1082; -0,0222	0,1277	-0,6475	341,0	587,2	0,0877
MANR01	16	455,2; 873,7; 209,4	-0,0339; -0,1198; -0,0222	0,1055	-0,5677	359,0	521,0	0,0598
FWHR01	13	452,2; 1207; 187,3	-0,0321; -0,1469; -0,0222	0,1085	-0,5936	364,0	509,9	0,0541
FWHR03	16	604,3; 898,9; 210,3	-0,0902; -0,1201; -0,0222	0,1839	-0,7468	350,0	741,4	0,1207

Tabelle T 5 Einzelergebnisse der Dehnungswöhlerlinie SR01 (EN-GJS-400-15), Siempelkamp, $R_{\epsilon} = -1$

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Dehnung [%] bei N/2			Dehnungsverhältnis $R_{\epsilon} = \epsilon_u/\epsilon_o$	Versuchsfrequenz [Hz]	Spannung [MPa]		Spannungsverhältnis $R_{\sigma} = \sigma_u/\sigma_o$	Schwingspielzahl		Bemerkung, Risslage
		$\epsilon_{a,t}$	$\epsilon_{a,p}$	$\epsilon_{a,e}$			σ_a (n = N/2)	σ_{max} (n = N/2)		N ₊	N _B	
SR01	S7-3-12_2,00%	2,000	1,753	0,247	-1	0,1	415,39	399,71	-1,08	4	6	B
SR01	S7-3-11_2,00%	2,000	1,756	0,244	-1	0,1	410,46	398,23	-1,06	15	18	B
SR01	S7-3-08_1,00%	1,000	0,770	0,230	-1	0,1	386,85	374,20	-1,07	68	84	B
SR01	S7-4-10_0,80%	0,800	0,578	0,221	-1	0,2	371,88	361,59	-1,06	75	90	B
SR01	S7-3-10_0,60%	0,600	0,386	0,214	-1	0,5	359,71	350,99	-1,05	110	134	B
SR01	S7-1-08_0,60%	0,600	0,383	0,217	-1	0,2	363,94	355,35	-1,05	152	181	D
SR01	S7-4-12_0,40%	0,400	0,202	0,198	-1	1,0	333,25	323,58	-1,06	340	390	B
SR01	S7-1-11_0,40%	0,400	0,200	0,200	-1	5,0	336,12	332,24	-1,02	459	594	C
SR01	S7-4-07_0,20%	0,200	0,027	0,174	-1	10,0	291,48	282,38	-1,06	2.589	2.859	E
SR01	S7-2-09_0,15%	0,150	0,003	0,147	-1	5,0	247,33	233,44	-1,12	69.852	77.430	C
SR01	S7-4-11_0,12%	0,120	0,000	0,120	-1	10,0	207,99	211,64	-0,97	45.958	48.919	C
SR01	S7-1-12_0,12%	0,120	0,000	0,120	-1	10,0	204,49	186,49	-1,19	15.895	177.396	B
SR01	S7-3-09_0,10%	0,100	0,000	0,100	-1	25,0	169,54	170,98	-0,98	315.624	341.877	C
SR01	S7-2-07_0,09%	0,090	0,000	0,090	-1	25,0	161,95	149,94	-1,16	389.562	434.190	B
SR01	S7-2-02_0,09%	0,090	0,000	0,090	-1	25,0	161,06	153,23	-1,10	259.652	298.445	B
SR01	S7-1-10_0,09%	0,090	0,004	0,086	-1	25,0	145,05	131,41	-1,21	601.589	372.350	C
SR01	S7-2-08_0,09%	0,090	0,000	0,090	-1	25,0	154,17	173,06	-0,78	375.862	425.490	B
SR01	S7-3-07_0,08%	0,080	0,002	0,077	-1	25,0	130,10	125,53	-1,07	10.000.000	10.000.001	Durchläufer
SR01	S7-4-14_0,07%	0,070	0,000	0,070	-1	5,0	125,49	150,75	-0,66	1259.621	1.394.303	C
SR01	S7-4-13_0,07%	0,070	0,000	0,070	-1	5,0	126,59	129,05	-0,96	895.624	1.019.821	C
SR01	S7-2-06_0,07%	0,070	0,000	0,070	-1	5,0	122,60	112,31	-1,18	10.000.000	10.000.001	Durchläufer
SR01	S7-2-10_0,06%	0,060	0,000	0,060	-1	3,0	103,54	102,62	-1,02	10.000.000	10.000.001	Durchläufer

Schwingprobe: b = 15 mm; d = 8 mm; l = 25 mm; Elastizitätsmodul: E = 168,000 GPa; Umgebung: Luft, T = 296 K; +) 10% Kraftabfall; Formzahl Kt = 1,05

Risslage: A = von der Walzoberfläche; B = zwischen den Schneiden; C = außerhalb der Schneiden; D = unter den Schneiden (oben); E = unter den Schneiden (unten)

Tabelle T 6 Einzelergebnisse der Dehnungswöhlerlinie MANR01 (EN-GJS-400-15), MAN, $R_\epsilon = -1$

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Dehnung [%] bei N/2			Dehnungsverhältnis $R_\epsilon = \epsilon_u/\epsilon_o$	Versuchsfrequenz [Hz]	Spannung [MPa]		Spannungsverhältnis $R_\sigma = \sigma_u/\sigma_o$	Schwingspielzahl		Bemerkung, Risslage
		$\epsilon_{a,t}$	$\epsilon_{a,p}$	$\epsilon_{a,e}$			σ_a (n = N/2)	σ_{max} (n = N/2)		N ₊	N _o	
MANR01	791-2-11_1,00%	1,000	0,765	0,235	-1	0,1	394,86	383,21	-1,06	40	45	B
MANR01	791-2-13_1,00%	1,000	0,767	0,233	-1	0,1	390,53	378,16	-1,07	55	64	B
MANR01	791-2-7_0,80%	0,800	0,572	0,228	-1	0,1	382,99	371,12	-1,06	100	113	B
MANR01	791-2-4_0,60%	0,600	0,383	0,217	-1	0,1	364,92	355,25	-1,05	185	204	B
MANR01	791-2-10_0,40%	0,401	0,190	0,211	-1	1,0	354,01	345,05	-1,05	580	667	B
MANR01	790-1-15_0,30%	0,301	0,093	0,208	-1	1,0	348,99	338,51	-1,06	1.958	2.265	C
MANR01	791-2-6_0,20%	0,200	0,018	0,182	-1	4,0	305,59	293,70	-1,08	2.850	3.202	B
MANR01	790-1-14_0,20%	0,199	0,016	0,184	-1	1,0	308,97	299,58	-1,06	6.258	7.053	B
MANR01	791-2-9_0,15%	0,150	0,000	0,150	-1	5,0	270,84	256,89	-1,11	14.589	16.686	C
MANR01	791-2-14_0,12%	0,120	0,000	0,120	-1	5,0	206,37	191,48	-1,16	78.596	87.278	B
MANR01	791-2-1_0,12%	0,120	0,000	0,120	-1	10,0	238,08	223,15	-1,13	42.589	47.488	C
MANR01	790-1-11_0,10%	0,100	0,000	0,100	-1	10,0	193,56	179,38	-1,16	185.962	201.879	B
MANR01	791-2-5_0,10%	0,100	0,000	0,100	-1	10,0	195,65	193,07	-1,03	122.585	135.387	C
MANR01	791-2-12_0,09%	0,090	0,000	0,090	-1	10,0	153,62	151,39	-1,03	1.859.621	1.913.411	C
MANR01	791-2-8_0,09%	0,090	0,000	0,090	-1	10,0	163,91	158,04	-1,07	958.620	1.053.424	D
MANR01	791-2-2_0,08%	0,080	0,000	0,080	-1	10,0	140,32	148,96	-0,88	10.0000000	10.000.001	Durchläufer

Schwingprobe: b = 15 mm; d = 8 mm; l = 25 mm; Elastizitätsmodul: E = 168,000 GPa; Umgebung: Luft, T = 296 K; +) 10% Kraftabfall; Formzahl Kt = 1,05

Risslage: A = von der Walzoberfläche; B = zwischen den Schneiden; C = außerhalb der Schneiden; D = unter den Schneiden (oben); E = unter den Schneiden (unten)

Tabelle T 7 Einzelergebnisse der Dehnungswöhlerlinie FWHR01 (EN-GJS-400-15),FWH, $R_{\epsilon} = -1$

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Dehnung [%] bei N/2			Dehnungsverhältnis $R_{\epsilon} = \epsilon_u/\epsilon_o$	Versuchsfrequenz [Hz]	Spannung [MPa]		Spannungsverhältnis $R_{\sigma} = \sigma_u/\sigma_o$	Schwingspielzahl		Bemerkung, Risslage
		$\epsilon_{a,t}$	$\epsilon_{a,p}$	$\epsilon_{a,e}$			$\sigma_a (n = N/2)$	$\sigma_{max} (n = N/2)$		N ₊	N ₀	
FWHR01	1-2-2-6-0,80%	0,800	0,569	0,231	-1	0,1	388,46	377,34	-1,06	68	78	B
FWHR01	1-2-2-10-0,60%	0,600	0,376	0,224	-1	0,1	376,28	366,09	-1,06	174	198	B
FWHR01	1-2-2-1-0,60%	0,600	0,378	0,222	-1	0,1	373,11	363,27	-1,05	135	153	B
FWHR01	1-2-2-11-0,40%	0,400	0,183	0,217	-1	0,5	363,88	355,09	-1,05	489	546	B
FWHR01	1-2-2-16-0,40%	0,400	0,184	0,216	-1	0,5	362,95	352,97	-1,06	443	483	B
FWHR01	1-2-2-12-0,20%	0,200	0,016	0,184	-1	1,0	309,33	298,63	-1,07	3.689	4.131	B
FWHR01	1-2-2-8-0,20%	0,200	0,014	0,186	-1	1,0	312,54	301,24	-1,08	14.895	16.054	D
FWHR01	1-2-2-5-0,12%	0,120	0,000	0,120	-1	10,0	225,81	205,78	-1,19	50.689	56.895	C
FWHR01	1-2-2-4-0,09%	0,090	0,000	0,090	-1	10,0	181,90	174,97	-1,08	225.618	250.168	B
FWHR01	1-2-2-14-0,08%	0,080	0,000	0,080	-1	10,0	153,35	143,96	-1,13	812.596	892.375	C
FWHR01	1-2-2-9-0,08%	0,080	0,000	0,080	-1	10,0	156,40	149,67	-1,09	589.654	654.994	C
FWHR01	1-2-2-2-0,07%	0,070	0,000	0,070	-1	25,0	132,30	123,91	-1,14	6.895.215	7.655.296	C
FWHR01	1-2-2-3-0,07%	0,070	0,001	0,069	-1	25,0	116,39	113,10	-1,06	10.000.000	10.000.001	Durchläufer

Schwingprobe: b = 15 mm; d = 8 mm; l = 25 mm; Elastizitätsmodul: E = 168,000 GPa; Umgebung: Luft, T = 296 K; +) 10% Kraftabfall; Formzahl Kt = 1,05

Risslage: A = von der Walzoberfläche; B = zwischen den Schneiden; C = außerhalb der Schneiden; D = unter den Schneiden (oben); E = unter den Schneiden (unten)

Tabelle T 8 Einzelergebnisse der Dehnungswöhlerlinie FWHR03 (EN-GJS-400-18), FWH, $R_{\epsilon} = -1$

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Dehnung [%] bei N/2			Dehnungsverhältnis $R_{\epsilon} = \epsilon_u/\epsilon_o$	Versuchsfrequenz [Hz]	Spannung [MPa]		Spannungsverhältnis $R_{\sigma} = \sigma_u/\sigma_o$	Schwingspielzahl		Bemerkung, Risslage
		$\epsilon_{a,t}$	$\epsilon_{a,p}$	$\epsilon_{a,e}$			σ_a (n = N/2)	σ_{max} (n = N/2)		N ₊	N _B	
FWHR03	FWH-GW-2.2_1,00%	1,000	0,755	0,245	-1	0,1	410,98	399,21	-1,06	40	44	D
FWHR03	FWH-GW-2.9_1,00%	1,000	0,753	0,246	-1	0,1	413,89	399,85	-1,07	41	47	B
FWHR03	FWH-GW-2.6_0,80%	0,800	0,565	0,235	-1	0,1	394,43	383,10	-1,06	39	43	B
FWHR03	FWH-GW-1.10_0,60%	0,600	0,375	0,225	-1	0,1	377,92	369,33	-1,05	125	144	C
FWHR03	FWH-GW-2.8_0,40%	0,400	0,194	0,205	-1	1,0	344,99	338,68	-1,04	180	191	C
FWHR03	FWH-GW-1.13_0,40%	0,399	0,190	0,209	-1	0,5	351,14	344,14	-1,04	221	242	C
FWHR03	FWH-GW-2.13_0,20%	0,200	0,019	0,181	-1	1,0	304,64	293,01	-1,08	11.985	13.058	E
FWHR03	FWH-GW-2.12_0,20%	0,200	0,015	0,185	-1	1,0	310,39	300,58	-1,07	3.259	3.571	B
FWHR03	FWH-GW-1.11_0,15%	0,150	0,001	0,149	-1	5,0	250,51	242,82	-1,06	4.968	5.586	B
FWHR03	FWH-GW-2.5_0,15%	0,150	0,003	0,147	-1	5,0	247,58	235,68	-1,10	33.598	37.482	C
FWHR03	FWH-GW-1.4_0,12%	0,120	0,000	0,120	-1	10,0	204,52	198,16	-1,06	55.895	62.786	B
FWHR03	FWH-GW-1.9_0,12%	0,119	0,001	0,119	-1	10,0	199,27	189,03	-1,11	126.594	132.531	C
FWHR03	FWH-GW-1.7_0,10%	0,100	0,000	0,100	-1	10,0	169,39	164,63	-1,06	325.698	352.737	C
FWHR03	FWH-GW-1.3_0,09%	0,090	0,000	0,090	-1	10,0	160,36	144,38	-1,22	478.596	524.136	C
FWHR03	FWH-GW-2.7_0,09%	0,090	0,000	0,090	-1	10,0	154,65	145,12	-1,13	1.256.984	1.355.152	C
FWHR03	FWH-GW-1.1_0,08%	0,080	0,000	0,080	-1	25,0	135,88	134,52	-1,02	10.000.000	10.000.001	Durchläufer

Schwingprobe: b = 15 mm; d = 8 mm; l = 25 mm; Elastizitätsmodul: E = 168,000 GPa; Umgebung: Luft, T = 296 K; +) 10% Kraftabfall; Formzahl Kt = 1,05

Risslage: A = von der Walzoberfläche; B = zwischen den Schneiden; C = außerhalb der Schneiden; D = unter den Schneiden (oben); E = unter den Schneiden (unten)

Anhang B

Bilder

Inhalt	Bild	Seite
Probenlageplan der Versuchskörper	Bild B 1 bis Bild B 10	B 2 bis B 11
Zyklische Spannungs-Dehnungskurve und Dehnungswöhlerlinie Versuchskörper Siempelkamp	Bild B 11 und Bild B12	B 12
Zyklische Spannungs-Dehnungskurve und Dehnungswöhlerlinie Versuchskörper MAN	Bild B 13 und Bild B14	B 13
Zyklische Spannungs-Dehnungskurve und Dehnungswöhlerlinie Versuchskörper FWH	Bild B 15 und Bild B16	B 14
Zyklische Spannungs-Dehnungskurve und Dehnungswöhlerlinie Bauteil FWH	Bild B 17 und Bild B18	B 15

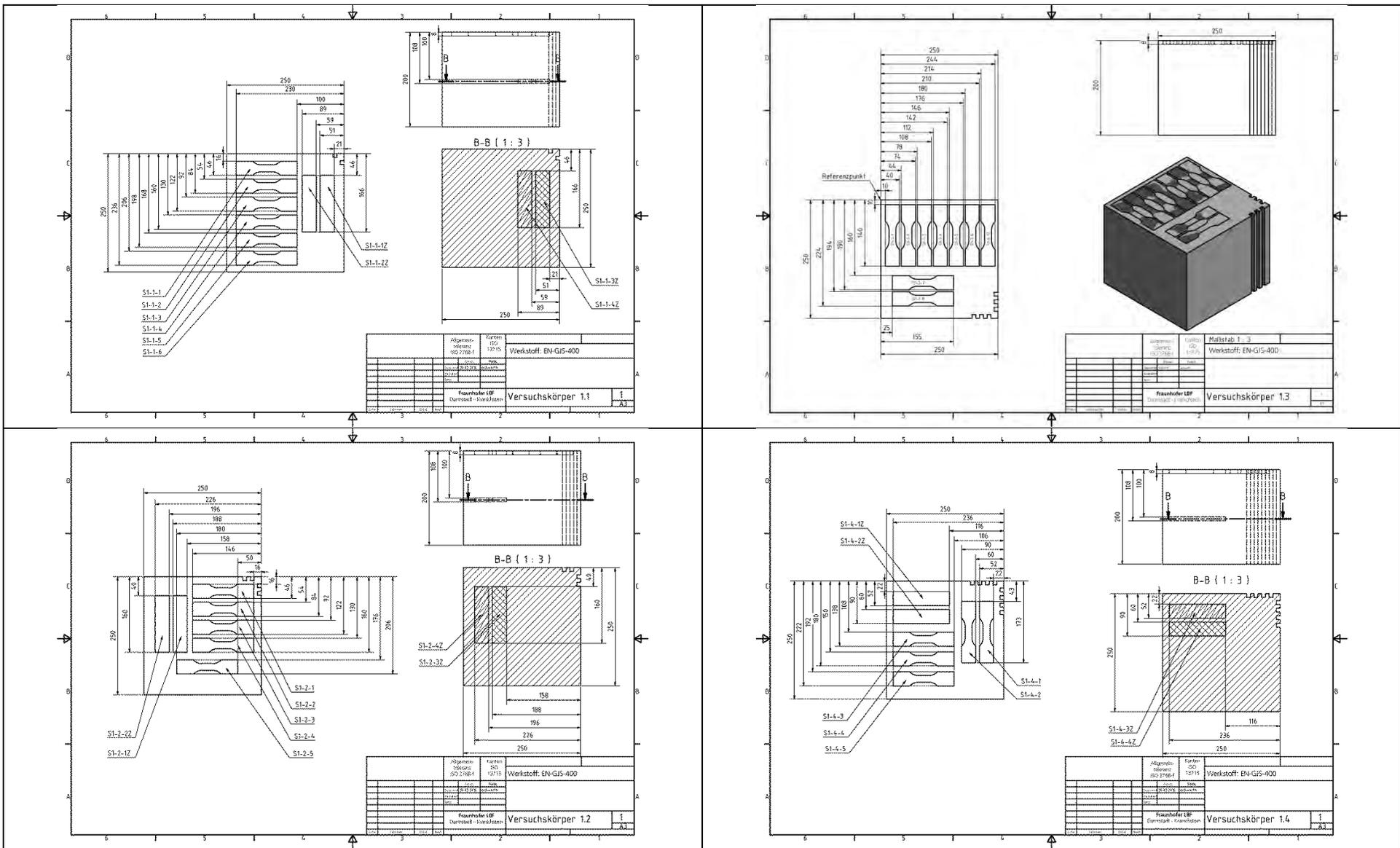


Bild B 1 Versuchskörper 1 (Siempelkamp)

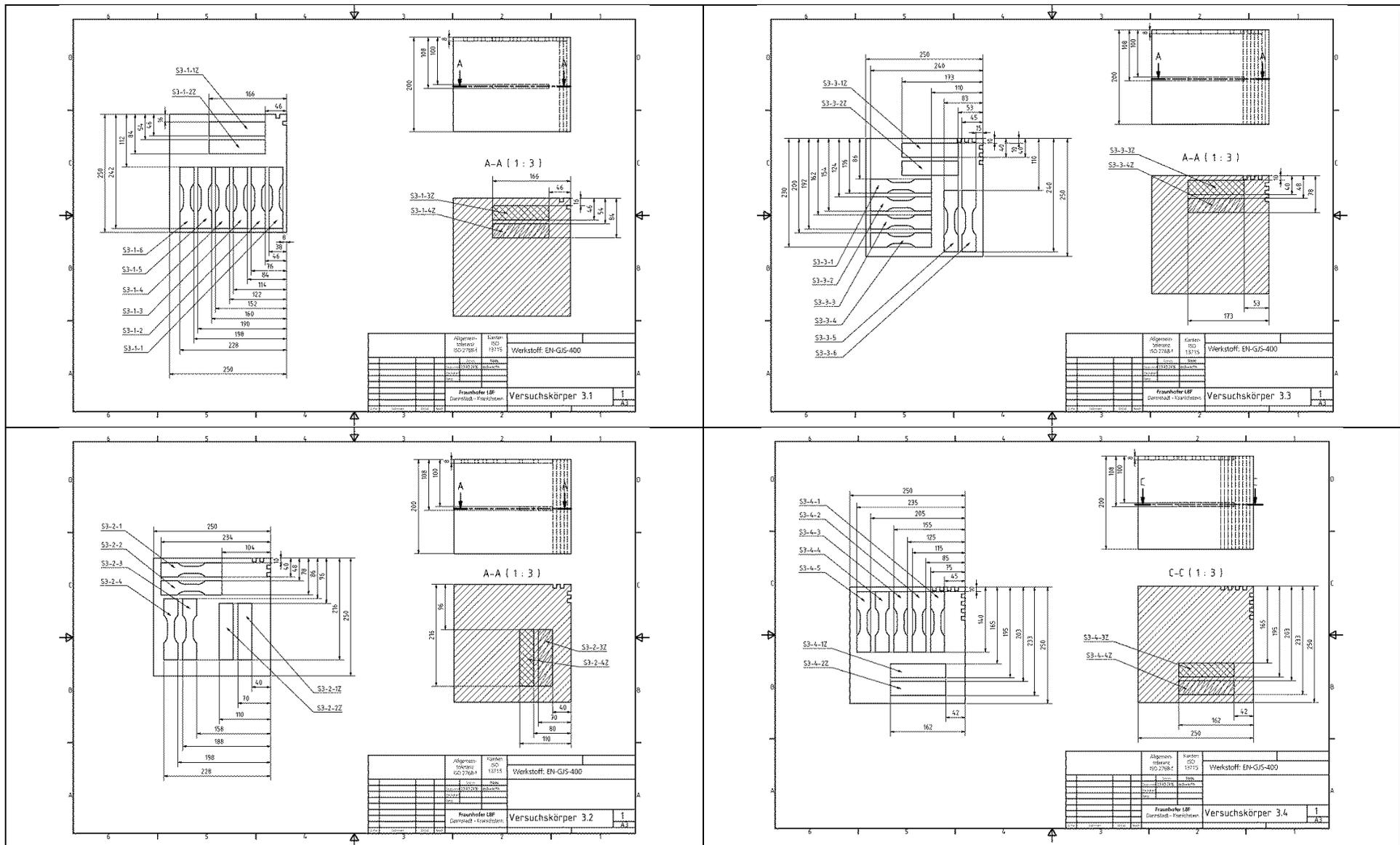


Bild B 2 Versuchskörper 3 (Siempelkamp)

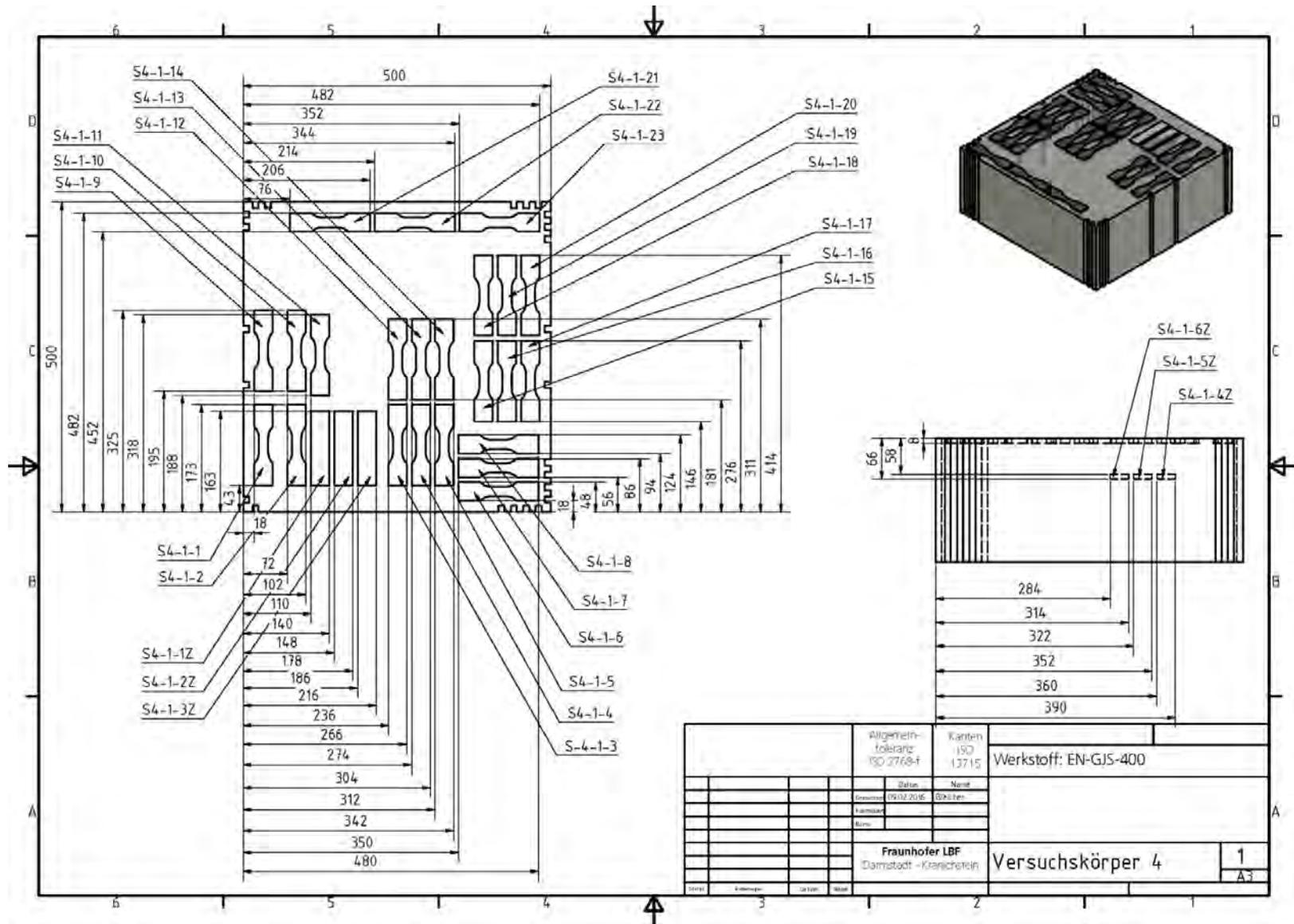


Bild B 3 Versuchskörper 4 (Siempelkamp)

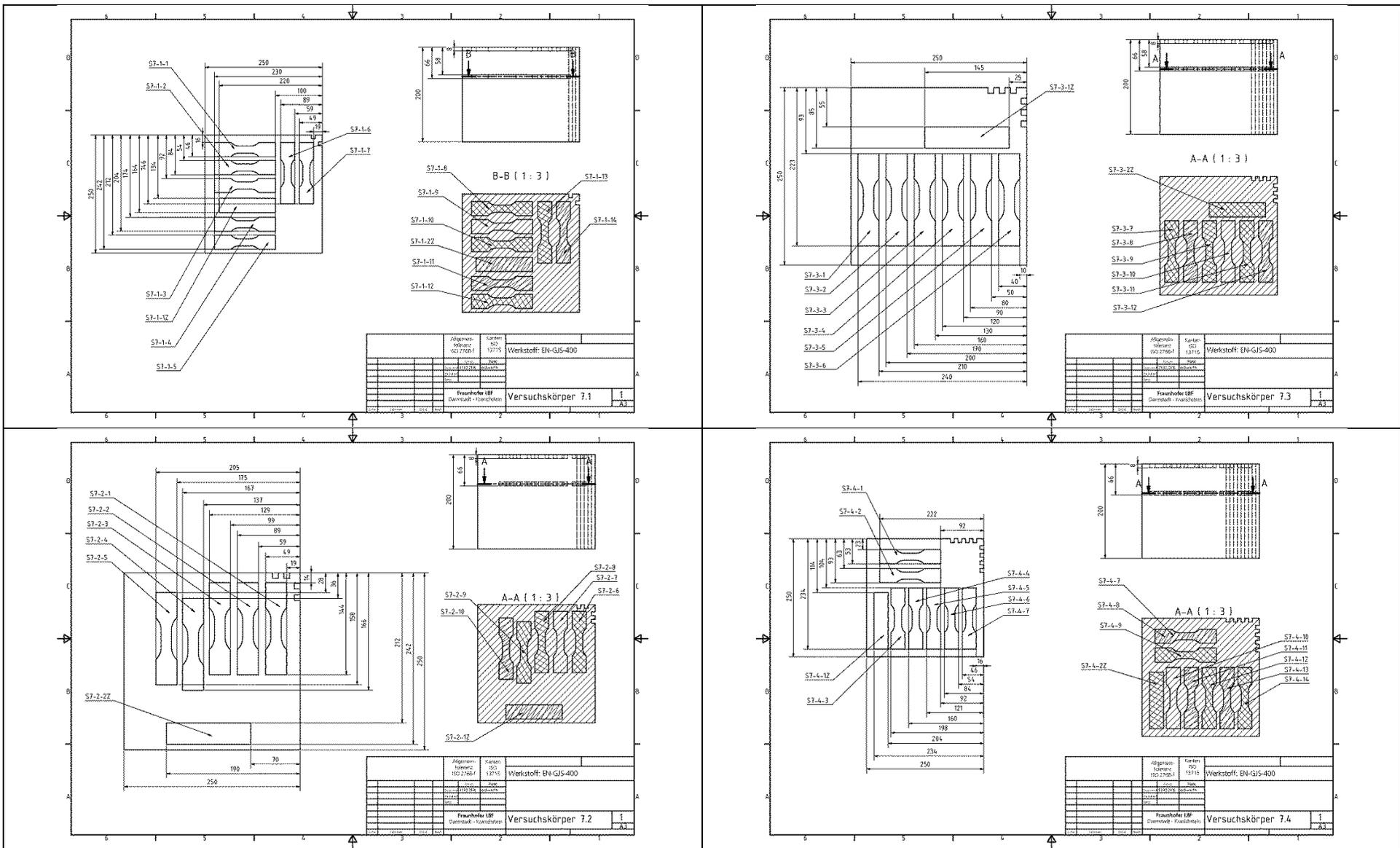


Bild B 4 Versuchskörper 7 (Siempelkamp)

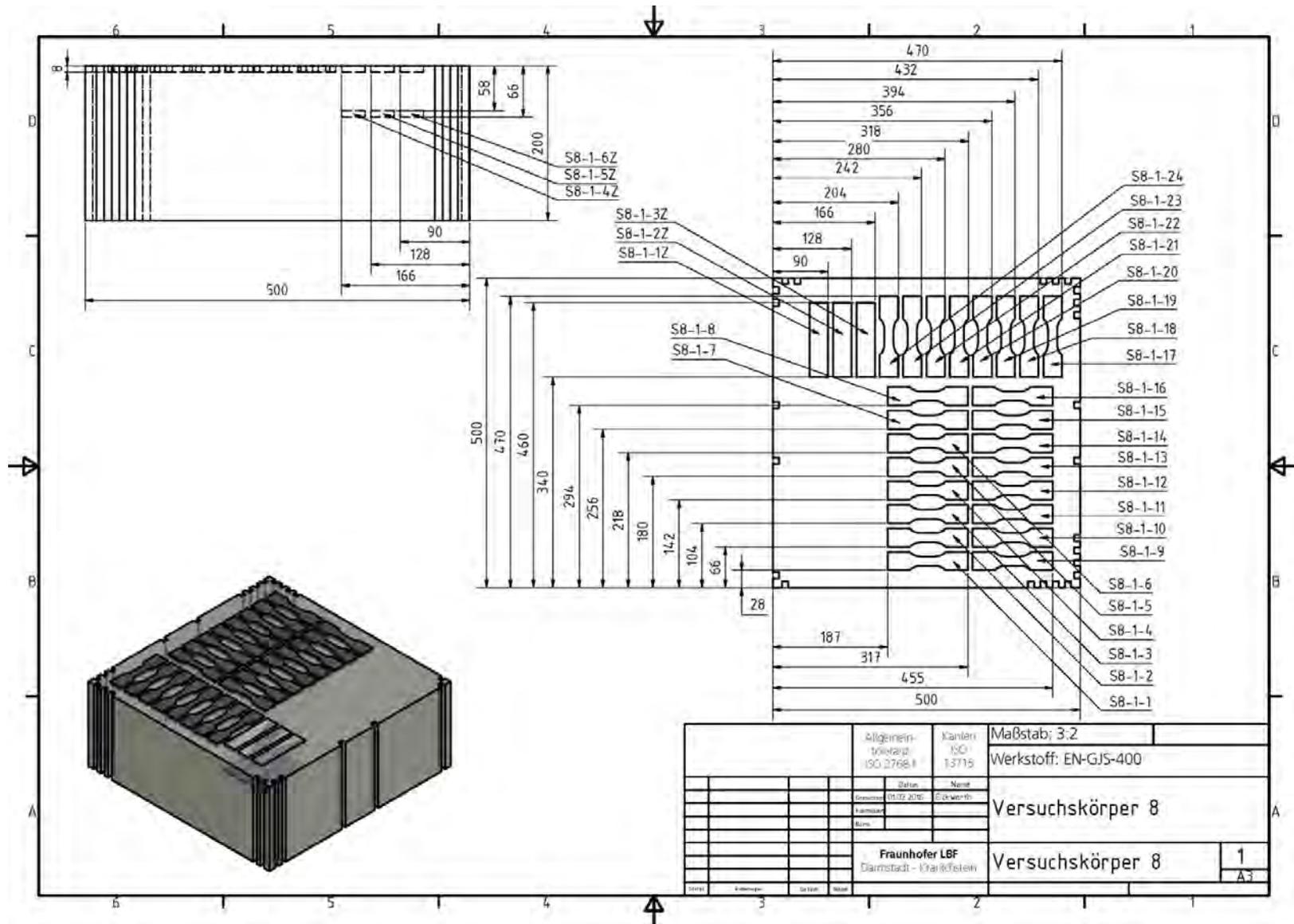


Bild B 5 Versuchskörper 8 (Siempelkamp)

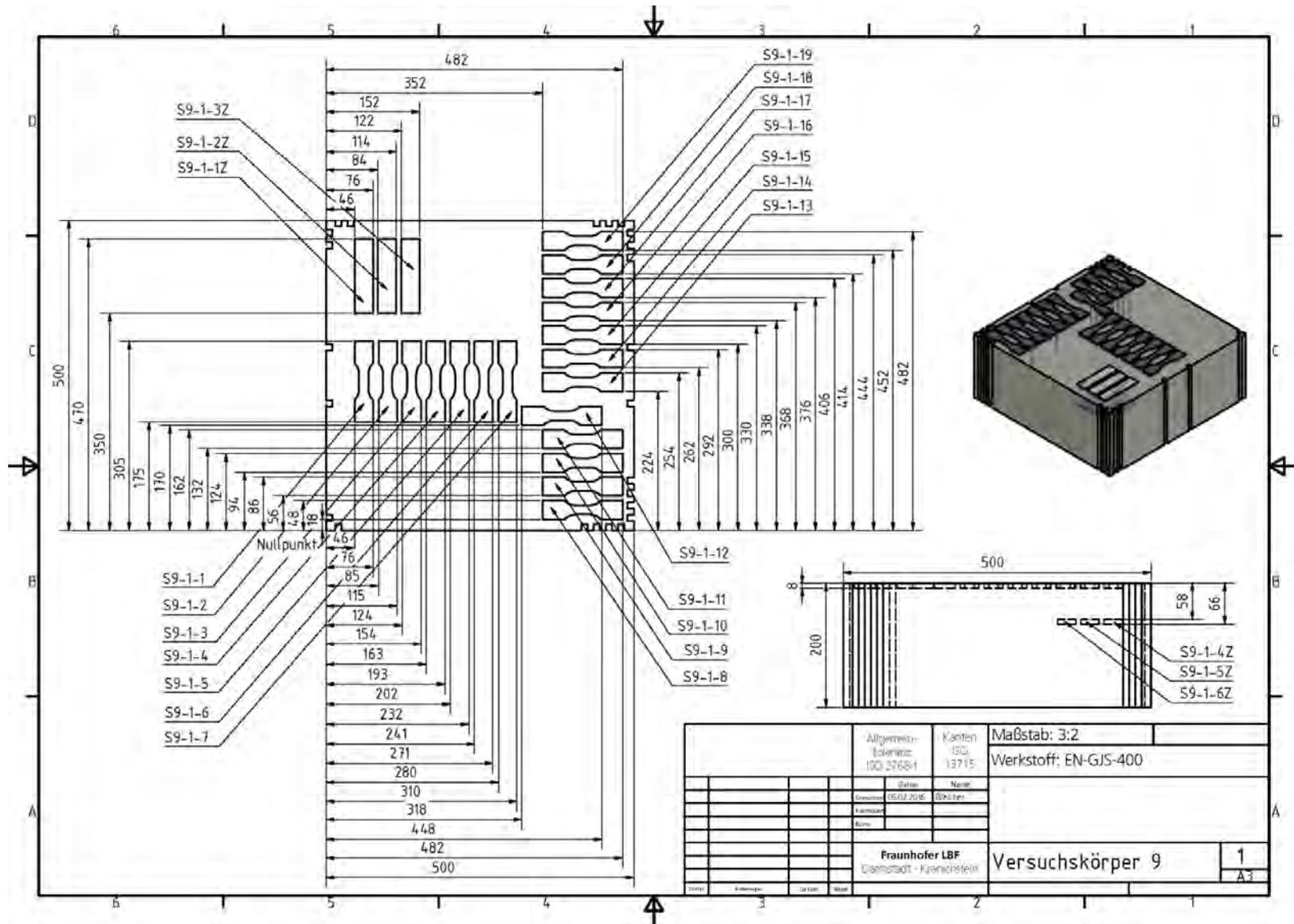


Bild B 6 Versuchskörper 9 (Siempelkamp)

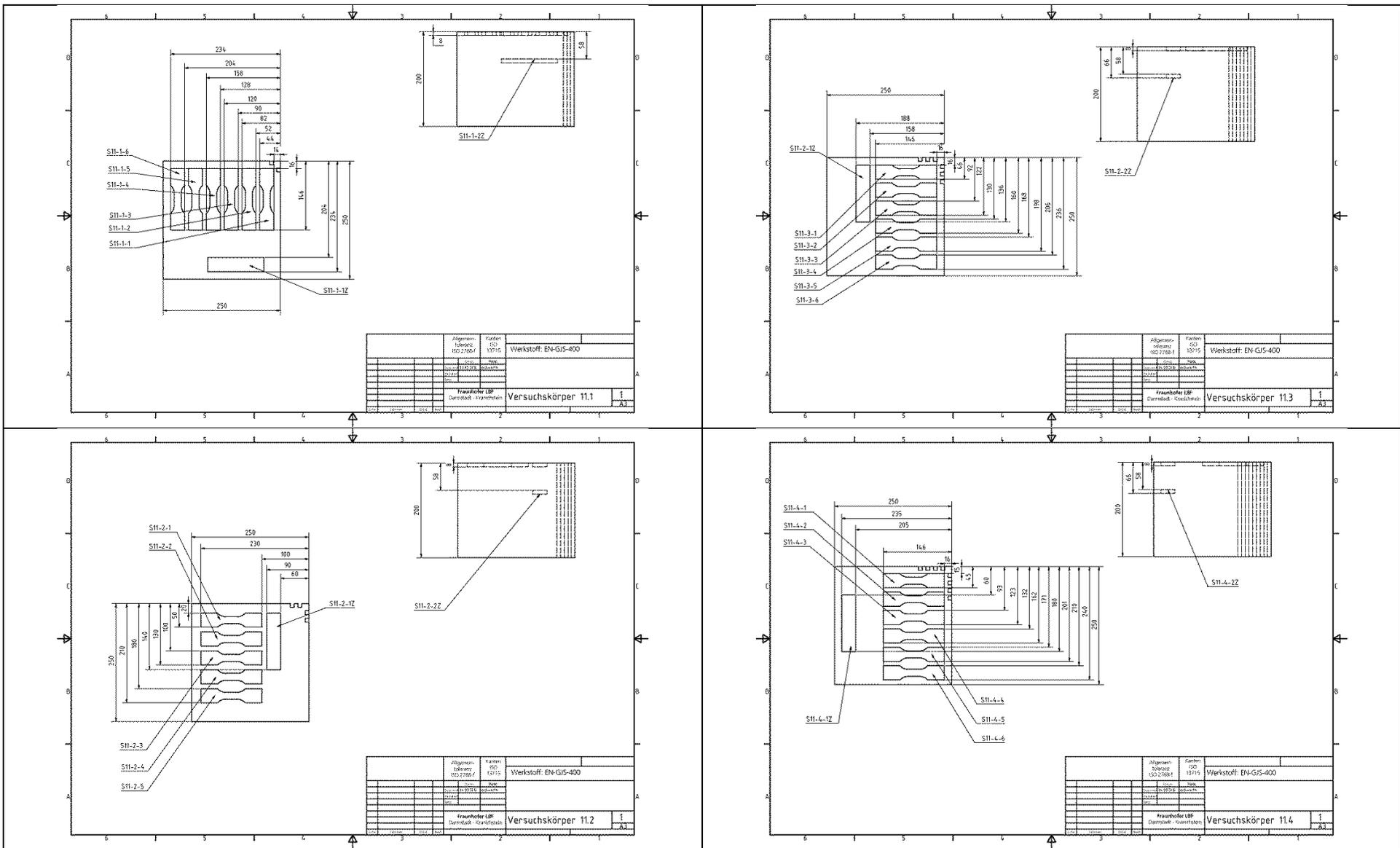


Bild B 7 Versuchskörper 11 (Siempelkamp)

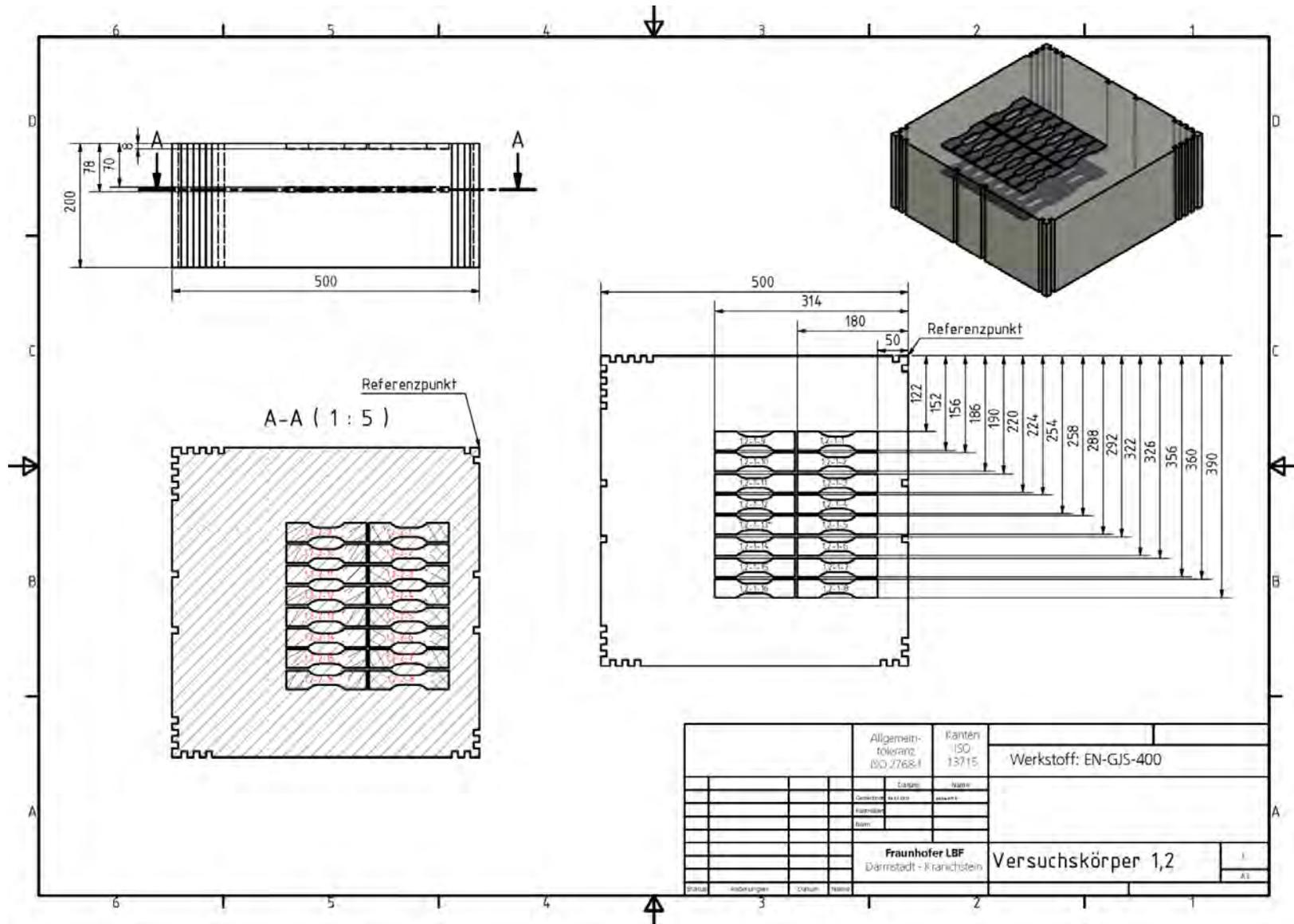


Bild B 8 Versuchskörper 1,2 (FWH)

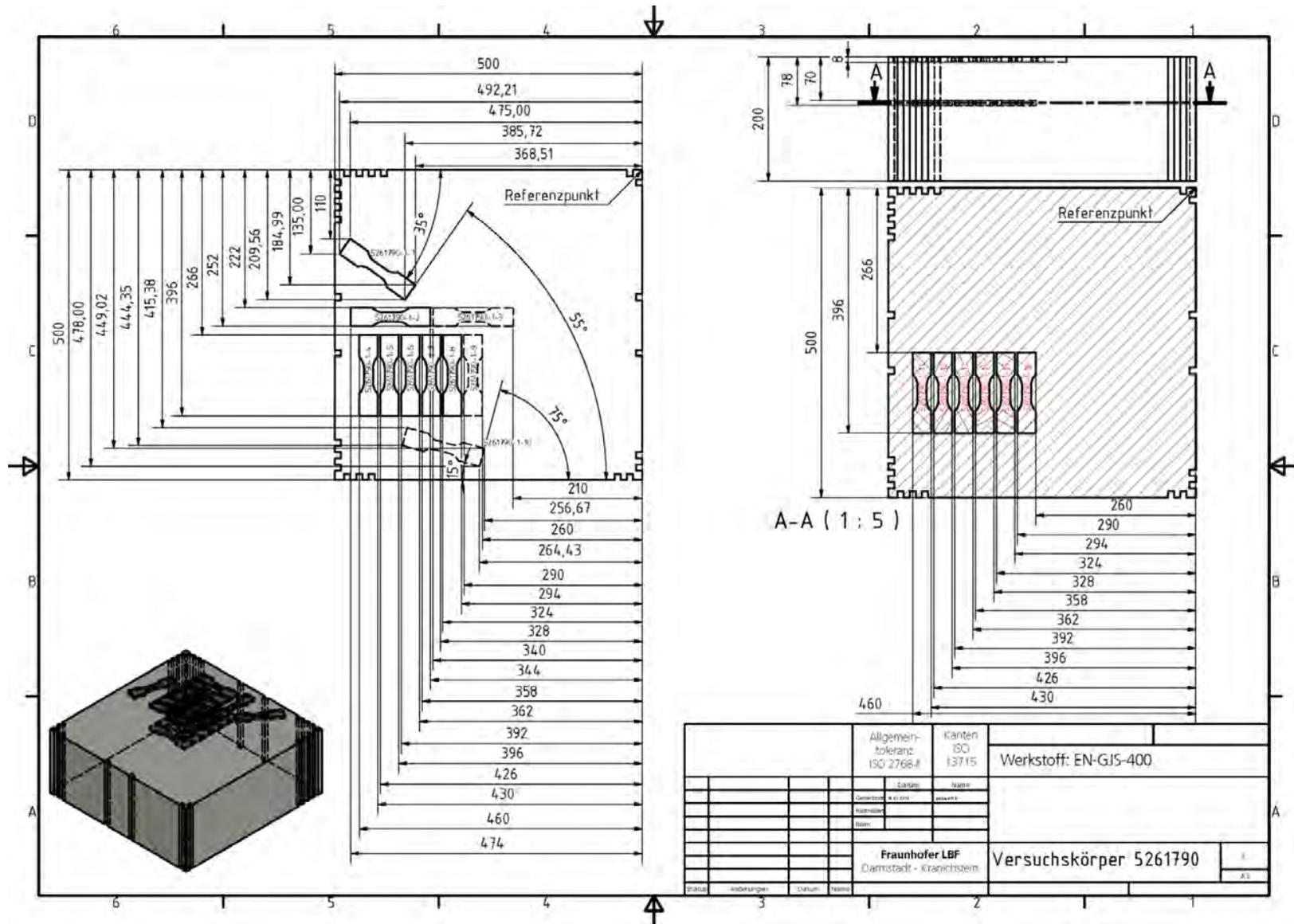


Bild B 9 Versuchskörper 5261790 (MAN)

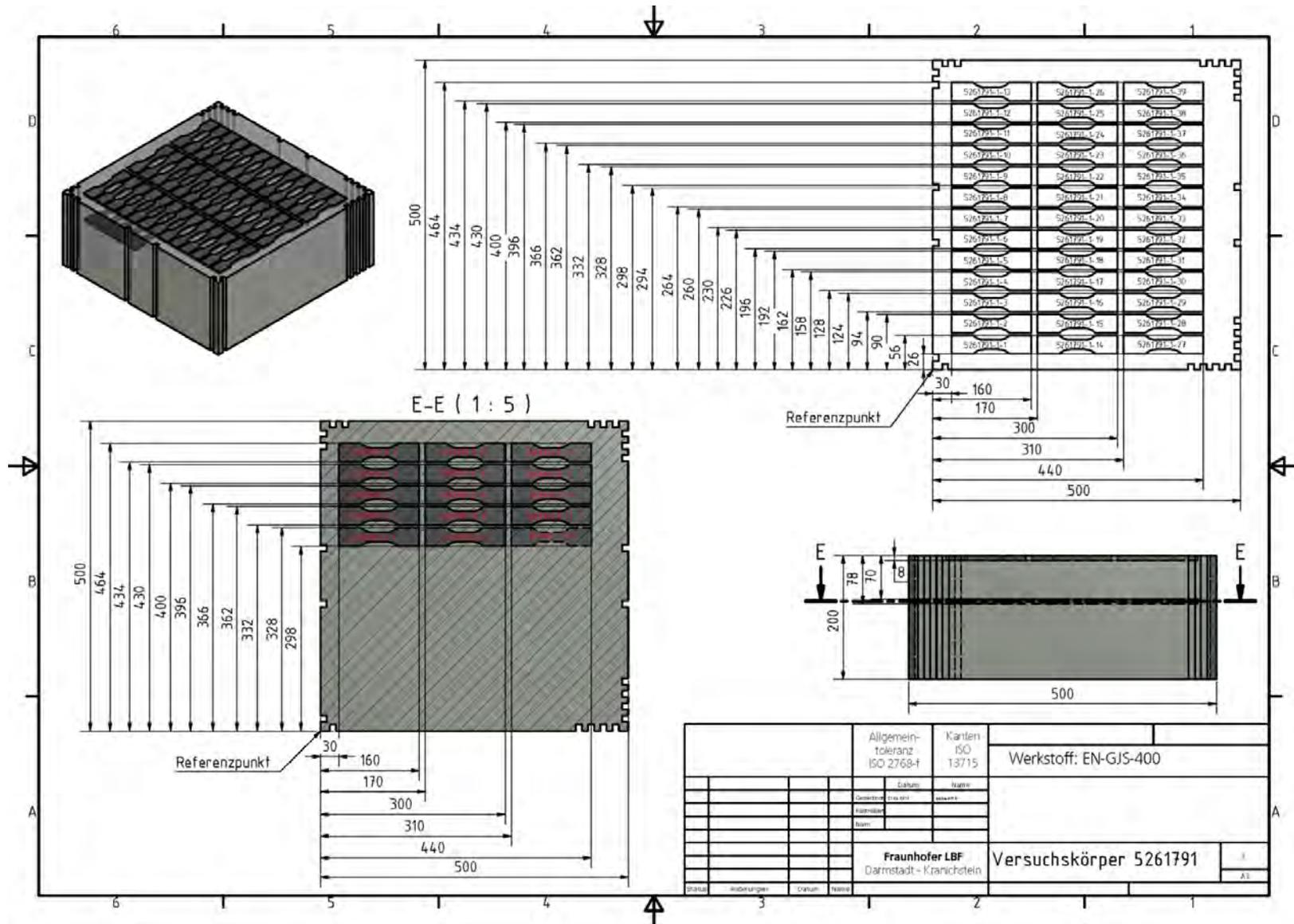


Bild B 10 Versuchskörper 5261791 (MAN)

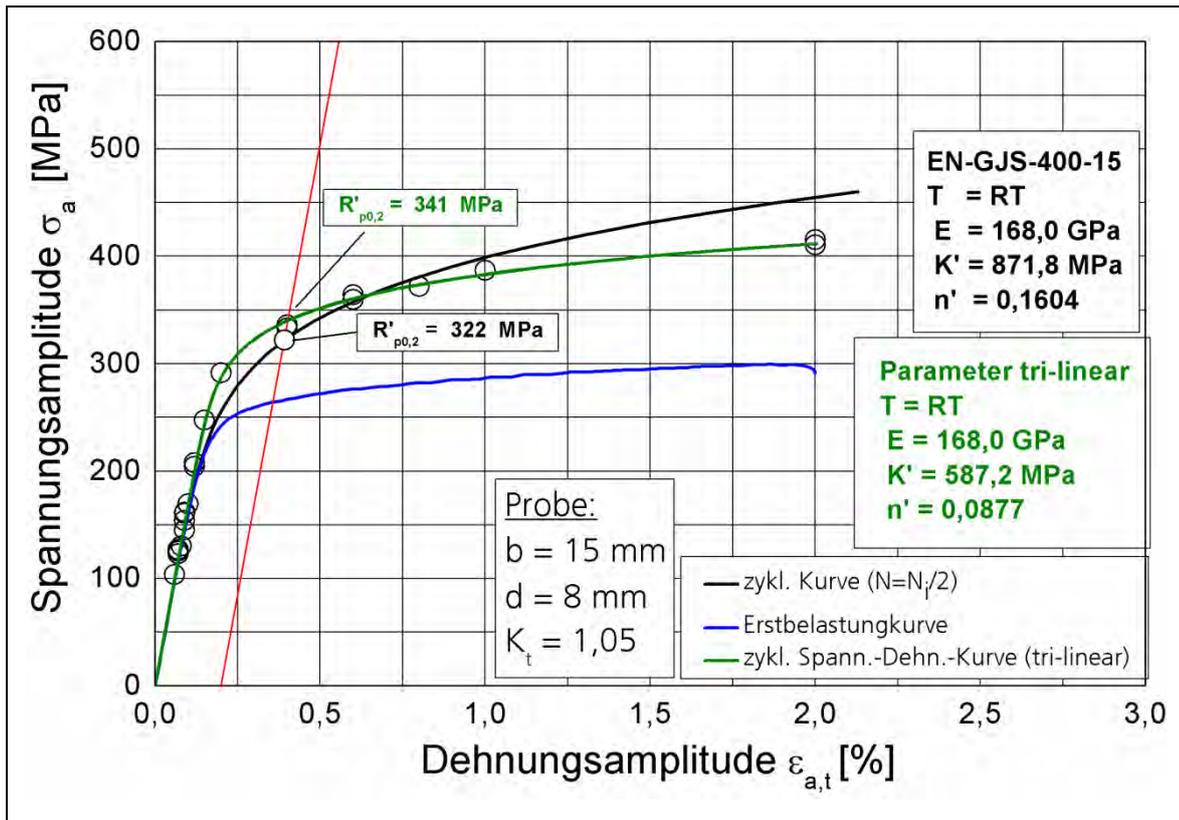


Bild B 11 Zyklische Spannungs-Dehnungskurve SR01 (EN-GJS-400-15), Siempelkamp, $R_\epsilon = -1$

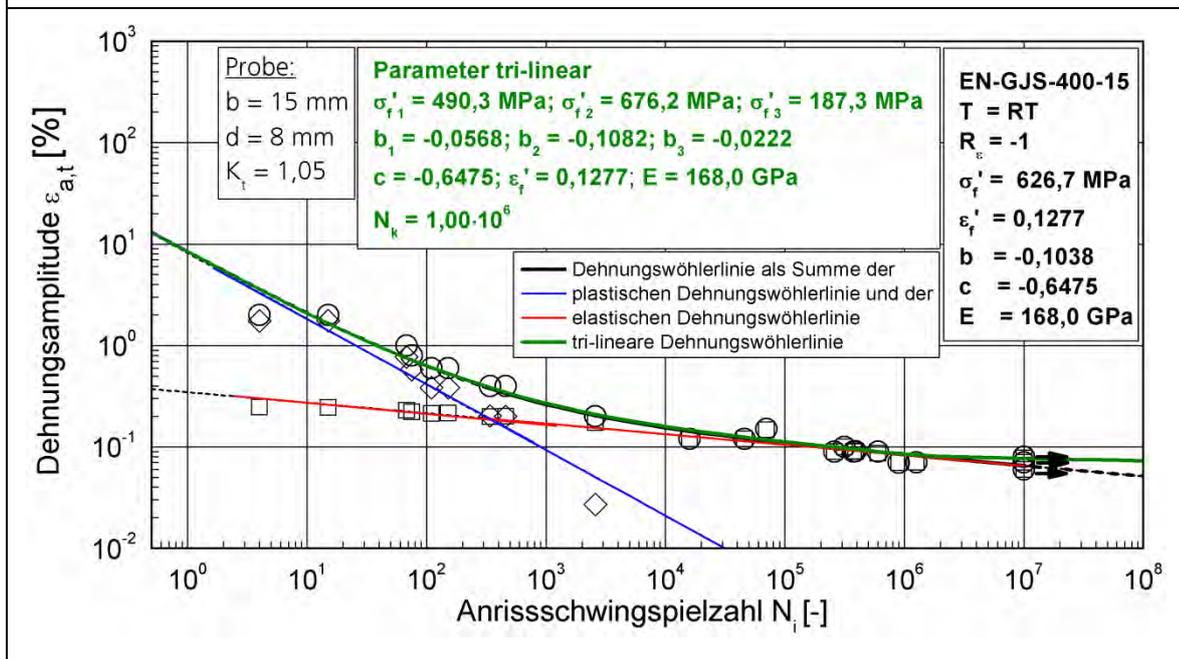


Bild B 12 Dehnungswöhlerlinie SR01 (EN-GJS-400-15), Siempelkamp, $R_\epsilon = -1$

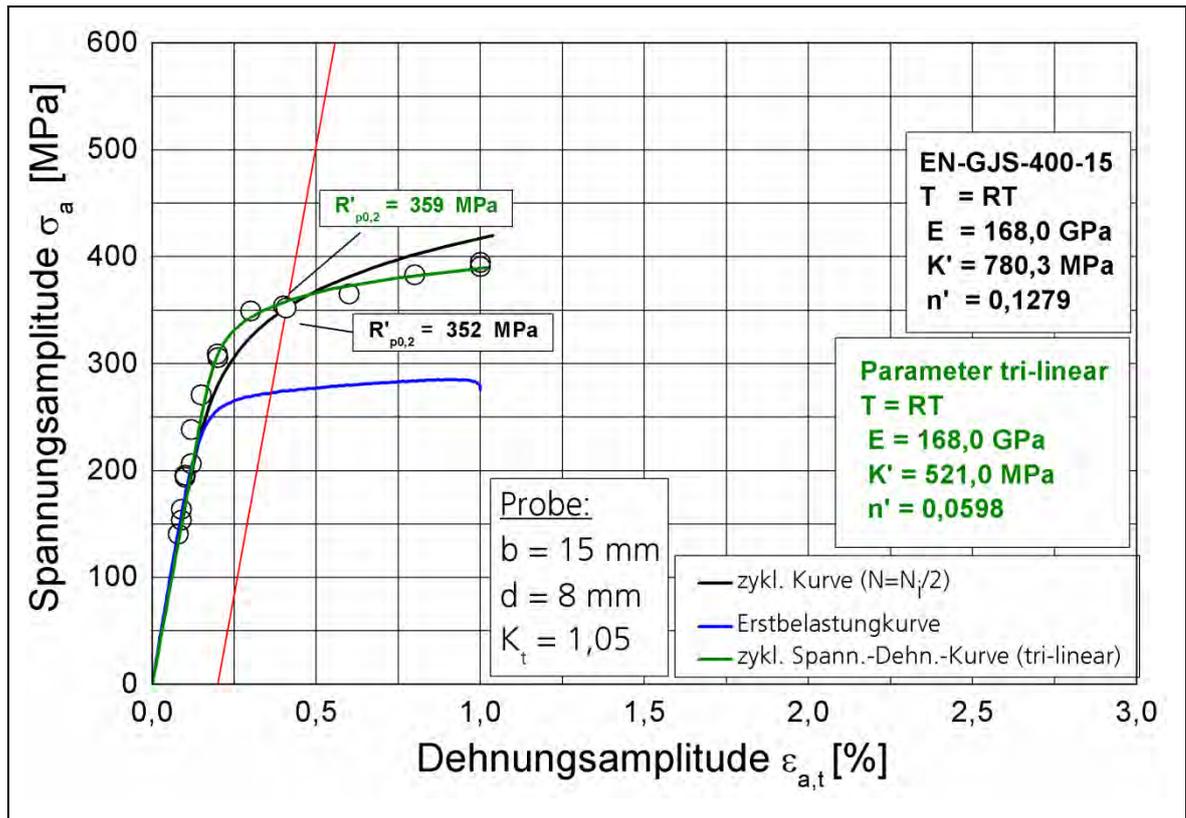


Bild B 13 Zyklische Spannungs-Dehnungskurve MANR01 (EN-GJS-400-15), MAN, $R_\epsilon = -1$

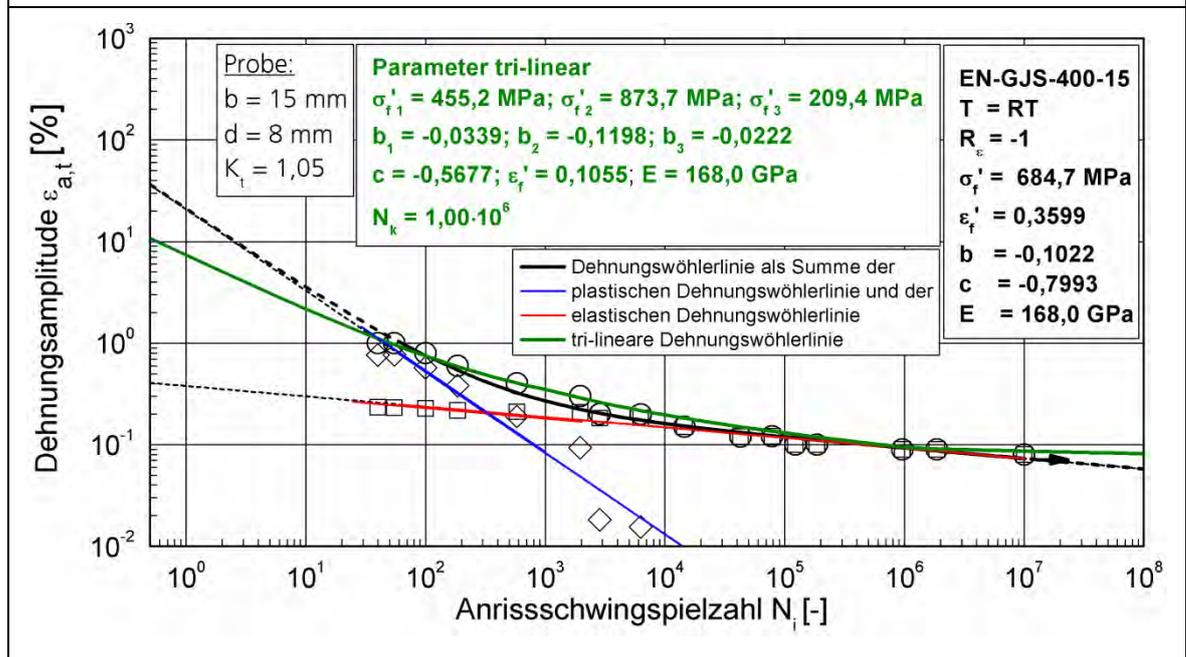


Bild B 14 Dehnungswöhlerlinie MANR01 (EN-GJS-400-15), MAN, $R_\epsilon = -1$

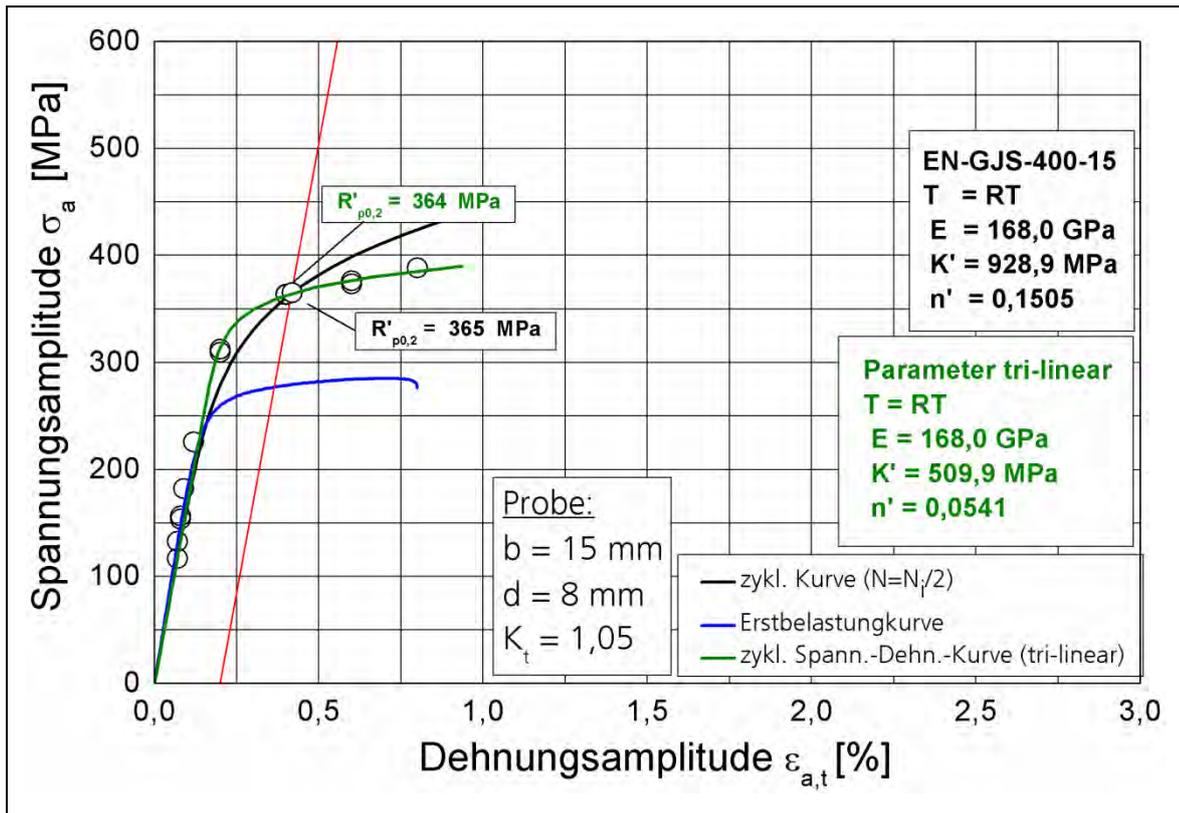


Bild B 15 Zyklische Spannungs-Dehnungskurve FWHR01 (EN-GJS-400-15), FWH, R_ε = -1

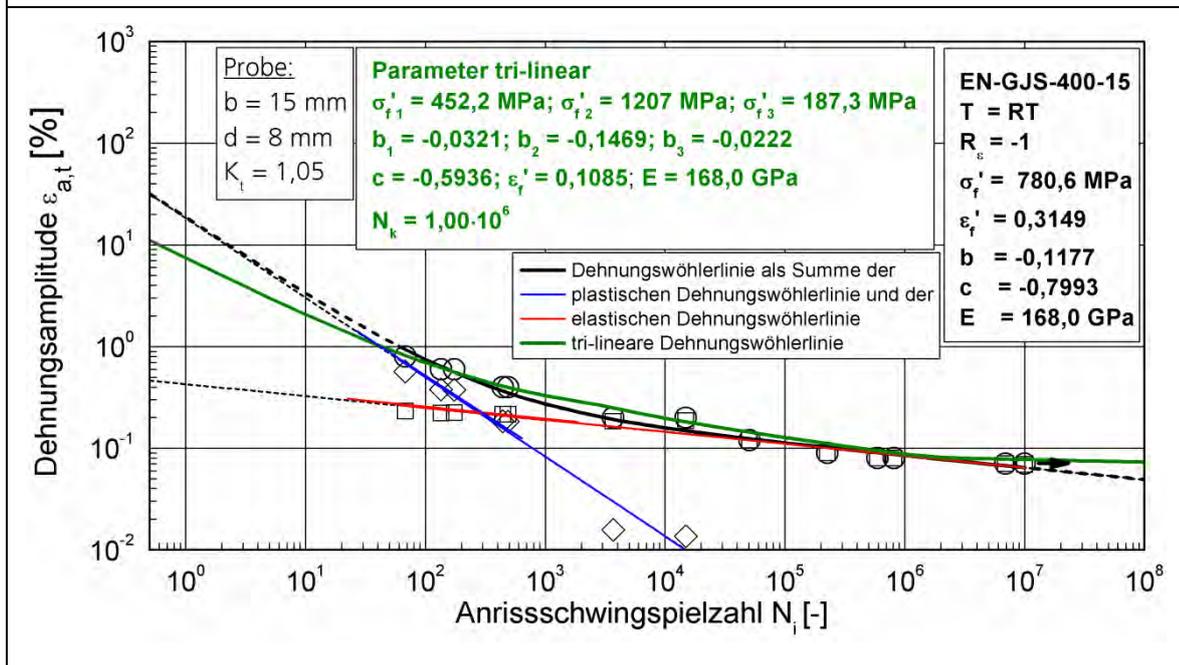


Bild B 16 Dehnungswöhlerlinie FWHR01 (EN-GJS-400-15), FWH, R_ε = -1

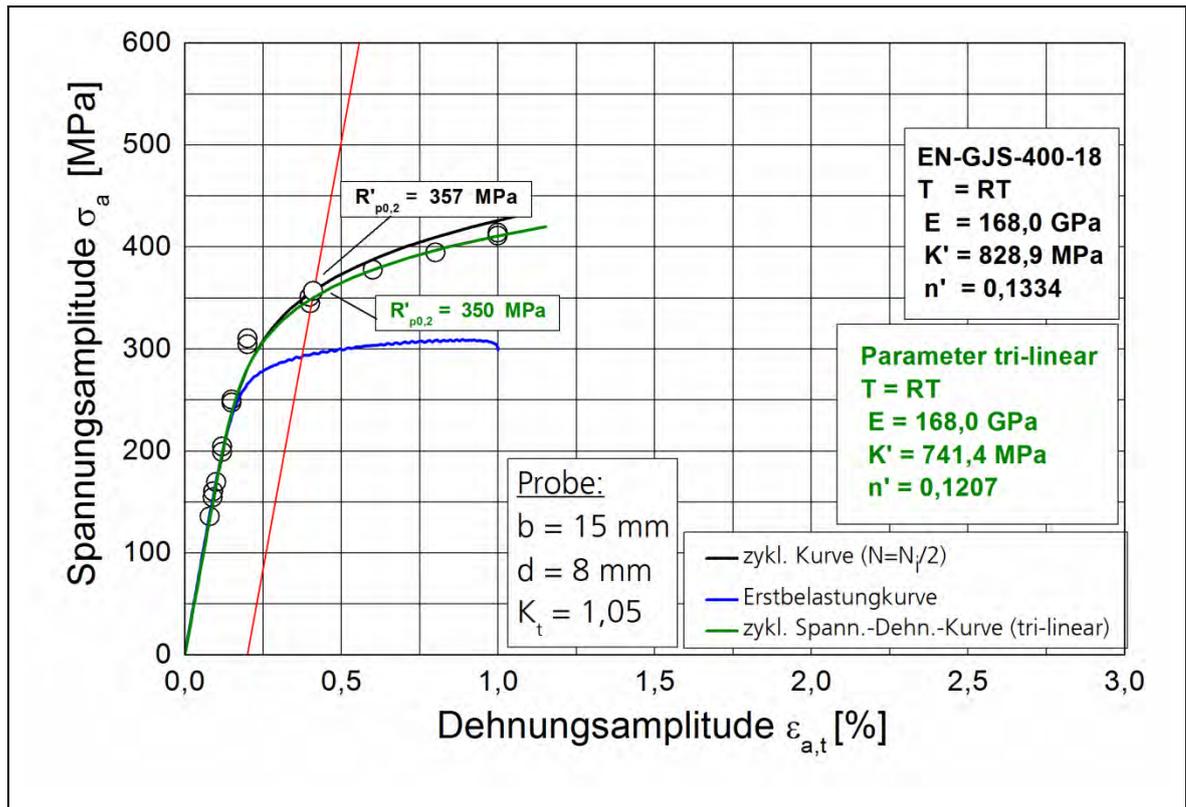


Bild B 17 Zyklische Spannungs-Dehnungskurve FWHR03 (EN-GJS-400-18), FWH, $R_\epsilon = -1$

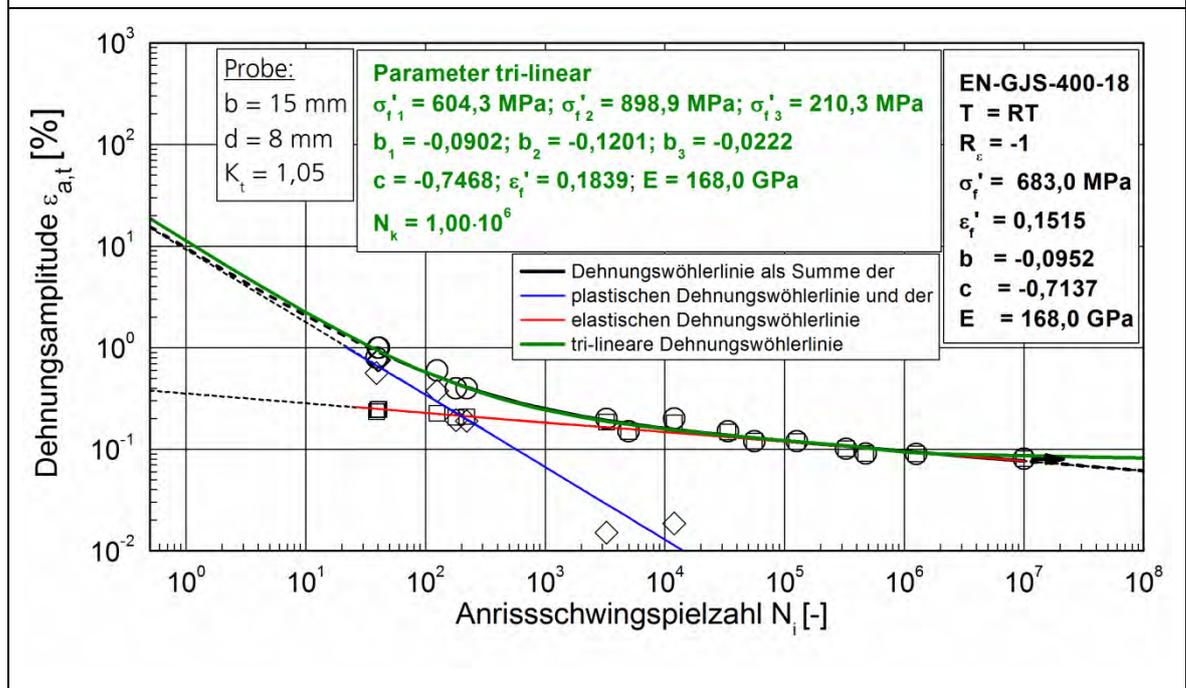


Bild B 18 Dehnungswöhlerlinie FWHR03 (EN-GJS-400-18), FWH, $R_\epsilon = -1$

Anhang I

Technischer Anhang – Fraunhofer IZFP

Vorarbeiten

Vorabtestkörper von Siempelkamp

Der Projektpartner Siempelkamp hat einen Vorabtestkörper mit den Abmessungen 190 x 200 x 80 mm zur Verfügung gestellt.



Ultraschallprüfung an dem Vorabtestkörper

Impuls-Echo-Technik, Kontakttechnik, Einschallwinkel 0° (Senkrechteinschallung)

Prüfkopf:

Einzelschwinger SEB1 (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Koppelmittel:

Fließwasser mit Korrosionsschutz

Schussabstand der Abrasterung in Scan- und Indexrichtung: 1 mm

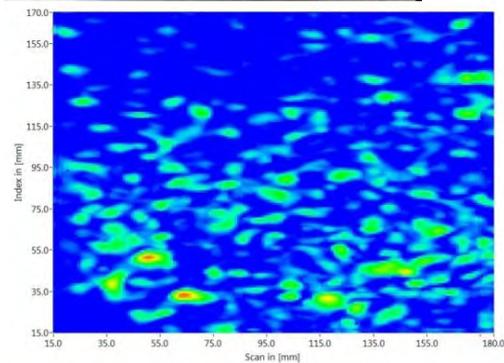
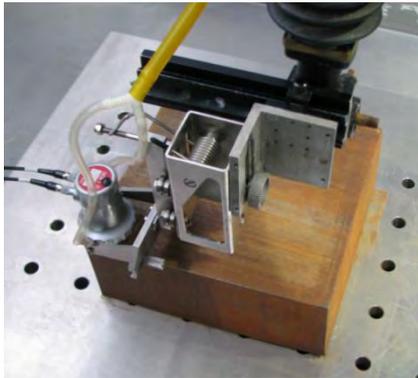
Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

Einschallung: Dross-Seite, Dross-Gegenseite und Seitenfläche des Vorabtestkörpers

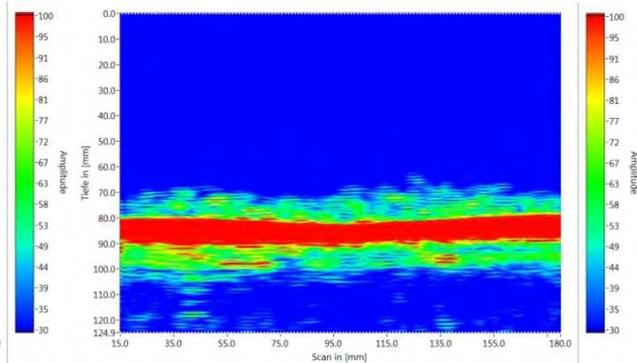
Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

Im oberen Bereich der Abbildungen ist jeweils ein Foto des vermessenen Versuchstestkörpers während den mechanisierten Ultraschallprüfungen abgebildet. Im unteren Bereich der Abbildungen sind jeweils die Ultraschallergebnisbilder dargestellt.

Vorabtestkörper Siempelkamp, Einschallung von der Dross-Gegenseite

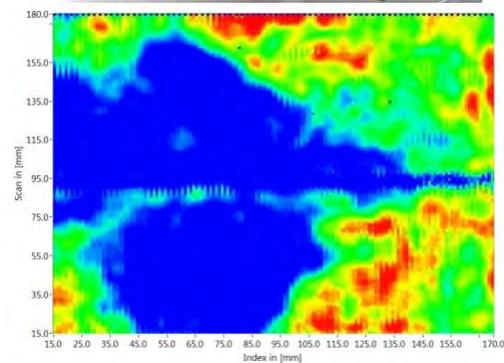
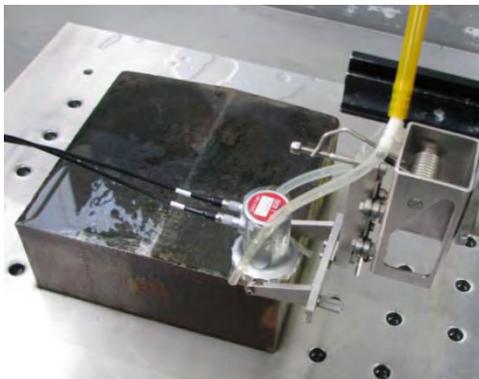


C-Bild (Draufsicht) von Dross-Gegenseite

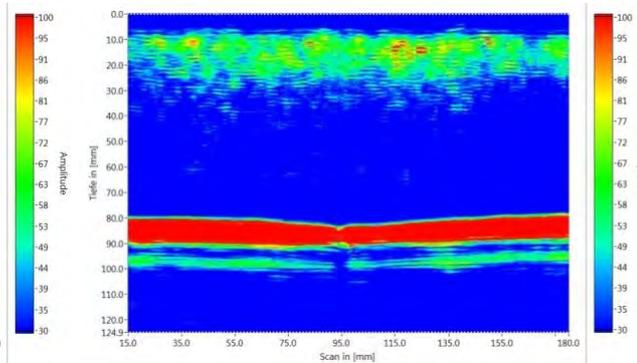


B-Bild (Seitenansicht) von Dross-Gegenseite

Vorabtestkörper Siempelkamp, Einschallung von der Dross-Seite

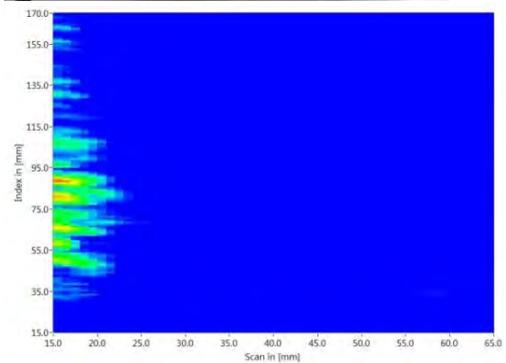
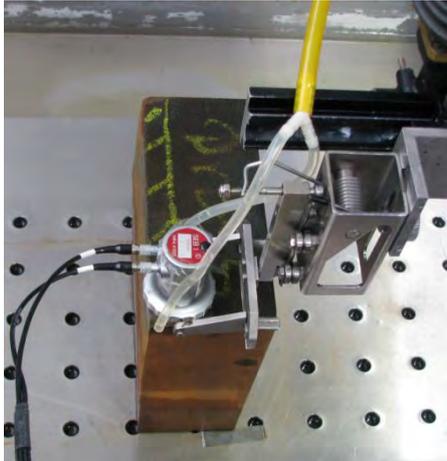


C-Bild (Draufsicht) von Dross-Seite

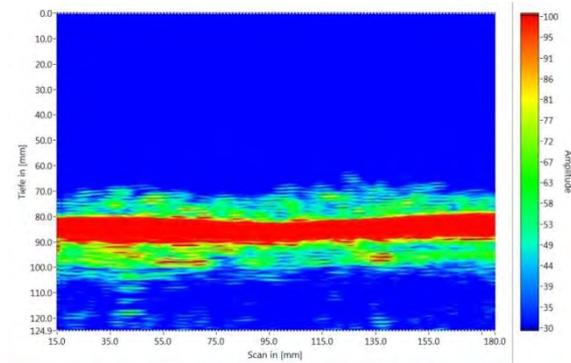


B-Bild (Seitenansicht) von Dross-Seite

Vorabtestkörper Siempelkamp, Einschallung von der Seitenfläche des Vorabtestkörpers



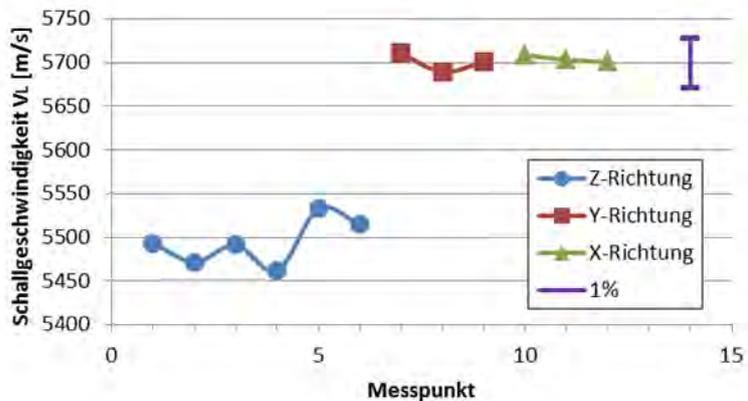
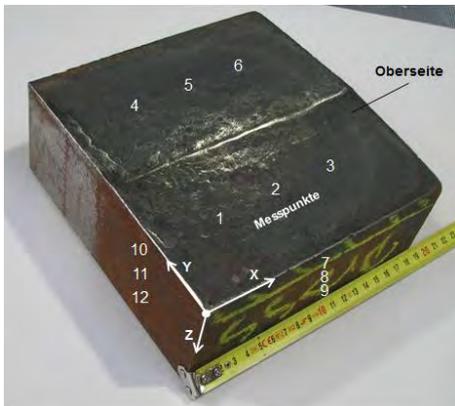
C-Bild (Draufsicht) von der Seitenfläche



B-Bild (Seitenansicht) von der Seitenfläche

An dem Vorabtestkörper wurden die Schallgeschwindigkeiten für den Grundwerkstoff und für den Dross-Bereich ermittelt. Hierzu wurde an zwölf Messpositionen der folgende Ultraschallprüfkopf in Kontakttechnik manuell eingesetzt: K1G, 1 MHz, I/E Betrieb, Koppelmittel: Fett. Die Messpunkte 1-6 liegen in dem Dross-Bereich des Vorabtestkörpers. Es zeigte sich, dass die Schallgeschwindigkeit sich im Dross-Bereich im Vergleich zum Grundwerkstoff verringert.

Vorabtestkörper Siempelkamp, Schallgeschwindigkeitsmessungen



Mikromagnetische Prüfung

Prüfsystem MikroMach

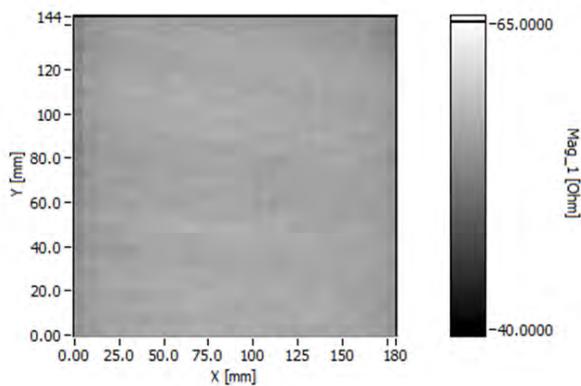
Prüfort: Dross-Seite und Dross-Gegenseite in Kontakttechnik sowie die Seitenfläche des Versuchstestkörpers

Prüffrequenz: 60 Hz

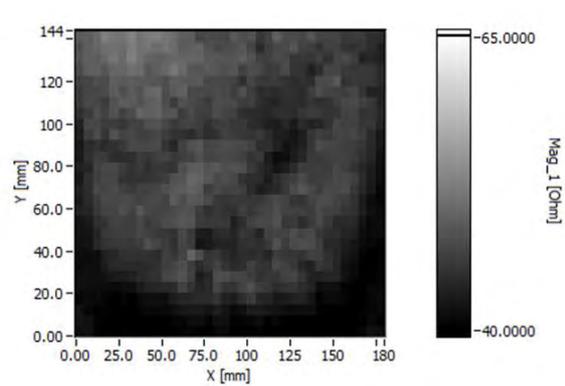
Magnetfeldaussteuerung: 110 A/cm

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster im Originalzustand und ein weiteres Mal nach dem Schleifen der rauen Oberflächen des Vorabtestkörpers. Bei den mechanisierten rasternden Messungen hatten beide Polschuhe des MikroMachs Kontakt mit der Vorabtestkörperoberfläche.

Vorabtestkörper Siempelkamp, Messungen von Dross- und Dross-Gegenseite vor dem Schleifen

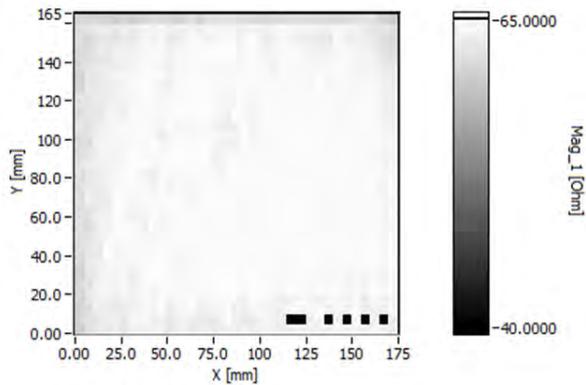


Mechanisierte MikroMach-Messung von der Dross-Gegenseite (exemplarische Kenngröße)

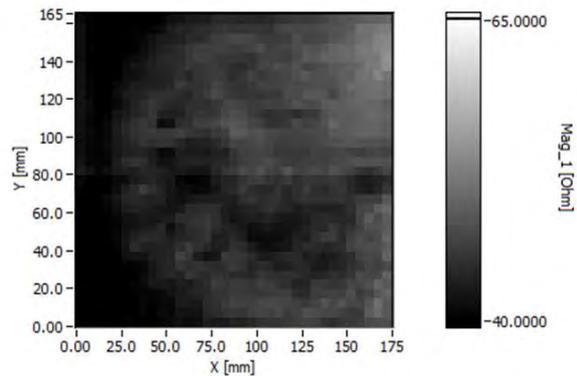


Mechanisierte MikroMach-Messung von der Dross-Seite (exemplarische Kenngröße)

Vorabtestkörper Siempelkamp, Messungen von Dross- und Dross-Gegenseite nach dem Schleifen

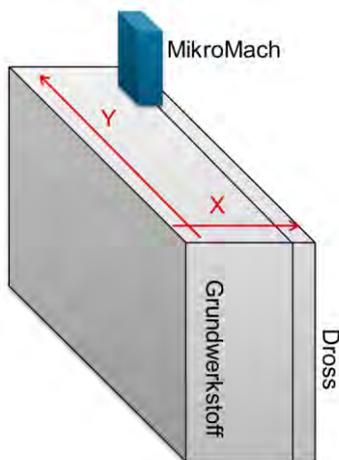


Mechanisierte MikroMach-Messung von der Dross-Gegenseite (exemplarische Kenngröße)

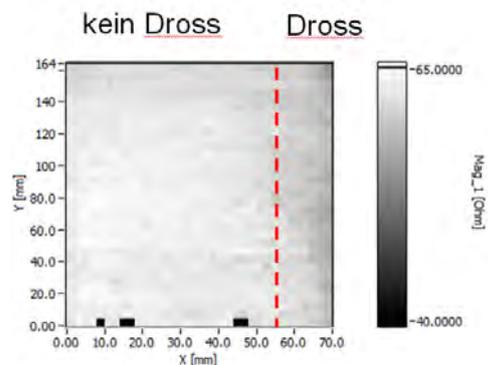


Mechanisierte MikroMach-Messung von der Dross-Seite (exemplarische Kenngröße)

Vorabtestkörper Siempelkamp, Messung von der Seitenfläche des Vorabtestkörpers vor dem Schleifen



Mechanisierte MikroMach-Messung von der Seitenfläche des Versuchstestkörpers (exemplarische Kenngröße)



Mechanisierte MikroMach-Messung von der Seitenfläche des Versuchstestkörpers (exemplarische Kenngröße)

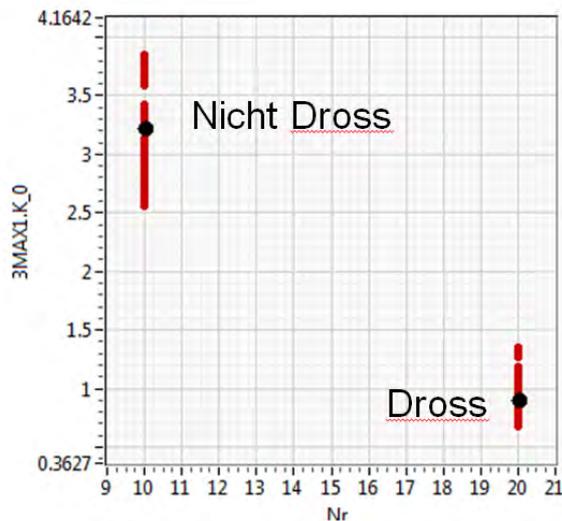
Prüfsystem 3MA-X8

Prüfart: Punktuelle Messungen auf der Dross-Seite und Dross-Gegenseite in Kontakttechnik mit einem bzgl. des MikroMachs um Faktor drei größeren 3MA-X8-Prüfkopf (Polschuhabmessungen Mikromach: jeweils 10 x 10 mm; Polschuhabmessungen 3MA-X8: 30 x 30 mm)

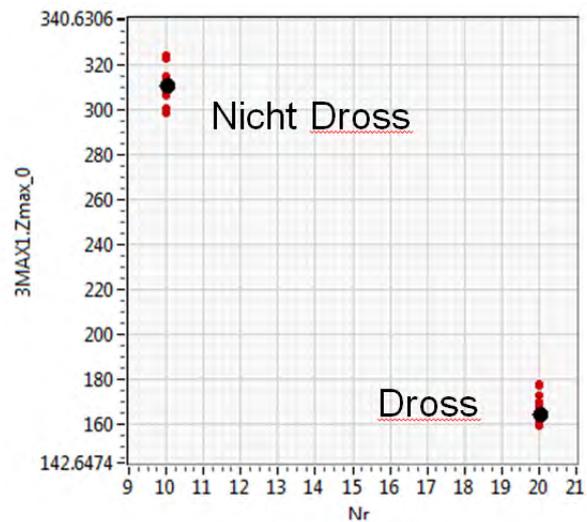
Prüffrequenz: 20 Hz

Magnetisierungsamplitude: 3 V

Vorabtestkörper Siempelkamp, punktuelle 3MA-X8-Messungen auf der Dross-Seite und Dross-Gegenseite nach dem Schleifen



Händische punktuelle 3MA-X8-Messung auf der Dross- und Dross-Gegenseite des Versuchstestkörpers (exemplarische Kenngröße)



Händische punktuelle 3MA-X8-Messung auf der Dross- und Dross-Gegenseite des Versuchstestkörpers (exemplarische Kenngröße)

In den Vorarbeiten konnte das Potential der mikromagnetischen Messungen (MikroMach- und 3MA-X8-Prüfsystem) zur Detektion von Dross aufgezeigt werden. Hierbei reagierten die Kenngrößen der Überlagerungspermeabilität am deutlichsten auf die Dross-Verteilung. Dies ist physikalisch nachvollziehbar, da der Werkstoff aufgrund der Einschlüsse eine geringere mittlere Permeabilität erhalten sollte. Durch Anschleifen der Oberfläche wurde sichergestellt, dass der Effekt nicht auf die Zunderschicht zurückzuführen war. Darüber hinaus zeigten Flächenscans auf der Dross-Seite deutliche Ungleichmäßigkeiten, während die Flächenscans auf der Dross-Gegenseite vergleichsweise homogen erschienen.

Magnetische Streufluss-Prüfung an dem Vorabtestkörper

Große stationäre Magnetisierungseinheit:

Elektromagnet

Magnetisierungsstrom: 3 A

Abstand der Polschuhe zur Oberfläche: Kontakt zur Oberfläche (Elektromagnet aufgesetzt)

Hall-Sonde, die von einem Manipulationssystem geführt wurde:

Sensitiv in Normal-Richtung

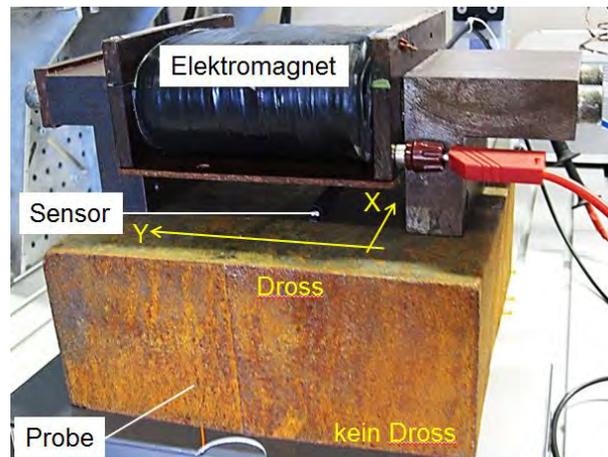
Keramische Schutzschicht

Ankopplung Hall-Sonde:

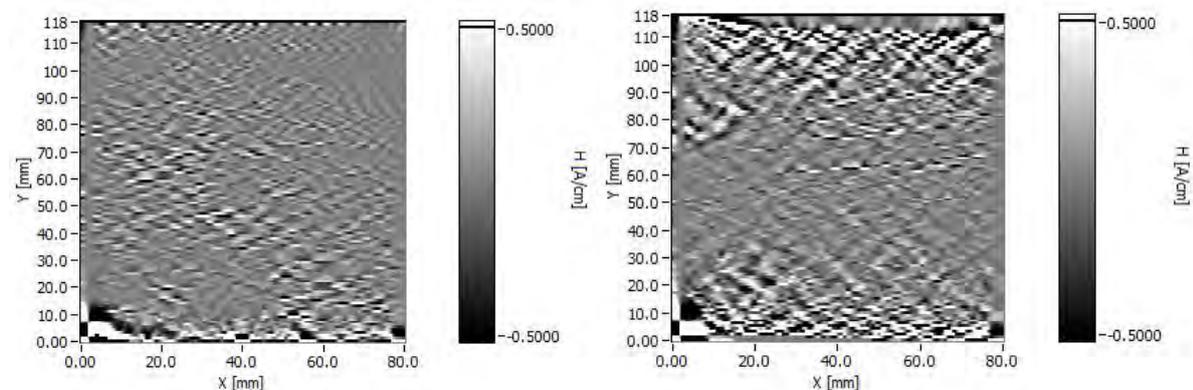
Federnder Kontakt zur Testkörperoberfläche

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster (nur die Hall-Sonde wurde bewegt, keine Bewegung des Elektromagneten)

Versuchsaufbau zur Streuflussmessung an dem Vorabtestkörper von Siempelkamp



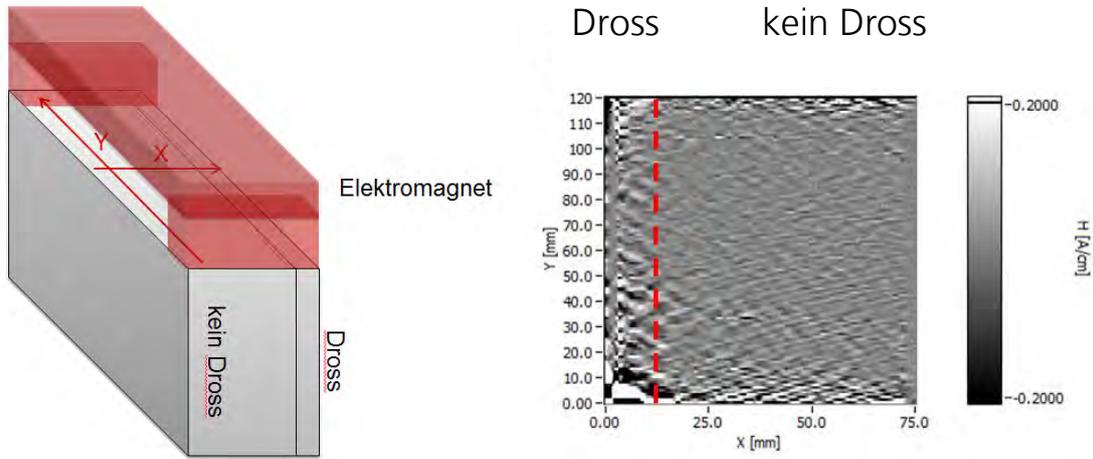
Vorabtestkörper Siempelkamp, Streuflussmessungen von der Dross-Seite und der Dross-Gegenseite nach dem Schleifen



Messung von der Dross-Gegenseite

Messung von der Dross-Seite

Vorabtestkörper Siempelkamp, Streuflussmessungen von der Seite des Versuchstestkörpers nach dem Schleifen

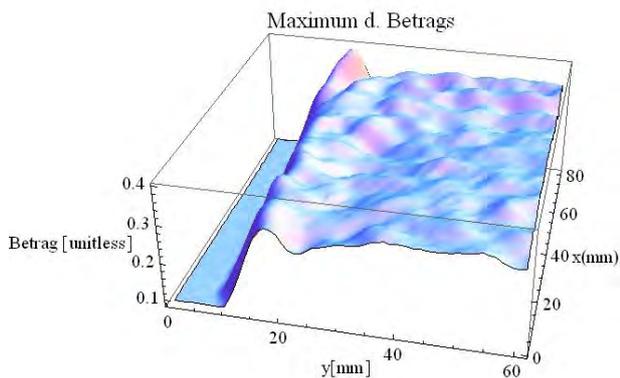


Die magnetischen Streufluss-Messungen an dem Vorabtestkörper bestätigten, dass sich auf der Dross-Seite lokale magnetische Streufelder bilden, die mit Magnetfeldsensoren detektiert werden können.

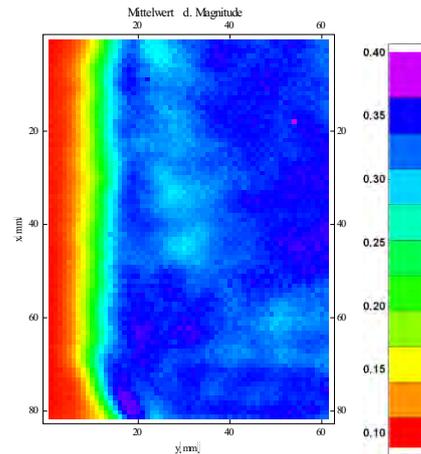
Millimeterwellen Prüfung

Die Millimeterwellenuntersuchung basiert auf der Messung von Unterschieden in der Permittivität des Materials. Bei unterschiedlichen Permittivitäten entstehen unterschiedliche Beträge und Laufzeiten der Millimeterwellen. Es war die Idee, dass Dross als nichtmetallische Ungänge möglicherweise auch mittels Mikrowellen detektiert werden könnte.

Vorabtestkörper Siempelkamp, mechanisierte Millimeterwellen Prüfung von der Seitenfläche des Vorabtestkörpers



3D Darstellung des Maximums des Betrags



2D Darstellung des Mittelwerts des Betrags

Mittels der Millimeterwellenuntersuchung war der Drossbereich nicht erkennbar. In der Abbildung sind die Beträge der Millimeterwellen des Scanbereichs dargestellt. Im rechten Teil der Abbildung zeigt der rote Bereich Luft, der grüne Bereich den Rand der Probe und der blaue Bereich die Probe. Aus dem linken Teil der Abbildung wird deutlich, dass der Drossbereich und Grundwerkstoffbereich einen gleichen Betrag haben. Das bedeutet, dass Dross und Gusseisen die gleiche Permittivität haben und somit mittels Mikrowellen nicht unterschieden werden können. Deshalb wurde dieses Verfahren im weiteren Projektverlauf nicht eingesetzt.

Voruntersuchungen an Bauteilen bei Siempelkamp

Im Rahmen von Voruntersuchungen bei Siempelkamp wurde das im Folgenden dargestellte Bauteil (gegossenen Großkomponente aus Gusseisen mit Kugelgraphit EN-GJS-400) für die Aufnahme von Ultraschall und mikromagnetischen Messdaten zur Verfügung gestellt.

Bauteil „Platte“ bei Siempelkamp



Länge: ca. 3000 mm
Breite: ca. 3000 mm
Höhe: ca. 1000 mm
Gewicht: 40,5 t

Ultraschallprüfung an einem Bauteil bei Siempelkamp

Impuls-Echo-Technik, Kontakttechnik, Einschallwinkel 0° (Senkrechteinschallung)

Prüfkopf:

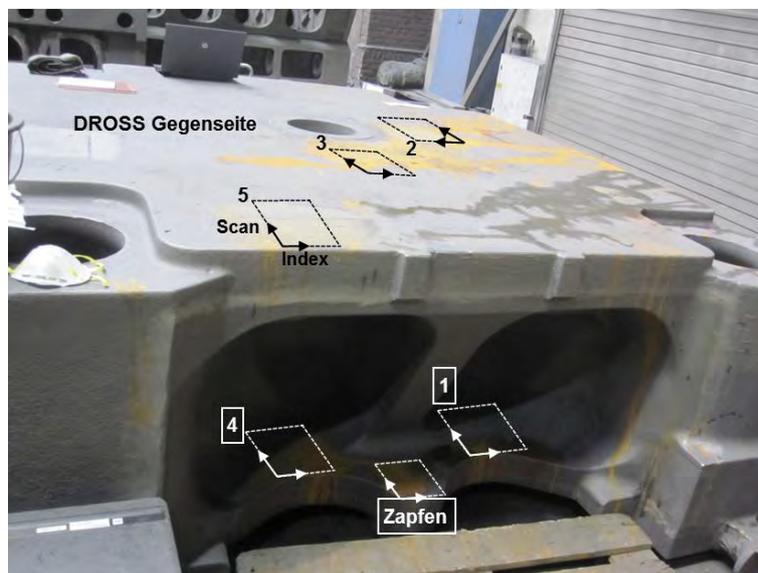
Einzelschwinger K1G (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Koppelmittel: Fett

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster mittels eines mobilen zweiachsigen Manipulator-Systems

Einschallung: Dross-Seite und Dross-Gegenseite

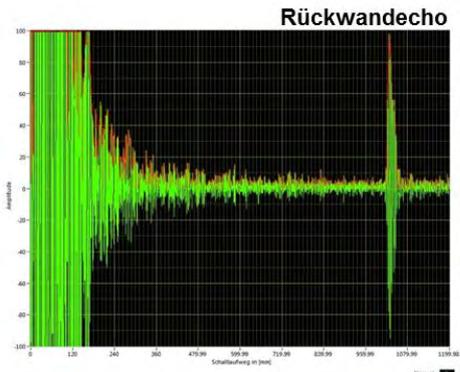
Bauteil „Platte“ bei Siempelkamp, Messbereiche der Ultraschallprüfung



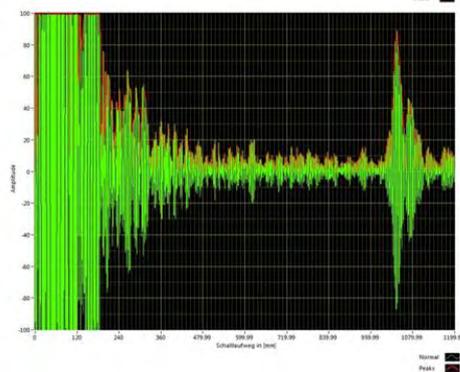
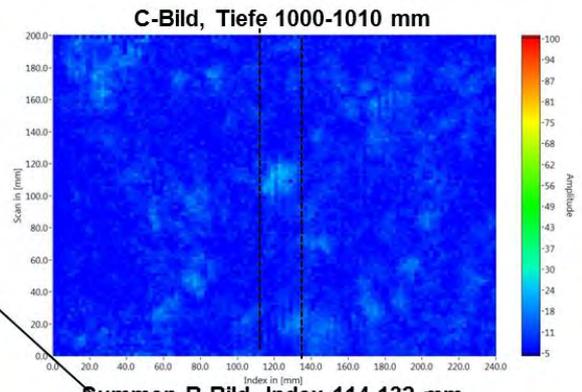
Im Rahmen der Voruntersuchungen bei Siempelkamp wurden bei den mechanisierten Ultraschallprüfungen Anzeigen aufgezeichnet, die sowohl von eventuell vorhandenem Dross aber auch vom Gefügerauschen des Grundmaterials herrühren konnten. Nach den Voruntersuchungen wurden anhand weiterer Testkörper mit Dross die Ergebnisse der mechanisierten Ultraschallprüfungen näher untersucht.

Die Messung von der Gegenseite bei Siempelkamp zeigte im Messbereich 2 mit dem K1G Prüfkopf kleinere Anzeigen. Der Messbereich 2 zeigte fleckenartige Bereiche, die auf eine Dross-Schicht etwa 15 mm schließen ließen.

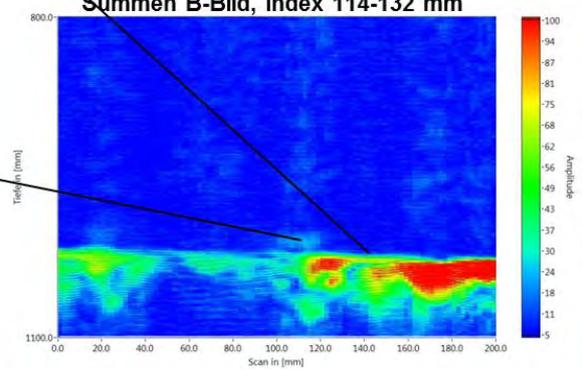
Bauteil „Platte“ bei Siempelkamp, Messbereich 2, Einschallung von der Dross- Gegenseite



A-Bild



A-Bild



Mikromagnetische Prüfung an einem Bauteil bei Siempelkamp

Prüfsystem MikroMach

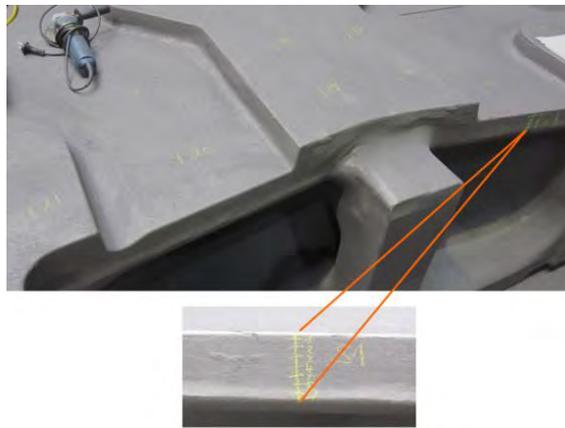
Prüfört: Dross-Seite (Gießoberseite), Dross-Gegenseite (Gießunterseite), obere Stirnseite des Bauteils „Platte“ (Dross-Seite) und untere Stirnseite des Bauteils „Platte“ (Dross-Gegenseite) in Kontakttechnik (Kontakt beider Polschuhe des MikroMachs mit der Testkörperoberfläche)

Prüffrequenz: 60 Hz

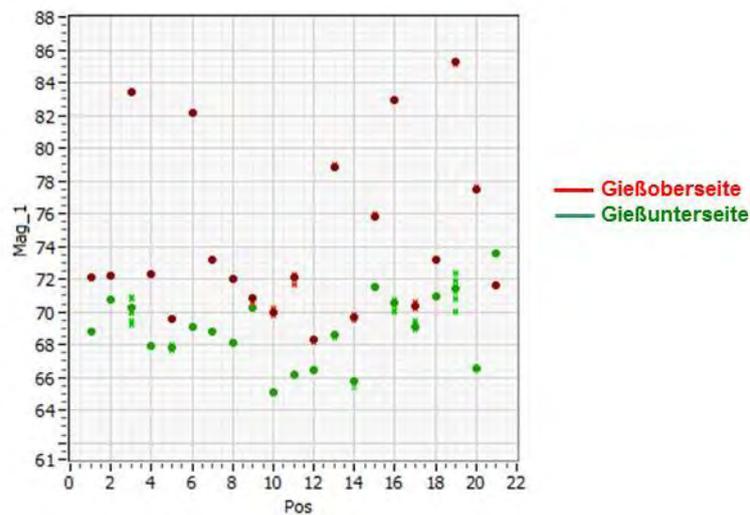
Magnetfeldaussteuerung: 110 A/cm

Ankopplung des MikroMach jeweils händisch auf die Bauteiloberfläche

Bauteil „Platte“ bei Siempelkamp, Messbereich an der oberen Stirnseite (Dross-Seite)

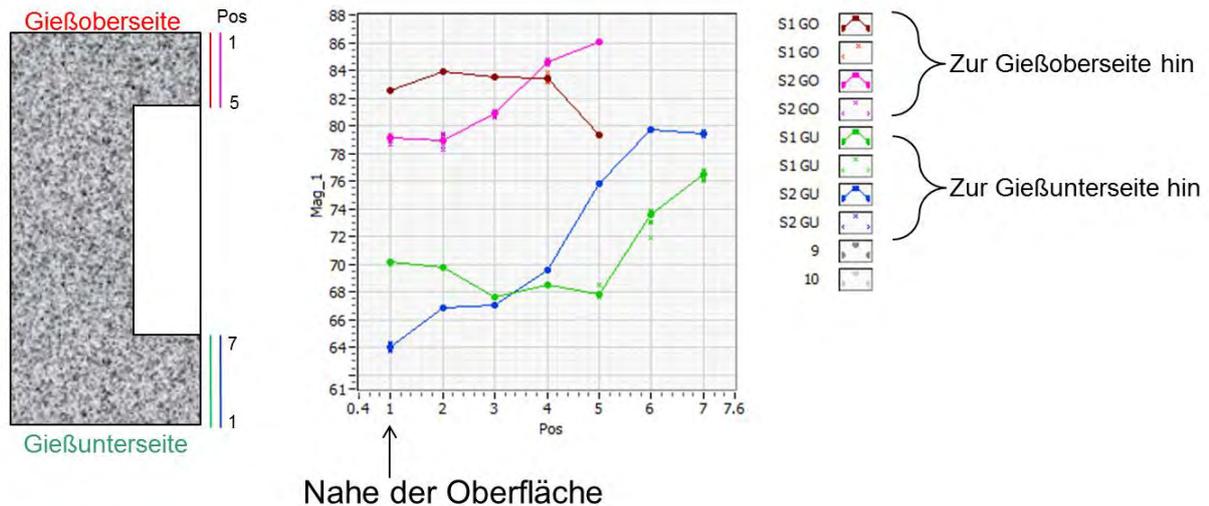


Bauteil „Platte“ bei Siempelkamp, MikroMach Messungen an der Dross-Seite (Gießoberseite) und der Dross-Gegenseite (Gießunterseite) an jeweils 21 verschiedenen über die Platte verteilte Messpositionen



Es zeigte sich an der Gießunterseite (Dross-Gegenseite, grün) ein homogene Signalverteilung, während an der Gießoberseite (Dross-Seite, rot) deutliche Unterschiede zu erkennen waren. Es war anzunehmen, dass dies möglicherweise auf eine inhomogene fein verteilte Dross-Ausbildung an der Gießoberseite zurückzuführen war.

Bauteil „Platte“ bei Siempelkamp, MikroMach Messungen an den Stirnseiten des Bauteils



Die vorherige Abbildung zeigt die Kenngrößenverläufe entlang der vier Kanten an der Stirnseite der „Platte“. Die blauen und grünen Linien zeigten hierbei den Verlauf beginnend von der vermutlich drossfreien Gießunterseite (Pos. 1) hin zu der Platteninnenseite (Pos.7), welche wiederum eine „Zwischen-Gießoberseite“ mit möglicher Dross-Bildung darstellte. Die rosa und braune Linie zeigten umgekehrt den Verlauf beginnend von der möglicherweise drossbehafteten Gießoberseite (Pos. 1) entlang der zwei Kanten hin zu der Platteninnenseite (Pos.5). Die Signaländerung des blauen und grünen Kenngrößenverlaufs entsprach genau dem erwarteten Ergebnis. An der Startposition 1 der Kante befand sich der Sensor an der drossfreien Gießunterseite und das Signalniveau entsprach genau dem Signalniveau der Gießunterseite. Im weiteren Verlauf stieg der Kenngrößenverlauf auf das zur Gießoberseite passende Niveau an. Somit lag die Vermutung nahe, dass die „Zwischen-Gießoberseite“ ebenfalls drossbehaftet ist. Der rosa und braune Kenngrößenverlauf deutete ebenfalls auf eine drossbehaftete Gießoberseite hin. Aus diesem Verhalten beider Verläufe könnte man schlussfolgern, dass die beiden an der Gießoberseite gemessenen Kanten drossbehaftet sind.

Testkörper von MAN Diesel & Turbo SE

Der Projektpartner MAN Diesel & Turbo SE hat vier Testkörper mit den Abmessungen 500 x 500 x 200 mm zur Verfügung gestellt.

Ultraschallprüfung, Einschallung: DROSS-Gegenseite:

Impuls-Echo-Technik, Kontakttechnik, Einschallwinkel 0° (Senkrechteinschallung)

Prüfkopf:

Einzelschwinger B1S (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Koppelmittel:

Fließwasser mit Korrosionsschutz

Schussabstand der Abrasterung in Scan- und Indexrichtung:

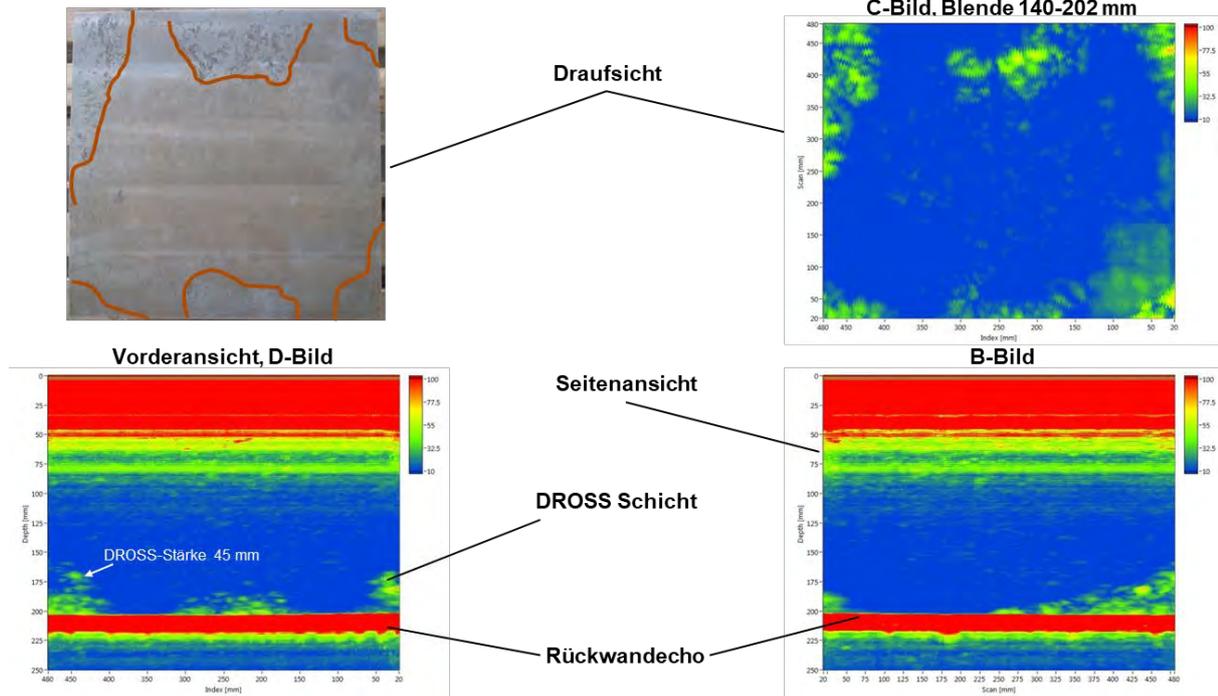
jeweils 10% des Schwingerdurchmessers → 2 mm

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

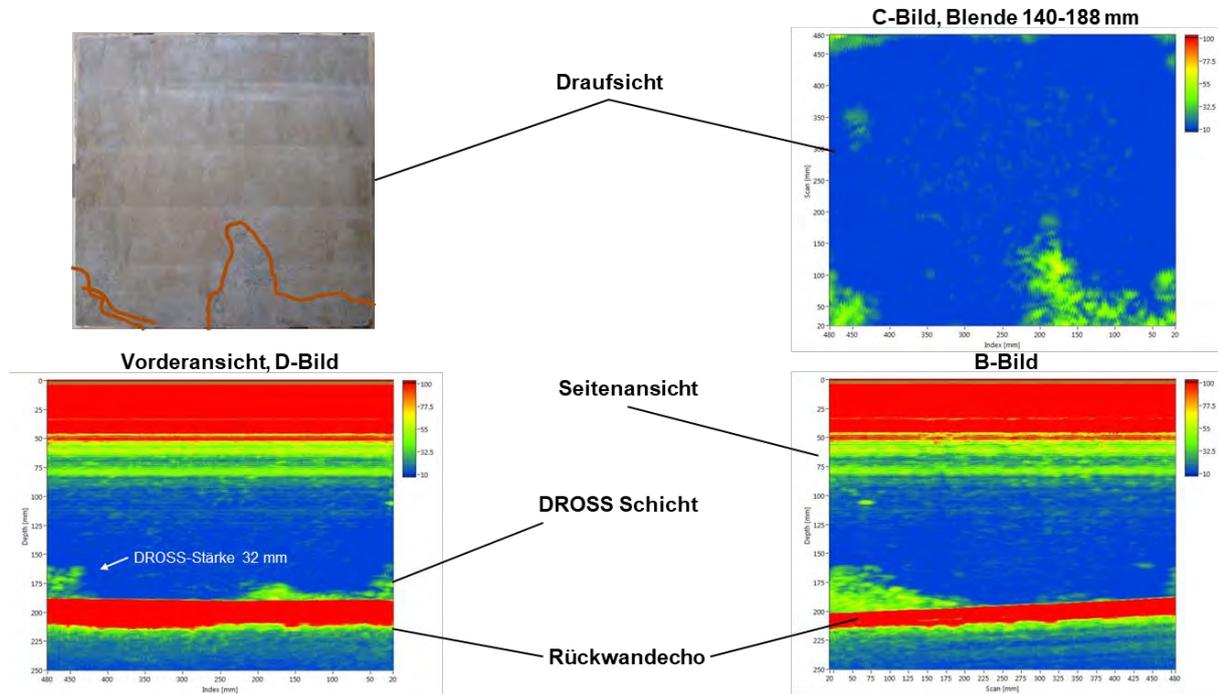
Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

Im linken oberen Bereich der Abbildungen ist jeweils ein Foto des vermessenen Testkörpers abgebildet (Dross-Seite). Für die MAN-Testkörper wurden die nach der Herstellung durch manuelle Ultraschall-Messungen ermittelten Dross-Verteilungen in die Testkörperfotos gezeichnet. Auf der unteren linken Seite der Abbildungen ist jeweils das D-Bild (Vorderansicht bzgl. des Fotos) der mechanisierten Ultraschall-Messungen dargestellt. Im rechten Bereich der Abbildungen befindet sich oben das C-Bild (Draufsicht) und darunter das B-Bild (Seitenansicht). Die zur C-Bilderzeugung verwendeten Blenden sind jeweils in den Abbildungen angegeben. Die mittels Ultraschallprüfung ermittelte maximale Dross-Stärke der Testkörper ist jeweils im D-Bild eingetragen.

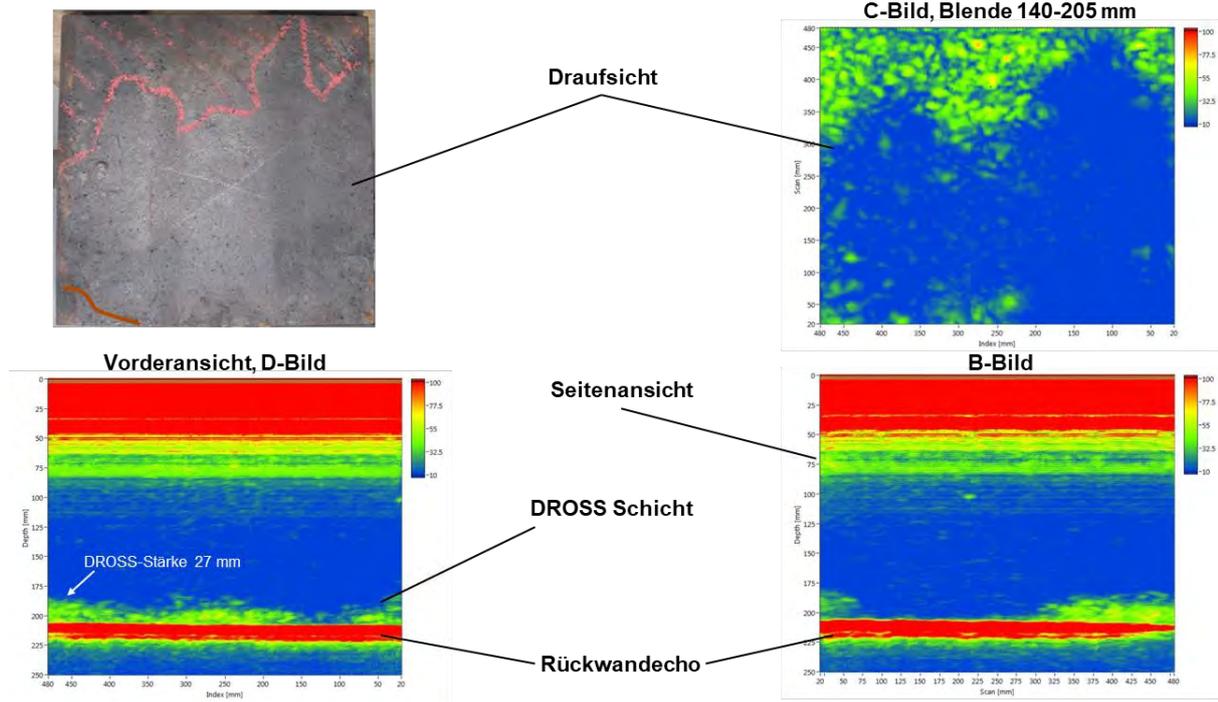
Testkörper MAN 5261600



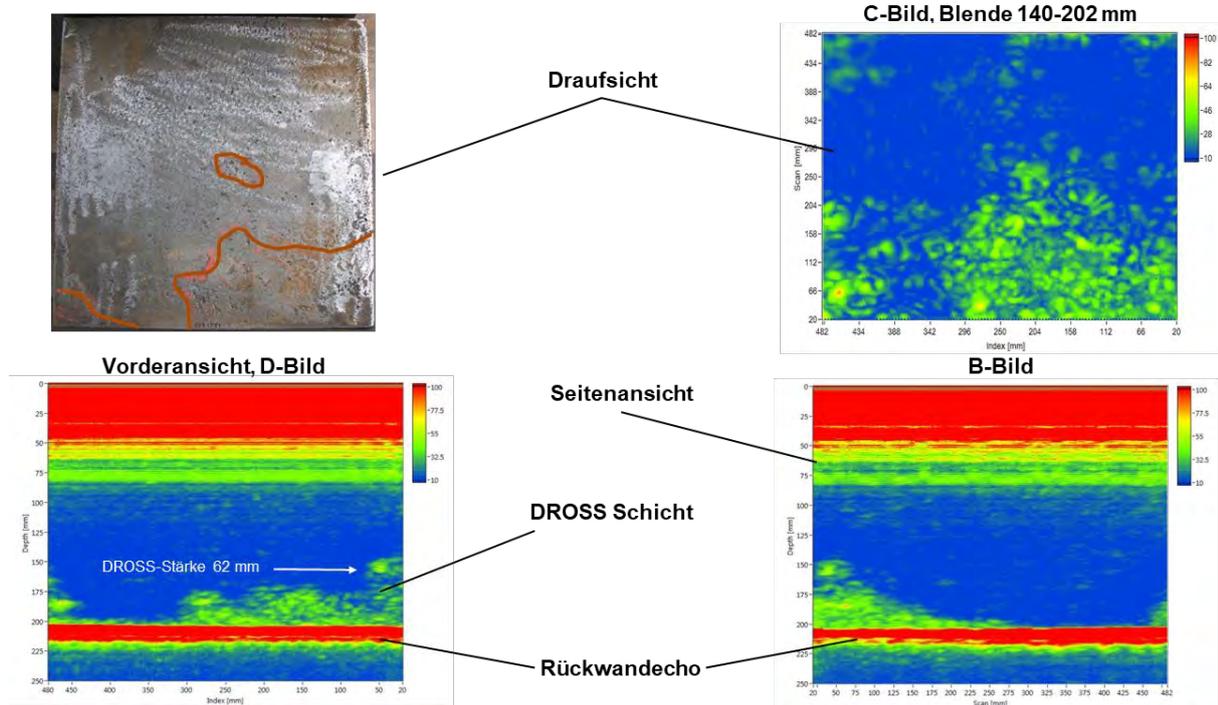
Testkörper MAN 5261601



Testkörper MAN 5261790



Testkörper MAN 5261791



Ultraschallprüfung, Einschallung: DROSS-Seite:

Impuls-Echo-Technik, Kontakttechnik, Einschallwinkel 0° (Senkrechteinschallung)

Prüfkopf:

Einzelschwinger SEB1 (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Koppelmittel:

Fließwasser mit Korrosionsschutz

Schussabstand der Abrasterung in Scan- und Indexrichtung:

jeweils 10% des Schwingerdurchmessers → 2 mm

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

Im linken oberen Bereich der Abbildungen ist jeweils ein Foto des vermessenen Testkörpers abgebildet. Im rechten Bereich der Abbildungen befindet sich oben das C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Dross-Gegenseite bzw. Schnittfläche, und darunter zum Vergleich das C-Bild (ebenfalls Draufansicht), aufgenommen von der Dross-Seite bzw. Gießoberseite.

Testkörper MAN 5261600

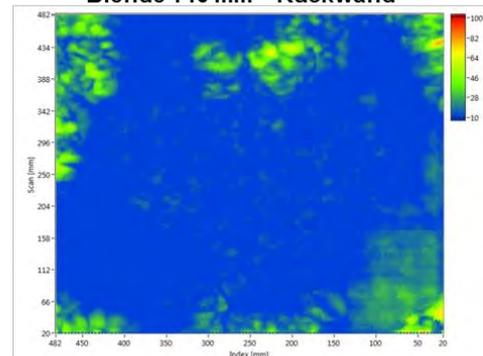


Prüfung von
Schnittfläche

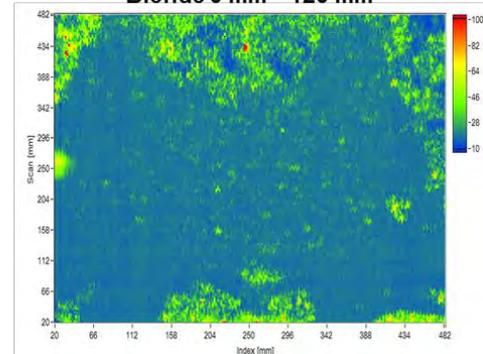
Z

Prüfung von der
Gießoberseite

Blende 140 mm - Rückwand



Blende 0 mm - 120 mm

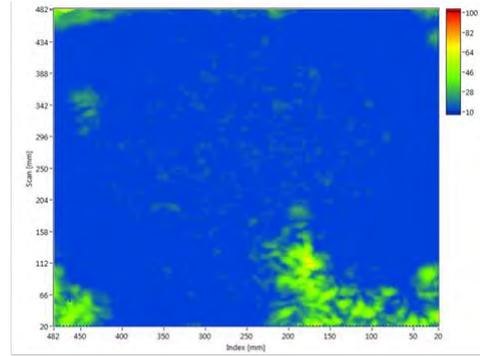


Testkörper MAN 5261601

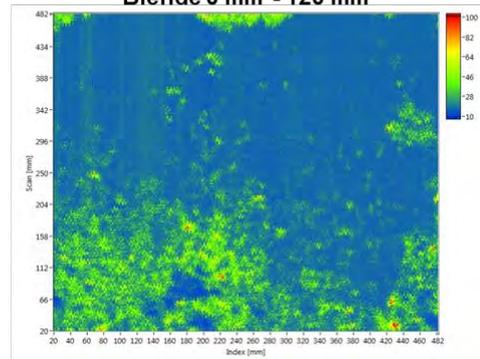


Prüfung von
Schnittfläche

Z



Blende 0 mm - 120 mm

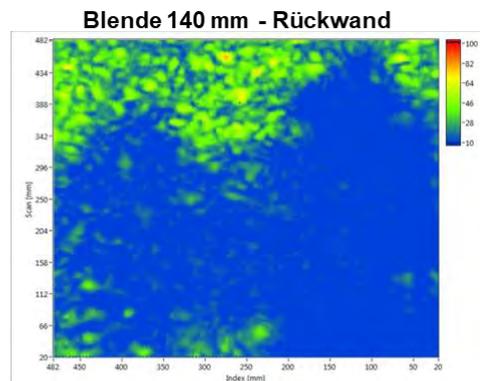


Testkörper MAN 5261790

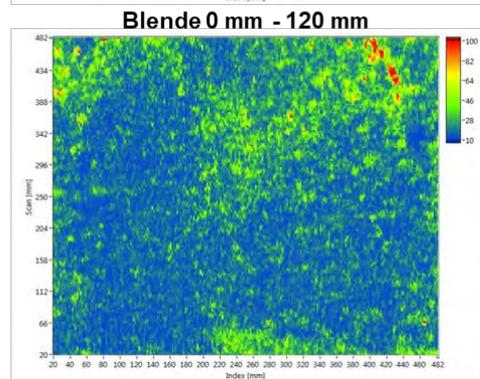


Prüfung von
Schnittfläche

Prüfung von der
Gießoberseite



Blende 140 mm - Rückwand



Blende 0 mm - 120 mm

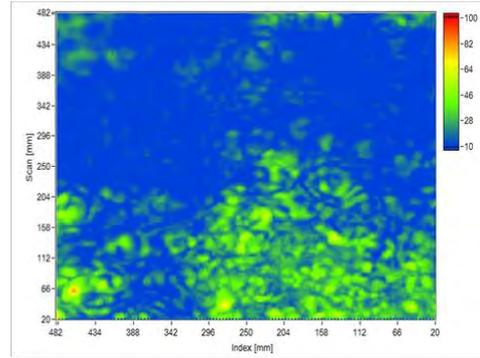
Testkörper MAN 5261791



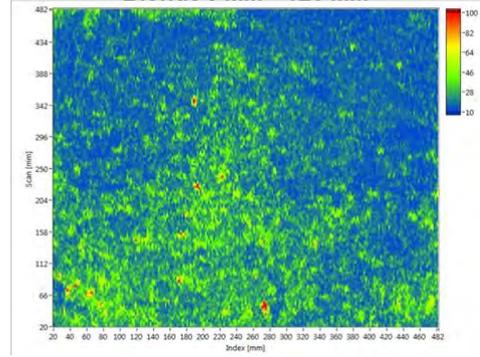
Prüfung von Schnittfläche

Prüfung von der Gießoberseite

Blende 140 mm - Rückwand



Blende 0 mm - 120 mm



Ultraschallprüfung, Auswertung der Rückwandabschattung

Einschallung: Dross-Gegenseite und Dross-Seite

Impuls-Echo-Technik, Kontakttechnik, Einschallwinkel 0° (Senkrechteinschallung)

Prüfköpfe:

Einschallung von Drosss-Gegenseite:

Einzelschwinger B1S (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Für Prüfungen der Teilsegmente des Testkörpers MAN 5261600:

Einzelschwinger B2S (2MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Einschallung von der Dross-Seite:

Einzelschwinger SEB1 (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Für Prüfungen der Teilsegmente des Testkörpers MAN 5261600:

Einzelschwinger B2S (2MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Koppelmittel: Fließwasser mit Korrosionsschutz

Schussabstand der Abrasterung in Scan- und Indexrichtung:

jeweils 10% des Schwingerdurchmessers → 2 mm

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

Anmerkungen:

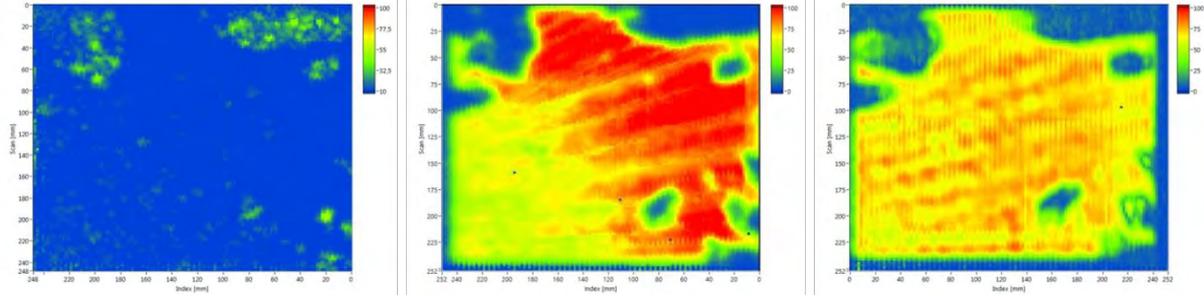
An einem Testkörper fand zur Auswertung der Rückwandabschattung eine wiederholte mechanisierte Ultraschall-Prüfung statt. Bei diesem Testkörper handelt es sich um einen an der Gieboberseite leicht überfrästen Testkörper. Zu dem Zeitpunkt dieser erneuten mechanisierten Ultraschallmessdatenaufnahme war dieser Testkörper MAN 5261600 im Gegensatz zu den zuvor an diesem Testkörper aufgezeichneten Messungen bereits geviertelt und in seiner Höhe reduziert. Dadurch ergaben sich für die vier Teilsegmente dieses Testkörpers grob die folgenden Abmessungen: 250mm x 250mm x 68mm.

Zur statistischen Absicherung wurde die Analyse der Rückwandabschattung ebenfalls auf die restlichen Ultraschalldaten, die bereits an den von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten Testkörpern aufgezeichnet wurden, appliziert. Da zur statistischen Absicherung Ultraschallmessdaten verwendet wurden, die im Laufe des Projektes an den Testkörpern aufgezeichnet wurden und diese Testkörper im Zuge der Projektarbeit zerstörend geprüft wurden, konnten keine neuen mechanisierten Ultraschalldaten aufgezeichnet werden. Neben der zerstörenden Prüfung in Belastungsversuchen wurden die Testkörper ebenfalls für Referenzuntersuchungen umgearbeitet, was eine Wiederholung der mechanisierten Messungen ebenfalls ausschloss. Aus diesem Grund wurden Daten verwendet, die nicht speziell für den Rückwandabschattungsansatz aufgezeichnet wurden. Deshalb ist es in einigen Messungen der Fall, dass eine Übersteuerung der Messdaten für die Rückwandabschattungs auswurteilung vorliegt. Die Übersteuerungen sind darauf zurückzuführen, dass mit entsprechend hohen Verstärkungen gearbeitet wurde, um die Empfindlichkeit der mechanisierten Ultraschallprüfung zur Dross-Detektion zu erhöhen. Dies stellt für die Analyse des Rückwandabschattungsansatzes kein grundsätzliches Problem dar, aber es führt dazu, dass die Ergebnisbilder teilweise bezüglich der Farbskala nicht mit dem zuvor an dem geviertelten Testkörper MAN 5261600 übereinstimmen. Die qualitative Aussagekraft der Bilder bleibt jedoch erhalten.

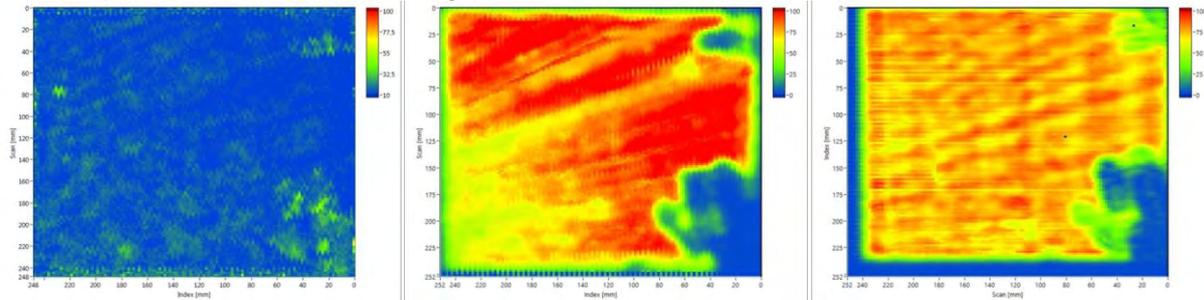
Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

Im linken Bereich der Abbildungen ist das Ultraschall C-Bild aufgezeichnet von der Dross-Gegenseite dargestellt. Mittig ist jeweils das C-Bild der Analyse der Rückwandabschattung für Ultraschalldaten bei Einschallung von der Dross-Gegenseite und rechts das C-Bild der Analyse der Rückwandabschattung bei Einschallung von der Dross-Seite dargestellt.

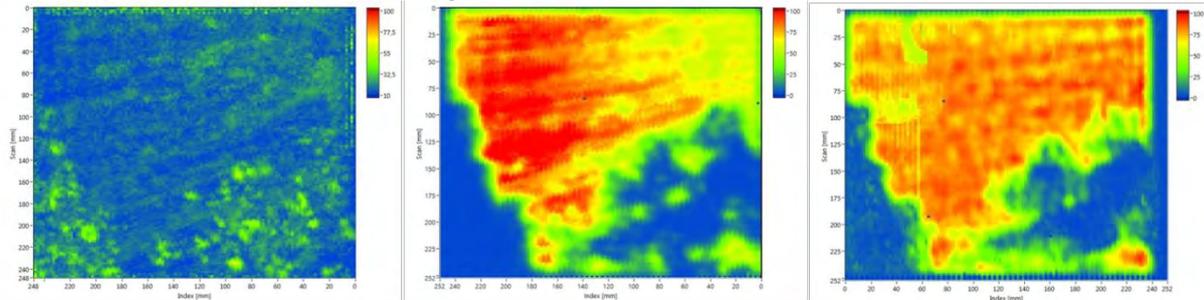
Testkörper MAN 5261600, Teilsegment 1



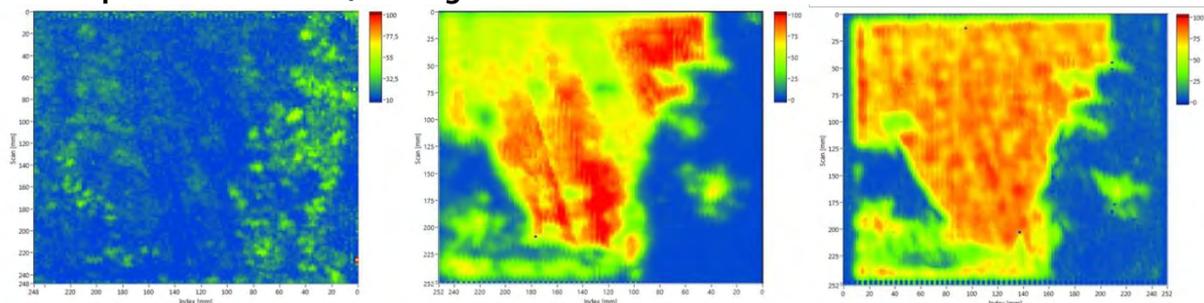
Testkörper MAN 5261600, Teilsegment 2



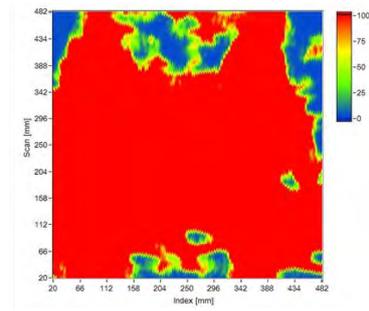
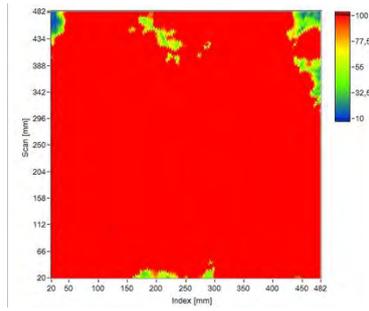
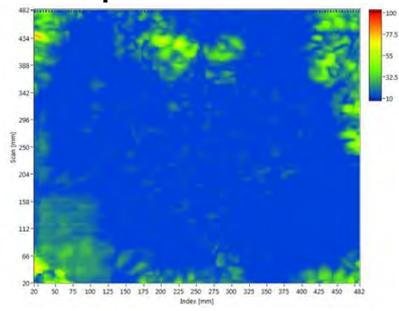
Testkörper MAN 5261600, Teilsegment 3



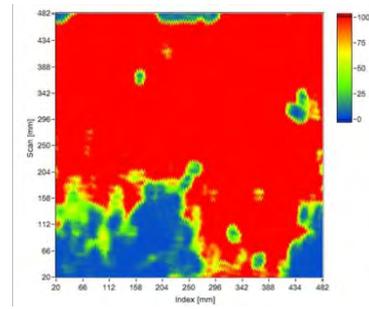
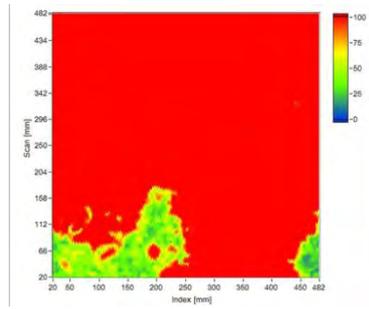
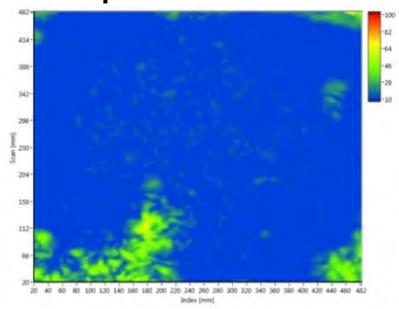
Testkörper MAN 5261600, Teilsegment 4



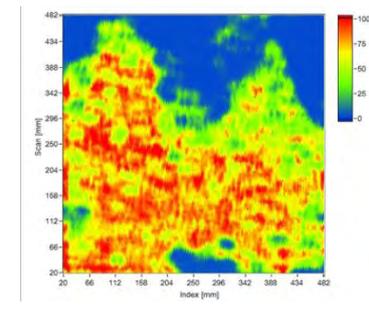
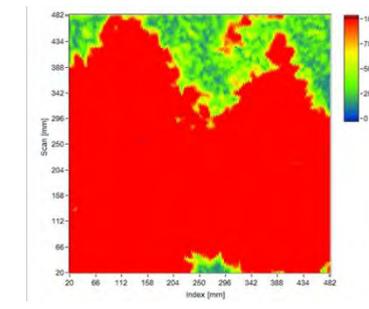
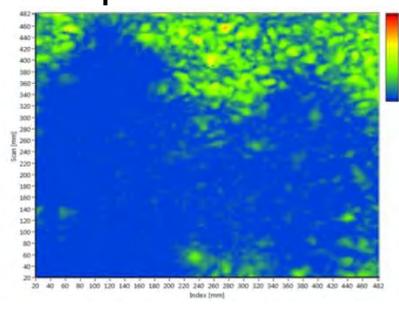
Testkörper MAN 5261600



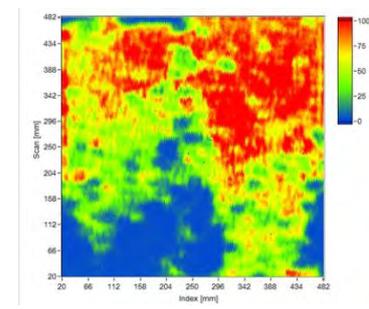
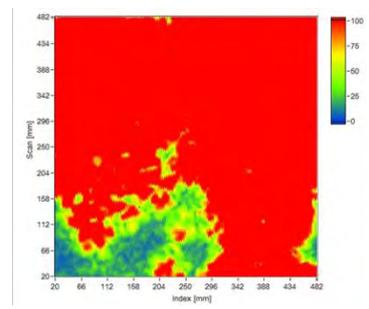
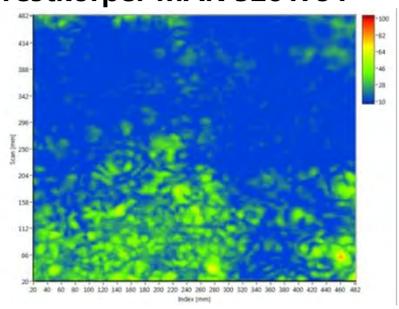
Testkörper MAN 5261601



Testkörper MAN 5261790



Testkörper MAN 5261791



Mikromagnetische Prüfung

Prüfsystem MikroMach

Prüfort: DROSS-Seite in Kontakttechnik (Kontakt beider Polschuhe des MikroMach mit der Testkörperoberfläche)

Prüffrequenz: 60 Hz

Magnetfeldaussteuerung: 110 A/cm

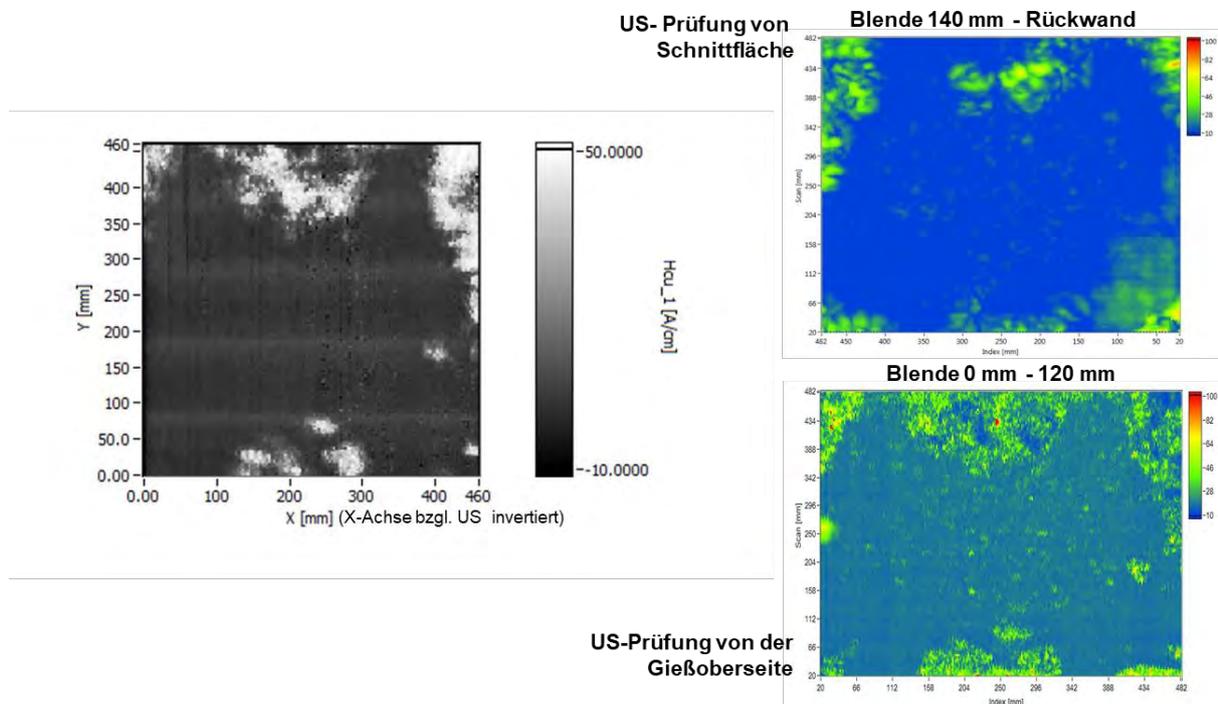
Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

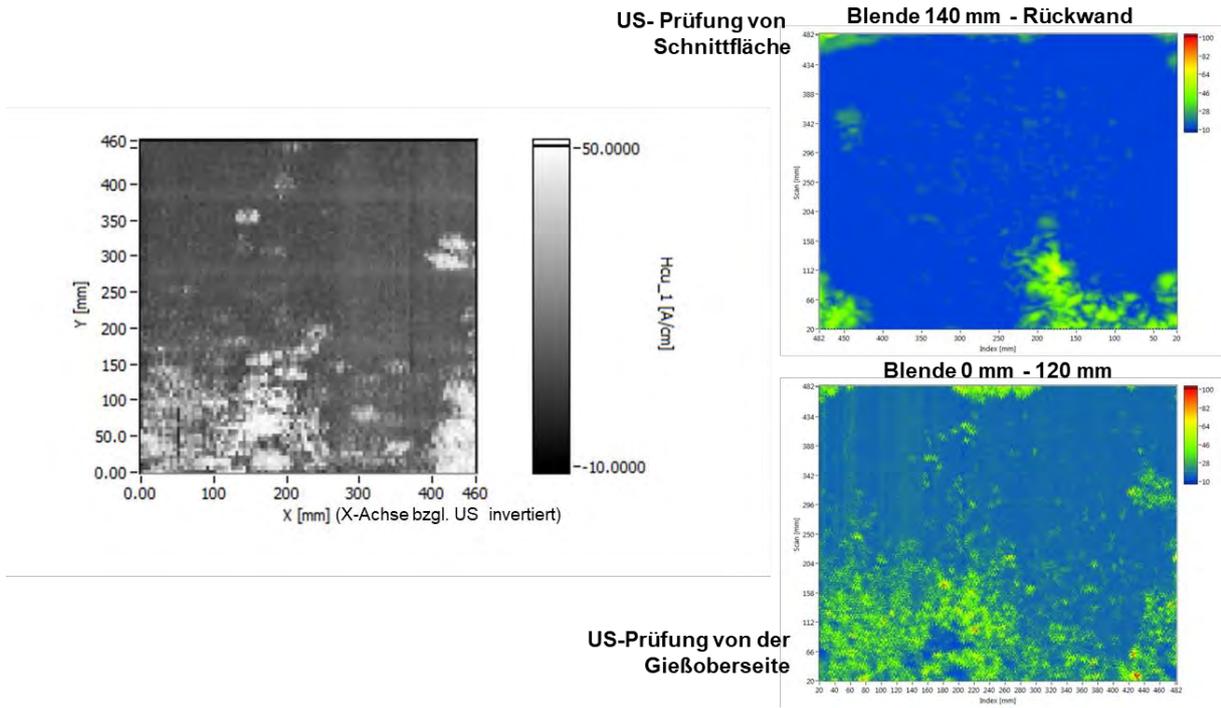
Im linken Bereich der Abbildungen ist jeweils das Ergebnisbild der mechanisierten Datenaufnahme der mikromagnetischen 3MA-Kenngröße H_{cu} (Koerzitivfeldstärke abgeleitet aus der Überlagerungspermeabilität) dargestellt. Im rechten oberen Bereich der Abbildungen befindet sich das Ultraschall-C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Schnittfläche bzw. Dross-Gegenseite. Im rechten unteren Bereich der Abbildungen befindet sich das Ultraschall-C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Dross-Seite. Die Ultraschall-Bilder dienen zum qualitativen Vergleich der Ultraschall-Ergebnisse mit den Ergebnisbildern der 3MA-Datenaufnahme.

Die Auflösungen der mechanisierten mikromagnetischen Prüfungen sind jeweils in den Abbildungsbeschriftungen angegeben.

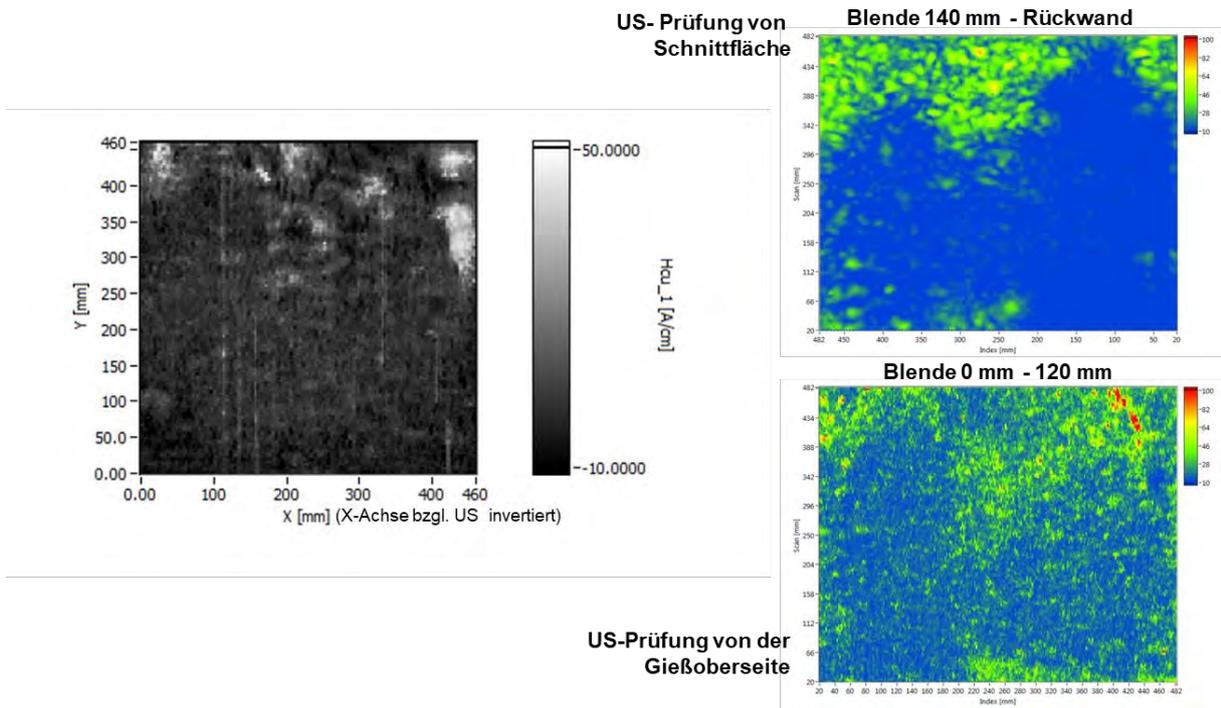
Testkörper MAN 5261600, Auflösung 150 x 150 Messpunkte



Testkörper MAN 5261601, Auflösung 92 x 92 Messpunkte

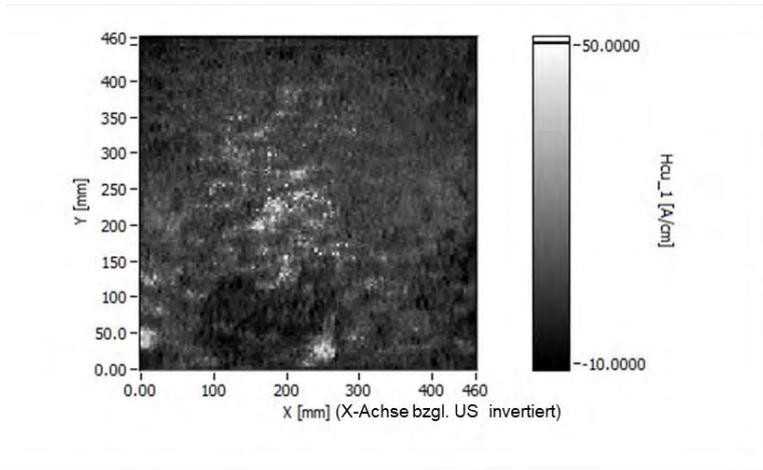


Testkörper MAN 5261790, Auflösung 150 x 150 Messpunkte

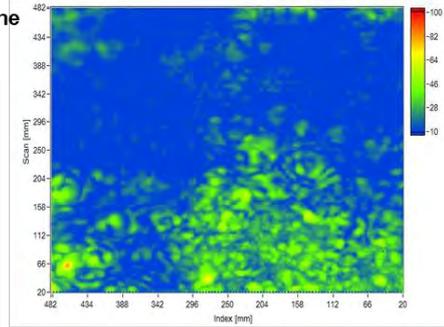


Testkörper MAN 5261791, Auflösung 150 x 150 Messpunkte

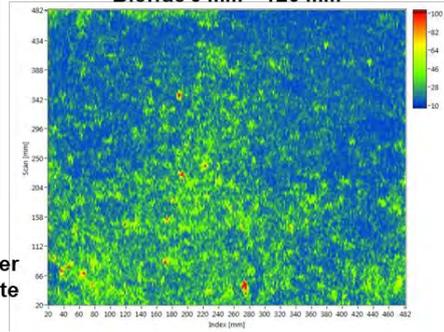
**US- Prüfung von
Schnittfläche**



Blende 140 mm - Rückwand



Blende 0 mm - 120 mm



**US-Prüfung von der
Gießoberseite**

Vergleich der beiden Varianten von 3MA-Prüfsystemen: MikroMach und 3MA-X8

Seitens des Fraunhofer IZFP wurde im Laufe des Projektes der Support, Aufbau sowie die Vermarktung und Produktion von MikroMach-Systemen eingestellt, so dass gegen Ende der Projektlaufzeit auf die neueste Variante von 3MA-Prüfsystemen zurückgegriffen werden musste. Um die Vergleichbarkeit der beiden Prüfsystemvarianten aufzuzeigen, wurde der Testkörpers MAN 5261601 mit beiden Prüfsystemvarianten mechanisiert mikromagnetisch geprüft. Mit beiden Varianten wurde von der DROSS-Seite in Kontakttechnik (Kontakt beider Polschuhe des MikroMach bzw. 3MA-X8-Sensors mit der Testkörperoberfläche) geprüft. Die Abtastung der Bauteiloberfläche fand nach mäanderförmigem Scanmuster statt.

Prüfsystem MikroMach

Prüffrequenz: 60 Hz

Magnetfeldaussteuerung: 110 A/cm

Prüfsystem 3MA-X8

Prüffrequenz: 50 Hz

Magnetisierungsamplitude: 2 V

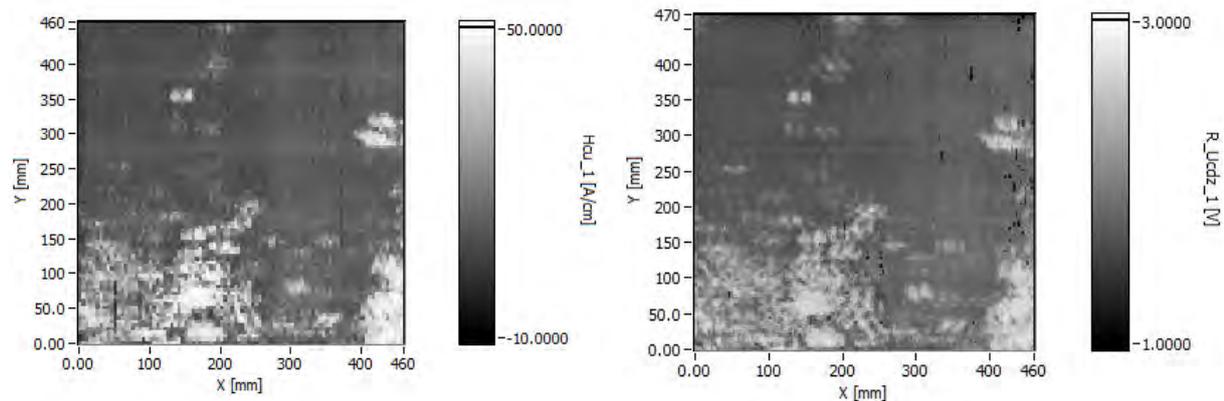
Anmerkung:

Die Ergebnisbilder beider Prüfsystem zeigen qualitativ die Verteilung des Drosses und liefern somit vergleichbaren Ergebnisse bei der mechanisierten Prüfung.

Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellung:

Im linken Bereich der Abbildung ist das Ergebnisbild der mechanisierten Datenaufnahme der mikromagnetischen 3MA-Kenngröße H_{cu} (Koerzitivfeldstärke abgeleitet aus der Überlagerungspermeabilität) der MikroMach-Variante dargestellt. Im rechten Bereich der Abbildung befindet sich das Ergebnisbild der Kenngröße R_{Ucdz} (Analogon zur Koerzitivfeldstärke abgeleitet aus der Überlagerungspermeabilität) des 3MA-X8-Prüfsystems.

Vergleich der Ergebnisbilder MikroMach und 3MA-X8 (Testkörper MAN 5261601)



Magnetische Streufluss-Prüfung von der Dross-Seite

Magnetisierungseinheit im Verbund mit einem flexiblen Hall-Sonden-Träger:

Elektromagnet (Hall-Sonde mittig zwischen den Polschuhen angeordnet)

Magnetisierungsstrom: 0,55 A

Abstand der Polschuhe zur Oberfläche: 2 mm

Hall-Sonde:

Sensitiv in Normal-Richtung

Keramische Schutzschicht

Ankopplung Hall-Sonde:

Federnder Kontakt zur Testkörperoberfläche

Auflösung: 0,1 mm in Scan- und 1 mm in Index-Richtung

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

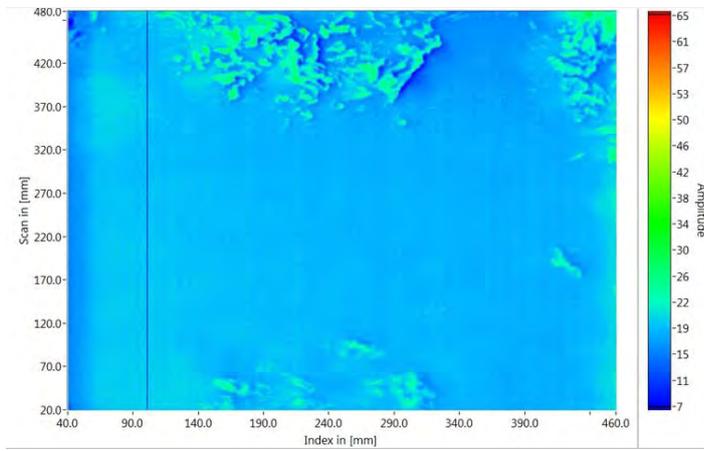
Anmerkung:

Die Gussrauheit und die Unebenheit der nicht überfrästen Testkörper störte die mechanisierten magnetischen Streufluss-Messungen (z.B. ungleichmäßiger Polschuhabstand durch Unebenheit bzw. Unplanheit/Baligkeit, Sensorabhebungen durch Rauheit, usw.) und führte zu einer Beeinflussung der Ergebnisdarstellung (analog zur MT-Prüfung).

Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

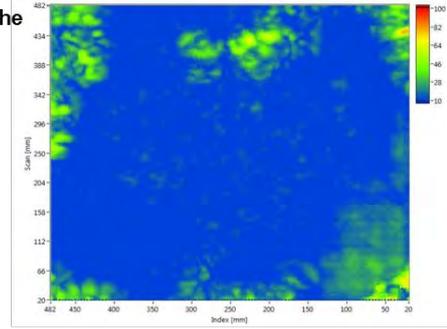
Im linken Bereich der Abbildungen ist jeweils das Ergebnisbild der mechanisierten Datenaufnahme des magnetischen Streuflusses dargestellt. Im rechten oberen Bereich der Abbildungen befindet sich das Ultraschall-C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Schnittfläche bzw. Dross-Gegenseite. Im rechten unteren Bereich der Abbildungen befindet sich das Ultraschall-C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Dross-Seite. Die Ultraschall-Bilder dienen zum qualitativen Vergleich der Ultraschall-Ergebnisse mit den Ergebnisbildern der Streufluss-Prüfung.

Testkörper MAN 5261600

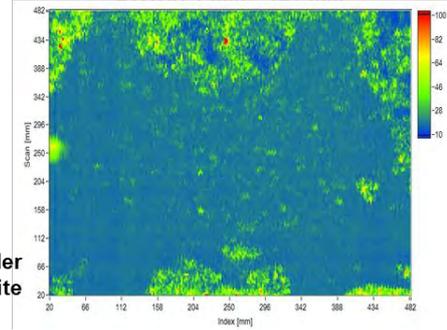


US- Prüfung von

Blende 140 mm - Rückwand



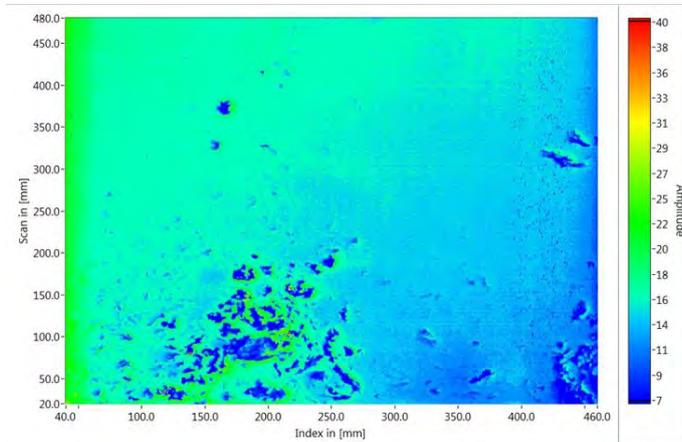
Blende 0 mm - 120 mm



US-Prüfung von der

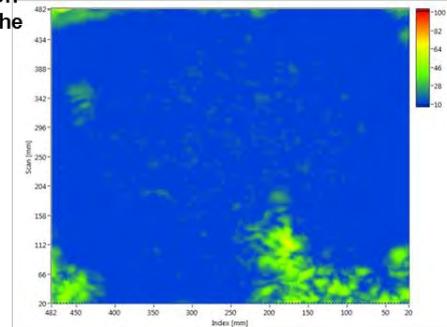
Gießoberseite

Testkörper MAN 5261601

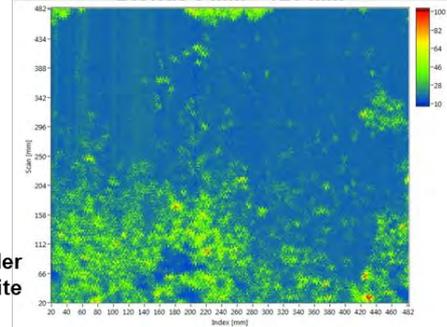


US- Prüfung von

Blende 140 mm - Rückwand



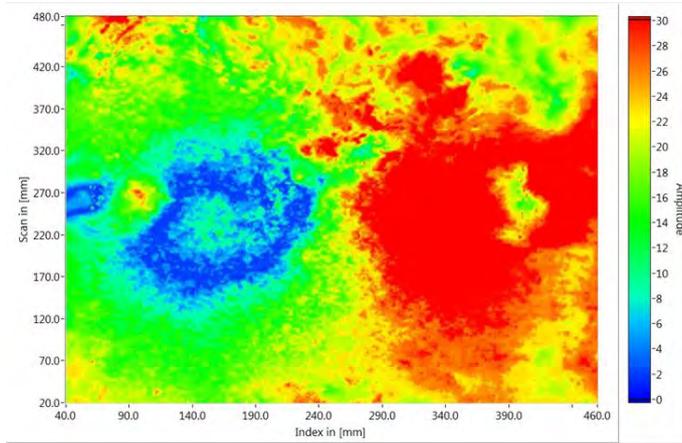
Blende 0 mm - 120 mm



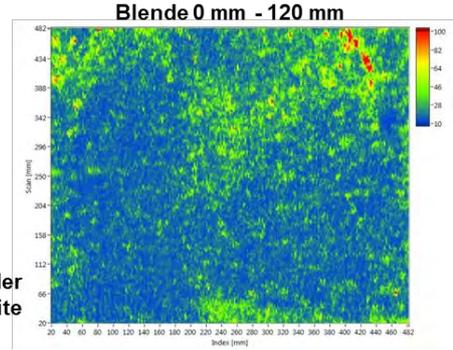
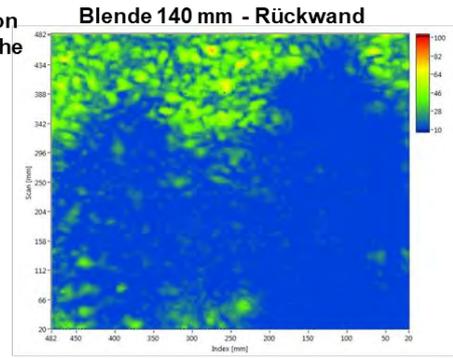
US-Prüfung von der

Gießoberseite

Testkörper MAN 5261790

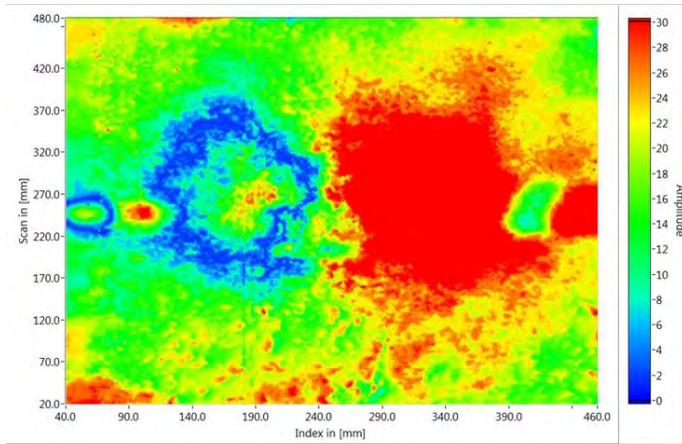


US- Prüfung von Schnittfläche

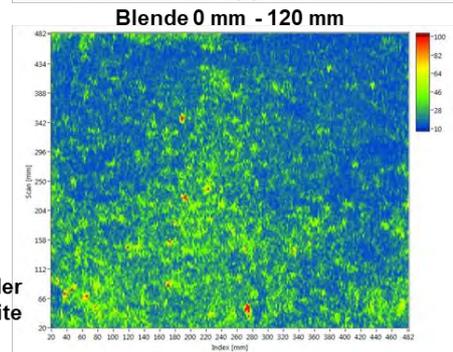
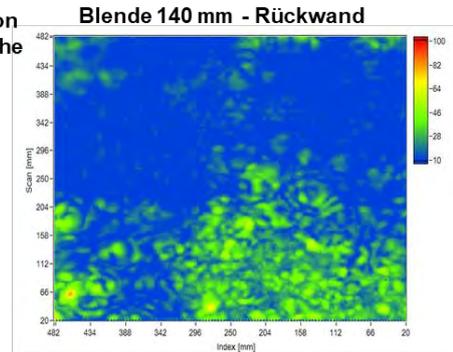


US-Prüfung von der Gießoberseite

Testkörper MAN 5261791



US- Prüfung von Schnittfläche



US-Prüfung von der Gießoberseite

Testkörper von Siempelkamp

Von dem Projektpartner Siempelkamp wurden acht Testkörper mit den Abmessungen 500 x 500x 200 mm zur Verfügung gestellt.

Ultraschallprüfung, Einschallung: DROSS-Gegenseite:

Impuls-Echo-Technik, Kontakttechnik, Einschallwinkel 0° (Senkrechteinschallung)

Prüfkopf:

Einzelschwinger B1S (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Koppelmittel:

Fließwasser mit Korrosionsschutz

Schussabstand der Abrasterung in Scan- und Indexrichtung:

jeweils 10% des Schwingerdurchmessers → 2 mm

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

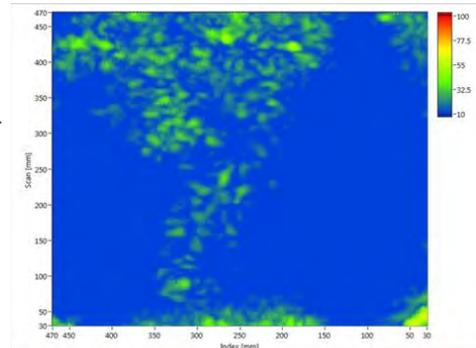
Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

Im linken oberen Bereich der Abbildungen ist jeweils ein Foto des vermessenen Testkörpers abgebildet (Dross-Gegenseite). Für die Siempelkamp-Testkörper wurden die nach der Herstellung durch manuelle Ultraschall-Messungen ermittelten Dross-Verteilungen auf die Testkörper gezeichnet. Auf der unteren linken Seite der Abbildungen ist jeweils das D-Bild (Vorderansicht bzgl. des Fotos) der mechanisierten Ultraschall-Messungen dargestellt. Im rechten Bereich der Abbildungen befindet sich oben das C-Bild (Draufsicht) und darunter das B-Bild (Seitenansicht). Die zur C-Bilderzeugung verwendeten Blenden sind jeweils in den Abbildungen angegeben. Die maximale Dross-Stärke der Testkörper ist jeweils im D-Bild eingetragen.

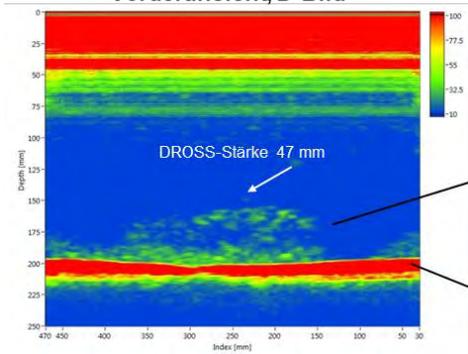
Siempelkamp Testkörper 39579-3



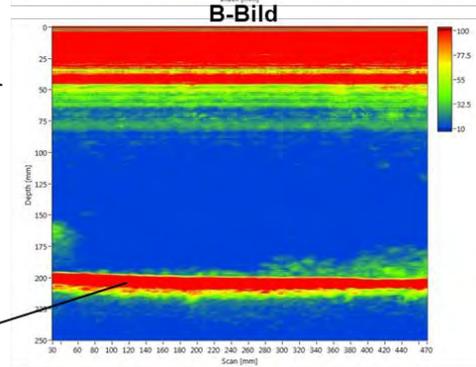
Draufsicht



Vorderansicht, D-Bild



Seitenansicht



B-Bild

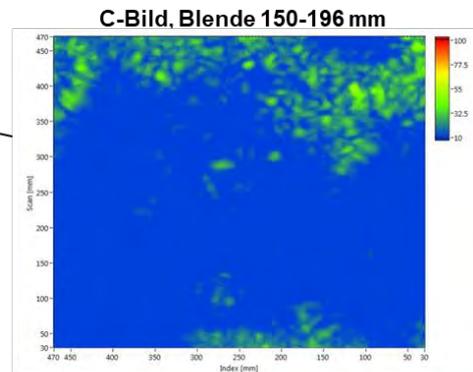
DROSS Schicht

Rückwandecho

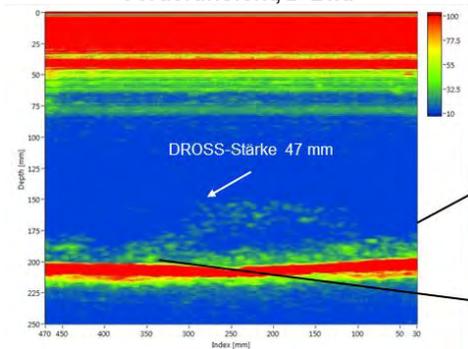
Siempelkamp Testkörper 39579-4



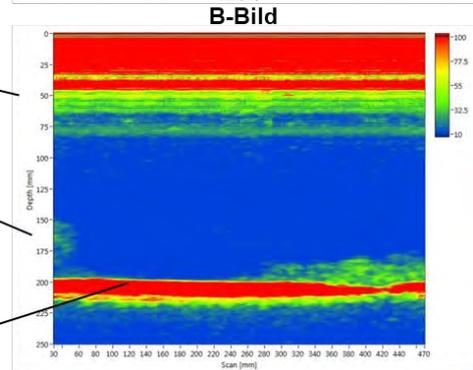
Draufsicht



Vorderansicht, D-Bild



Seitenansicht

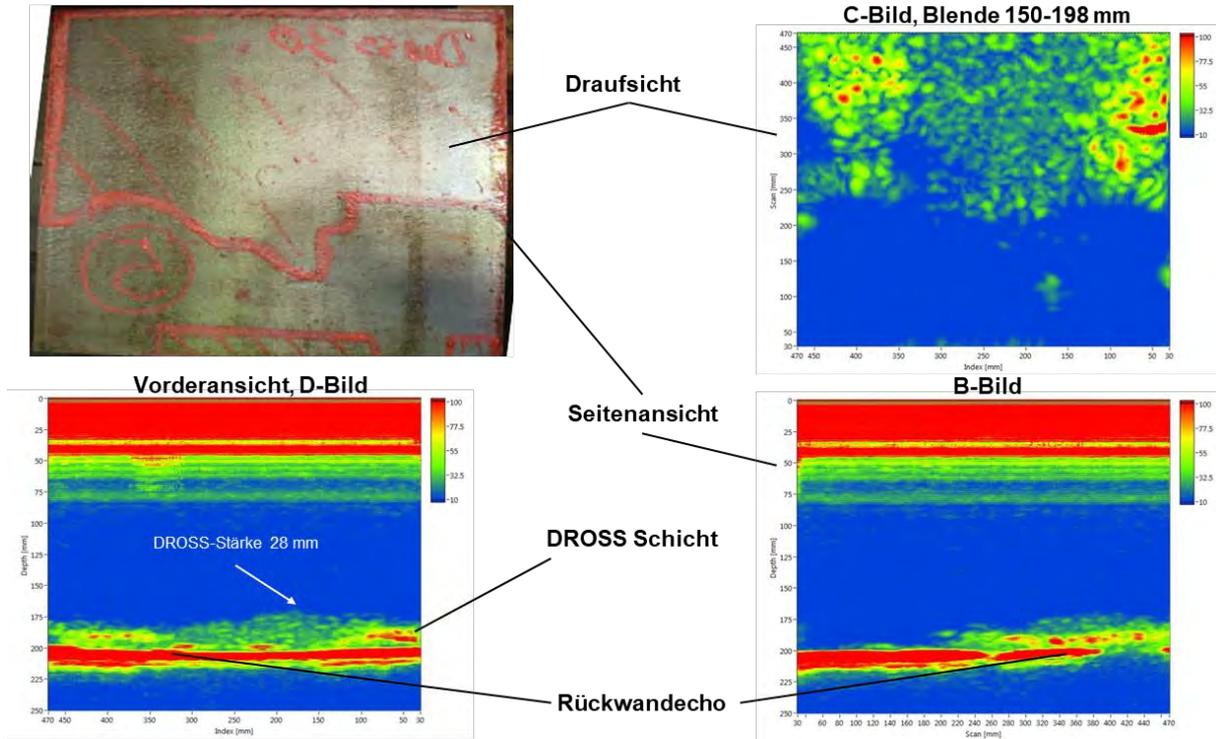


B-Bild

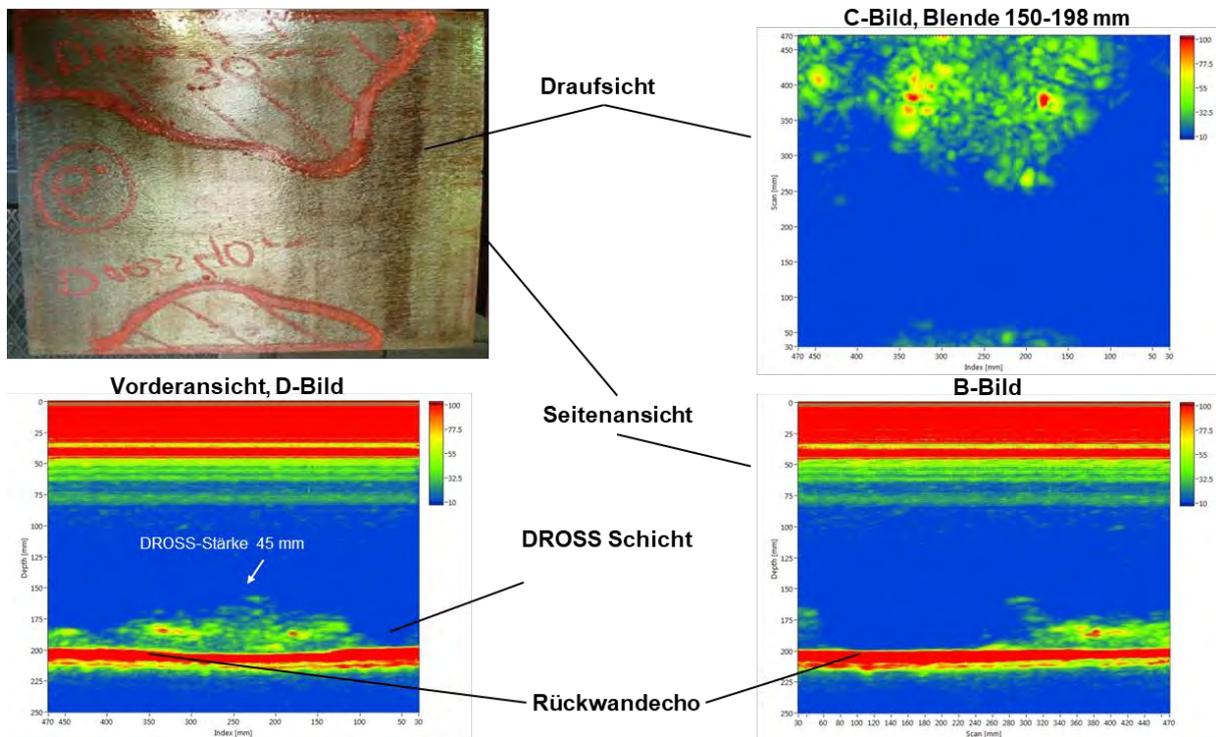
DROSS Schicht

Rückwandecho

Siempelkamp Testkörper 39579-5



Siempelkamp Testkörper 39579-6

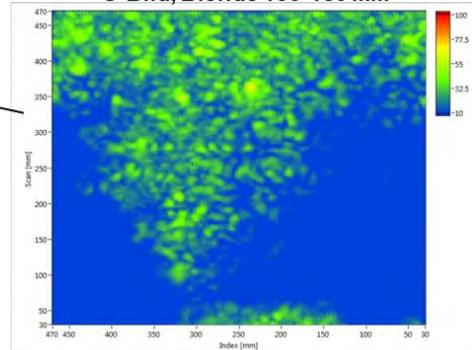


Siempelkamp Testkörper 39579-7

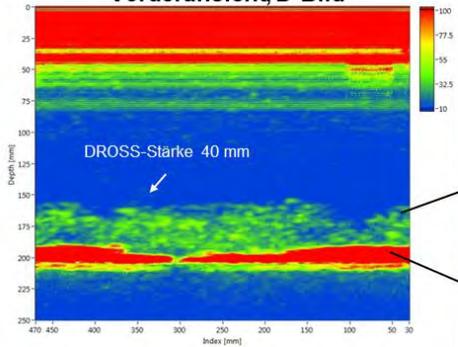


Draufsicht

C-Bild, Blende 150-189 mm

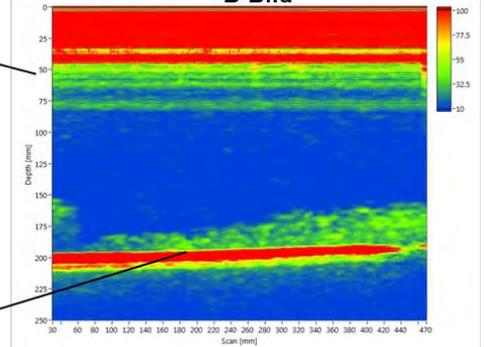


Vorderansicht, D-Bild



Seitenansicht

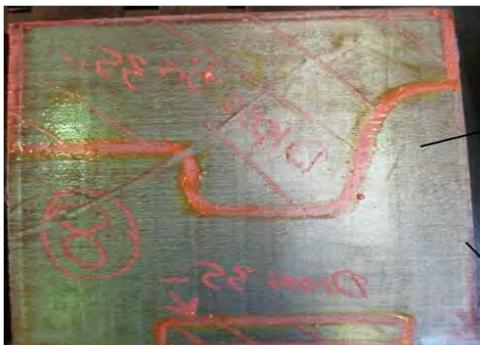
B-Bild



DROSS Schicht

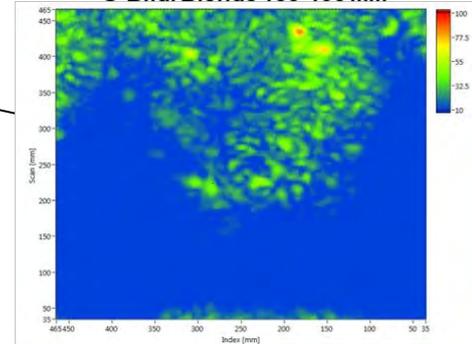
Rückwandeche

Siempelkamp Testkörper 39579-8

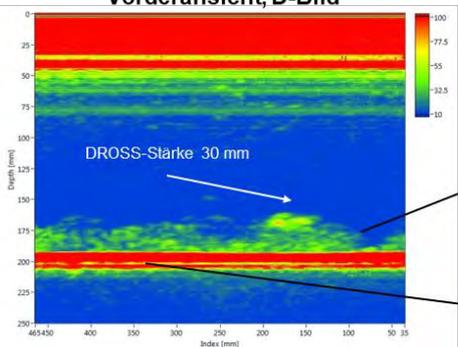


Draufsicht

C-Bild, Blende 150-190 mm

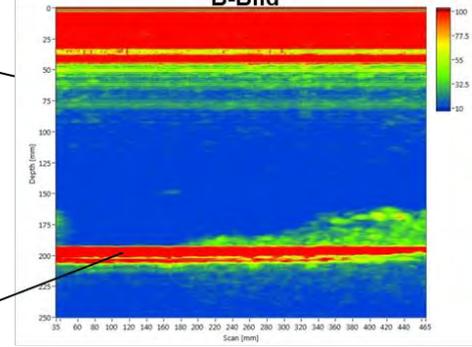


Vorderansicht, D-Bild



Seitenansicht

B-Bild



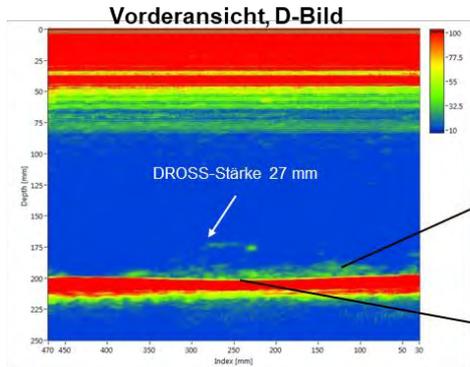
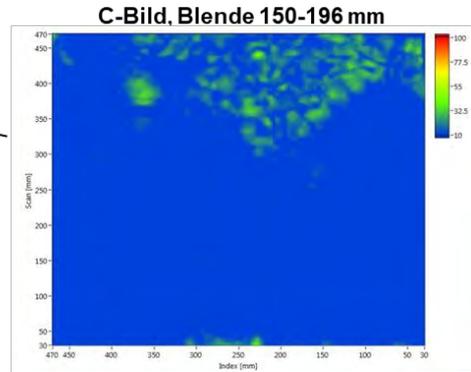
DROSS Schicht

Rückwandeche

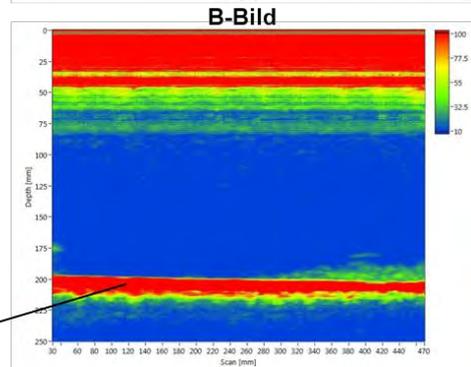
Siempelkamp Testkörper 39579-9



Draufsicht



Seitenansicht



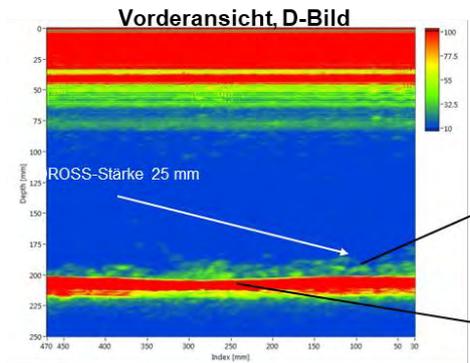
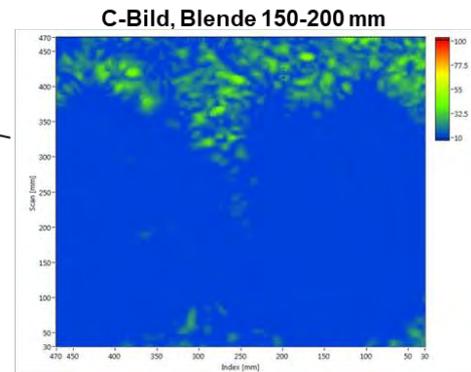
DROSS Schicht

Rückwandeche

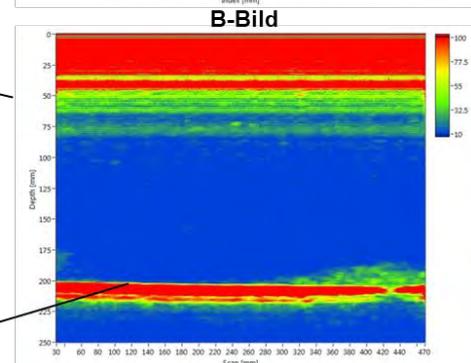
Siempelkamp Testkörper 39579-10



Draufsicht



Seitenansicht



DROSS Schicht

Rückwandeche

Ultraschallprüfung, Einschallung: DROSS-Seite:

Impuls-Echo-Technik, Kontakttechnik, Einschallwinkel 0° (Senkrechteinschallung)

Prüfkopf:

Einzelschwinger SEB1 (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Koppelmittel:

Fließwasser mit Korrosionsschutz

Schussabstand der Abrasterung in Scan- und Indexrichtung:

jeweils 10% des Schwingerdurchmessers → 2 mm

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

Im linken oberen Bereich der Abbildungen ist jeweils ein Foto des vermessenen Testkörpers abgebildet (Dross-Gegenseite). Für die Siempelkamp-Testkörper wurden die nach der Herstellung durch manuelle Ultraschall-Messungen ermittelten Dross-Verteilungen auf die Testkörper gezeichnet. Im rechten Bereich der Abbildungen befindet sich oben das C-Bild (Draufsicht), mechanisiert aufgenommen von der Dross-Gegenseite, und darunter zum Vergleich das C-Bild (ebenfalls Draufsicht), aufgenommen von der Dross-Seite bzw. Gießoberseite.

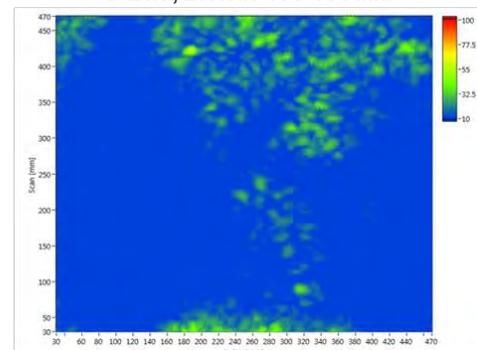
Siempelkamp Testkörper 39579-3



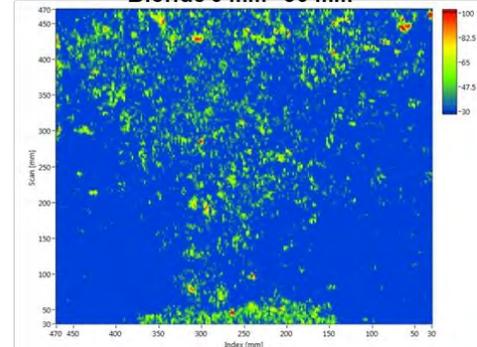
Prüfung von
Schnittfläche

Prüfung von der
Gießoberseite

C-Bild, Blende 150-196 mm



Blende 0 mm- 50 mm

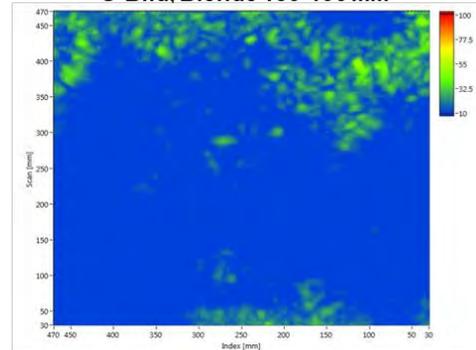


Siempelkamp Testkörper 39579-4



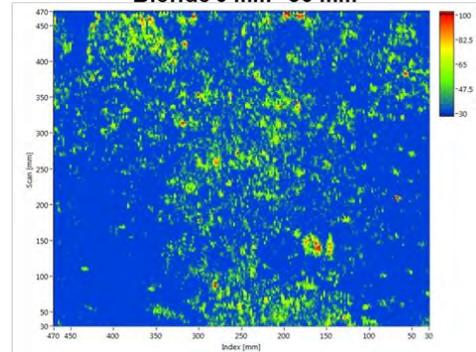
Prüfung von
Schnittfläche

C-Bild, Blende 150-196 mm



Prüfung von der
Gießoberseite

Blende 0 mm- 50 mm

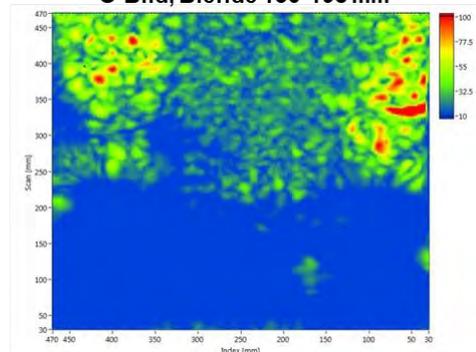


Siempelkamp Testkörper 39579-5



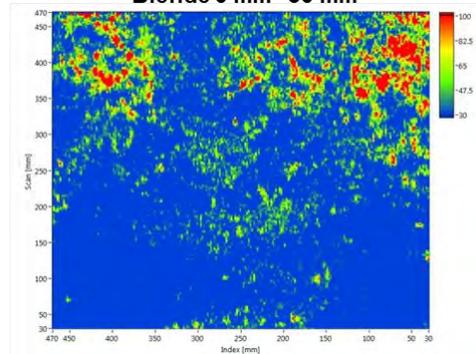
Prüfung von
Schnittfläche

C-Bild, Blende 150-198 mm



Prüfung von der
Gießoberseite

Blende 0 mm- 50 mm

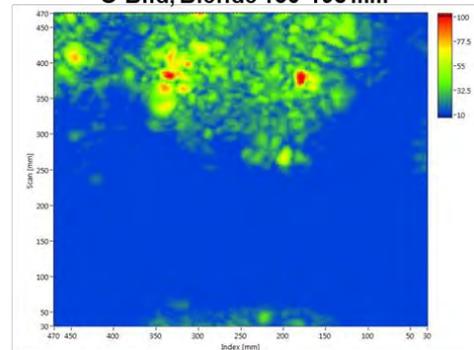


Siempelkamp Testkörper 39579-6



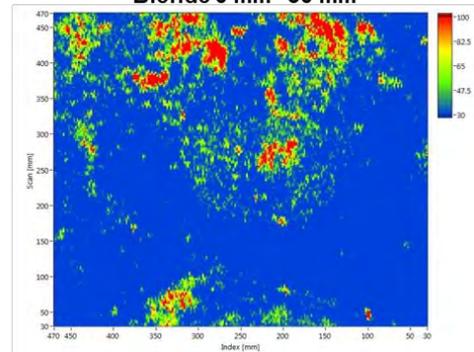
Prüfung von
Schnittfläche

C-Bild, Blende 150-198 mm



Prüfung von der
Gießoberseite

Blende 0 mm- 50 mm

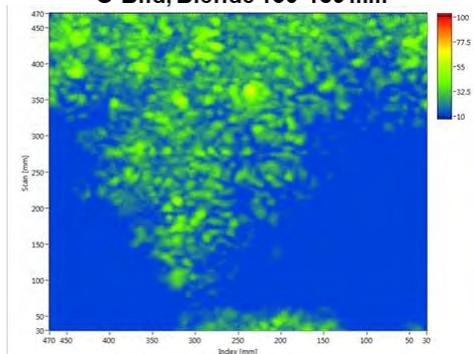


Siempelkamp Testkörper 39579-7



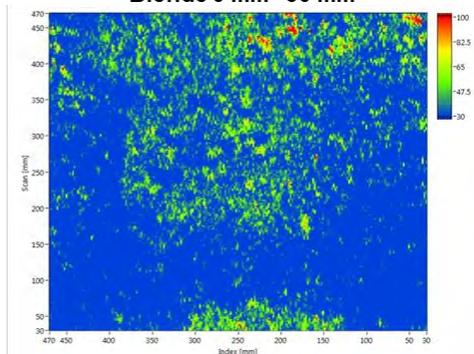
Prüfung von
Schnittfläche

C-Bild, Blende 150-189 mm

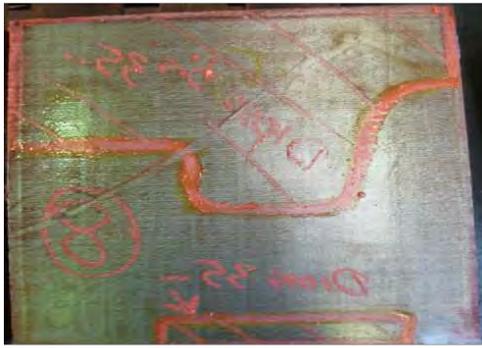


Prüfung von der
Gießoberseite

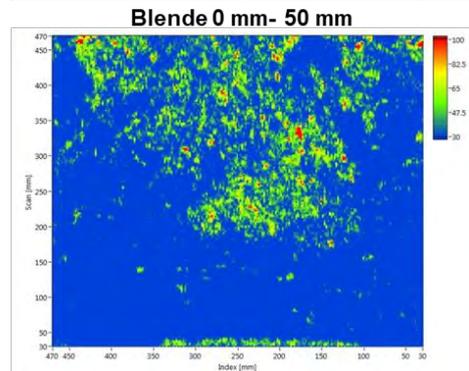
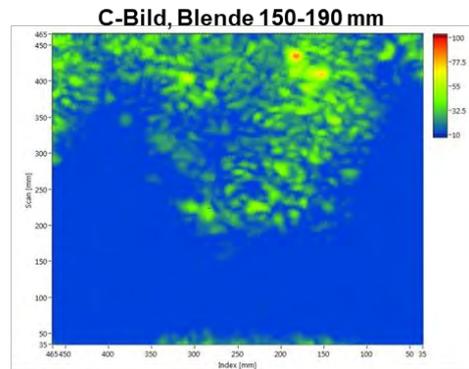
Blende 0 mm- 50 mm



Siempelkamp Testkörper 39579-8



Prüfung von Schnittfläche

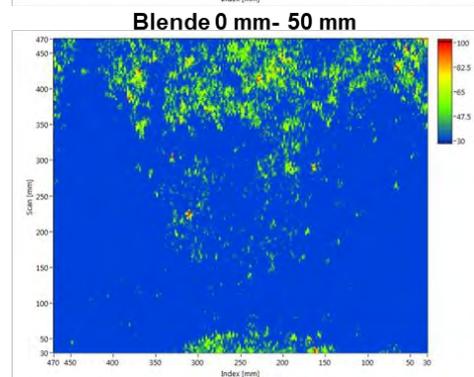
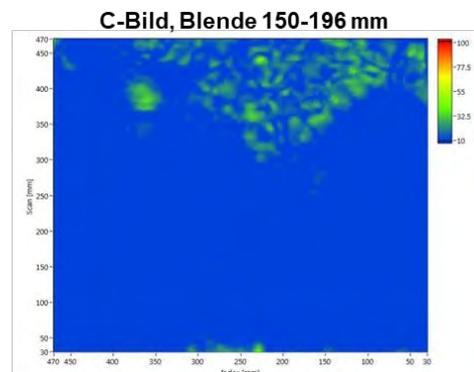


Prüfung von der Gießoberseite

Siempelkamp Testkörper 39579-9



Prüfung von Schnittfläche



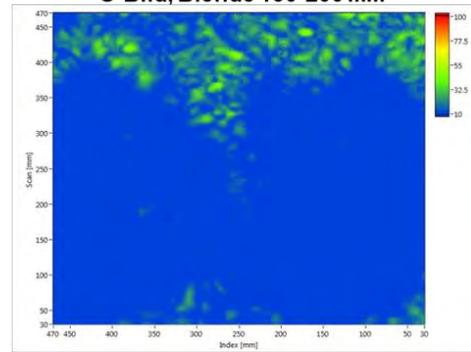
Prüfung von der Gießoberseite

Siempelkamp Testkörper 39579-10

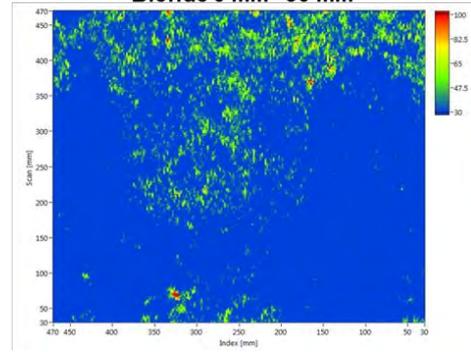


Prüfung von Schnittfläche

C-Bild, Blende 150-200 mm



Blende 0 mm- 50 mm



Prüfung von der Gießoberseite

Ultraschallprüfung, Auswertung der Rückwandabschattung

Einschallung: Dross-Gegenseite und Dross-Seite

Impuls-Echo-Technik, Kontakttechnik, Einschallwinkel 0° (Senkrechteinschallung)

Prüfköpfe:

Einschallung von Dross-Gegenseite:

Einzelschwinger B1S (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Einschallung von der Dross-Seite:

Einzelschwinger SEB1 (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Koppelmittel: Fließwasser mit Korrosionsschutz

Schussabstand der Abrasterung in Scan- und Indexrichtung:

jeweils 10% des Schwingerdurchmessers \rightarrow 2 mm

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

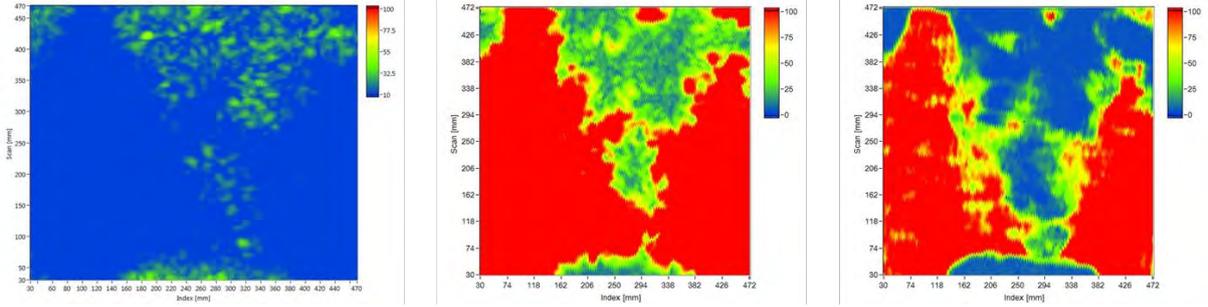
Anmerkungen:

Zur statistischen Absicherung wurden Ultraschallmessdaten verwendet, die im Laufe des Projektes an den Testkörpern aufgezeichnet wurden. Da diese Testkörper im Zuge der Projektarbeit zerstörend geprüft wurden, konnten keine neuen mechanisierten Ultraschalldaten zur Auswertung der Rückwandabschattung aufgezeichnet werden. Neben der zerstörenden Prüfung in Belastungsversuchen wurden die Testkörper ebenfalls für Referenzuntersuchungen umgearbeitet, was eine Wiederholung der mechanisierten Messungen ebenfalls ausschloss. Aus diesem Grund wurden Daten verwendet, die nicht speziell für den Rückwandabschattungsansatz aufgezeichnet wurden. Deshalb ist es in einigen Messungen der Fall, dass eine Übersteuerung der Messdaten für die Rückwandabschattungsanalyse vorliegt. Die Übersteuerungen sind darauf zurückzuführen, dass mit entsprechend hohen Verstärkungen gearbeitet wurde, um die Empfindlichkeit der mechanisierten Ultraschallprüfung zur Dross-Detektion zu erhöhen. Dies stellt für die Analyse des Rückwandabschattungsansatzes kein grundsätzliches Problem dar, aber es führt dazu, dass die Ergebnisbilder teilweise bezüglich der Farbskala nicht mit dem zuvor an dem geviertelten Testkörper MAN 5261600 übereinstimmen. Die qualitative Aussagekraft der Bilder bleibt jedoch erhalten.

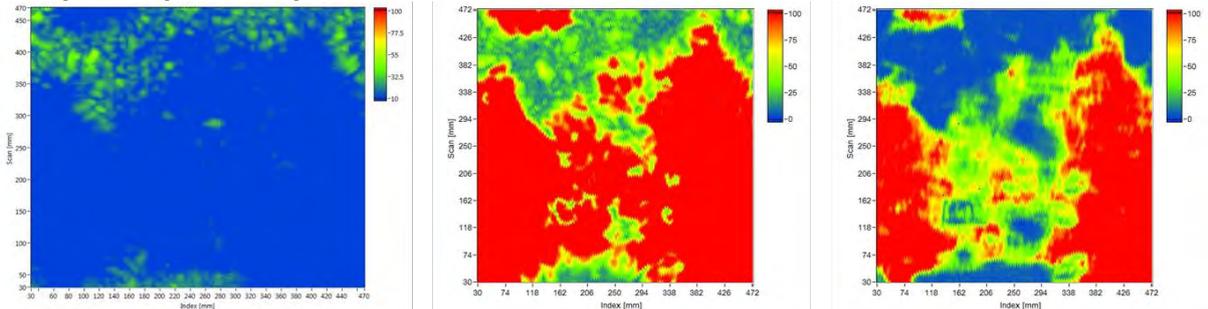
Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

Im linken Bereich der Abbildungen ist das Ultraschall C-Bild aufgezeichnet von der Dross-Gegenseite dargestellt. Mittig ist jeweils das C-Bild der Analyse der Rückwandabschattung für Ultraschalldaten bei Einschallung von der Dross-Gegenseite und rechts das C-Bild der Analyse der Rückwandabschattung bei Einschallung von der Dross-Seite dargestellt.

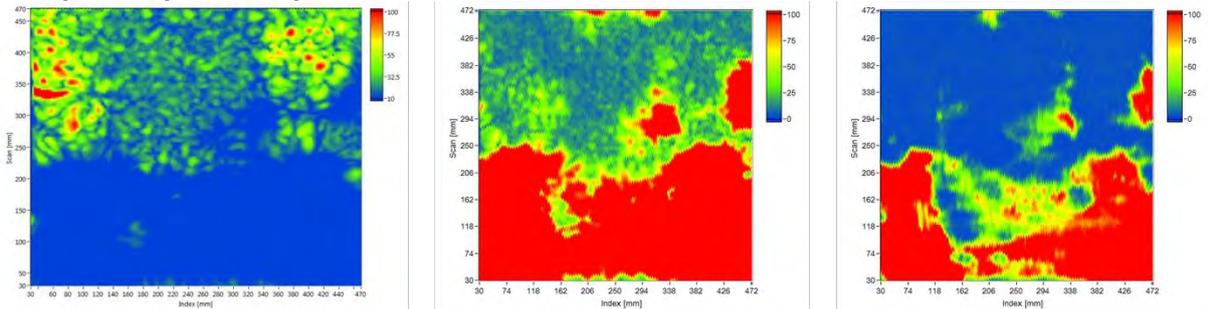
Siempelkamp Testkörper 39579-3



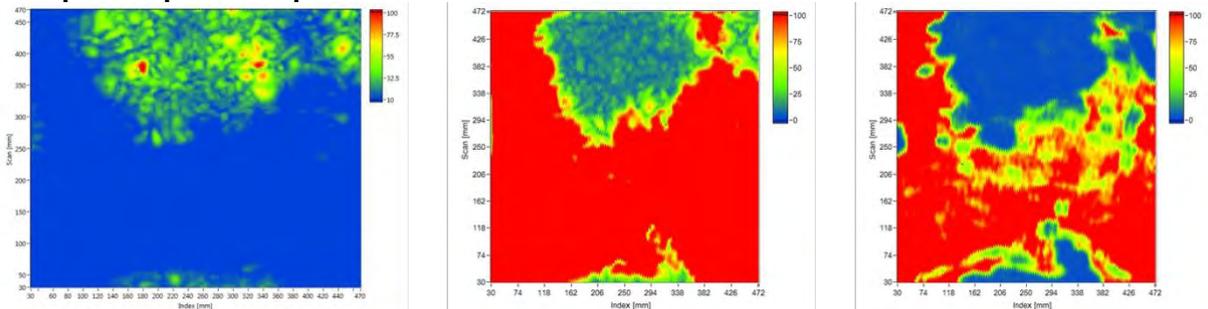
Siempelkamp Testkörper 39579-4



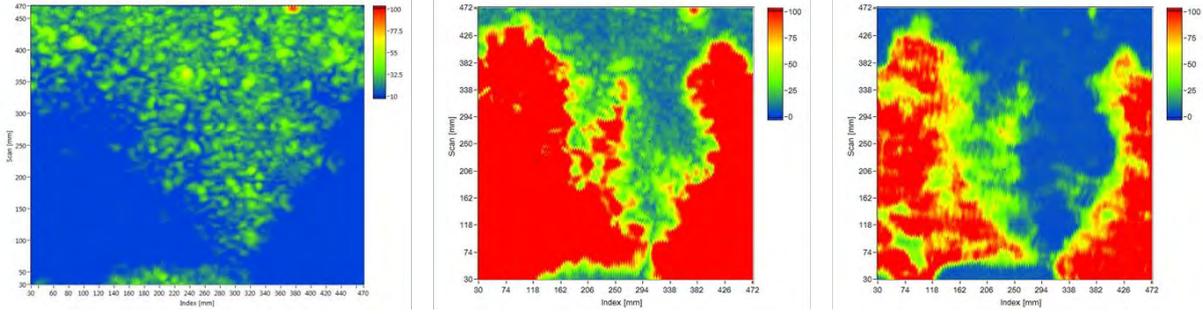
Siempelkamp Testkörper 39579-5



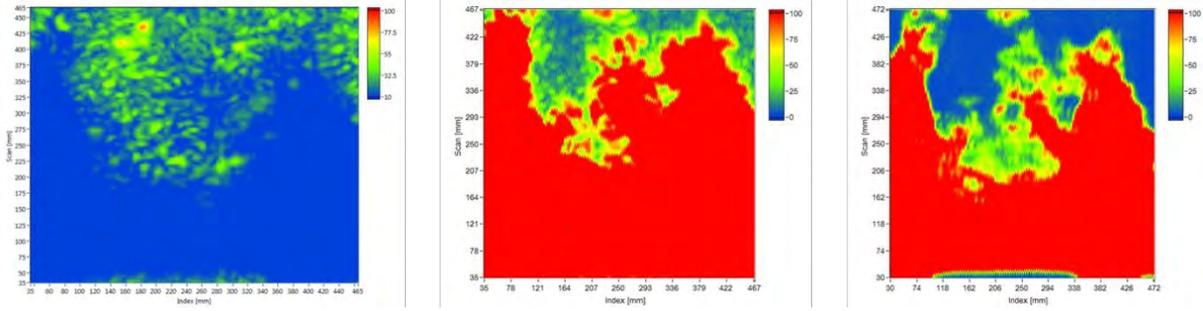
Siempelkamp Testkörper 39579-6



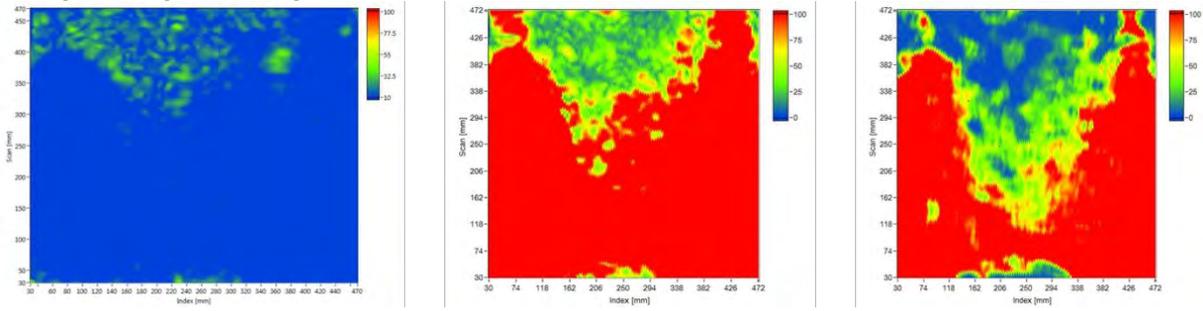
Siempelkamp Testkörper 39579-7



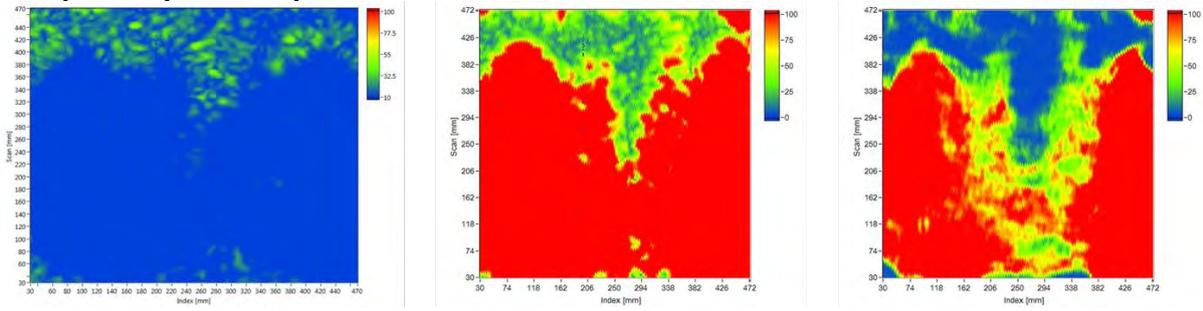
Siempelkamp Testkörper 39579-8



Siempelkamp Testkörper 39579-9



Siempelkamp Testkörper 39579-10



Mikromagnetische Prüfung

Prüfsystem MikroMach

Prüfort: DROSS-Seite in Kontakttechnik (Kontakt beider Polschuhe des MikroMach mit der Testkörperoberfläche)

Prüffrequenz: 60 Hz

Magnetfeldaussteuerung: 110 A/cm

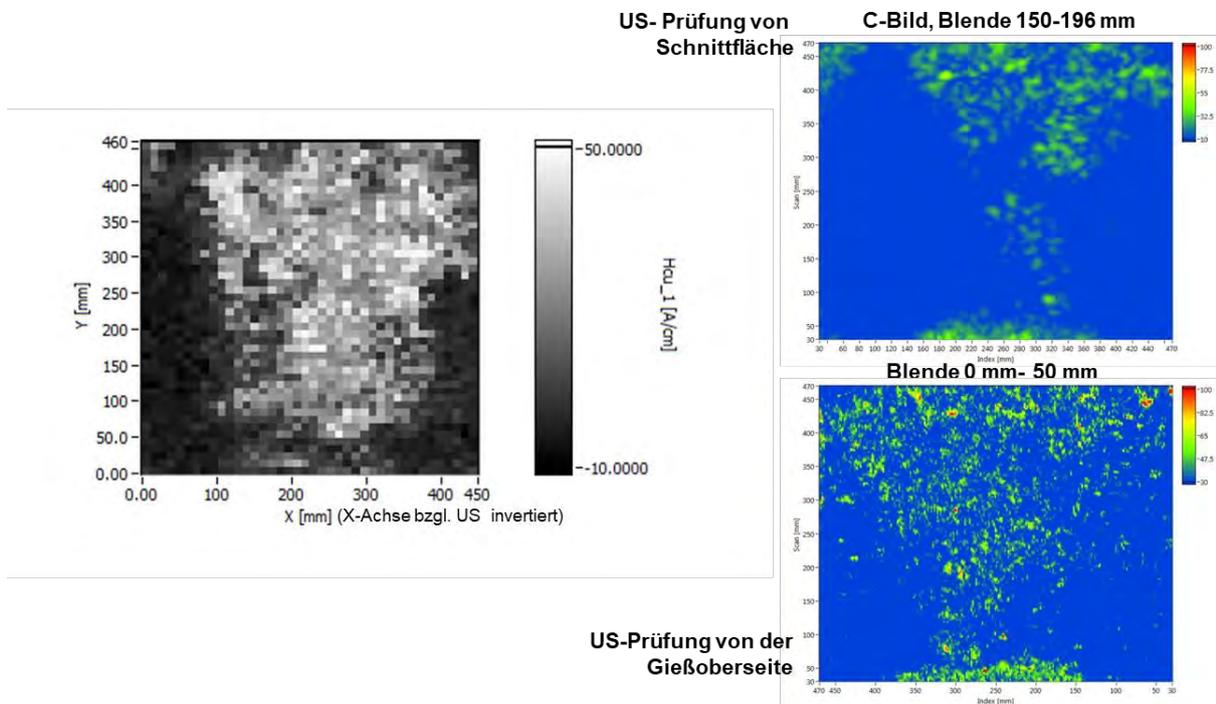
Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

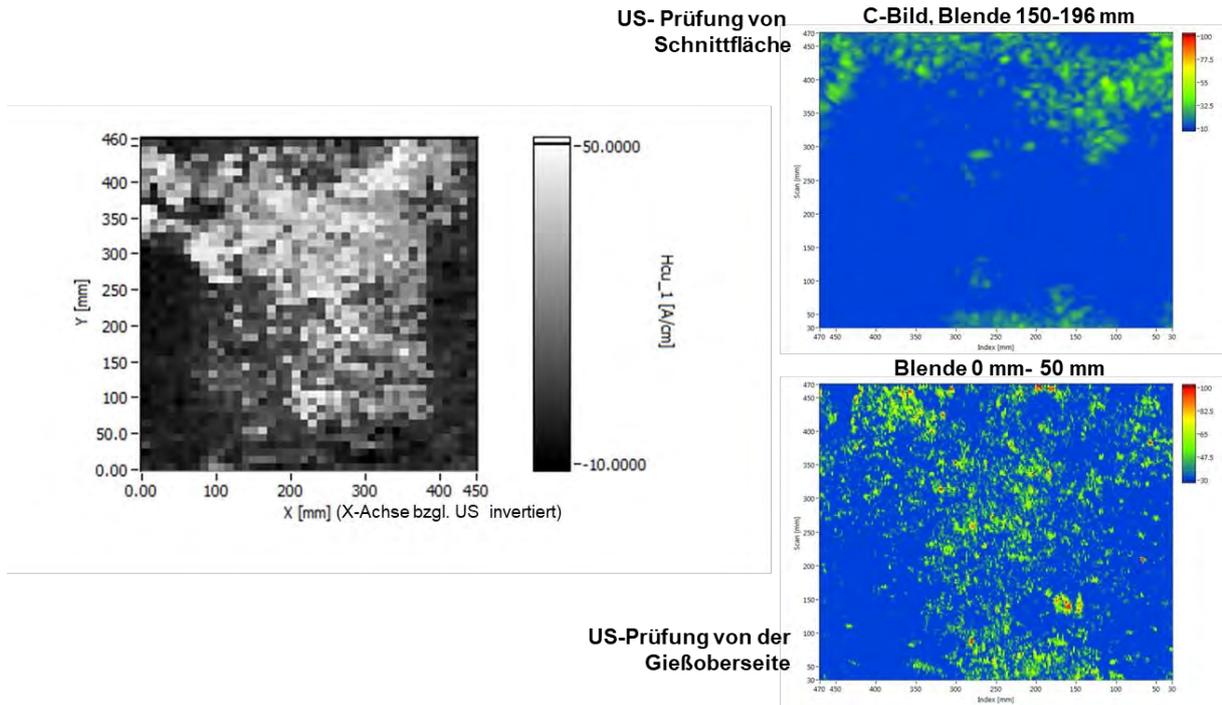
Im linken Bereich der Abbildungen ist jeweils das Ergebnisbild der mechanisierten Datenaufnahme der mikromagnetischen 3MA-Kenngröße H_{cu} (Koerzitivfeldstärke abgeleitet aus der Überlagerungspermeabilität) dargestellt. Im rechten oberen Bereich der Abbildungen befindet sich das Ultraschall-C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Schnittfläche bzw. Dross-Gegenseite. Im rechten unteren Bereich der Abbildungen befindet sich das Ultraschall-C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Dross-Seite. Die Ultraschall-Bilder dienen zum qualitativen Vergleich der Ultraschall-Ergebnisse mit den Ergebnisbildern der 3MA-Datenaufnahme.

Die Auflösungen der mechanisierten mikromagnetischen Prüfungen sind jeweils in den Abbildungsbeschriftungen angegeben.

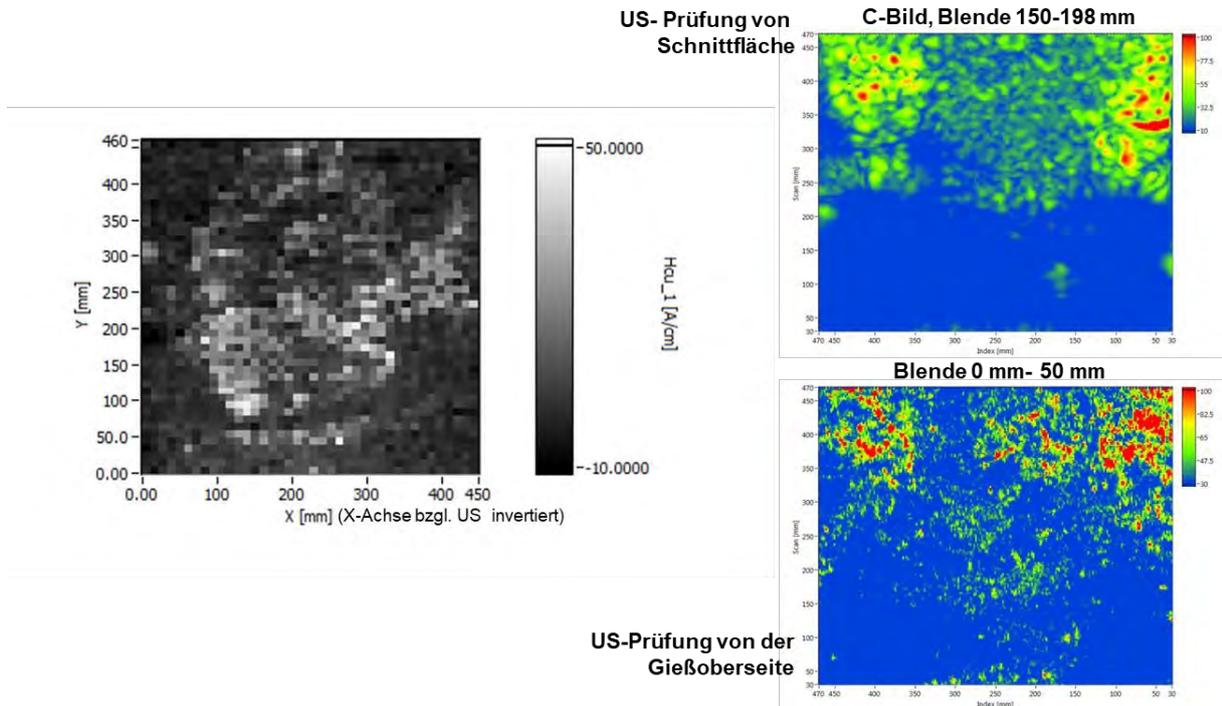
Siempelkamp Testkörper 3957-3, Auflösung 40 x 46 Messpunkte



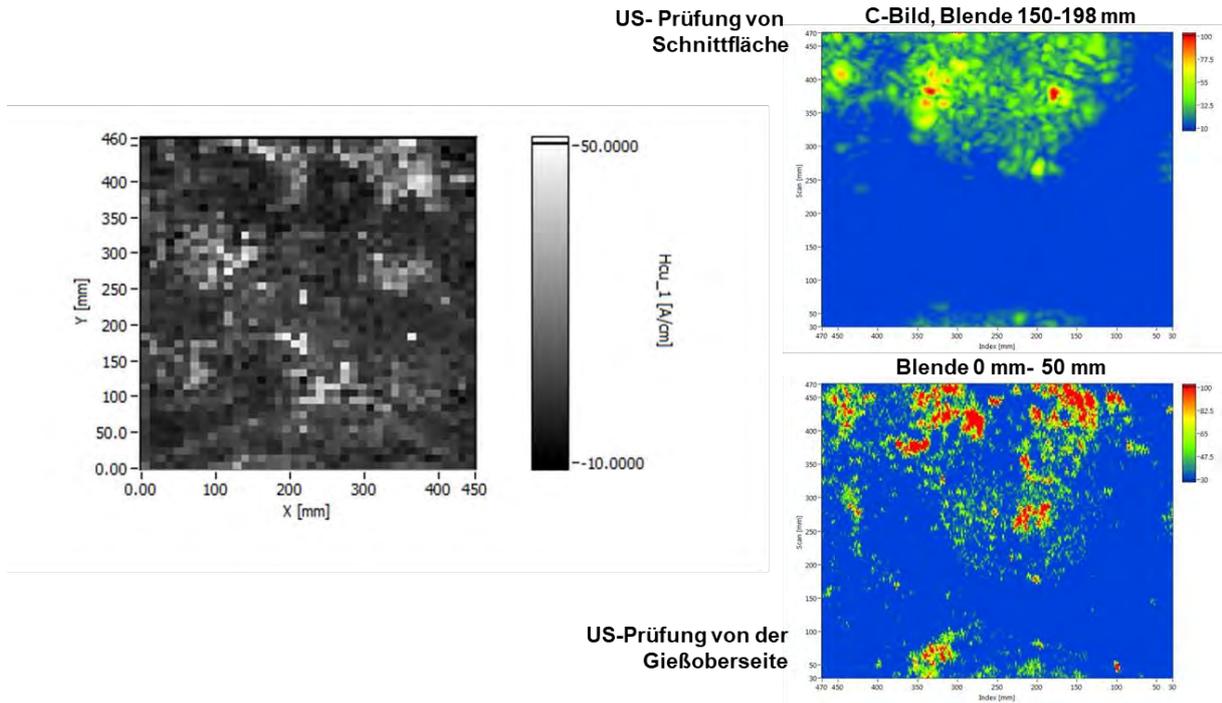
Siempelkamp Testkörper 3957-4, Auflösung 40 x 46 Messpunkte



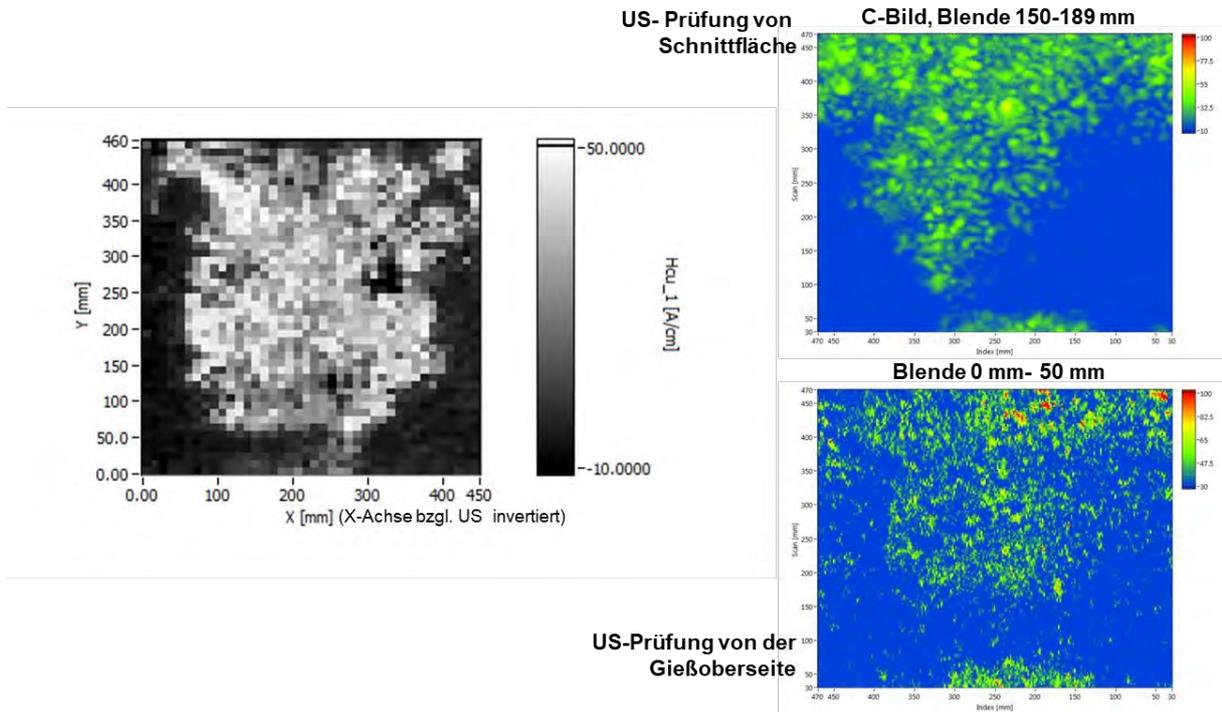
Siempelkamp Testkörper 3957-5, Auflösung 40 x 46 Messpunkte



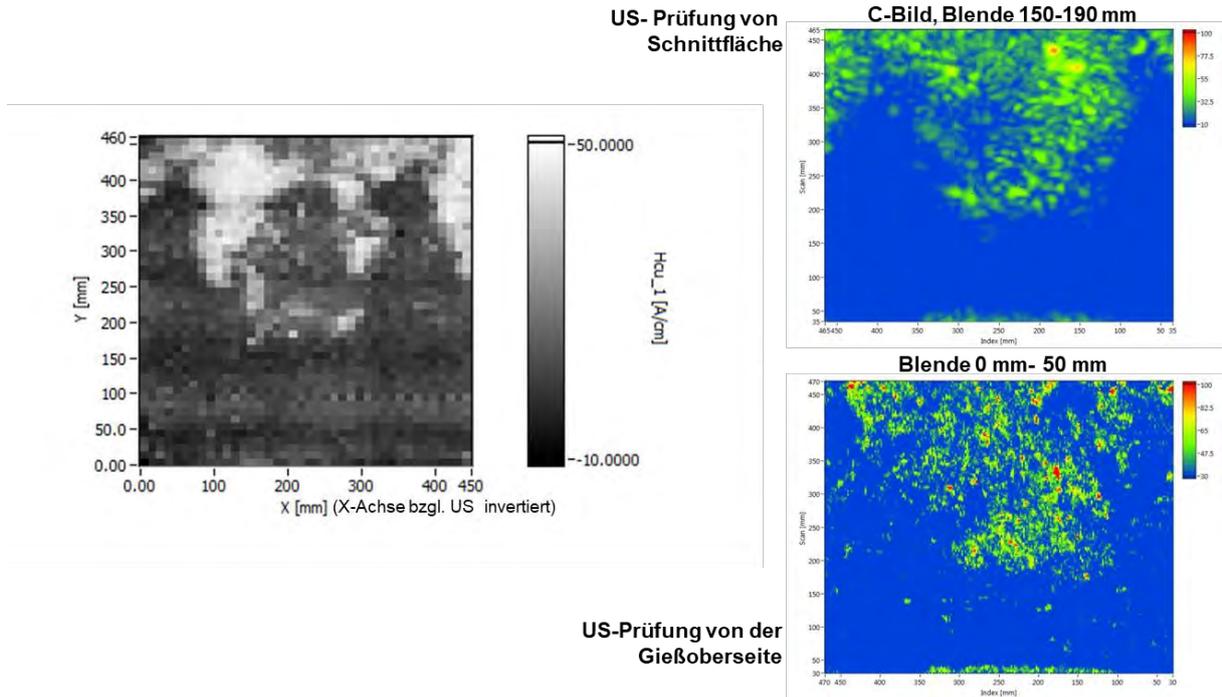
Siempelkamp Testkörper 3957-6, Auflösung 40 x 46 Messpunkte



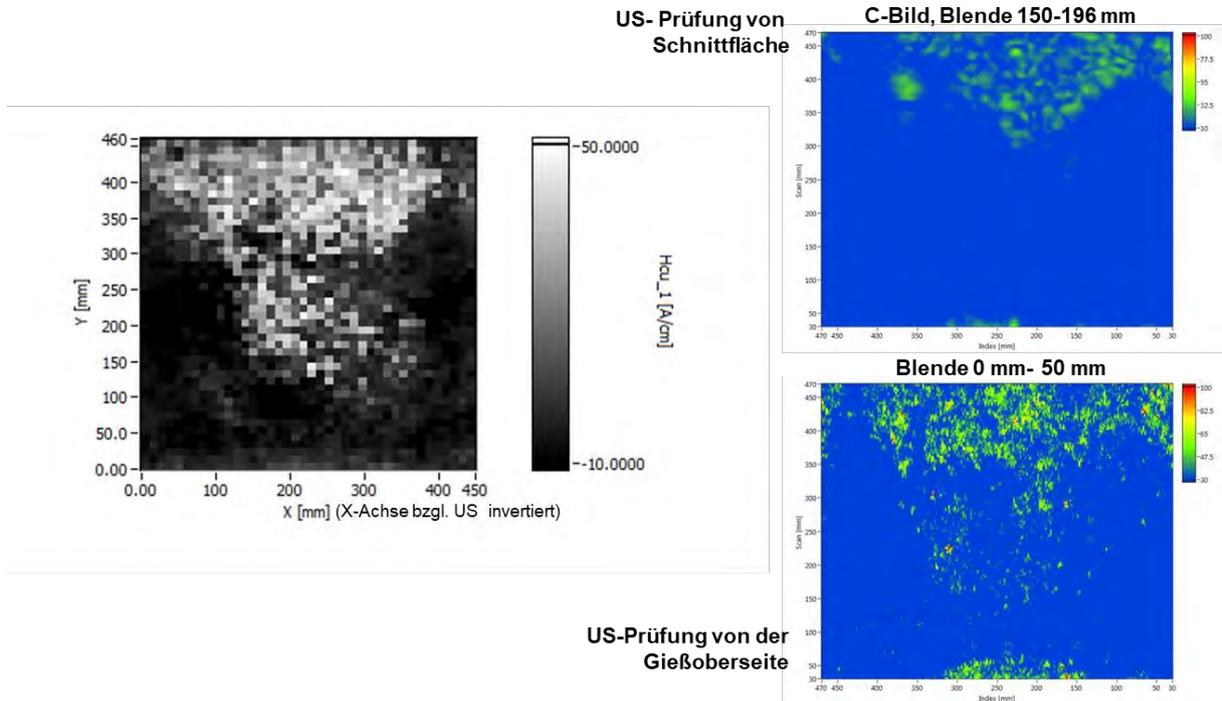
Siempelkamp Testkörper 3957-7, Auflösung 40 x 46 Messpunkte



Siempelkamp Testkörper 3957-8, Auflösung 40 x 46 Messpunkte

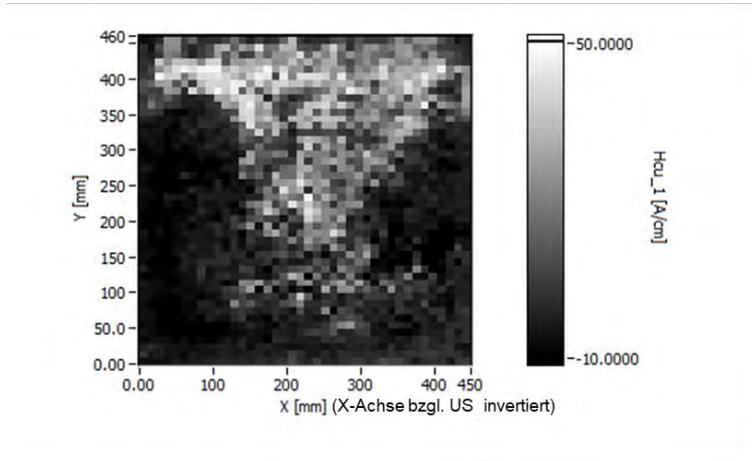


Siempelkamp Testkörper 3957-9, Auflösung 40 x 46 Messpunkte

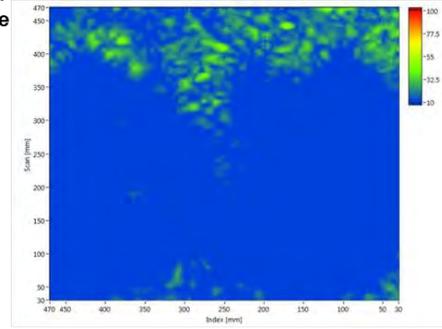


Siempelkamp Testkörper 3957-10, Auflösung 40 x 46 Messpunkte

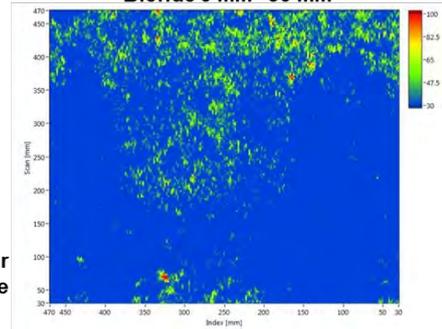
US- Prüfung von
Schnittfläche



C-Bild, Blende 150-200 mm



Blende 0 mm- 50 mm



US-Prüfung von der
Gießoberseite

Magnetische Streufluss-Prüfung von der Dross-Seite

Magnetisierungseinheit im Verbund mit einem flexiblen Hall-Sonden-Träger:

Elektromagnet (Hall-Sonde mittig zwischen den Polschuhen angeordnet)

Magnetisierungsstrom: 0,55 A

Abstand der Polschuhe zur Oberfläche: 2 mm

Hall-Sonde:

sensitiv in Normal-Richtung

keramische Schutzschicht

Ankopplung Hall-Sonde:

Federnder Kontakt zur Testkörperoberfläche

Auflösung: 0,1 mm in Scan- und 1 mm in Index-Richtung

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

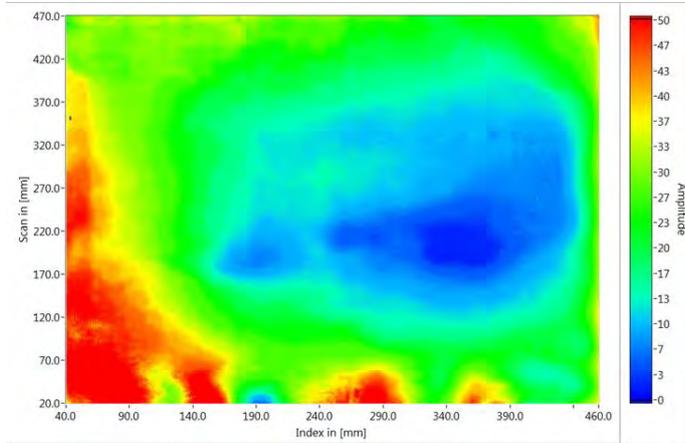
Anmerkung:

Die Gussrauheit und die Unebenheit der nicht überfrästen Testkörper störte die mechanisierten magnetischen Streufluss-Messungen (z.B. ungleichmäßiger Polschuhabstand durch Unebenheit bzw. Unplanheit/Baligkeit, Sensorabhebungen durch Rauheit, usw.) und führte zu einer Beeinflussung der Ergebnisdarstellung (analog zur MT-Prüfung).

Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

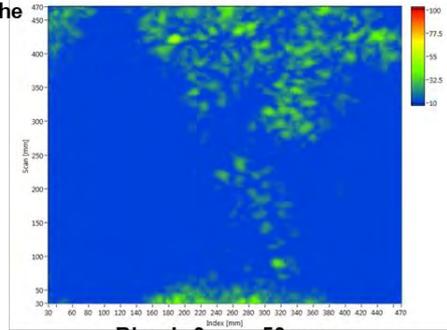
Im linken Bereich der Abbildungen ist jeweils das Ergebnisbild der mechanisierten Datenaufnahme des magnetischen Streuflusses dargestellt. Im rechten oberen Bereich der Abbildungen befindet sich das Ultraschall-C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Schnittfläche bzw. Dross-Gegenseite. Im rechten unteren Bereich der Abbildungen befindet sich das Ultraschall-C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Dross-Seite. Die Ultraschall-Bilder dienen zum qualitativen Vergleich der Ultraschall-Ergebnisse mit den Ergebnisbildern der Streufluss-Prüfung.

Siempelkamp Testkörper 3957-3

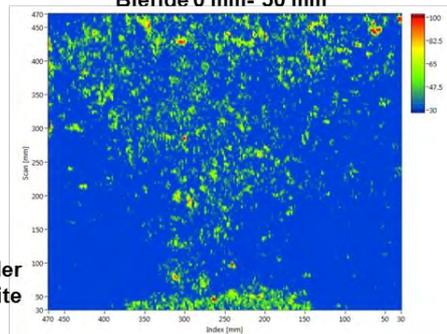


US- Prüfung von Schnittfläche

C-Bild, Blende 150-196 mm

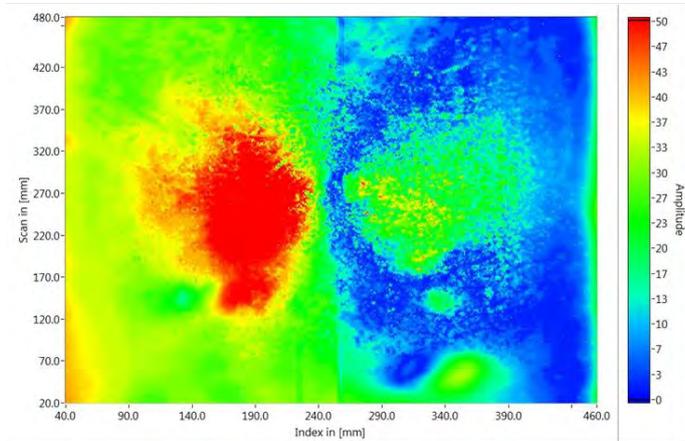


Blende 0 mm- 50 mm



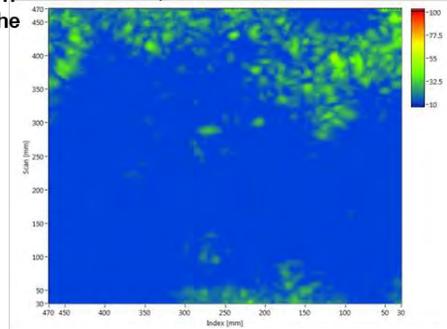
US-Prüfung von der Gießoberseite

Siempelkamp Testkörper 3957-4

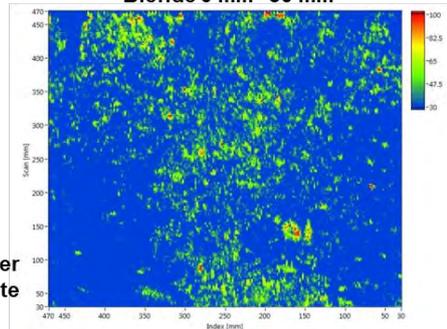


US- Prüfung von Schnittfläche

C-Bild, Blende 150-196 mm

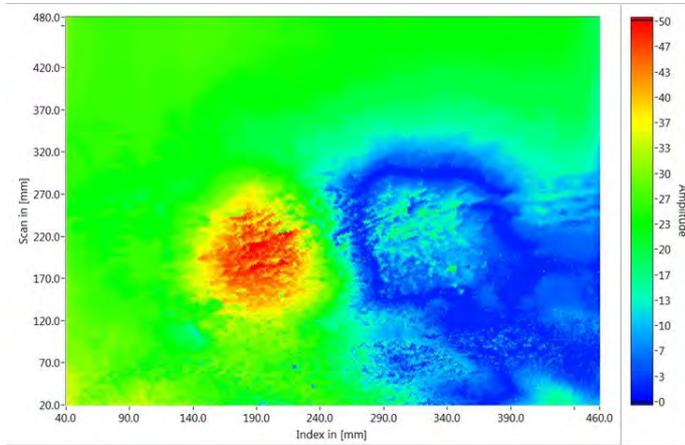


Blende 0 mm- 50 mm



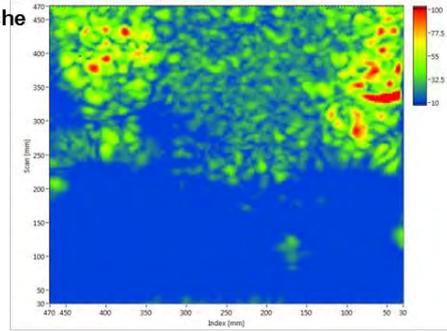
US-Prüfung von der Gießoberseite

Siempelkamp Testkörper 3957-5

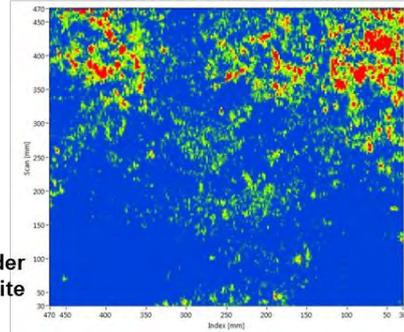


US- Prüfung von Schnittfläche

C-Bild, Blende 150-198 mm

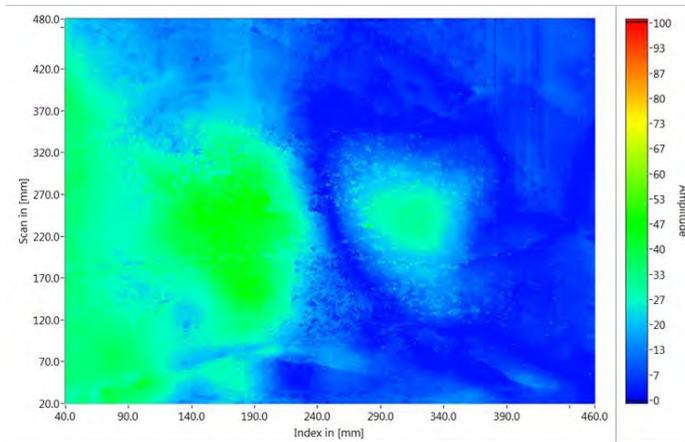


Blende 0 mm- 50 mm



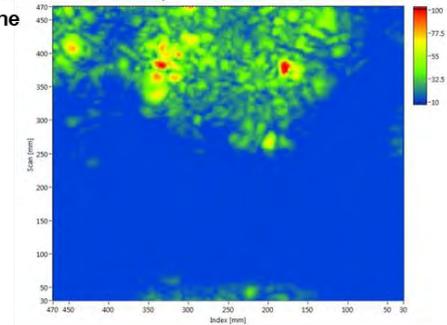
US-Prüfung von der Gießoberseite

Siempelkamp Testkörper 3957-6

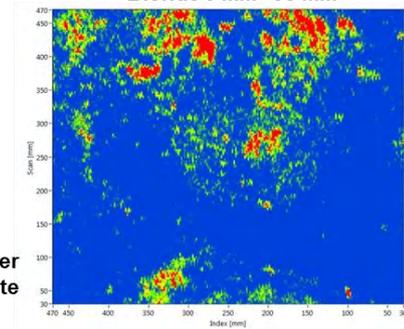


US- Prüfung von Schnittfläche

C-Bild, Blende 150-198 mm

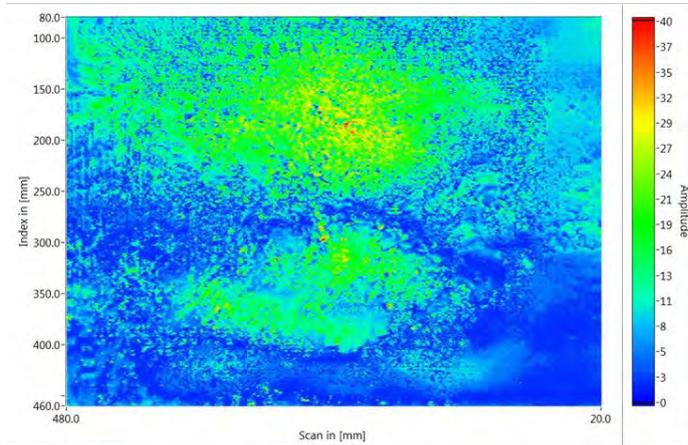


Blende 0 mm- 50 mm

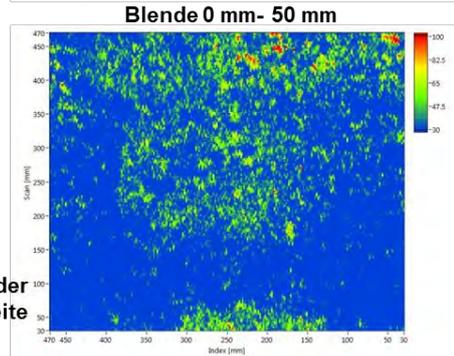
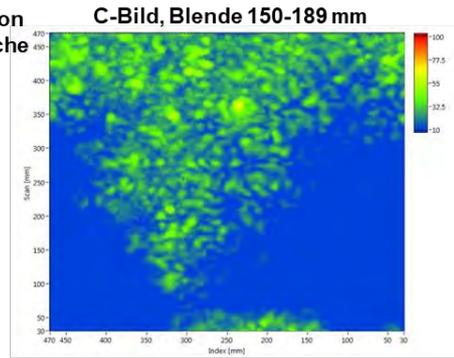


US-Prüfung von der Gießoberseite

Siempelkamp Testkörper 3957-7

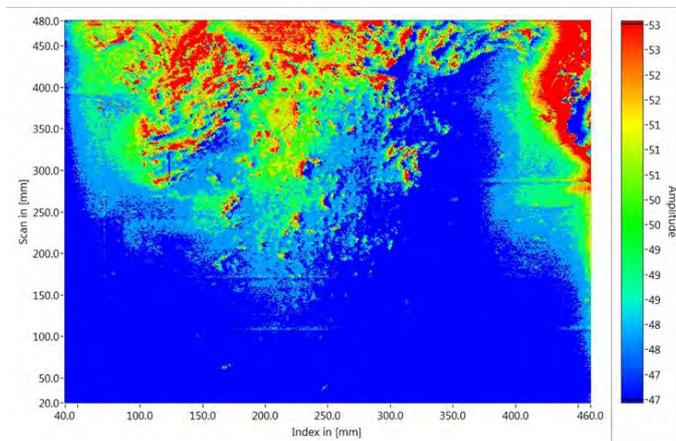


US- Prüfung von Schnittfläche

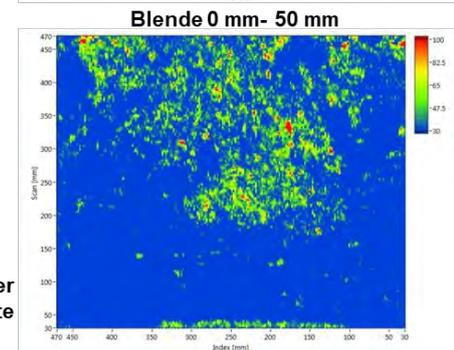
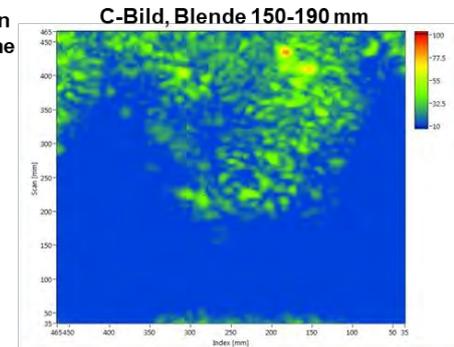


US-Prüfung von der Gießoberseite

Siempelkamp Testkörper 3957-8

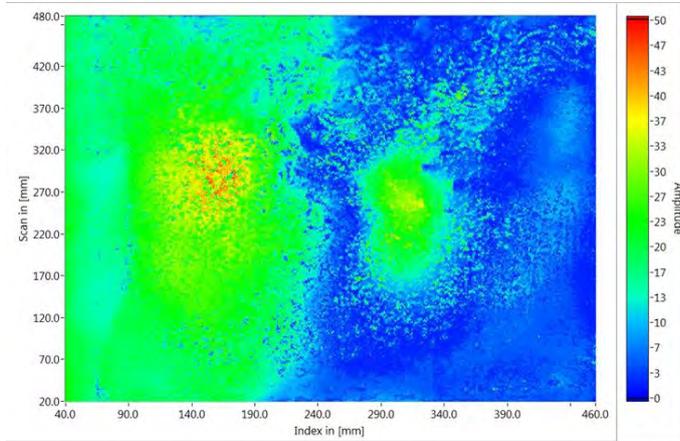


US- Prüfung von Schnittfläche



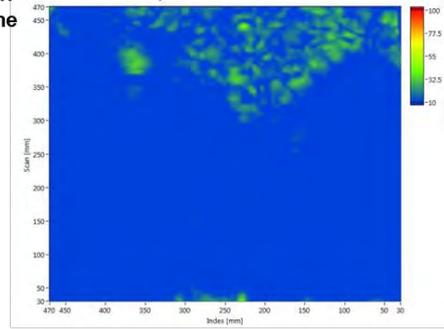
US-Prüfung von der Gießoberseite

Siempelkamp Testkörper 3957-9

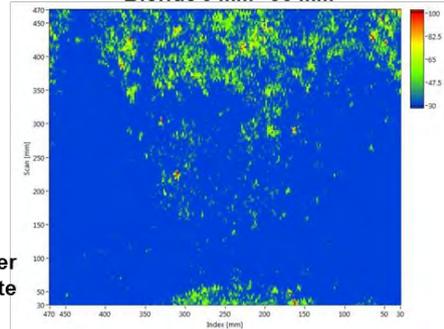


US- Prüfung von Schnittfläche

C-Bild, Blende 150-196 mm

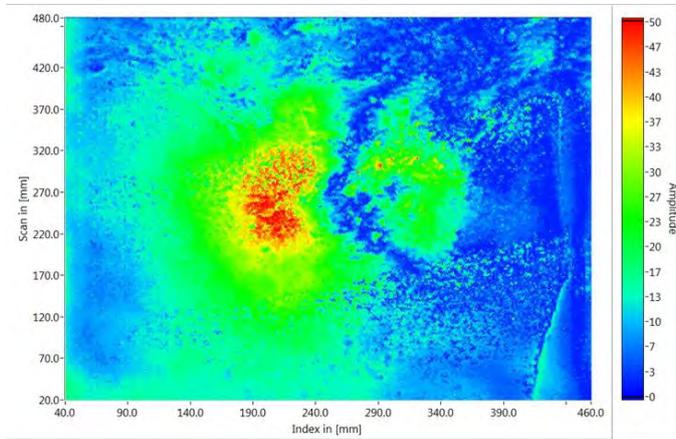


Blende 0 mm- 50 mm



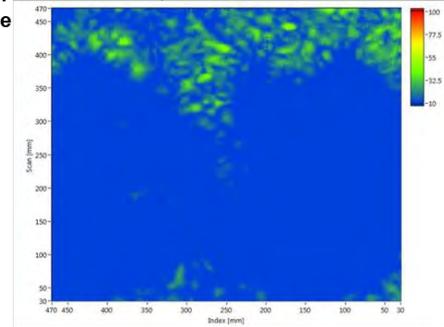
US-Prüfung von der Gießoberseite

Siempelkamp Testkörper 3957-10

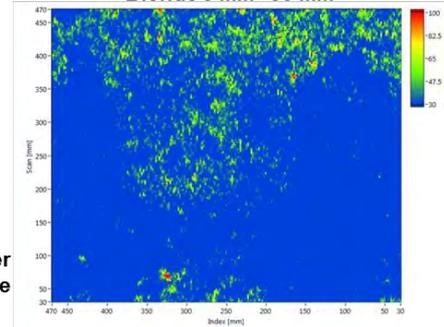


US- Prüfung von Schnittfläche

C-Bild, Blende 150-200 mm



Blende 0 mm- 50 mm



US-Prüfung von der Gießoberseite

Testkörper von Thyssen Krupp

Von dem Projektpartner Thyssen Krupp wurden drei Testkörper mit den Abmessungen 500 x 500 x 200 mm zur Verfügung gestellt.

Ultraschallprüfung ,Einschallung: DROSS-Gegenseite:

Impuls-Echo-Technik, Kontakttechnik, Einschallwinkel 0° (Senkrechteinschallung)

Prüfkopf:

Einzelschwinger B1S (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Koppelmittel:

Fließwasser mit Korrosionsschutz

Schussabstand der Abrasterung in Scan- und Indexrichtung:

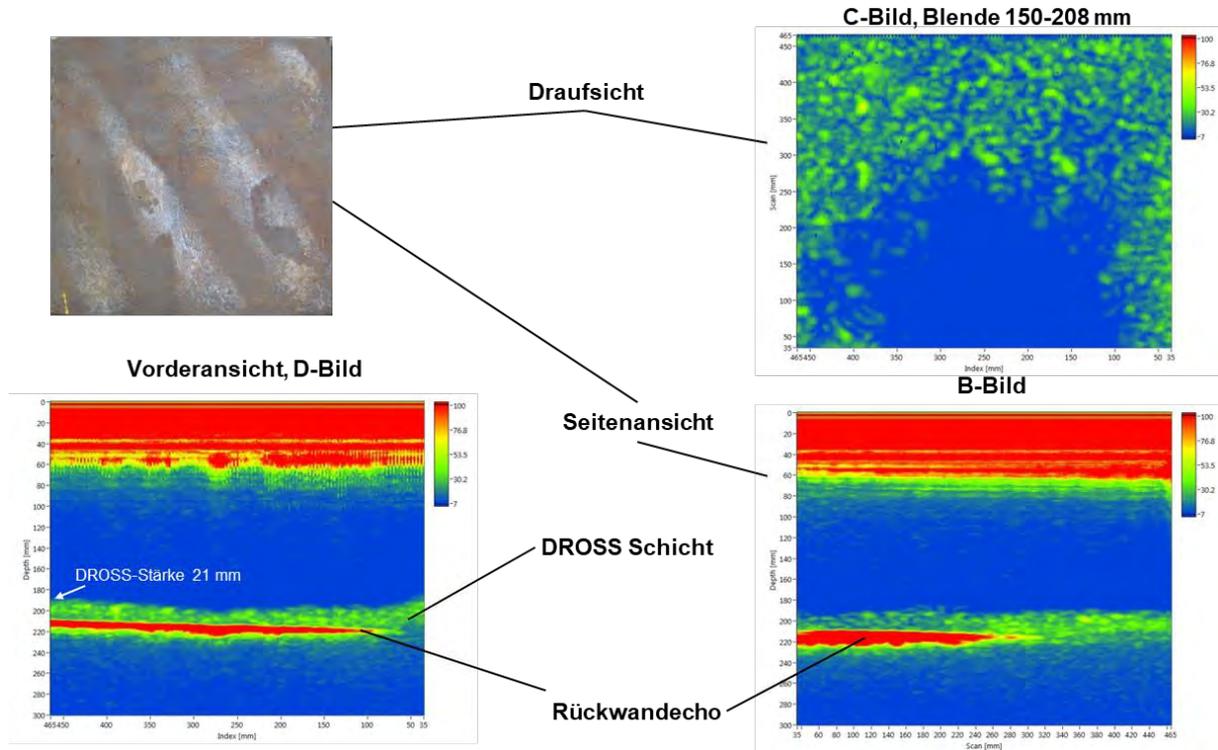
jeweils 10% des Schwingerdurchmessers → 2 mm

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

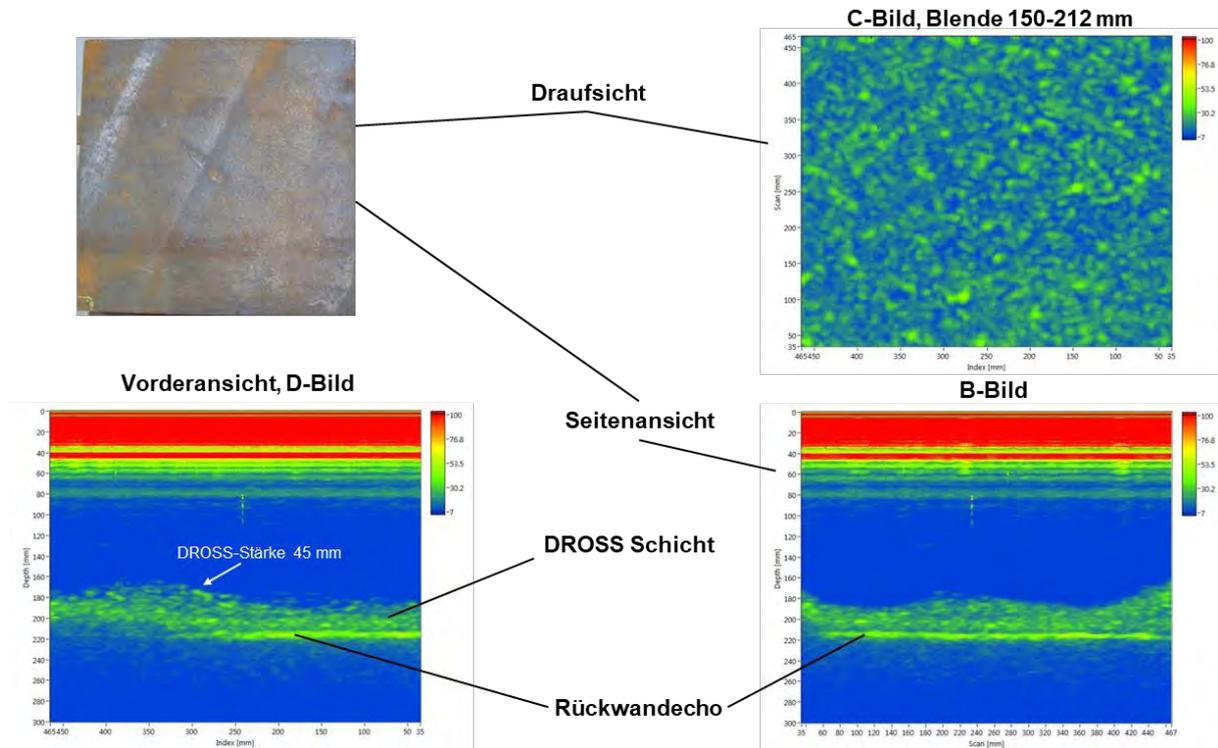
Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

Im linken oberen Bereich der Abbildungen ist jeweils ein Foto des vermessenen Testkörpers abgebildet (Dross-Seite). Auf der unteren linken Seite der Abbildungen ist jeweils das D-Bild (Vorderansicht bzgl. des Fotos) der mechanisierten Ultraschall-Messungen dargestellt. Im rechten Bereich der Abbildungen befindet sich oben das C-Bild (Draufsicht) und darunter das B-Bild (Seitenansicht). Die zur C-Bilderzeugung verwendeten Blenden sind jeweils in den Abbildungen angegeben. Die maximale Dross-Stärke der Testkörper ist jeweils im D-Bild eingetragen.

Thyssen Krupp Testkörper 39455-1



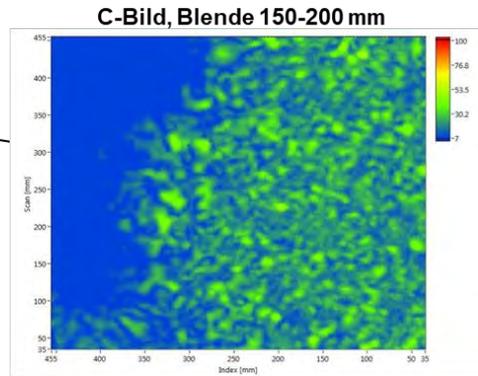
Thyssen Krupp Testkörper 39455-2



Thyssen Krupp Testkörper 39455-3

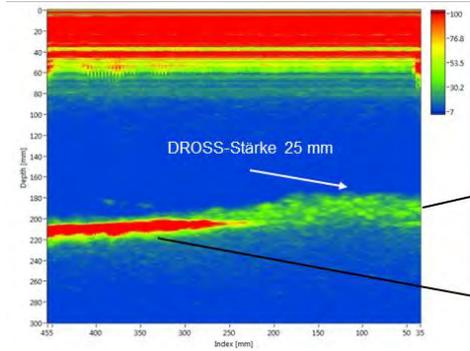


Draufsicht



Z

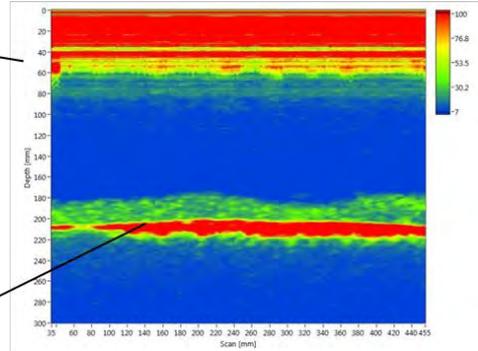
Vorderansicht, D-Bild



Seitenansicht

DROSS Schicht

Rückwandecho



Ultraschallprüfung, Einschallung: DROSS-Seite:

Impuls-Echo-Technik, Kontakttechnik, Einschallwinkel 0° (Senkrechteinschallung)

Prüfkopf:

Einzelschwinger SEB1 (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Koppelmittel:

Fließwasser mit Korrosionsschutz

Schussabstand der Abrasterung in Scan- und Indexrichtung:

jeweils 10% des Schwingerdurchmessers → 2 mm

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

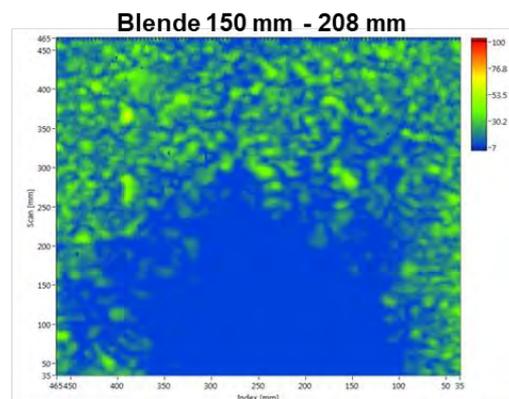
Im linken oberen Bereich der Abbildungen ist jeweils ein Foto des vermessenen Testkörpers abgebildet (Dross-Seite). Im rechten Bereich der Abbildungen befindet sich oben das C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Dross-Gegenseite, und darunter zum Vergleich das C-Bild (ebenfalls Draufsicht), aufgenommen von der Dross-Seite bzw. Gießoberseite.

Thyssen Krupp Testkörper 39455-1

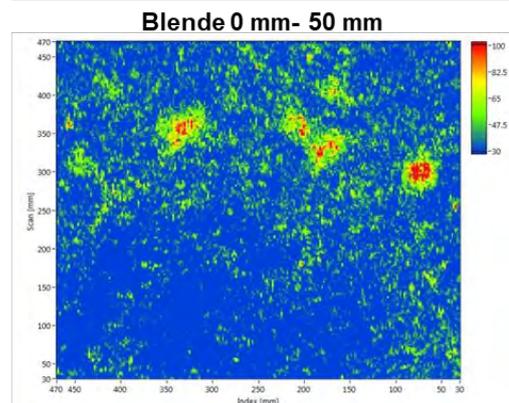


Prüfung von
Dross-Gegenseite

Z



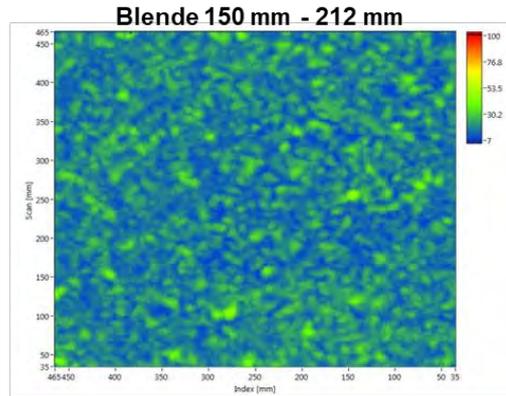
Prüfung von der
Gießoberseite



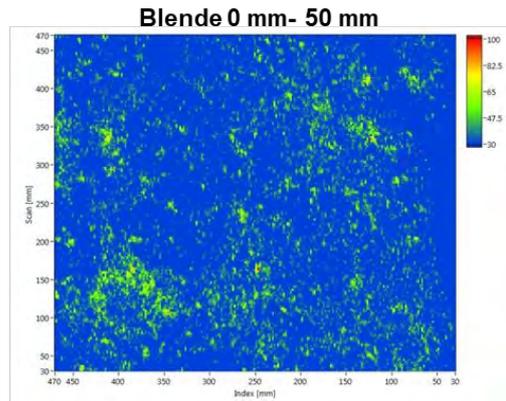
Thyssen Krupp Testkörper 39455-2



**Prüfung von
Dross-Gegenseite**



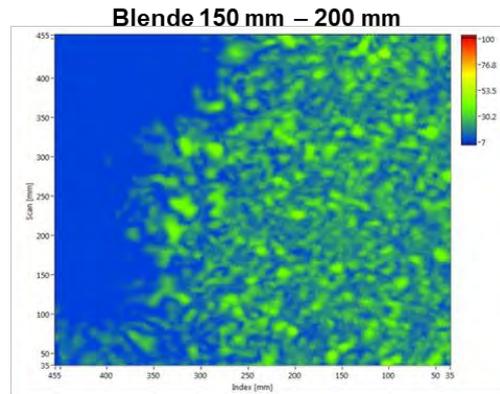
**Prüfung von der
Gießoberseite**



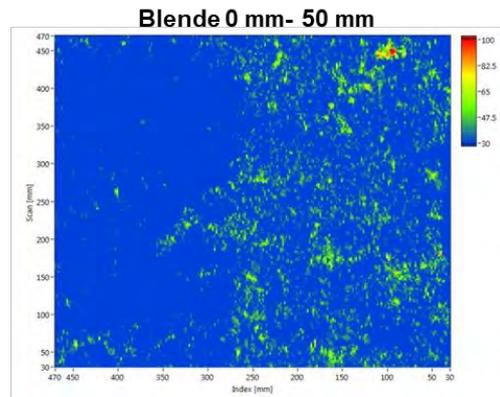
Thyssen Krupp Testkörper 39455-3



**Prüfung von
Dross-Gegenseite**



**Prüfung von der
Gießoberseite**



Ultraschallprüfung, Auswertung der Rückwandabschattung

Einschallung: Dross-Gegenseite und Dross-Seite

Impuls-Echo-Technik, Kontakttechnik, Einschallwinkel 0° (Senkrechteinschallung)

Prüfköpfe:

Einschallung von Dross-Gegenseite:

Einzelschwinger B1S (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Einschallung von der Dross-Seite:

Einzelschwinger SEB1 (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Koppelmittel: Fließwasser mit Korrosionsschutz

Schussabstand der Abrasterung in Scan- und Indexrichtung:

jeweils 10% des Schwingerdurchmessers \rightarrow 2 mm

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

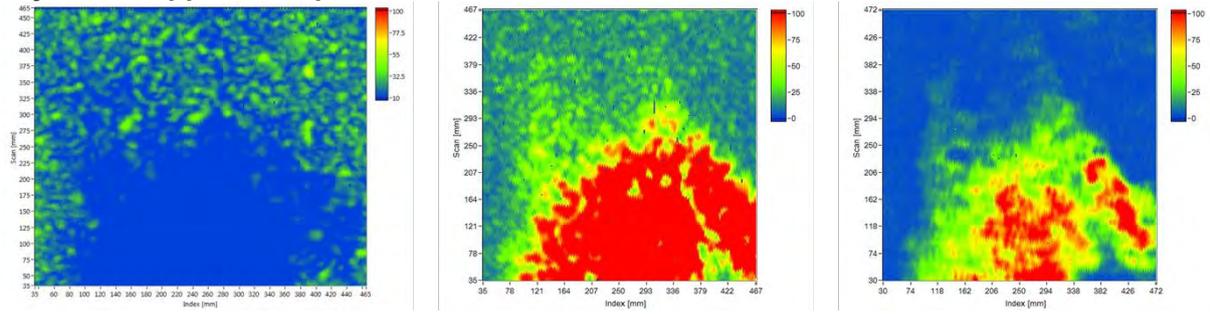
Anmerkungen:

Zur statistischen Absicherung wurden Ultraschallmessdaten verwendet, die im Laufe des Projektes an den Testkörpern aufgezeichnet wurden. Da diese Testkörper im Zuge der Projektarbeit zerstörend geprüft wurden, konnten keine neuen mechanisierten Ultraschalldaten zur Auswertung der Rückwandabschattung aufgezeichnet werden. Neben der zerstörenden Prüfung in Belastungsversuchen wurden die Testkörper ebenfalls für Referenzuntersuchungen umgearbeitet, was eine Wiederholung der mechanisierten Messungen ebenfalls ausschloss. Aus diesem Grund wurden Daten verwendet, die nicht speziell für den Rückwandabschattungsansatz aufgezeichnet wurden. Deshalb ist es in einigen Messungen der Fall, dass eine Übersteuerung der Messdaten für die Rückwandabschattungsanalyse vorliegt. Die Übersteuerungen sind darauf zurückzuführen, dass mit entsprechend hohen Verstärkungen gearbeitet wurde, um die Empfindlichkeit der mechanisierten Ultraschallprüfung zur Dross-Detektion zu erhöhen. Dies stellt für die Analyse des Rückwandabschattungsansatzes kein grundsätzliches Problem dar, aber es führt dazu, dass die Ergebnisbilder teilweise bezüglich der Farbskala nicht mit dem zuvor an dem geviertelten Testkörper MAN 5261600 übereinstimmen. Die qualitative Aussagekraft der Bilder bleibt jedoch erhalten.

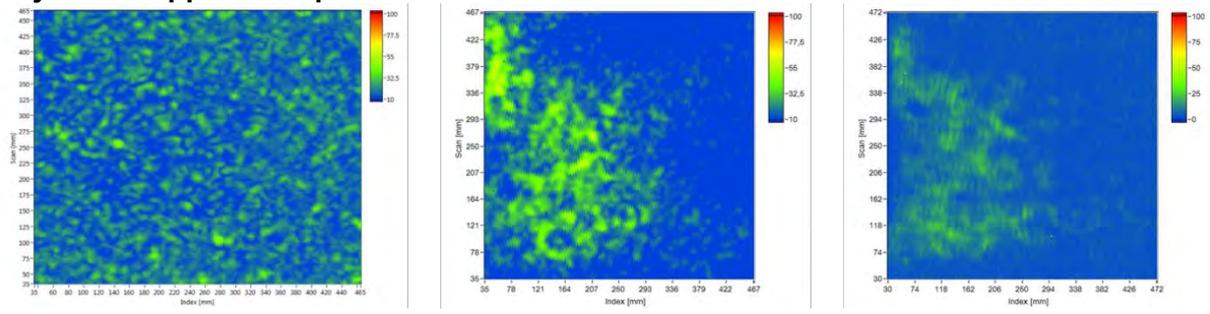
Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

Im linken Bereich der Abbildungen ist das Ultraschall C-Bild aufgezeichnet von der Dross-Gegenseite dargestellt. Mittig ist jeweils das C-Bild der Analyse der Rückwandabschattung für Ultraschalldaten bei Einschallung von der Dross-Gegenseite und rechts das C-Bild der Analyse der Rückwandabschattung bei Einschallung von der Dross-Seite dargestellt.

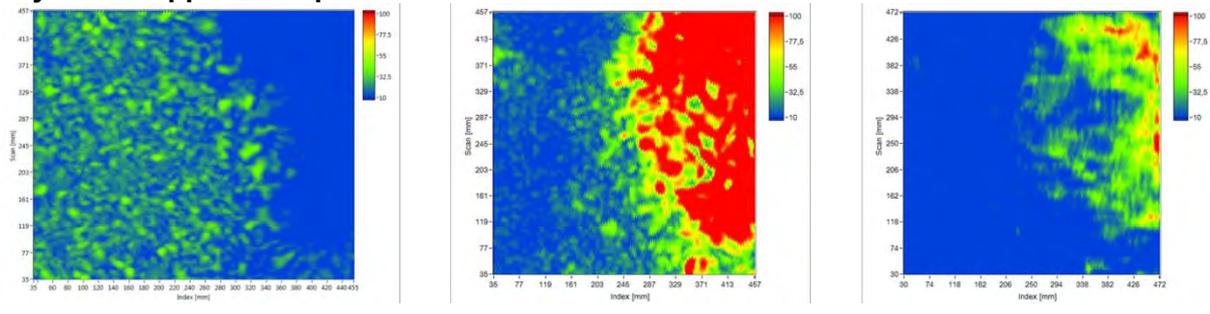
Thyssen Krupp Testkörper 39455-1



Thyssen Krupp Testkörper 39455-2



Thyssen Krupp Testkörper 39455-3



Ultraschallprüfung, Auswertung der Rückwandabschattung Variation der Verstärkung bei der Auswertung der Rückwandabschattung

Einschallung: Dross-Gegenseite und Dross-Seite

Impuls-Echo-Technik, Kontakttechnik, Einschallwinkel 0° (Senkrechteinschallung)

Prüfköpfe:

Einschallung von Dross-Gegenseite:

Einzelschwinger B1S (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Einschallung von der Dross-Seite:

Einzelschwinger SEB1 (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Koppelmittel: Fließwasser mit Korrosionsschutz

Schussabstand der Abrasterung in Scan- und Indexrichtung:

jeweils 10% des Schwingerdurchmessers → 2 mm

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

Anmerkungen:

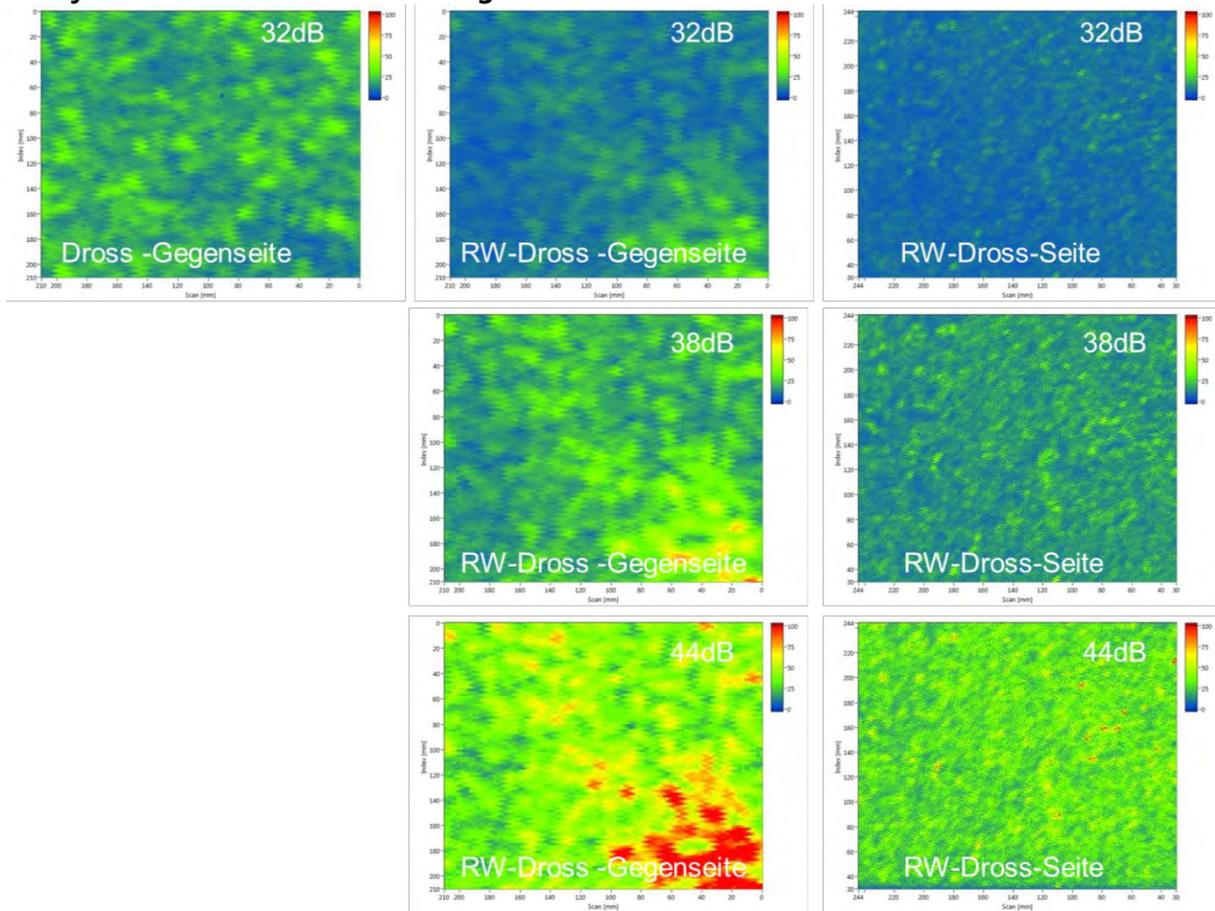
Um zu untersuchen ob durch Variation der Verstärkung bei der Analyse der Rückwandabschattung für mechanisierte Ultraschall-Prüfungen eine bessere Detektion von Dross ermöglicht, wurde ein Teilsegment des Testkörpers 39455-2 erneut mechanisiert Ultraschallgeprüft. Bei diesem Teilsegment handelt es sich um ein Viertel des ursprünglichen Testkörpers, der zusätzlich auf der Dross-Seite überfräst wurde.

Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellung:

Im linken Bereich der Abbildung ist das Ultraschall C-Bild aufgezeichnet von der Dross-Gegenseite dargestellt. Mittig ist jeweils das C-Bild der Analyse der Rückwandabschattung für Ultraschalldaten bei Einschallung von der Dross-Gegenseite und rechts das C-Bild der Analyse der Rückwandabschattung bei Einschallung von der Dross-Seite dargestellt. In die C-Bilder ist die jeweils verwendete Verstärkung in dB eingetragen.

Es zeigt sich, dass bei der mechanisierten Ultraschalldatenaufnahme und Analyse der Rückwandabschattung trotz Variation der Verstärkung die qualitative Aussagekraft der Ergebnisbilder erhalten bleibt und die Dross-Verteilung aufgezeigt werden kann.

Teilsegment von Thyssen Krupp Testkörper 39455-2; Verstärkungsvariation bei der Analyse der Rückwandabschattung



Mikromagnetische Prüfung

Prüfsystem MikroMach

Prüfort: DROSS-Seite in Kontakttechnik (Kontakt beider Polschuhe des MikroMach mit der Testkörperoberfläche)

Prüffrequenz: 60 Hz

Magnetfeldaussteuerung: 110 A/cm

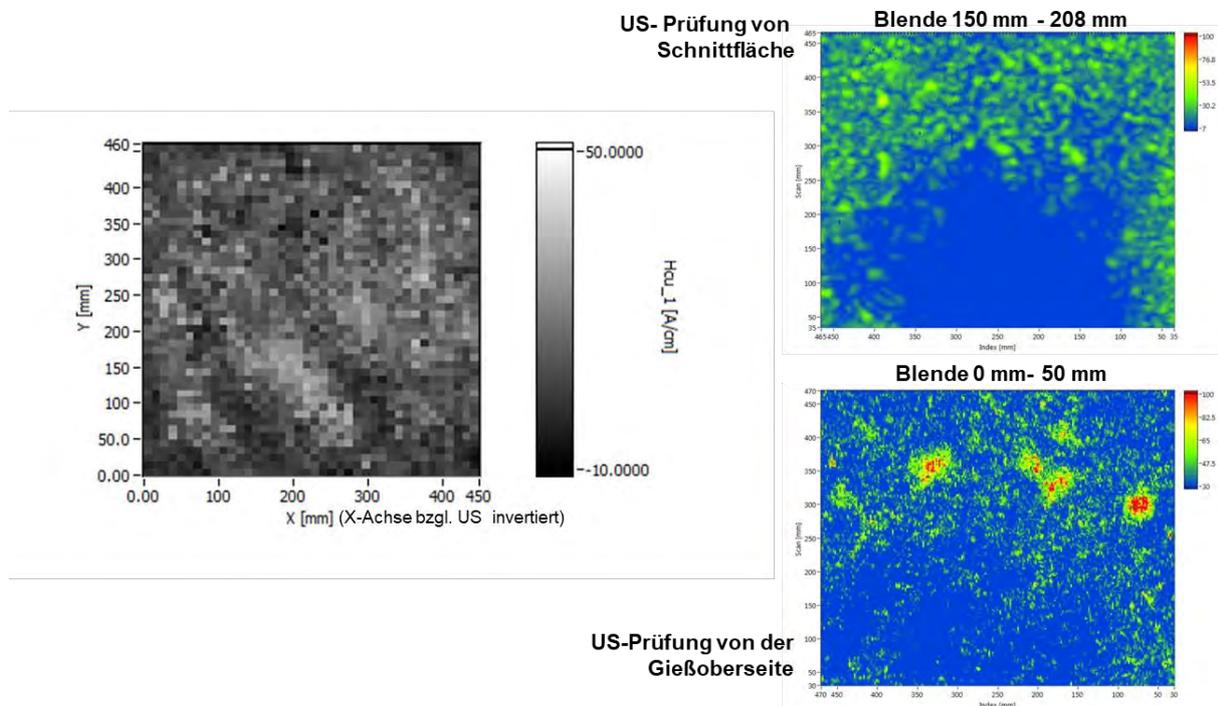
Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

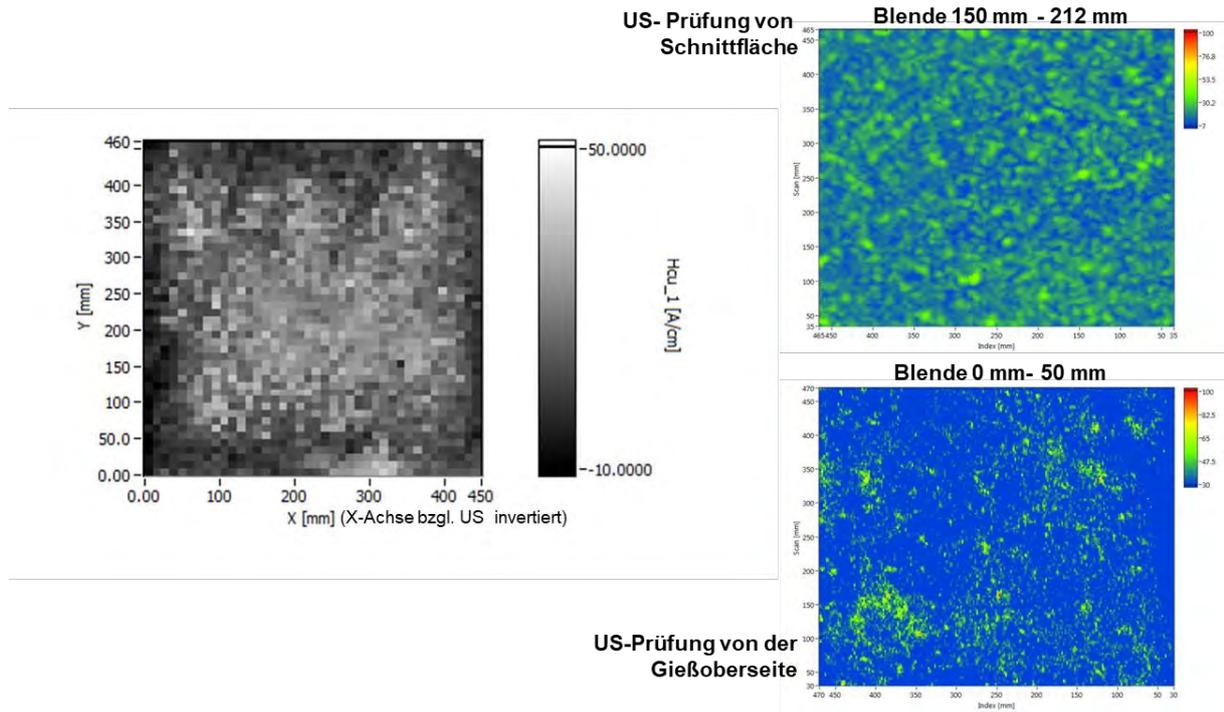
Im linken Bereich der Abbildungen ist jeweils das Ergebnisbild der mechanisierten Datenaufnahme der mikromagnetischen 3MA-Kenngröße H_{cu} (Koerzitivfeldstärke abgeleitet aus der Überlagerungspermeabilität) dargestellt. Im rechten oberen Bereich der Abbildungen befindet sich das Ultraschall-C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Schnittfläche bzw. Dross-Gegenseite. Im rechten unteren Bereich der Abbildungen befindet sich das Ultraschall-C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Dross-Seite. Die Ultraschall-Bilder dienen zum qualitativen Vergleich der Ultraschall-Ergebnisse mit den Ergebnisbildern der 3MA-Datenaufnahme.

Die Auflösungen der mechanisierten mikromagnetischen Prüfungen sind jeweils in den Abbildungsbeschriftungen angegeben.

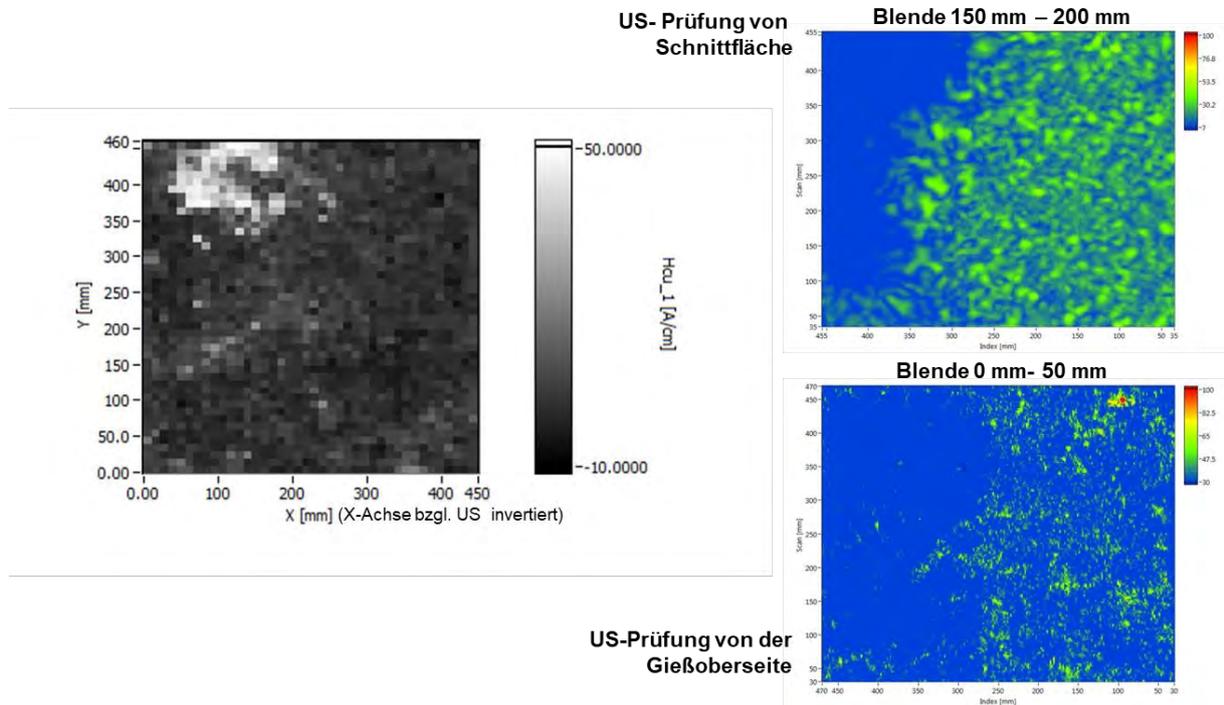
Thyssen Krupp Testkörper 39455-1, Auflösung 40 x 46 Messpunkte



Thyssen Krupp Testkörper 39455-2, Auflösung 40 x 46 Messpunkte



Thyssen Krupp Testkörper 39455-3, Auflösung 40 x 46 Messpunkte



Prüfsystem 3MA-X8

Prüfort: DROSS-Seite in Kontakttechnik (Kontakt beider Polschuhe des 3MA-X8-Sensors mit der Testkörperoberfläche)

Prüffrequenz: 50 Hz

Magnetisierungsamplitude: 2 V

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

Anmerkungen:

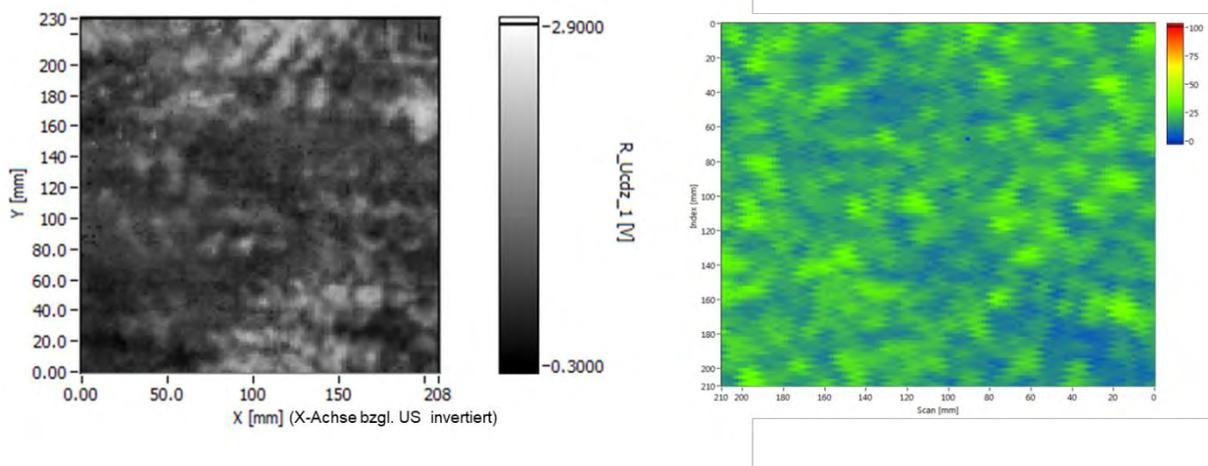
Um zu untersuchen ob durch Variation der Verstärkung bei der Analyse der Rückwandabschattung für mechanisierte Ultraschall-Prüfungen eine bessere Detektion von Dross ermöglicht, wurde ein Teilstück des Testkörpers 39455-2 erneut mechanisiert Ultraschallgeprüft. Bei diesem Teilstück handelt es sich um ein Viertel des ursprünglichen Testkörpers, der zusätzlich auf der Dross-Seite überfräst wurde. Im Zuge dieser Ultraschallprüfungen wurde der Testkörper ebenfalls erneut mikromagnetisch geprüft. Da seitens des Fraunhofer IZFP im Laufe des Projektes der Support, Aufbau sowie die Vermarktung und Produktion von MikroMach-Systemen eingestellt wurde, kam gegen Ende der Projektlaufzeit die neueste Variante von 3MA-Prüfsystemen 3MA-X8 zum Einsatz. Die Vergleichbarkeit der beiden Prüfsystemvarianten wurde anhand des Testkörpers MAN 5261601 aufgezeigt (siehe entsprechenden Punkt im technischen Anhang).

Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellung:

Im linken Bereich der Abbildung ist das Ergebnisbild der mechanisierten Datenaufnahme der mikromagnetischen 3MA-X8-Kenngröße Ucdz (Analogon zur Koerzitivfeldstärke abgeleitet aus der Überlagerungspermeabilität) dargestellt. Im rechten Bereich befindet sich das Ultraschall-C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Dross-Gegenseite. Das Ultraschall-Bild dient zum qualitativen Vergleich des Ultraschall-Ergebnisses mit dem Ergebnisbild der 3MA-X8-Datenaufnahme.

Die Auflösung der mechanisierten mikromagnetischen Prüfung ist in der Abbildungsbeschriftung angegeben.

Teilstück von Thyssen Krupp Testkörper 39455-2, Auflösung 104 x 115 Messpunkte



Magnetische Streufluss-Prüfung von der Dross-Seite

Magnetisierungseinheit im Verbund mit einem flexiblen Hall-Sonden-Träger:
Elektromagnet (Hall-Sonde mittig zwischen den Polschuhen angeordnet)
Magnetisierungsstrom: 0,55 A
Abstand der Polschuhe zur Oberfläche: 2 mm

Hall-Sonde:
Sensitiv in Normal-Richtung
Keramische Schutzschicht
Ankopplung Hall-Sonde:
Federnder Kontakt zur Testkörperoberfläche

Auflösung: 0,1 mm in Scan- und 1 mm in Index-Richtung

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

Anmerkung:

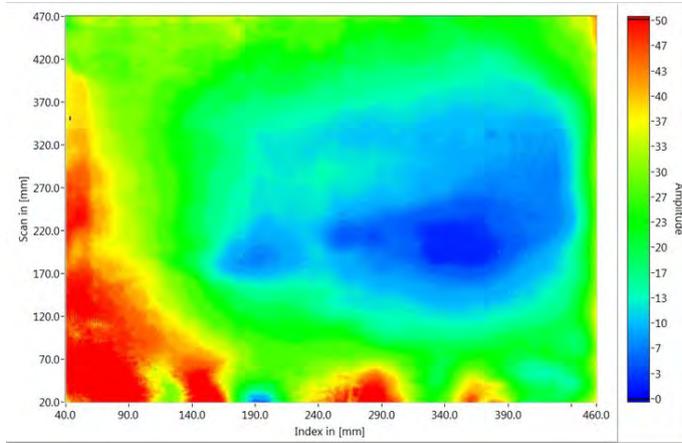
Die Gussrauheit und die Unebenheit der nicht überfrästen Testkörper störte die mechanisierten magnetischen Streufluss-Messungen (z.B. ungleichmäßiger Polschuhabstand durch Unebenheit bzw. Unplanheit/Balligkeit, Sensorabhebungen durch Rauheit, usw.) und führte zu einer Beeinflussung der Ergebnisdarstellung (analog zur MT-Prüfung).

Aus diesem Grund wurde nur ein Testkörper von Thyssen-Krupp mittels mechanisierter Streuflussprüfung vermessen. Auf die Aufnahme weiterer Streuflussdaten wurde wegen den Testkörperoberflächengegebenheiten verzichtet.

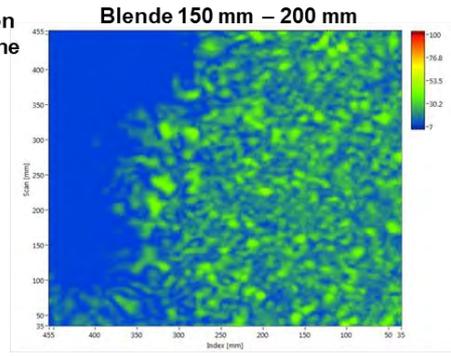
Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellung:

Im linken Bereich der Abbildung ist das Ergebnisbild der mechanisierten Datenaufnahme des magnetischen Streuflusses dargestellt. Im rechten oberen Bereich der Abbildung befindet sich das Ultraschall-C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Schnittfläche bzw. Dross-Gegenseite. Im rechten unteren Bereich der Abbildung befindet sich das Ultraschall-C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Dross-Seite. Die Ultraschall-Bilder dienen zum qualitativen Vergleich der Ultraschall-Ergebnisse mit dem Ergebnisbild der Streufluss-Prüfung.

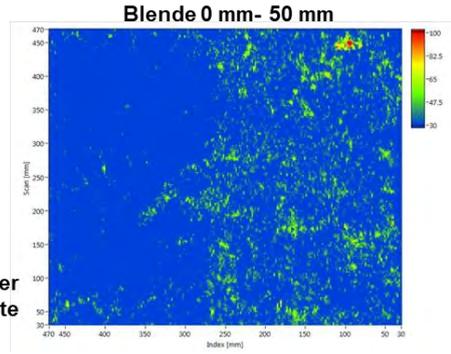
Thyssen Krupp Testkörper 39455-3



US- Prüfung von Schnittfläche



US-Prüfung von der Gießoberseite



Testkörper von Friedrich Wilhelms-Hütte

Von dem Projektpartner Friedrich Wilhelms-Hütte wurden vier Testkörper mit den Abmessungen 500 x 500 x 200 mm und zwei Bauteilsegmente zur Verfügung gestellt

Ultraschallprüfung, Einschallung: DROSS-Gegenseite:

Impuls-Echo-Technik, Kontakttechnik, Einschallwinkel 0° (Senkrechteinschallung)

Prüfkopf:

Einzelschwinger B1S (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Koppelmittel:

Fließwasser mit Korrosionsschutz

Schussabstand der Abrasterung in Scan- und Indexrichtung:

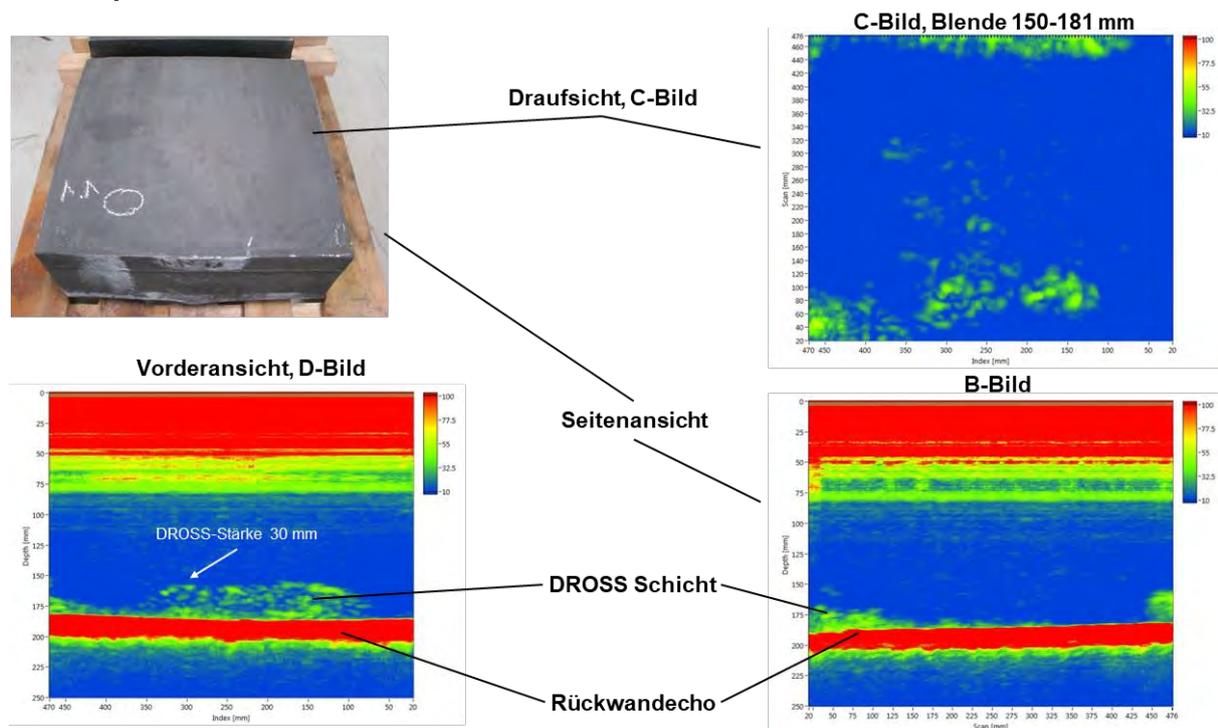
jeweils 10% des Schwingerdurchmessers → 2 mm

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

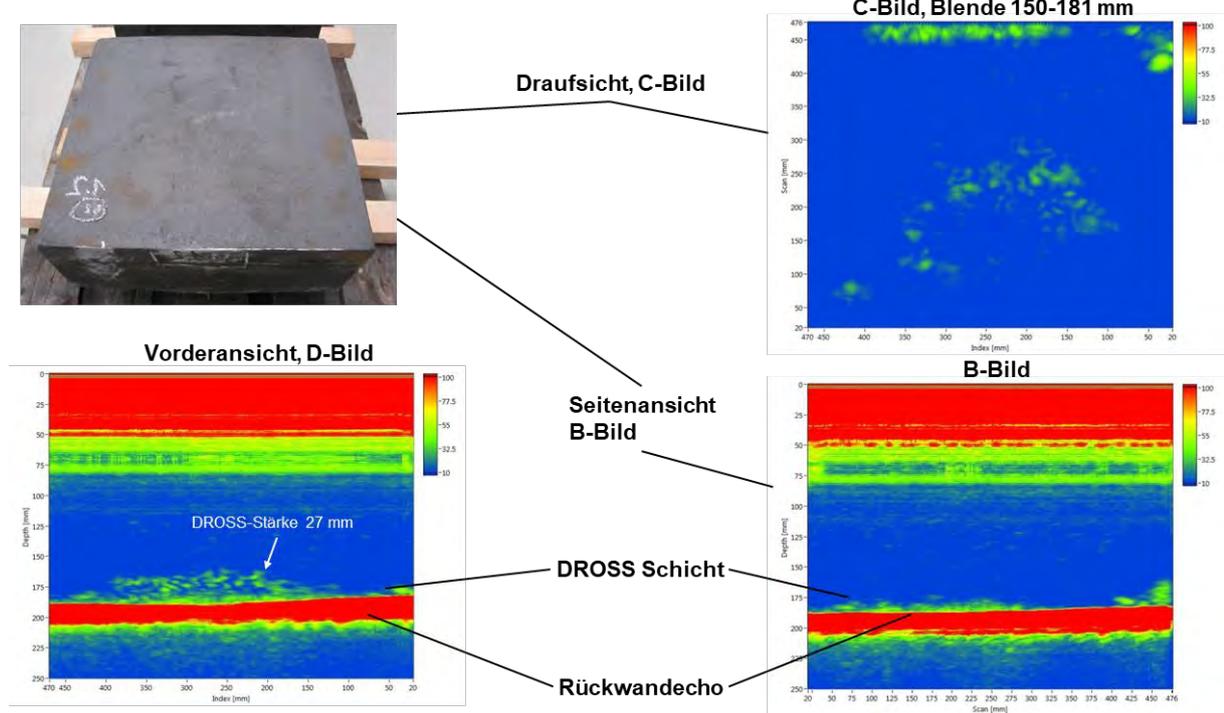
Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

Im linken oberen Bereich der Abbildungen ist jeweils ein Foto des vermessenen Testkörpers abgebildet (Dross-Seite). Auf der unteren linken Seite der Abbildungen ist jeweils das D-Bild (Vorderansicht bzgl. des Fotos) der mechanisierten Ultraschall-Messungen dargestellt. Im rechten Bereich der Abbildungen befindet sich oben das C-Bild (Draufsicht) und darunter das B-Bild (Seitenansicht). Die zur C-Bilderzeugung verwendeten Blenden sind jeweils in den Abbildungen angegeben. Die maximale Dross-Stärke der Testkörper ist jeweils im D-Bild eingetragen.

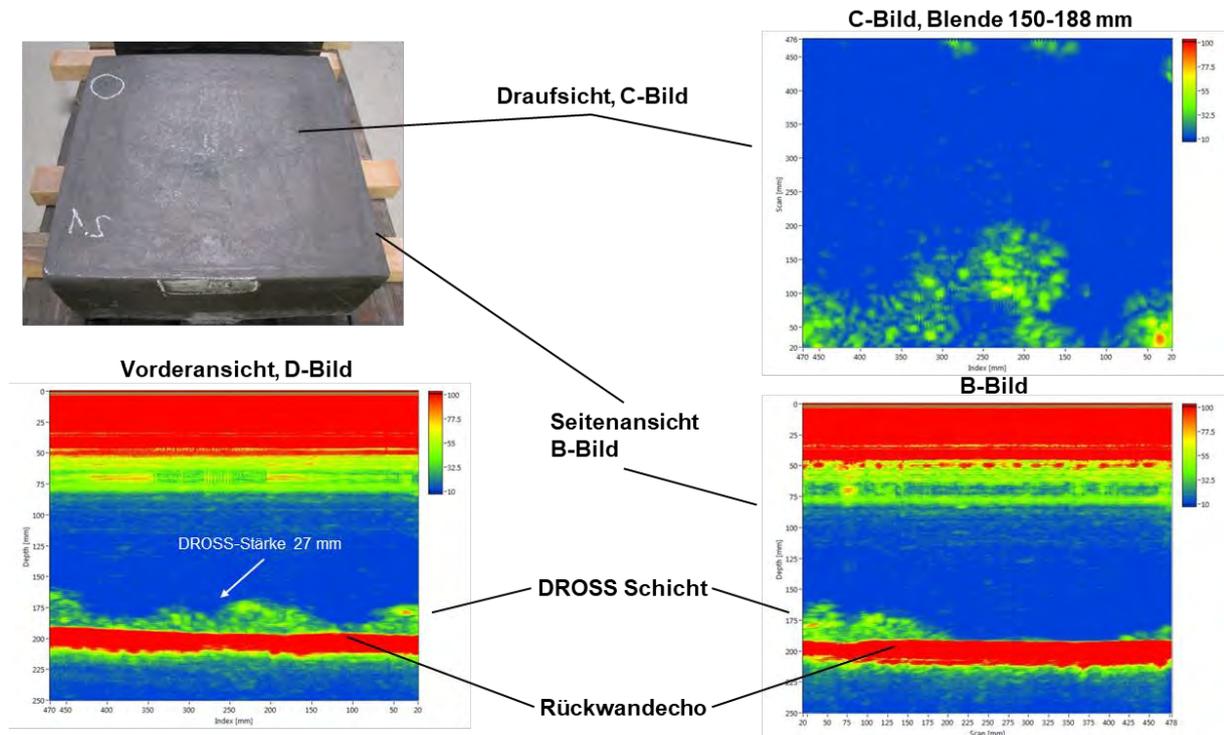
Testkörper FWH 1.1



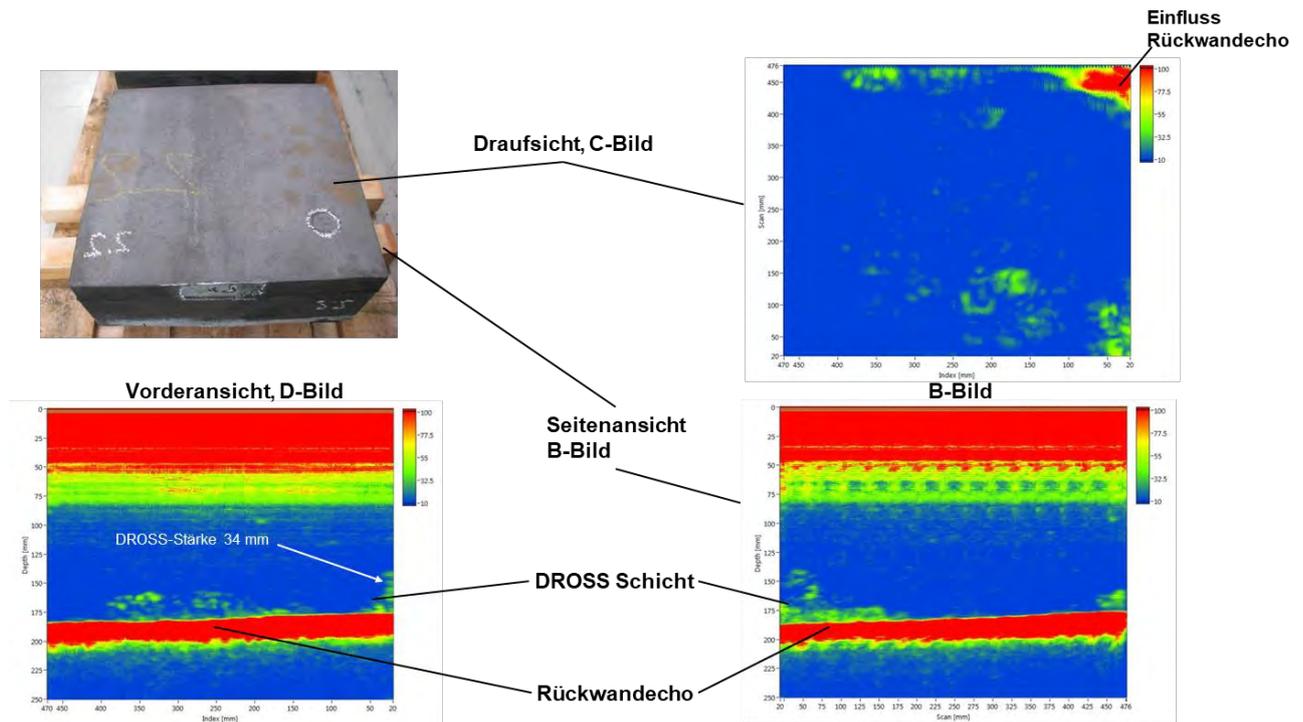
Testkörper FWH 1.2



Testkörper FWH 2.1



Testkörper FWH 2.2



Ultraschallprüfung, Einschallung: DROSS-Seite:

Impuls-Echo-Technik, Kontakttechnik, Einschallwinkel 0° (Senkrechteinschallung)

Prüfkopf:

Einzelschwinger SEB1 (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Koppelmittel:

Fließwasser mit Korrosionsschutz

Schussabstand der Abrasterung in Scan- und Indexrichtung:
jeweils 10% des Schwingerdurchmessers \rightarrow 2 mm

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

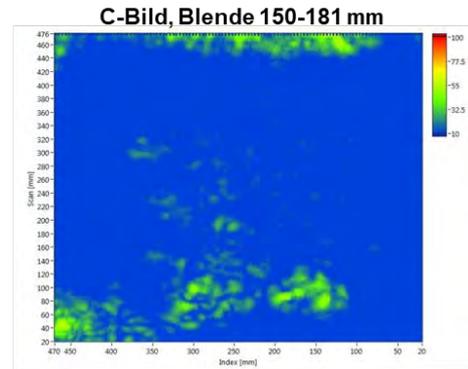
Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

Im linken oberen Bereich der Abbildungen ist jeweils ein Foto des vermessenen Testkörpers abgebildet (Dross-Seite). Im rechten Bereich der Abbildungen befindet sich oben das C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Dross-Gegenseite, und darunter zum Vergleich das C-Bild (ebenfalls Draufsicht), aufgenommen von der Dross-Seite bzw. Gießoberseite.

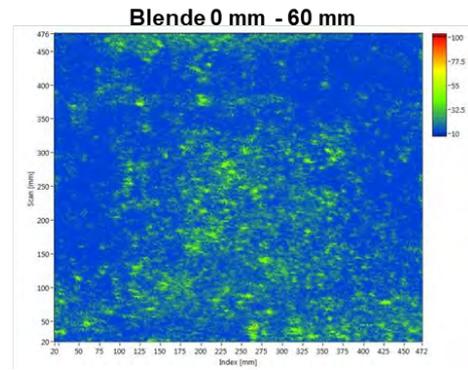
Testkörper FWH 1.1



**Prüfung von
Dross-Gegenseite**



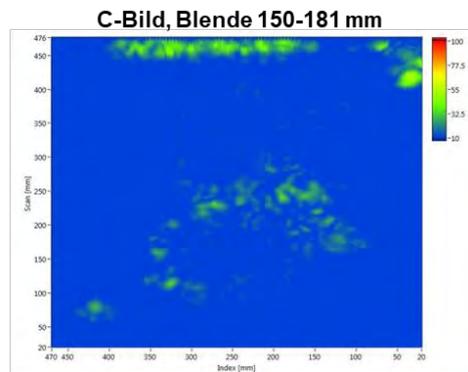
**Prüfung von der
Gießoberseite**



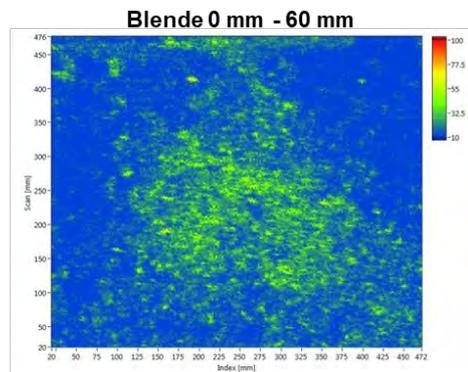
Testkörper FWH 1.2



**Prüfung von
Dross-Gegenseite**



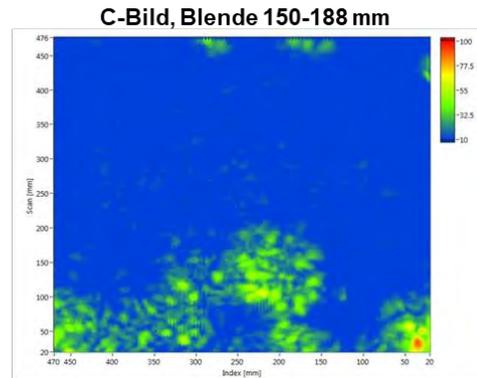
**Prüfung von der
Gießoberseite**



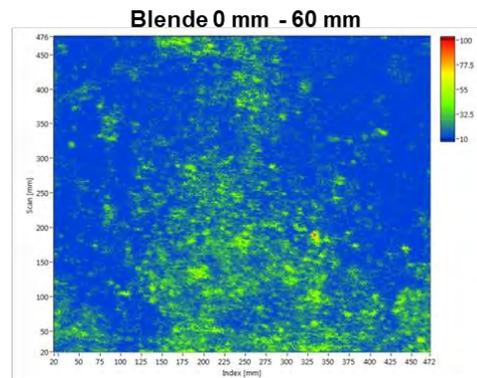
Testkörper FWH 2.1



Prüfung von Dross-Gegenseite



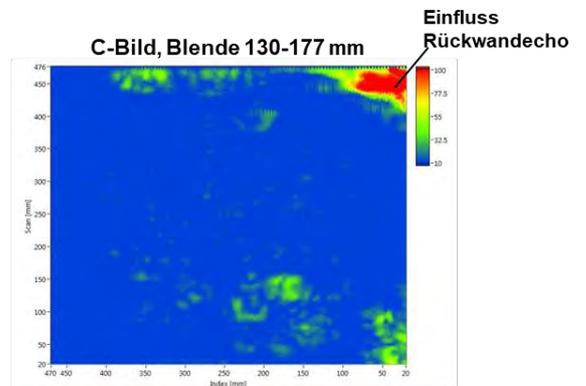
Prüfung von der Gießoberseite



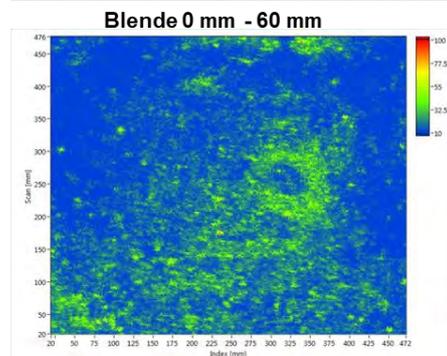
Testkörper FWH2.2



Prüfung von Dross-Gegenseite



Prüfung von der Gießoberseite



Ultraschallprüfung, Auswertung der Rückwandabschattung

Einschallung: Dross-Gegenseite und Dross-Seite

Impuls-Echo-Technik, Kontakttechnik, Einschallwinkel 0° (Senkrechteinschallung)

Prüfköpfe:

Einschallung von Dross-Gegenseite:

Einzelschwinger B1S (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Einschallung von der Dross-Seite:

Einzelschwinger SEB1 (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Koppelmittel: Fließwasser mit Korrosionsschutz

Schussabstand der Abrasterung in Scan- und Indexrichtung:

jeweils 10% des Schwingerdurchmessers → 2 mm

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

Anmerkungen:

Zur statistischen Absicherung wurden Ultraschallmessdaten verwendet, die im Laufe des Projektes an den Testkörpern aufgezeichnet wurden. Da diese Testkörper im Zuge der Projektarbeit zerstörend geprüft wurden, konnten keine neuen mechanisierten Ultraschalldaten zur Auswertung der Rückwandabschattung aufgezeichnet werden. Neben der zerstörenden Prüfung in Belastungsversuchen wurden die Testkörper ebenfalls für Referenzuntersuchungen umgearbeitet, was eine Wiederholung der mechanisierten Messungen ebenfalls ausschloss. Aus diesem Grund wurden Daten verwendet, die nicht speziell für den Rückwandabschattungsansatz aufgezeichnet wurden. Deshalb ist es in einigen Messungen der Fall, dass eine Übersteuerung der Messdaten für die Rückwandabschattungsanalyse vorliegt. Die Übersteuerungen sind darauf zurückzuführen, dass mit entsprechend hohen Verstärkungen gearbeitet wurde, um die Empfindlichkeit der mechanisierten Ultraschallprüfung zur Dross-Detektion zu erhöhen. Dies stellt für die Analyse des Rückwandabschattungsansatzes kein grundsätzliches Problem dar, aber es führt dazu, dass die Ergebnisbilder teilweise bezüglich der Farbskala nicht mit dem zuvor an dem geviertelten Testkörper MAN 5261600 übereinstimmen. Die qualitative Aussagekraft der Bilder bleibt jedoch erhalten.

Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

Im linken Bereich der Abbildungen ist das Ultraschall C-Bild aufgezeichnet von der Dross-Gegenseite dargestellt. Mittig ist jeweils das C-Bild der Analyse der Rückwandabschattung für Ultraschalldaten bei Einschallung von der Dross-Gegenseite und rechts das C-Bild der Analyse der Rückwandabschattung bei Einschallung von der Dross-Seite dargestellt.

Mikromagnetische Prüfung

Prüfsystem MikroMach

Prüfort: DROSS-Seite in Kontakttechnik (Kontakt beider Polschuhe des MikroMach mit der Testkörperoberfläche)

Prüffrequenz: 60 Hz

Magnetfeldaussteuerung: 110 A/cm

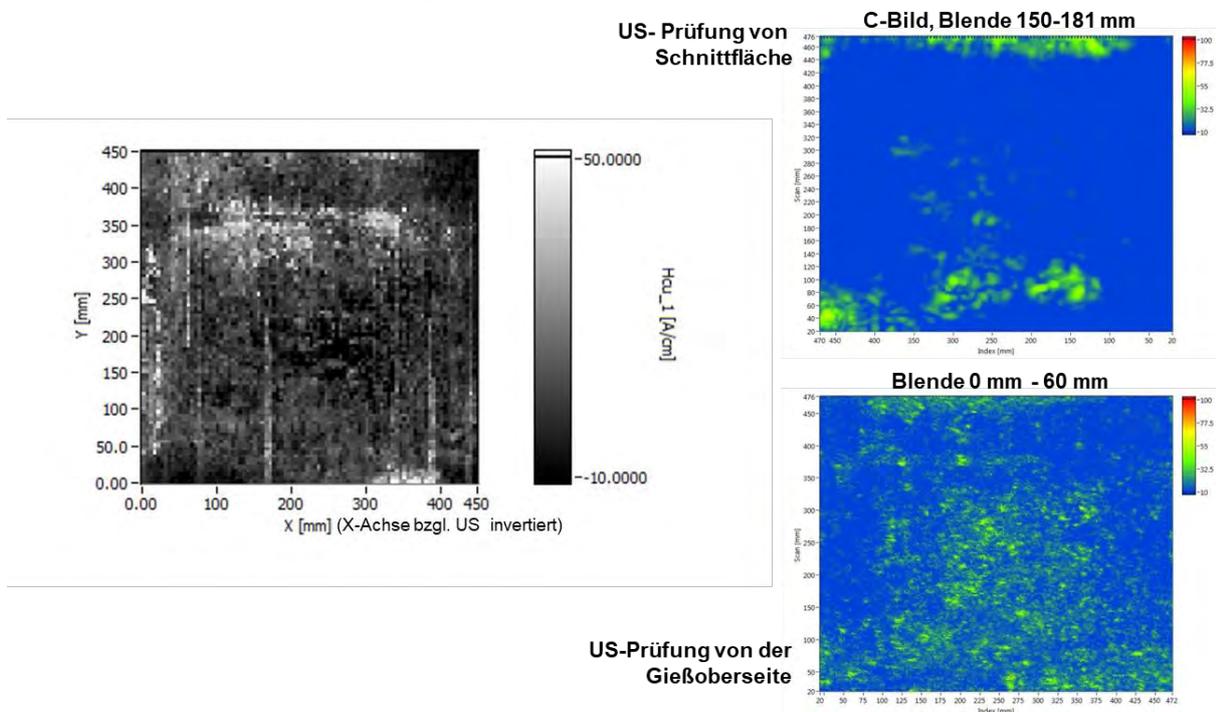
Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

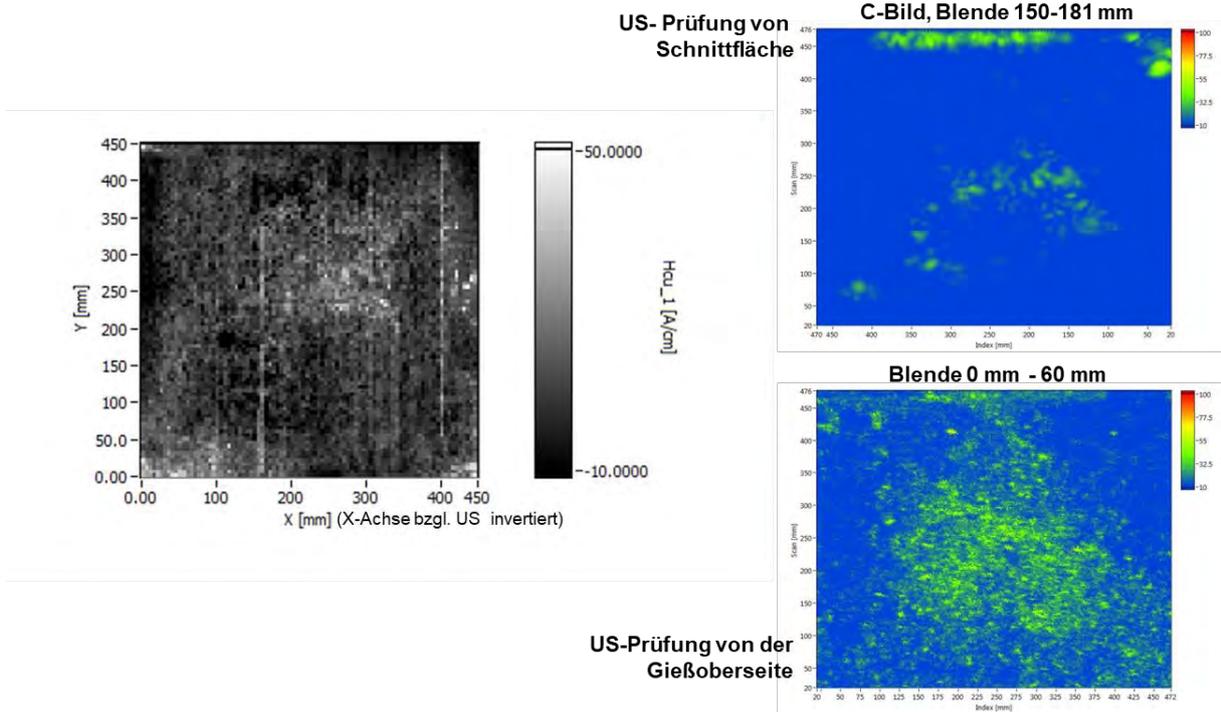
Im linken Bereich der Abbildungen ist jeweils das Ergebnisbild der mechanisierten Datenaufnahme der mikromagnetischen 3MA-Kenngröße H_{cu} (Koerzitivfeldstärke abgeleitet aus der Überlagerungspermeabilität) dargestellt. Im rechten oberen Bereich der Abbildungen befindet sich das Ultraschall-C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Schnittfläche bzw. Dross-Gegenseite. Im rechten unteren Bereich der Abbildungen befindet sich das Ultraschall-C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Dross-Seite. Die Ultraschall-Bilder dienen zum qualitativen Vergleich der Ultraschall-Ergebnisse mit den Ergebnisbildern der 3MA-Datenaufnahme.

Die Auflösungen der mechanisierten mikromagnetischen Prüfungen sind jeweils in den Abbildungsbeschriftungen angegeben.

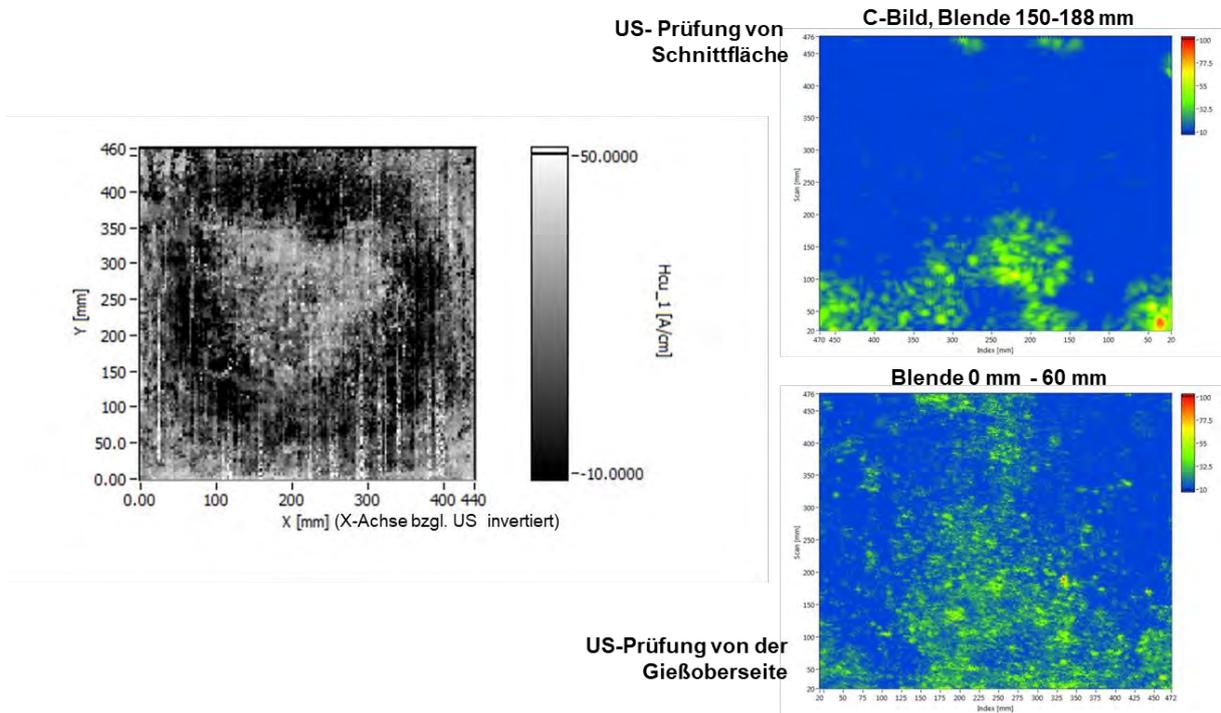
Testkörper FWH 1.1, Auflösung 90 x 90 Messpunkte



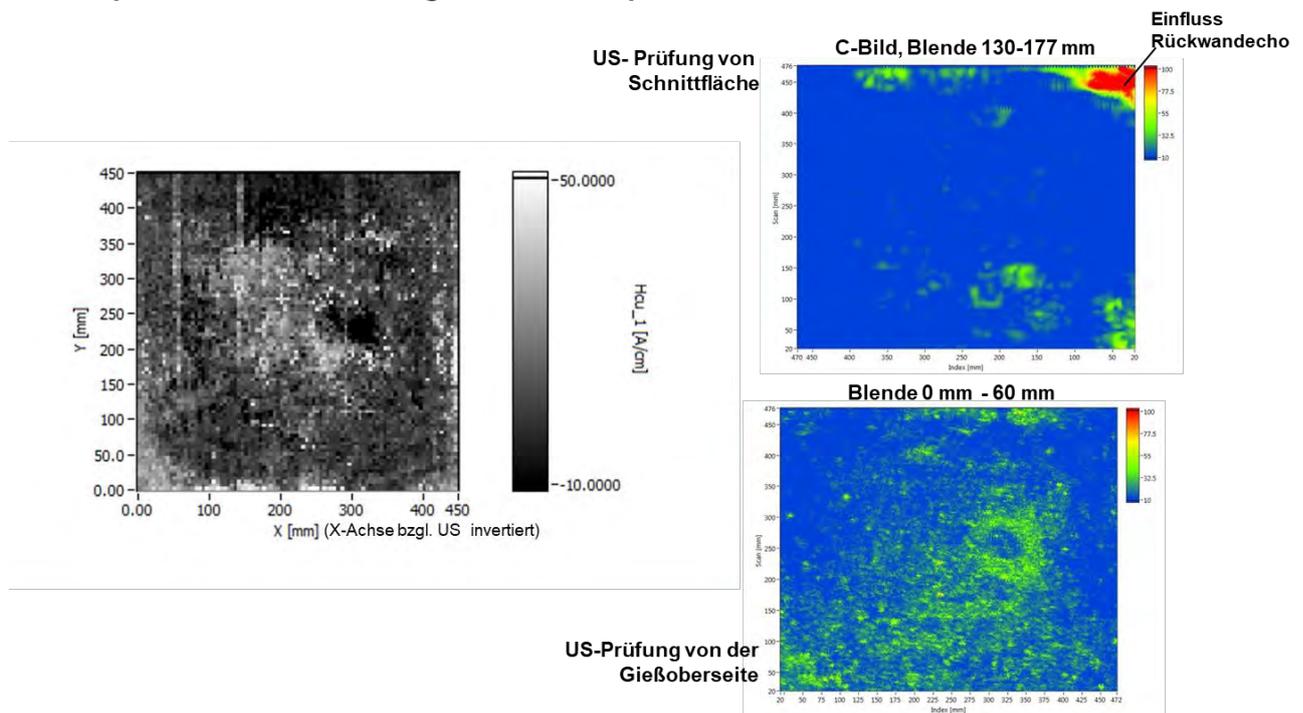
Testkörper FWH 1.2, Auflösung 90 x 90 Messpunkte



Testkörper FWH 2.1, Auflösung 90 x 90 Messpunkte



Testkörper FWH 2.1, Auflösung 90 x 90 Messpunkte



Magnetische Streufluss-Prüfung von der Dross-Seite

Magnetisierungseinheit im Verbund mit einem flexiblen Hall-Sonden-Träger:
Elektromagnet (Hall-Sonde mittig zwischen den Polschuhen angeordnet)
Magnetisierungsstrom: 0,55 A
Abstand der Polschuhe zur Oberfläche: 2 mm

Hall-Sonde:
Sensitiv in Normal-Richtung
Keramische Schutzschicht
Ankopplung Hall-Sonde:
Federnder Kontakt zur Testkörperoberfläche

Auflösung: 0,1 mm in Scan- und 1 mm in Index-Richtung

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

Anmerkung:
Es wurden zwei Testkörper von Friedrich Wilhelms-Hütte im Nachgang auf der Dross-Seite leicht überfräst und im überfrästen Zustand mittels mechanisierter magnetischer Streufluss-Prüfung gemessen. Die beiden Testkörper wurden zuvor mittels magnetischer Befestigung an der Dross-Seite bewegt, dadurch entstanden magnetische Restfelder in den Testkörperoberflächen, die jeweils einen hellen und einen dunklen Streifen in den Ergebnisbildern verursachten.

Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:
Im linken Bereich der Abbildungen ist jeweils das Ergebnisbild der mechanisierten Datenaufnahme des magnetischen Streuflusses dargestellt. Im rechten oberen Bereich der Abbildungen befindet sich das Ultraschall-C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der

Schnittfläche bzw. Dross-Gegenseite. Im rechten unteren Bereich der Abbildungen befindet sich das Ultraschall-C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Dross-Seite. Die Ultraschall-Bilder dienen zum qualitativen Vergleich der Ultraschall-Ergebnisse mit den Ergebnisbildern der Streufluss-Prüfung.

Bauteilsegmente von Friedrich Wilhems Hütte

Bei den beiden Bauteilsegmenten handelt es sich jeweils um ca. 600 x ca. 250 x ca. 160 mm große Teilstücke eines großen Bauteils. Die folgende Abbildung zeigt ein Foto eines der Segmente.

Foto der DROSS-Gegenseite (Schnittfläche) von Bauteilsegment 1 und Bauteilsegment 2



Bauteilsegment 1



Bauteilsegment 2

Ultraschallprüfung, Einschallung: DROSS-Gegenseite:

Impuls-Echo-Technik, Kontakttechnik, Einschallwinkel 0° (Senkrechteinschallung)

Prüfkopf:

Einzelschwinger B1S (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Koppelmittel:

Fließwasser mit Korrosionsschutz

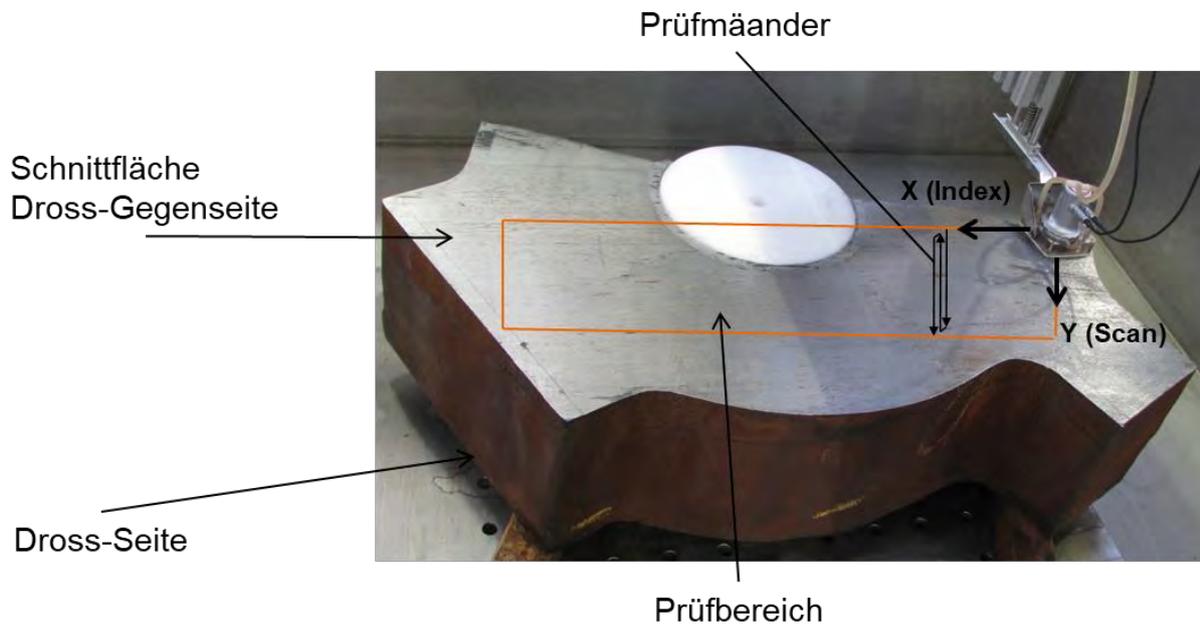
Scanlänge 450 mm, Indexlänge 450 mm

Schussabstand der Abrasterung in Scan- und Indexrichtung:
jeweils 10% des Schwingerdurchmessers → 2 mm

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

Anmerkungen:

Die folgende Abbildung zeigt ein Foto eines der Segmente mit eingezeichnetem Scan-Bereich der mechanisierten Untersuchungen.

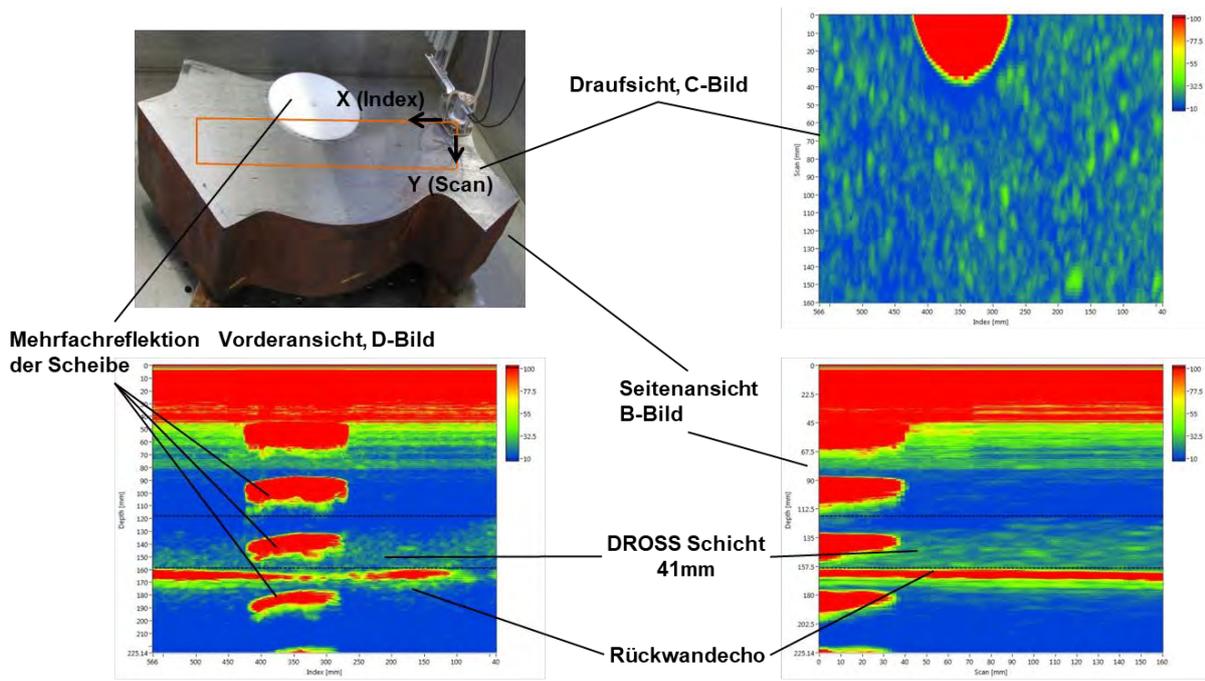


Wie aus der vorherigen Abbildung ersichtlich, wurde durch Einbringen einer passenden Kunststoffscheibe in die kreisförmige Aussparung der Segmente der rechteckige Prüfbereich für die mäanderförmige Abrasterung optimiert, da so ein größerer zusammenhängender Bereich der Segmente mechanisiert untersucht werden konnte.

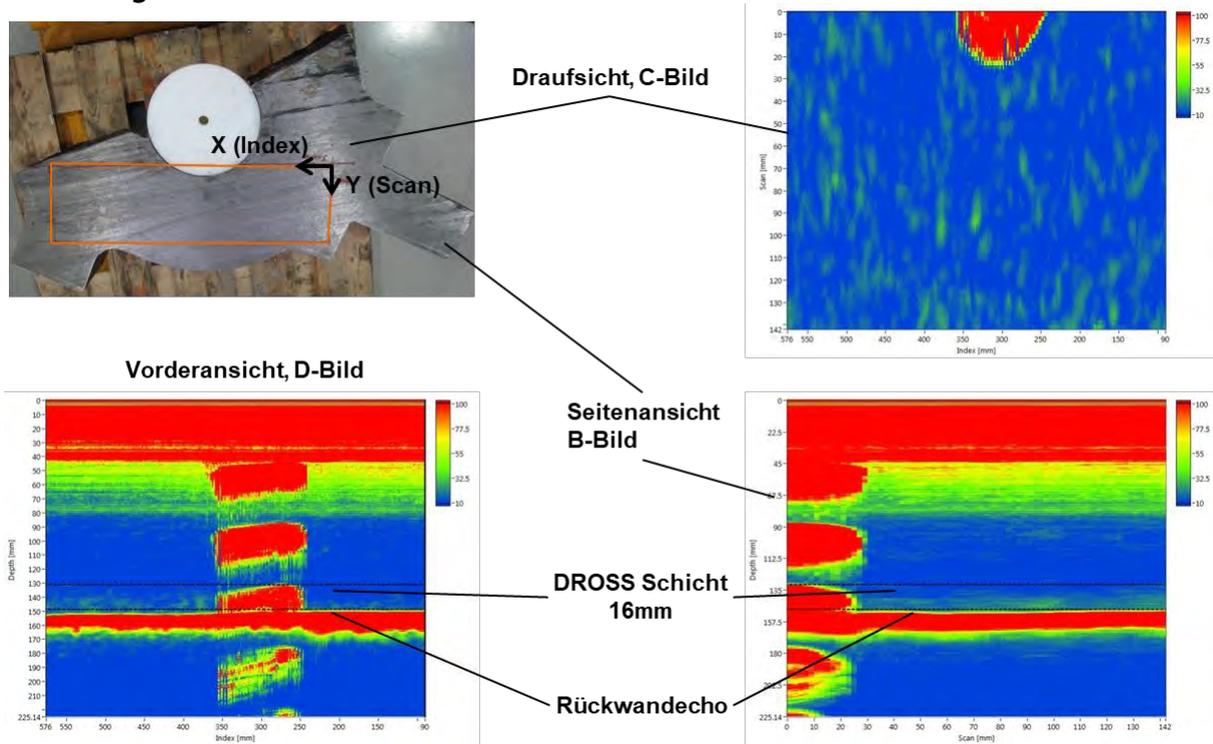
Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

Im linken oberen Bereich der Abbildungen ist jeweils ein Foto des Segments abgebildet (Schnittfläche bzw. Dross-Gegenseite). Auf der unteren linken Seite der Abbildungen ist jeweils das D-Bild (Vorderansicht) der Ultraschall-Messungen dargestellt. Im rechten Bereich der Abbildungen befindet sich oben das C-Bild (Draufsicht) und darunter das B-Bild (Seitenansicht).

Bauteilsegment FWH 1



Bauteilsegment FWH 2



Ultraschallprüfung, Einschallung: DROSS-Seite:

Impuls-Echo-Technik, Kontakttechnik, Einschallwinkel 0° (Senkrechteinschallung)

Prüfkopf:

Einzelschwinger SEB1 (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Koppelmittel:

Fließwasser mit Korrosionsschutz

Schussabstand der Abrasterung in Scan- und Indexrichtung:

jeweils 10% des Schwingerdurchmessers → 2 mm

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

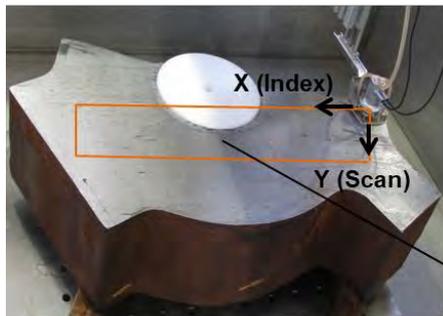
Anmerkung:

Es wurde durch Einbringen einer passenden Kunststoffscheibe in die kreisförmige Aussparung der Segmente der rechteckige Prüfbereich für die mäanderförmige Abrasterung optimiert, da so ein größerer zusammenhängender Bereich der Segmente mechanisiert untersucht werden konnte.

Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

Im linken oberen Bereich der Abbildungen ist jeweils ein Foto des Segments abgebildet (Schnittfläche bzw. Dross-Gegenseite). Im rechten Teil der Abbildungen sind oben jeweils das C-Bild aus den Messdaten von der Dross-Gegenseite (Schnittfläche) und darunter das C-Bild aus den Messungen von der Dross-Seite dargestellt.

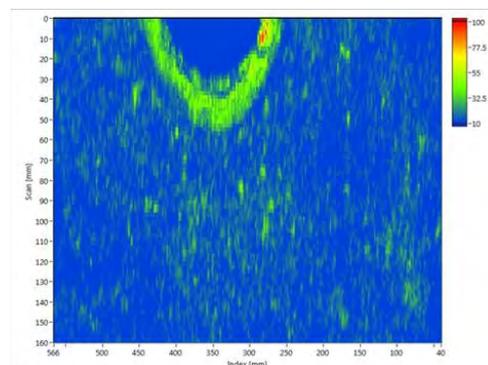
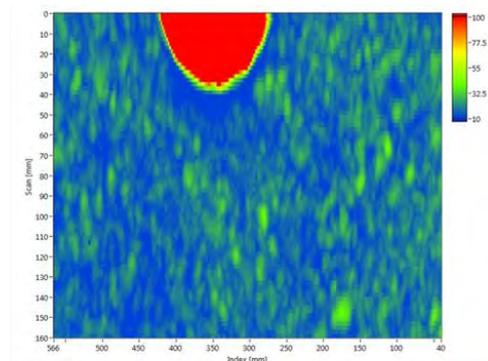
Bauteilsegment FWH 1



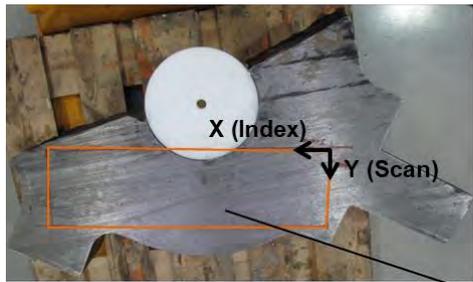
Prüfung von
Schnittfläche

Prüfbereich

Prüfung von der
Gießoberseite



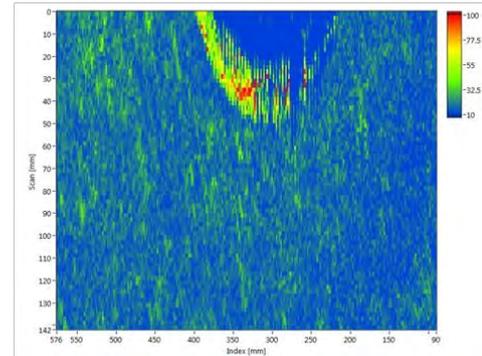
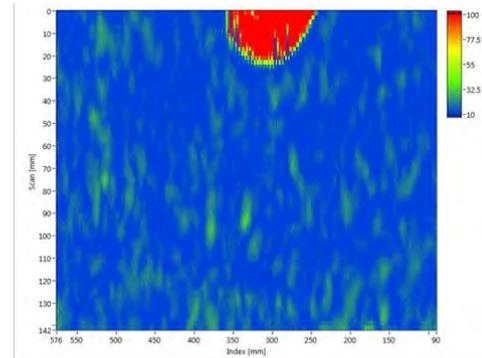
Bauteilsegment FWH 2



Prüfung von
Schnittfläche

Prüfbereich

Prüfung von der
Gießoberseite



Ultraschallprüfung, Auswertung der Rückwandabschattung

Einschallung: Dross-Gegenseite und Dross-Seite

Impuls-Echo-Technik, Kontakttechnik, Einschallwinkel 0° (Senkrechteinschallung)

Prüfköpfe:

Einschallung von Drosss-Gegenseite:

Einzelschwinger B1S (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Einschallung von der Dross-Seite:

Einzelschwinger SEB1 (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Koppelmittel: Fließwasser mit Korrosionsschutz

Schussabstand der Abrasterung in Scan- und Indexrichtung:

jeweils 10% des Schwingerdurchmessers → 2 mm

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

Anmerkungen:

Zur statistischen Absicherung wurden Ultraschallmessdaten verwendet, die im Laufe des Projektes an den Testkörpern aufgezeichnet wurden. Da diese Testkörper im Zuge der Projektarbeit zerstörend geprüft wurden, konnten keine neuen mechanisierten Ultraschalldaten zur Auswertung der Rückwandabschattung aufgezeichnet werden. Neben der zerstörenden Prüfung in Belastungsversuchen wurden die Testkörper ebenfalls für Referenzuntersuchungen umgearbeitet, was eine Wiederholung der mechanisierten Messungen ebenfalls ausschloss. Aus diesem Grund wurden Daten verwendet, die nicht speziell für den Rückwandabschattungsansatz aufgezeichnet wurden. Deshalb ist es in einigen Messungen der

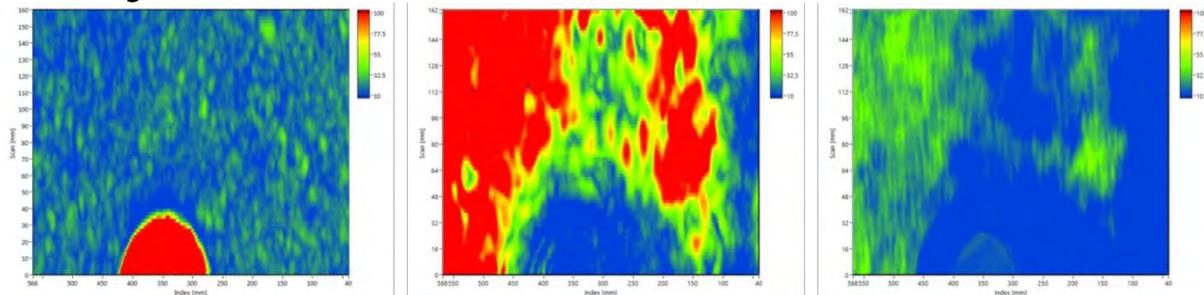
Fall, dass eine Übersteuerung der Messdaten für die Rückwandabschattungsanalyse vorliegt. Die Übersteuerungen sind darauf zurückzuführen, dass mit entsprechend hohen Verstärkungen gearbeitet wurde, um die Empfindlichkeit der mechanisierten Ultraschallprüfung zur Dross-Detektion zu erhöhen. Dies stellt für die Analyse des Rückwandabschattungsansatzes kein grundsätzliches Problem da, aber es führt dazu, dass die Ergebnisbilder teilweise bezüglich der Farbskala nicht mit dem zuvor an dem geviertelten Testkörper MAN 5261600 übereinstimmen. Die qualitative Aussagekraft der Bilder bleibt jedoch erhalten.

Es wurde durch Einbringen einer passenden Kunststoffscheibe in die kreisförmige Aussparung der Segmente der rechteckige Prüfbereich für die mäanderförmige Abrasterung optimiert, da so ein größerer zusammenhängender Bereich der Segmente mechanisiert untersucht werden konnte.

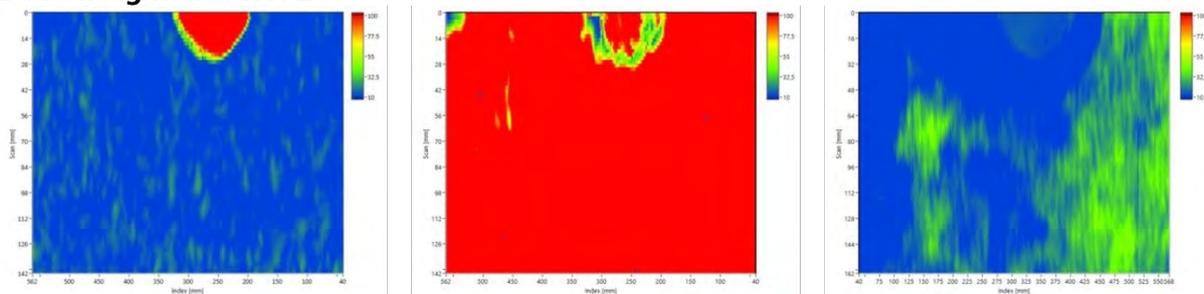
Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

Im linken Bereich der Abbildungen ist das Ultraschall C-Bild aufgezeichnet von der Dross-Gegenseite dargestellt. Mittig ist jeweils das C-Bild der Analyse der Rückwandabschattung für Ultraschalldaten bei Einschaltung von der Dross-Gegenseite und rechts das C-Bild der Analyse der Rückwandabschattung bei Einschaltung von der Dross-Seite dargestellt.

Bauteilsegment FWH 1



Bauteilsegment FWH 2



Mikromagnetische Prüfung

Prüfsystem MikroMach

Prüfort: DROSS-Seite in Kontakttechnik (Kontakt beider Polschuhe des MikroMach mit der Testkörperoberfläche)

Prüffrequenz: 60 Hz

Magnetfeldaussteuerung: 110 A/cm

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

Anmerkung:

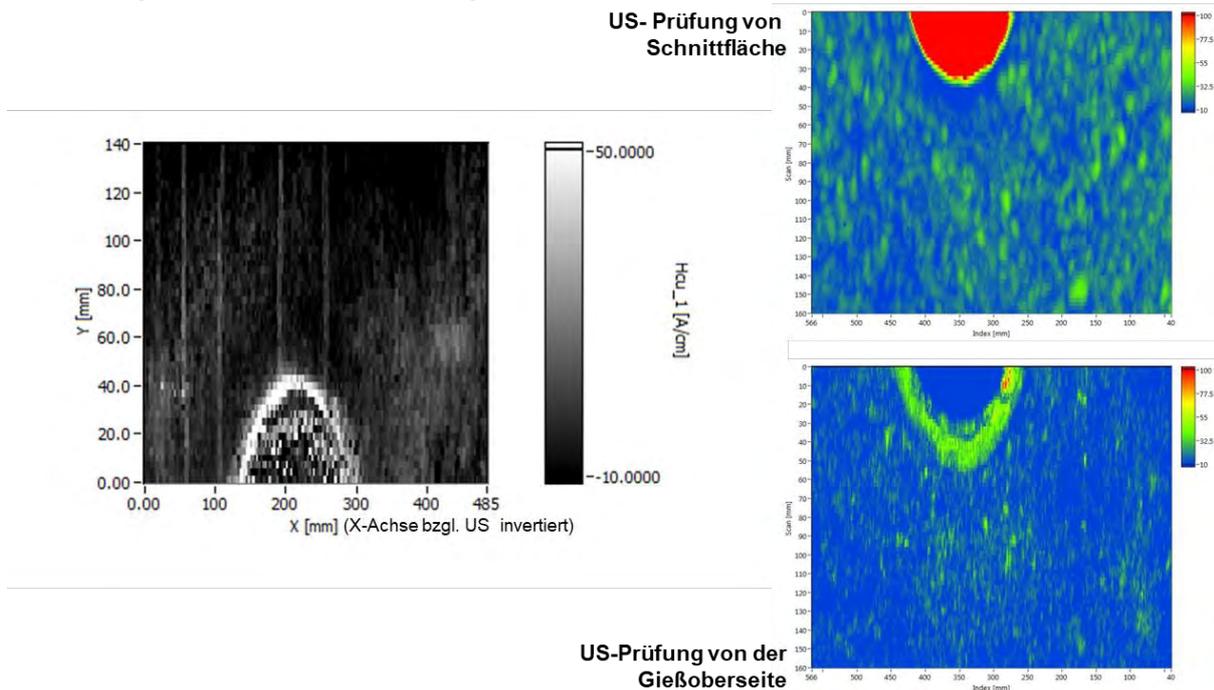
Es wurde durch Einbringen einer passenden Kunststoffscheibe in die kreisförmige Aussparung der Segmente der rechteckige Prüfbereich für die mäanderförmige Abrasterung optimiert, da so ein größerer zusammenhängender Bereich der Segmente mechanisiert untersucht werden konnte.

Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

Im linken Bereich der Abbildungen ist jeweils das Ergebnisbild der mechanisierten Datenaufnahme der mikromagnetischen 3MA-Kenngröße H_{cu} (Koerzitivfeldstärke abgeleitet aus der Überlagerungspermeabilität) dargestellt. Im rechten oberen Bereich der Abbildungen befindet sich das Ultraschall-C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Schnittfläche bzw. Dross-Gegenseite. Im rechten unteren Bereich der Abbildungen befindet sich das Ultraschall-C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Dross-Seite. Die Ultraschall-Bilder dienen zum qualitativen Vergleich der Ultraschall-Ergebnisse mit den Ergebnisbildern der 3MA-Datenaufnahme.

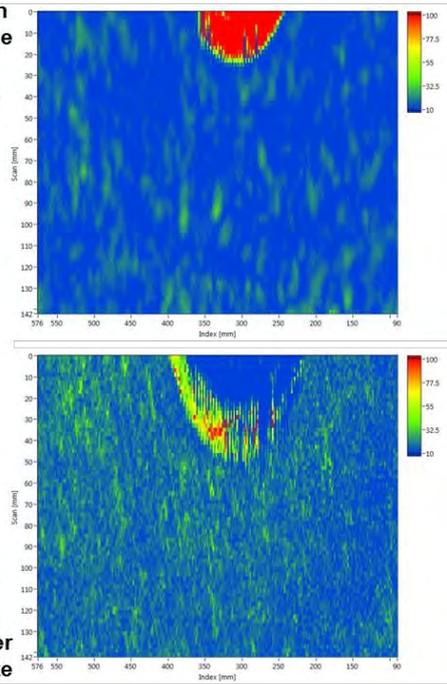
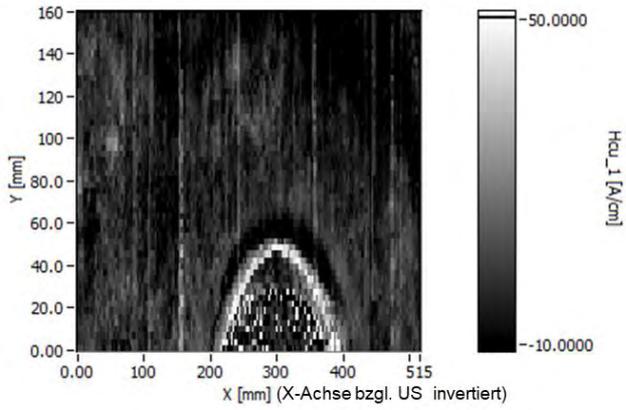
Die Auflösungen der mechanisierten mikromagnetischen Prüfungen sind jeweils in den Abbildungsbeschriftungen angegeben.

Bauteilsegment FWH 1, Auflösung 162 x 47 Messpunkte



Bauteilsegment FWH 2, Auflösung 172 x 54 Messpunkte

US- Prüfung von Schnittfläche



US-Prüfung von der Gießoberseite

Bauteilsegmente von Enercon

Von dem Projektpartner Enercon wurden vier Bauteilsegmente zur Verfügung gestellt

Aufgrund seiner Abmessungen und des Gewichts musste ein von Enercon zur Verfügung gestelltes Bauteil vor den Messungen zerteilt werden. Hierzu wurde zunächst der vermeidlich drossbehaftete obere Ring des Bauteils abgetrennt und anschließend in vier Einzelteile gesägt. Die Segmente des Bauteils sind jeweils von der Dross-Seite und von der Dross-Gegenseite aus in der folgenden Abbildung dargestellt.

Bauteilsegmente, Dross-Seite (links), Dross-Gegenseite (rechts)



Ultraschallprüfung, Einschallung: DROSS-Gegenseite:

Impuls-Echo-Technik, Kontakttechnik, Einschallwinkel 0° (Senkrechteinschallung)

Prüfkopf:

Einzelschwinger B1S (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Koppelmittel:

Fließwasser mit Korrosionsschutz

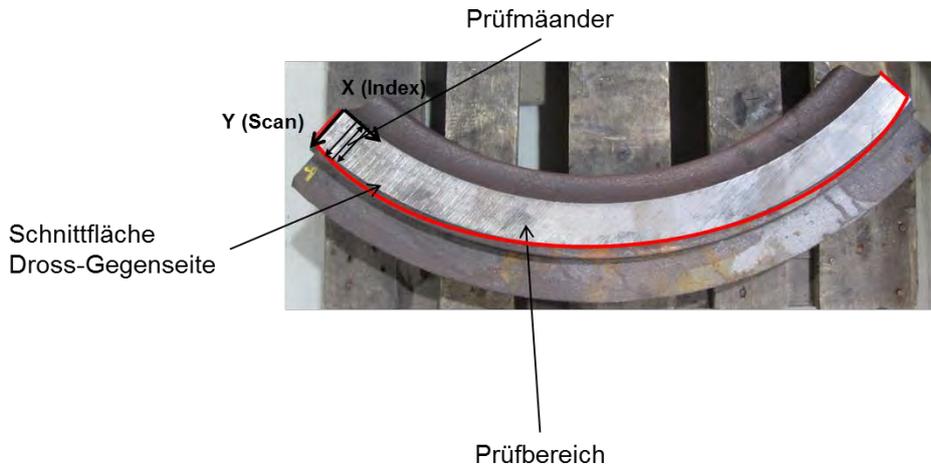
Schussabstand der Abrasterung in Scan- und Indexrichtung:
jeweils 10% des Schwingerdurchmessers \rightarrow 2 mm

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

Anmerkungen:

Bei der Prüfung von der Dross-Gegenseite konnte nur ein Teilbereich der Bauteilsegmente untersucht werden. Dieser ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Exemplarisch dargestellter Prüfbereich für die Messungen von der Dross-Gegenseite für die Bauteilsegmente



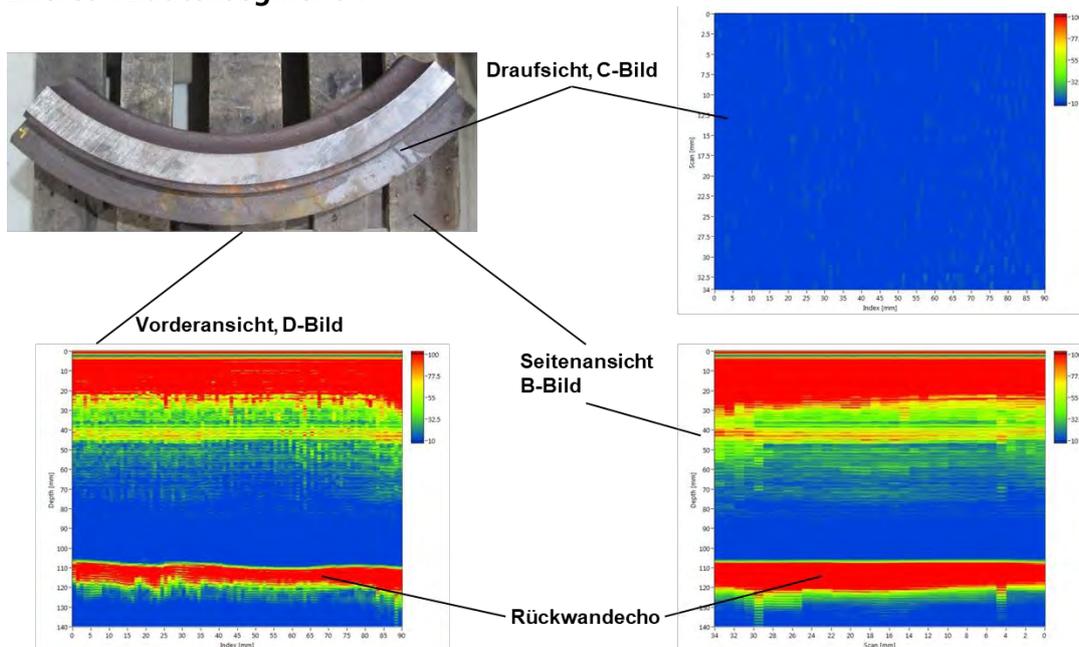
Es handelt sich um die ebene Schnittfläche, die an allen vier Segmenten durch die Bearbeitung entstanden ist. Die Bereiche außerhalb der Schnittfläche sind geometrisch bedingt mit keinem Verfahren mechanisiert prüfbar.

An allen Segmenten wurden keine Dross-Anzeigen gefunden.

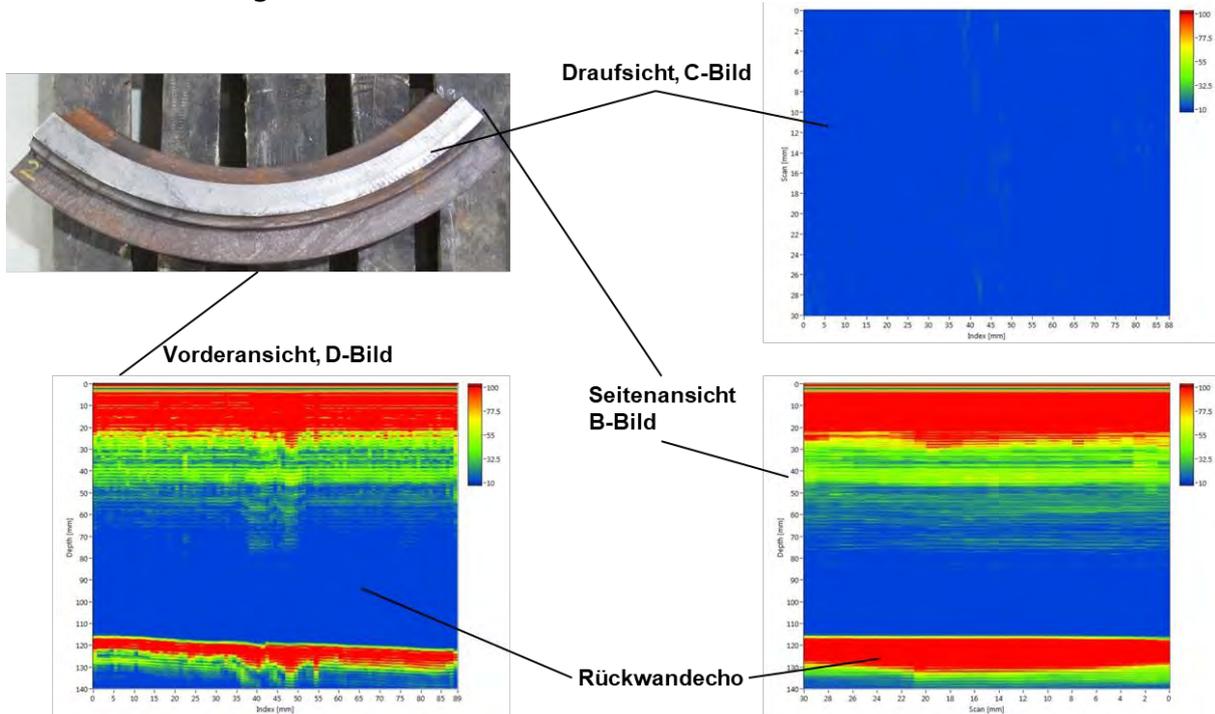
Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

Im linken oberen Bereich der Abbildungen ist jeweils ein Foto des vermessenen Bauteilsegments abgebildet (Dross-Gegenseite). Auf der unteren linken Seite der Abbildungen ist jeweils das D-Bild (Vorderansicht bzgl. des Fotos) der mechanisierten Ultraschall-Messungen dargestellt. Im rechten Bereich der Abbildungen befindet sich oben das C-Bild (Draufsicht) und darunter das B-Bild (Seitenansicht). Die zur C-Bilderzeugung verwendeten Blenden sind jeweils in den Abbildungen angegeben. Es sind keine maximalen Dross-Stärken eingetragen, da in dem mechanisiert vermessenen Bereich der Segmente keine Dross-Anzeigen vorlagen.

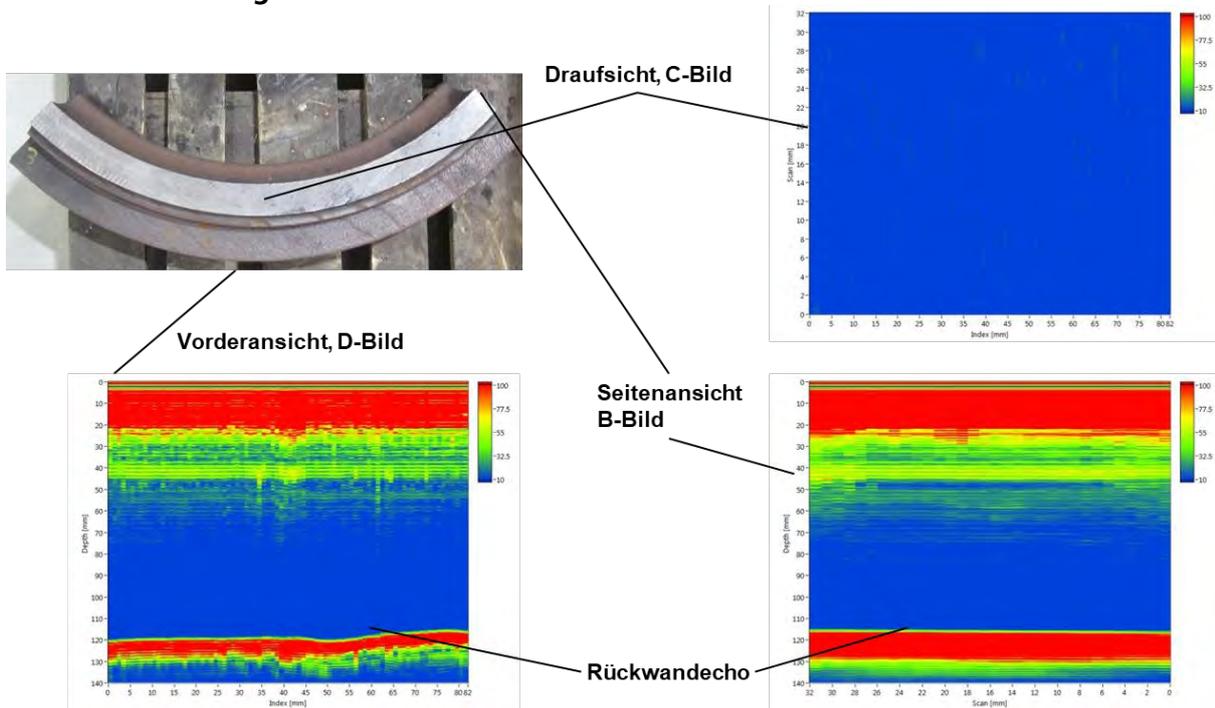
Enercon Bauteilsegment 1



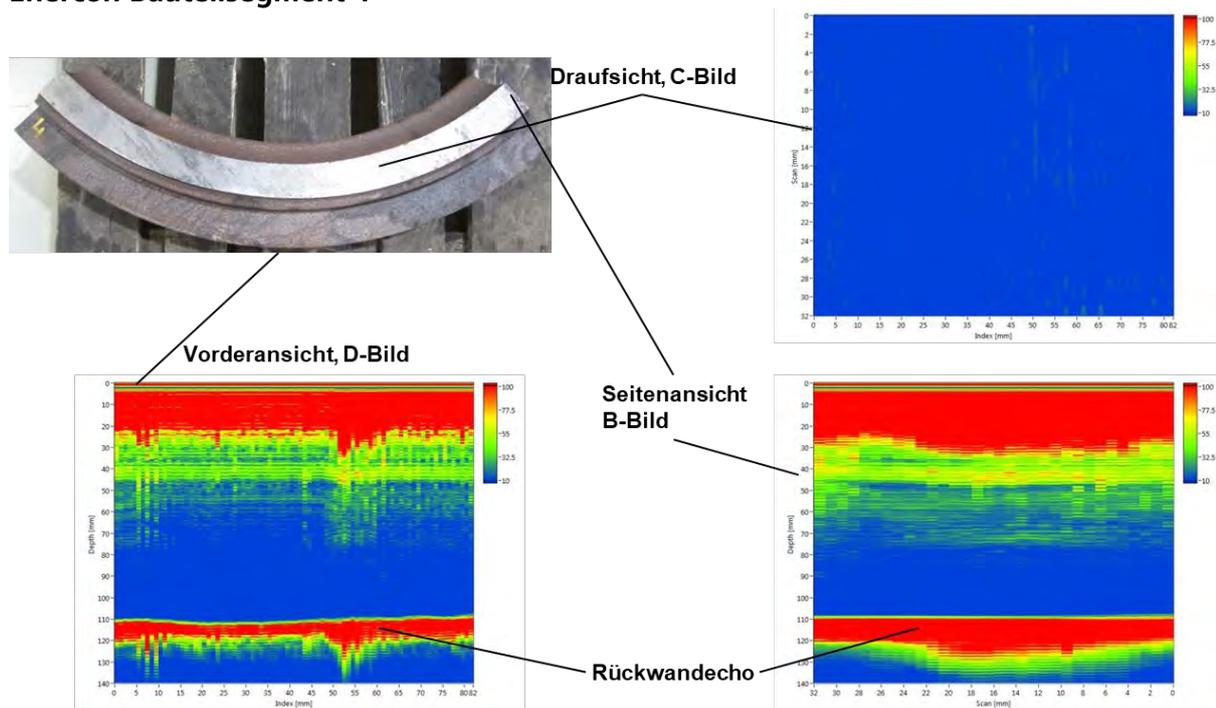
Enercon Bauteilsegment 2



Enercon Bauteilsegment 3



Enercon Bauteilsegment 4



Ultraschallprüfung, Einschallung: DROSS-Seite:

Impuls-Echo-Technik, Kontakttechnik, Einschallwinkel 0° (Senkrechteinschallung)

Prüfkopf:

Einzelschwinger SEB1 (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Koppelmittel:

Fließwasser mit Korrosionsschutz

Schussabstand der Abrasterung in Scan- und Indexrichtung:
jeweils 10% des Schwingerdurchmessers \rightarrow 2 mm

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

Anmerkung:

Für die mechanisierten Prüfungen von der Dross-Seite wurde mittels eines angepassten Adapterstückes aus Holz ein möglichst großer rechteckiger Scanbereich für diese Messungen realisiert. Der so realisierte Scanbereich ist in den Ergebnisdarstellungen durch ein rotes Karree in den Fotos gekennzeichnet.

Analog zu den Ergebnissen bei Einschallung von der Dross-Gegenseite wurden auch bei den Messungen bei Einschallung von der Dross-Seite keine Dross-Anzeigen gefunden.

Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

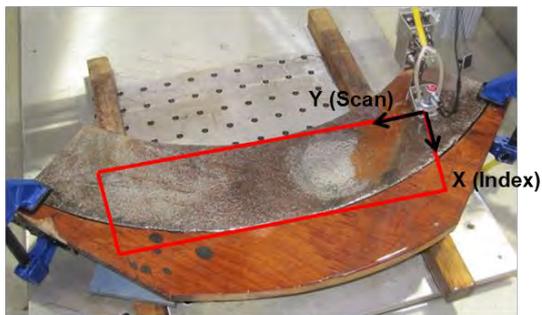
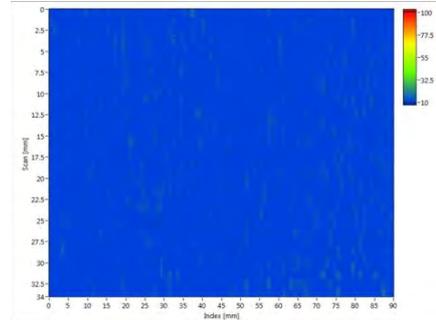
Im linken oberen Bereich der Abbildungen ist jeweils ein Foto des Segments abgebildet (Schnittfläche bzw. Dross-Gegenseite). Darunter befindet sich ein Foto des Segmentes von der Dross-Seite und dem an das Segment applizierten Adapter. Im rechten Teil der Abbildungen sind

oben jeweils das C-Bild aus den Messdaten von der Dross-Gegenseite (Schnittfläche) und darunter das C-Bild aus den Messungen von der Dross-Seite dargestellt.

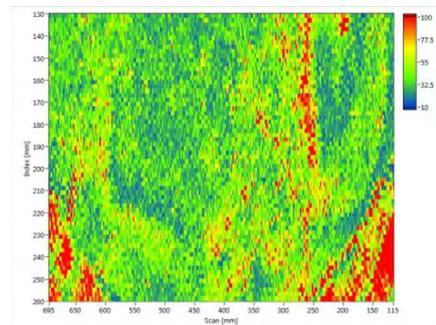
Enercon Bauteilsegment 1



Prüfung von Schnittfläche



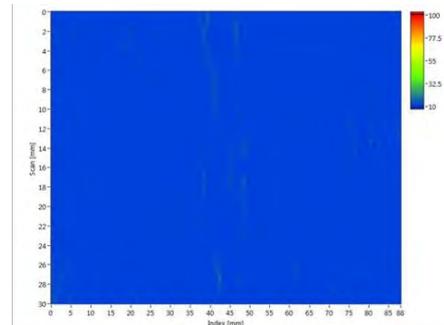
Prüfung von der Gießoberseite



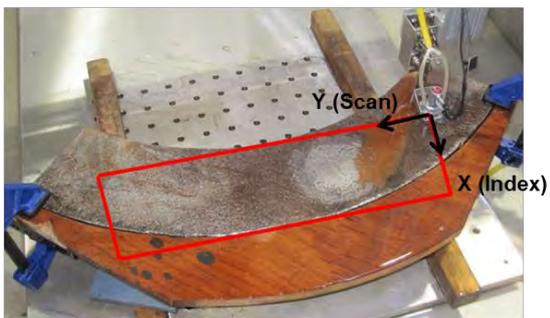
Enercon Bauteilsegment 2



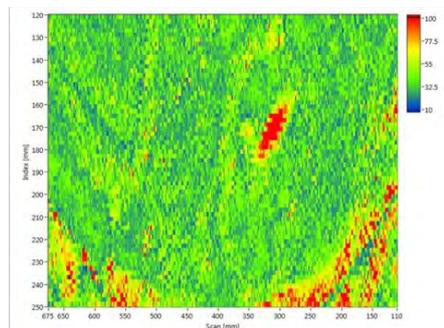
Prüfung von Schnittfläche



Prüfbereich



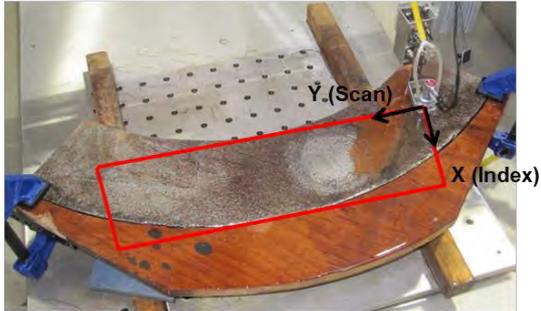
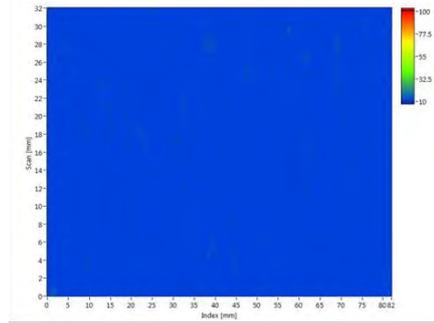
Prüfung von der Gießoberseite



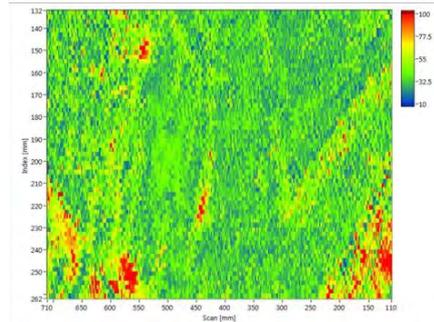
Enercon Bauteilsegment 3



Prüfung von Schnittfläche



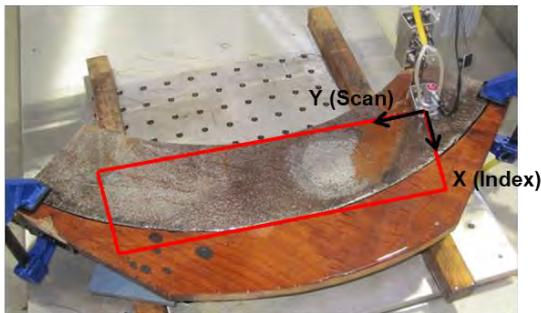
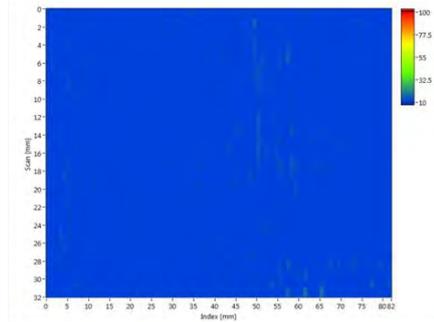
Prüfung von der Gießoberseite



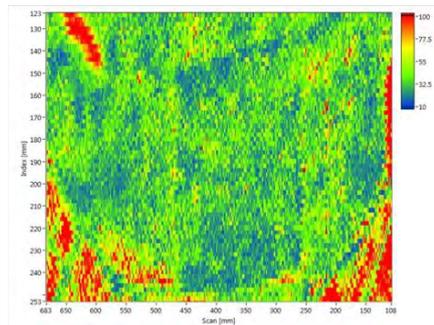
Enercon Bauteilsegment 4



Prüfung von Schnittfläche



Prüfung von der Gießoberseite



Ultraschallprüfung, Auswertung der Rückwandabschattung

Einschallung: Dross-Gegenseite und Dross-Seite

Impuls-Echo-Technik, Kontakttechnik, Einschallwinkel 0° (Senkrechteinschallung)

Prüfköpfe:

Einschallung von Dross-Gegenseite:

Einzelschwinger B1S (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Einschallung von der Dross-Seite:

Einzelschwinger SEB1 (1MHz, Schwingerdurchmesser 20 mm)

Koppelmittel: Fließwasser mit Korrosionsschutz

Schussabstand der Abrasterung in Scan- und Indexrichtung:

jeweils 10% des Schwingerdurchmessers → 2 mm

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

Anmerkungen:

Zur statistischen Absicherung wurden Ultraschallmessdaten verwendet, die im Laufe des Projektes an den Testkörpern aufgezeichnet wurden. Da diese Testkörper im Zuge der Projektarbeit zerstörend geprüft wurden, konnten keine neuen mechanisierten Ultraschalldaten zur Auswertung der Rückwandabschattung aufgezeichnet werden. Neben der zerstörenden Prüfung in Belastungsversuchen wurden die Testkörper ebenfalls für Referenzuntersuchungen umgearbeitet, was eine Wiederholung der mechanisierten Messungen ebenfalls ausschloss. Aus diesem Grund wurden Daten verwendet, die nicht speziell für den Rückwandabschattungsansatz aufgezeichnet wurden. Deshalb ist es in einigen Messungen der Fall, dass eine Übersteuerung der Messdaten für die Rückwandabschattungsanalyse vorliegt. Die Übersteuerungen sind darauf zurückzuführen, dass mit entsprechend hohen Verstärkungen gearbeitet wurde, um die Empfindlichkeit der mechanisierten Ultraschallprüfung zur Dross-Detektion zu erhöhen. Dies stellt für die Analyse des Rückwandabschattungsansatzes kein grundsätzliches Problem dar, aber es führt dazu, dass die Ergebnisbilder teilweise bezüglich der Farbskala nicht mit dem zuvor an dem geviertelten Testkörper MAN 5261600 übereinstimmen. Die qualitative Aussagekraft der Bilder bleibt jedoch erhalten.

Bei der Prüfung von der Dross-Gegenseite konnte nur ein Teilbereich der Bauteilsegmente untersucht werden.

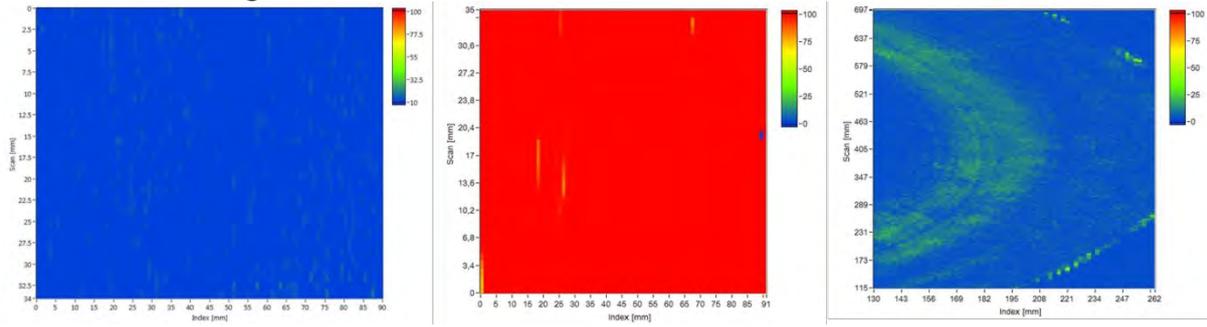
Für die mechanisierten Prüfungen von der Dross-Seite wurde mittels eines angepassten Adapterstückes aus Holz ein möglichst großer rechteckiger Scanbereich für diese Messungen realisiert.

Analog zu den Ergebnissen bei Einschallung von der Dross-Gegenseite und Dross-Seite wurden auch bei der Auswertung der Rückwandabschattung keine Dross-Anzeigen gefunden.

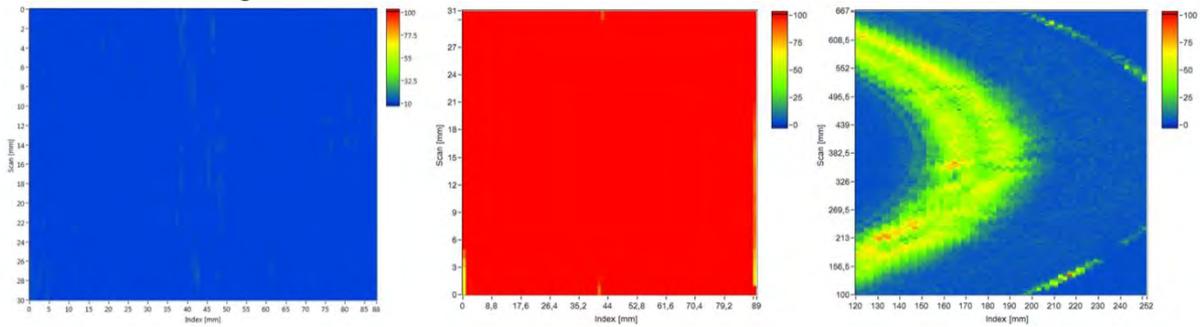
Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

Im linken Bereich der Abbildungen ist das Ultraschall C-Bild aufgezeichnet von der Dross-Gegenseite dargestellt. Mittig ist jeweils das C-Bild der Analyse der Rückwandabschattung für Ultraschalldaten bei Einschallung von der Dross-Gegenseite und rechts das C-Bild der Analyse der Rückwandabschattung bei Einschallung von der Dross-Seite dargestellt.

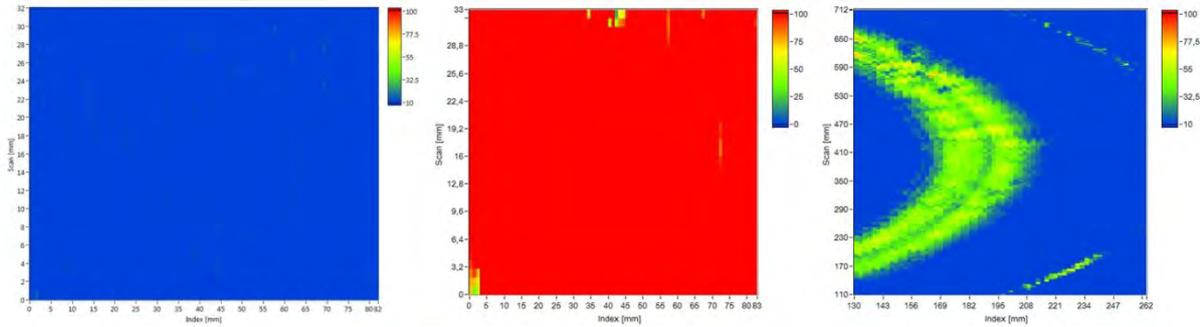
Enercon Bauteilsegment 1



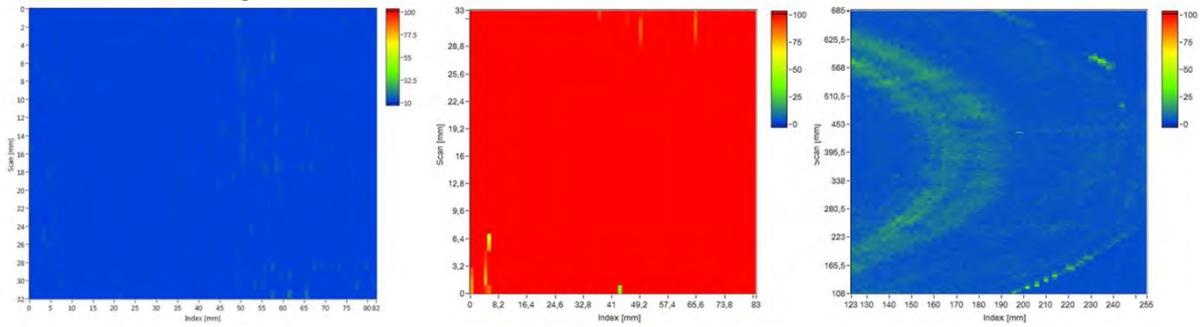
Enercon Bauteilsegment 2



Enercon Bauteilsegment 3



Enercon Bauteilsegment 4



Mikromagnetische Prüfung

Prüfsystem MikroMach

Prüfort: DROSS-Seite in Kontakttechnik (Kontakt beider Polschuhe des MikroMach mit der Testkörperoberfläche)

Prüffrequenz: 60 Hz

Magnetfeldaussteuerung: 110 A/cm

Abtastung der Bauteiloberfläche nach mäanderförmigem Scanmuster

Anmerkung:

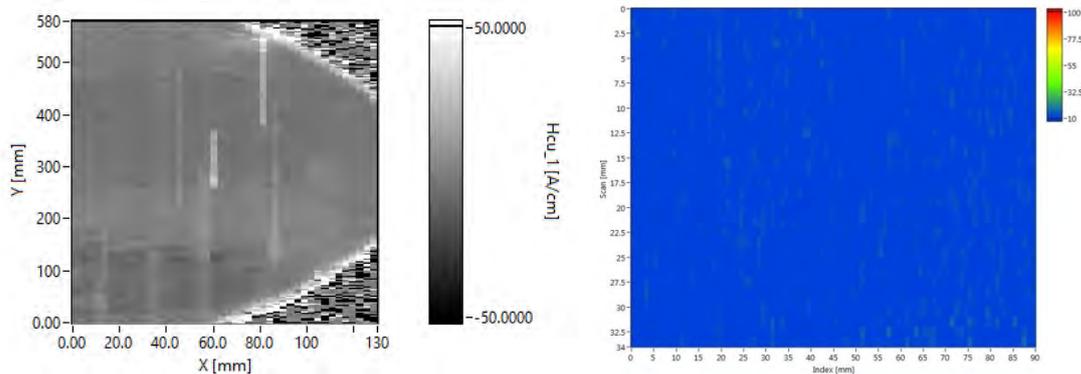
Für die mechanisierten Prüfungen von der Dross-Seite wurde mittels eines angepassten Adapterstückes aus Holz ein möglichst großer rechteckiger Scanbereich für diese Messungen realisiert. Der so realisierte Scanbereich ist in den Ergebnisdarstellungen durch ein rotes Karree in den Fotos gekennzeichnet.

Analog zu den Ultraschall-Ergebnissen wurden auch bei den mechanisierten mikromagnetischen Messungen von der Dross-Seite keine Dross-Anzeigen gefunden.

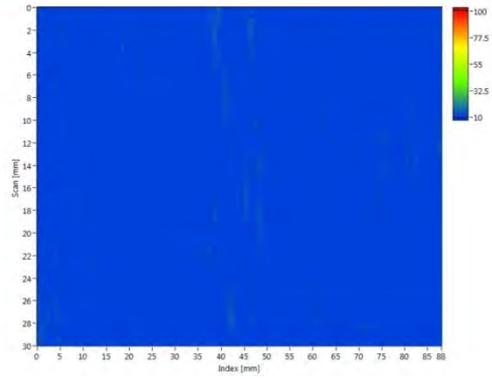
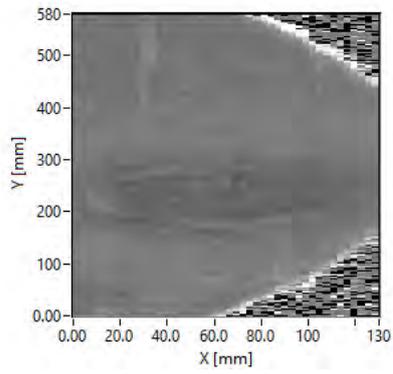
Aufbau der folgenden Ergebnisdarstellungen:

Im linken Bereich der Abbildungen ist jeweils das Ergebnisbild der mechanisierten Datenaufnahme der mikromagnetischen 3MA-Kenngröße H_{cu} (Koerzitivfeldstärke abgeleitet aus der Überlagerungspermeabilität) dargestellt. Im rechten Bereich der Abbildungen befindet sich das Ultraschall-C-Bild (Draufsicht), aufgenommen von der Schnittfläche bzw. Dross-Gegenseite. Das Ultraschall-Bild dient zum qualitativen Vergleich der Ultraschall-Ergebnisse mit den Ergebnisbildern der 3MA-Datenaufnahme.

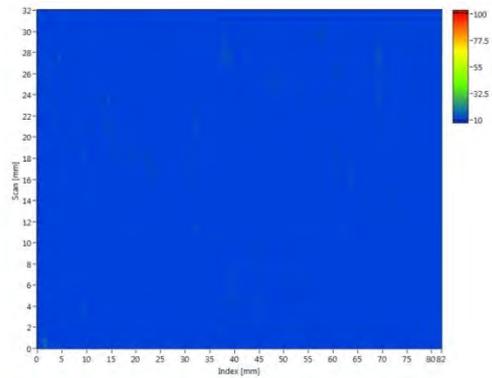
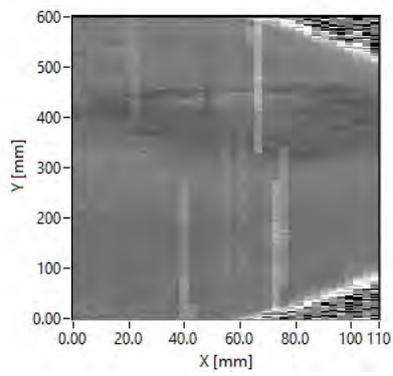
Enercon Bauteilsegment 1



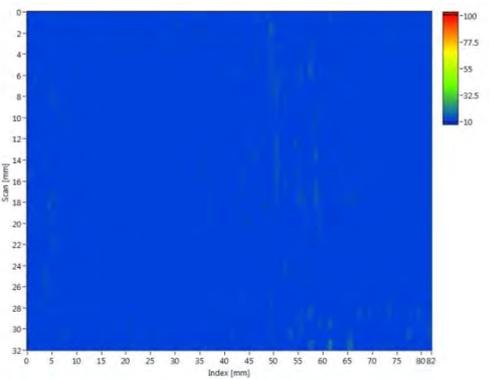
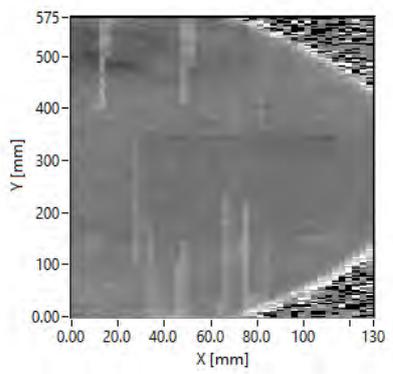
Enercon Bauteilsegment 2



Enercon Bauteilsegment 3



Enercon Bauteilsegment 4



Anhang V

Verfahrensanweisung

zur
mechanisierten Ultraschallprüfung von Großgussbauteilen mit Kugelgraphit
(GJS) unter Einsatz von Einzelschwingern

Erarbeitet im Rahmen des Projektes
„unverDROSSen“

.....

Inhalt

1. Geltungsbereich.....	4
2. Zweck	4
3. Personalqualifikation	4
4. Geltende Vorschriften	4
5. Anforderungen	5
5.1 Prüfobjekte	5
5.2 Prüfumfang, Prüfbereich und Auswertebereich	5
5.2.1 Prüfumfang.....	5
5.2.2 Prüfbereich	6
5.2.3 Auswertebereich	7
6. Prüfzeitpunkt	7
7. Prüfeinrichtung	7
7.1 Prüfköpfe und Prüffrequenzen	7
7.2 Kontrolle der Prüfausrüstung	7
7.3 Koppelmittel	7
7.4 Justierung der Ultraschallausrüstung.....	8
7.3.1 Allgemeines	8
7.3.2 Entfernungsjustierung	8
7.3.3 Empfindlichkeitseinstellung.....	8
7.5 Vorbereitungen von Gussflächen für die Prüfung	8
8. Ultraschall-Prüfelektronik.....	10
8.1 Allgemeines	10
8.2 Manipulationssystem	10
8.3 Datenaufnahme, Rekonstruktion und Visualisierung.....	10
9. Allgemeines Vorgehen bei der mechanisierten Prüfung von Großgusskomponenten	12
9.1 Prüfung von der Dross-Gegenseite.....	12

9.2 Prüfung von der Dross-Seite.....	12
9.3 Vergleich einer mechanisierten Ultraschallprüfung von der Dross-Gegenseite und der Dross-Seite.....	14
11. Prüfbereich/Aufnahmelange	16
12. Verstärkungsabhängige Korrektur.....	16
13. Auswertung der Ultraschallprüfergebnisse	16
14. Prüfbericht	17

1. Geltungsbereich

Diese Verfahrensbeschreibung gilt für die Durchführung einer mechanisierten Ultraschallprüfung unter Einsatz von Einzelschwingern an Großgusskomponenten mit Kugelgraphit (GJS) zur Bestimmung innerer Inhomogenitäten in Impuls-Echo-Technik. Das vorliegende Dokument wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens: „**Detektion, Prüfung und Bewertung von Dross im Großgussbereich**“ kurz „**UnverDROSSen**“ erarbeitet.

2. Zweck

Diese Beschreibung dient dazu Materialungängen, speziell oxidische, sulfidische und silikatische Verunreinigungen (Dross), im Bauteilvolumen von Großgusskomponenten mit Kugelgraphit (GJS) unter Zuhilfenahme der mechanisierten Ultraschallprüfung nachzuweisen und die Ausprägung des Drosses am Bauteil zuverlässig abbilden und bewerten zu können.

3. Personalqualifikation

Das Prüfpersonal besitzt mindestens die Qualifikationsstufe UT II nach DIN EN ISO 9712 und ist mit der Durchführung der mechanisierten Ultraschallprüfung vertraut. Das Auswertepersonal besitzt ebenfalls die Qualifikationsstufe UT II oder UT III nach DIN EN ISO 9712 und ist insbesondere mit der Ultraschall-Ergebnisauswertung der mechanisierten Ultraschallprüfung vertraut.

4. Geltende Vorschriften

DIN, Deutsches Institut für Normung e.V.: Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung - Allgemeine Grundsätze. Deutsche Fassung EN ISO 16810:2014, Berlin: Beuth, 2014. – Normnr.

DIN EN ISO 16810:2014-07

DIN, Deutsches Institut für Normung e.V.: Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung - Empfindlichkeits- und Entfernungsjustierung. Deutsche Fassung EN ISO 16811:2014, Berlin: Beuth, 2014. – Normnr.

DIN EN ISO 16811:2014-06

DIN, Deutsches Institut für Normung e.V.: Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung - Durchschallungstechnik. Deutsche Fassung EN ISO 16823:2014, Berlin: Beuth, 2014. – Normnr.

DIN EN ISO 16823:2014-07

DIN, Deutsches Institut für Normung e.V.: Zerstörungsfreie Prüfung - Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung. Deutsche Fassung EN ISO 9712:2012, Berlin: Beuth, 2012. – Normnr. **DIN EN ISO 9712:2012-12**

DIN, Deutsches Institut für Normung e.V.: Zerstörungsfreie Prüfung - Charakterisierung und Verifizierung der Ultraschall-Prüfausrüstung (Teil 1 – 3). Deutsche Fassung EN 12668, Berlin: Beuth, – Normnr. **DIN EN 12668 (Teil 1-3)**

DIN, Deutsches Institut für Normung e.V.: Gießereiwesen - Ultraschallprüfung - Teil 3: Gussstücke aus Gusseisen mit Kugelgraphit. Deutsche Fassung EN 12680-3:2011, Berlin: Beuth, 2012. – Normnr. **DIN EN 12680-3:2012-02**

Hinweis: Anwendbares Handbuch

Barbian, O.A.; Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP): „Handbuch Automatische Ultraschall-Prüfsysteme“, 3. Aufl. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS), 2017, ISBN 978-3-945023-95-2

5. Anforderungen

5.1 Prüfobjekte

Die vorliegende Verfahrensanweisung findet Anwendung bei höherfesten Gusswerkstoffen mit Kugelgraphit (GJS) wie z.B.: GJL-250, GJS-400, GJS-700 u.a.

5.2 Prüfumfang, Prüfbereich und Auswertebereich

5.2.1 Prüfumfang

Die zu prüfenden Bereiche des Gussstückes müssen vereinbart werden. Diese Vereinbarung muss festlegen, wie diese Bereiche zu prüfen sind, d.h. Rasterprüfung oder punktueller Abtasten, und in welchen Orientierungen.

Die mechanisierte Prüfung von Gusswerkstoffen mit Kugelgraphit (GJS) unter Einsatz von Einzelschwingern in Impuls-Echo-Technik kann durchgeführt werden, solange eine entsprechende Bauteilabtastung mittels eines geeigneten Prüfmanipulators gewährleistet ist.

5.2.2 Prüfbereich

Der zu prüfende Bereich des Bauteils wird durch den Hersteller festgelegt. Zur Gewährleistung einer 100%-gen Volumenerfassung muss die komplette Außenfläche des Gusstückes mit dem Einzelschwinger abgetastet werden. Dabei ist darauf zu achten, dass der Schussabstand in Scan- und Indexrichtung 10% des Schwingerdurchmessers beträgt. Festzuhalten ist zudem, dass sich der erfasste Volumenbereich ausschließlich anhand des abgetasteten Oberflächenbereiches ergibt (siehe Abb. 1). Die Abtastung erfolgt nach einem mäanderförmigen Scanmuster.

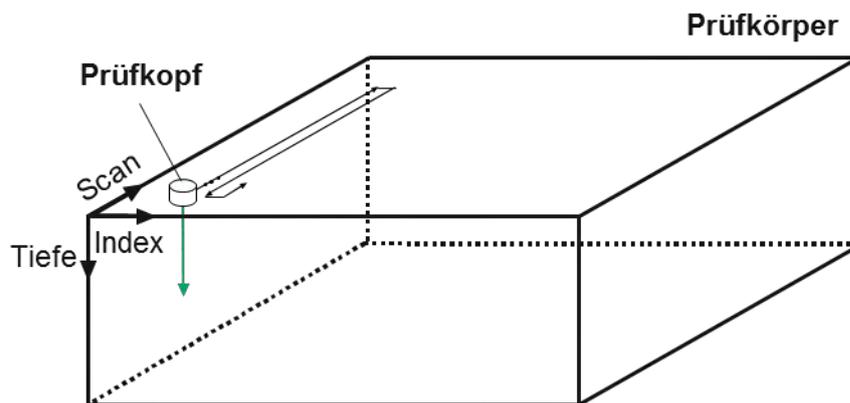


Abb. 1: Erfassung des Bauteilvolumens nach einem mäanderförmigen Scanmuster

Bei Bedarf können auch lediglich einzelne Bereiche durch die mechanisierte Ultraschallprüfung erfasst werden. Sinnvoll wäre diese partielle Abtastung in den bereits als „kritisch“ identifizierte Bereichen, bei denen es bedingt durch den Abguss verstärkt zur Ausbildung und Ansammlungen von Materialungenügen (Dross) kommt.

Im Falle eines geometrisch komplexeren Bauteils kann der zu prüfende Bereich ebenfalls nach dem mäanderförmigen Scanmuster abgetastet werden (siehe Abb. 2). An der grundlegenden Einsatzfähigkeit der mechanisierten Ultraschallprüfung ändert sich nichts.

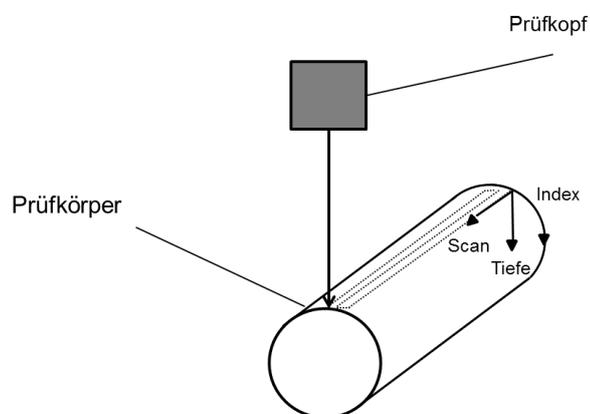


Abb. 2: Erfassung des Bauteilvolumens bei nicht ebenen Bauteilen

5.2.3 Auswertebereich

Der auszuwertende Volumenbereich entspricht dem abgetasteten und erfassten Volumenbereich.

6. Prüfzeitpunkt

Der Zeitpunkt der Ultraschallprüfung wird durch den Hersteller definiert. Da die Ultraschalllaufzeit temperaturabhängig ist, muss sichergestellt werden, dass bei dem zu prüfenden Bauteil konstante Temperaturen, idealerweise unter 50°C vorliegen.

7. Prüfeinrichtung

7.1 Prüfköpfe und Prüffrequenzen

Prüfköpfe und Prüffrequenzen müssen DIN EN 12668-2 und DIN EN 12668-3 entsprechen. Um den Bereich der nachzuweisenden Inhomogenitäten abzudecken, kann das Gussstück mit Einzelschwingern-Senkrechtprüfköpfen für Longitudinalwellen von der Dross-Gegenseite oder mit Sende-Empfangs- (SE-) Senkrechtprüfköpfen für Longitudinalwellen von der Dross-Seite aus geprüft werden. Die Frequenz muss der Prüfaufgabe und den Prüfbedingungen angepasst gewählt werden und muss im Bereich von 0,5 MHz und 5 MHz liegen. Bei reduzierten Wanddicken (unter 20 mm) oder in oberflächennahen Bereichen kann auch mit höheren Frequenzen geprüft werden.

7.2 Kontrolle der Prüfausrüstung

Die Prüfausrüstung muss regelmäßig nach DIN EN 12668-3 durch den Prüfer kontrolliert werden.

7.3 Koppelmittel

Ein Koppelmittel entsprechend DIN EN ISO 16810 muss verwendet werden. Das Koppelmittel muss die Prüffläche benetzen, um eine ausreichende Schallübertragung sicherzustellen. Für die Justierung und alle folgenden Prüfarbeiten muss das gleiche Koppelmittel verwendet werden.

7.4 Justierung der Ultraschallausrüstung

7.3.1 Allgemeines

Für die Justierung muss ein Vergleichskörper aus Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS) benutzt werden. Die Dicke dieses Vergleichskörpers muss mit dem Wanddickenbereich des zu prüfenden Gussstückes vergleichbar sein und muss zum Zeitpunkt der Anfrage und Bestellung vereinbart werden. Der Vergleichskörper muss die gleichen Ultraschalleigenschaften wie das zu prüfende Gussstück und die gleiche Oberflächenbeschaffenheit besitzen.

Alle Oberflächen des Vergleichskörpers müssen eben und parallel sein. Wenn Standard-Kalibrierkörper für Stahl benutzt werden, müssen die Unterschiede in der Schallgeschwindigkeit, der Schallschwächung und der Oberflächenbeschaffenheit zwischen Gussstück und Kalibrierkörper berücksichtigt werden.

7.3.2 Entfernungsjustierung

Die Entfernung muss justiert werden. Dies kann direkt am Gussstück vorgenommen werden, wenn seine Dicke bekannt ist und es parallel Oberflächen besitzt. Ansonsten kann entweder am Vergleichskörper oder am Kalibrierkörper die Entfernungsjustage vorgenommen werden.

7.3.3 Empfindlichkeitseinstellung

Die Empfindlichkeit wird durch Anschalten eines geeigneten Reflektors, z.B. der Gegenfläche des zu prüfenden Gussstückes, einer Flachboden- oder Querbohrung des Vergleichskörpers oder des Kreissegments des Kalibrierkörpers K1 oder K2 eingestellt. Dabei müssen die Schallschwächung, die Oberflächenbeschaffenheit und die Schallgeschwindigkeit des Gussstückes berücksichtigt werden. Die Transferkorrektur muss ebenfalls bestimmt werden. Dabei muss nicht nur die Beschaffenheit der Ankopplungsfläche, sondern auch die der Gegenfläche berücksichtigt werden. Die Anzeighöhe im zu beurteilenden Tiefenbereich wird durch den Durchmesser eines geeigneten Reflektors in Millimeter angegeben.

7.5 Vorbereitungen von Gussoberflächen für die Prüfung

Für die Vorbereitung der Gussoberflächen siehe DIN EN ISO 16810. Die zu prüfenden Gussstückoberflächen müssen so beschaffen sein, dass eine einwandfreie Ankopplung des Prüfkopfes möglich ist.

Bei Prüfungen mit Einzelschwingern-Senkrechtprüfköpfen für Longitudinalwellen von der Dross-Gegenseite sollte die Oberfläche des zu prüfenden Bauteils höchstens eine Rauheit von ca. 3S1 - 4S1 aufweisen.

Bei Prüfungen mit SE-Longitudinalprüfköpfen von der Dross-Seite ausgehend, sollte die Oberfläche des zu prüfenden Bauteils im Idealfall gefräst vorliegen und höchstens eine Rauheit Rz von 10 µm aufweisen. Andernfalls ist die Vorgabe (3S1-4S1) analog zur Prüfung von der Dross-Gegenseite anzunehmen.

Hinweis: Obenstehende Angaben zur Rauigkeit wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens ermittelt und können gegebenenfalls nach oben oder unten abweichen.

Um eine gesicherte Aussage bzgl. der Prüfbarkeit und der Rauigkeit zu treffen, muss an einem größeren Probensatz eine statistische Absicherung vorgenommen werden. In jedem Fall sei anzumerken, dass je rauer die Prüfoberfläche ist, umso ungenauer die Ergebnisdarstellung wird.

Weiterhin sei aber auch anzumerken, dass im Rahmen des Forschungsvorhabens erfolgreich Proben von der Dross-Gegenseite untersucht wurden, die in die Rauheitsklasse 8S1 der BNIF Richtlinie oder darüber einzuordnen wären.

8. Ultraschall-Prüfelektronik

8.1 Allgemeines

Grundsätzlich muss die Prüfelektronik die Anforderungen in DIN EN 12668-1 erfüllen. Darüber hinaus muss für die mechanisierte Ultraschallprüfung von Großgussbauteilen mittels Einzelschwinger die eingesetzte Prüfelektronik über eine entsprechende Koordinatenschnittstelle mit dem Manipulationssystem synchronisiert sein, um eine positionsbezogene Ultraschall-Datenaufnahme ermöglichen zu können.

8.2 Manipulationssystem

Zur mechanisierten Prüfung von Großgussbauteilen ist ein Manipulationssystem zur zweidimensionalen Abtastung der Bauteiloberfläche einzusetzen. Der Manipulator soll eine Positioniergenauigkeit von 0.1mm gewährleisten und ebenfalls über eine entsprechende Koordinatenschnittstelle verfügen, um die Datenaufnahme mit der Ultraschall-Prüfelektronik zu synchronisieren.

8.3 Datenaufnahme, Rekonstruktion und Visualisierung

Die aufgenommenen Ultraschalldaten, die zunächst als A-Bild vorliegen, werden durch die Prüfsoftware in farbcodierte B-, C-, und D-Bilder rekonstruiert, indem jedem aufgenommenen Amplitudenwert, unabhängig von in Index- und Scanrichtung, ein entsprechend farbcodierter Wert zugeordnet wird (siehe Abb. 3).

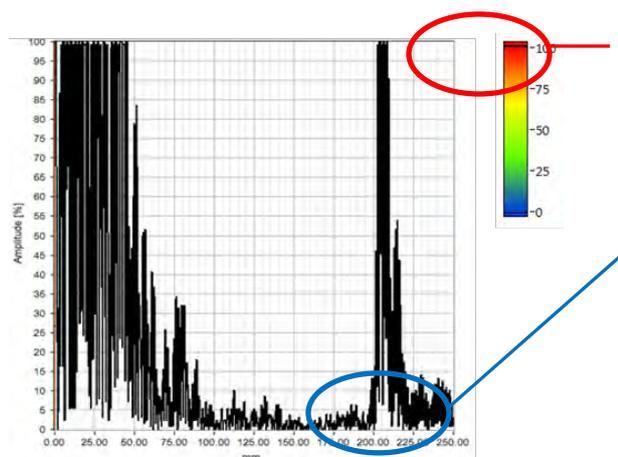


Abb. 3: Zuordnung der US-Amplitude im A-Bild als farbcodierter Wert

Hierdurch können einerseits gesamte Bauteilvolumina als Summenbilder aller Amplitudenwerte über alle Spuren (sowohl in Index- als auch in Scanrichtung) hinweg, farblich dargestellt werden, andererseits sind aber auch partielle Bauteilvolumina, die durch softwareintegrierte flexible Blenden definiert werden können, farblich darstellbar (vgl. Abb. 4. und 5).

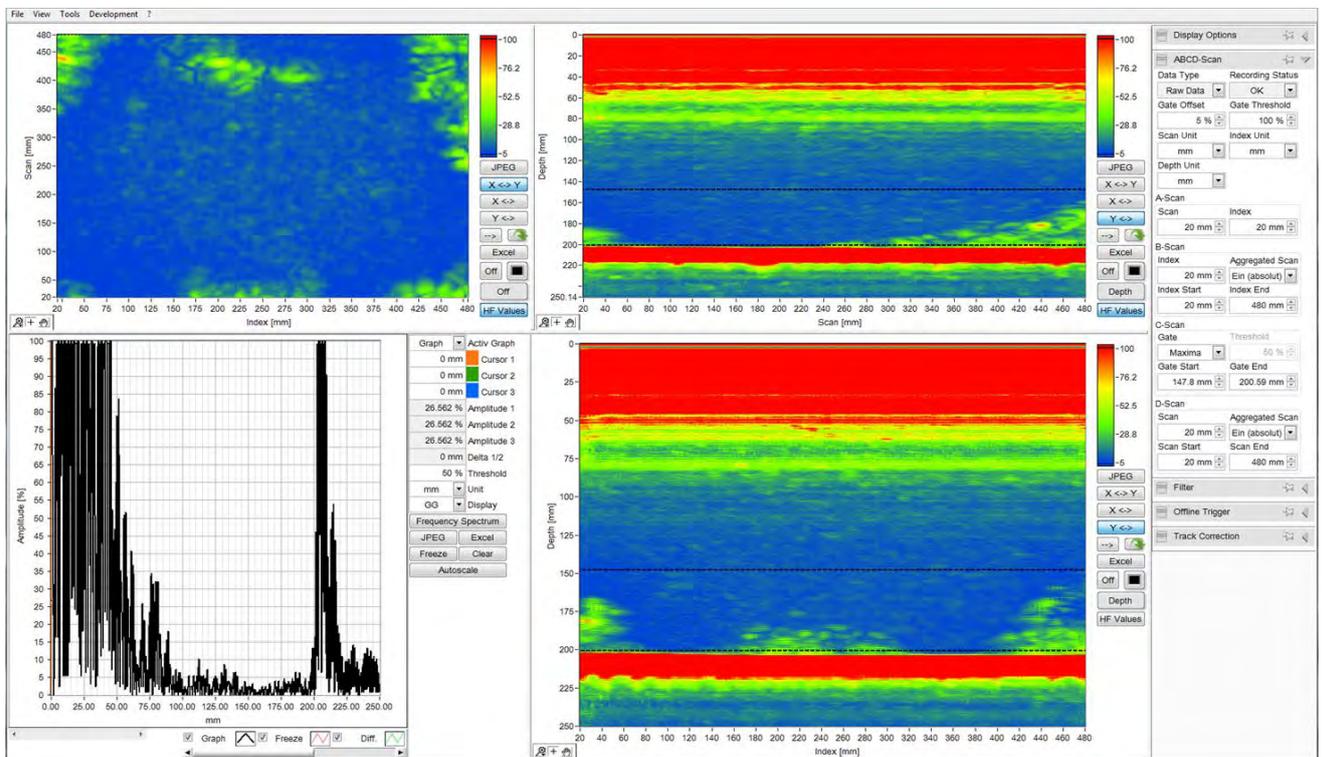


Abb. 4: Darstellung der US-Datenaufnahme als farbcodiertes Summen B-Bild (oben rechts), als farbcodiertes Summen D-Bild (unten rechts) und als farbcodiertes Summen C-Bild im Blendenbereich von 147mm - 200mm (oben links)

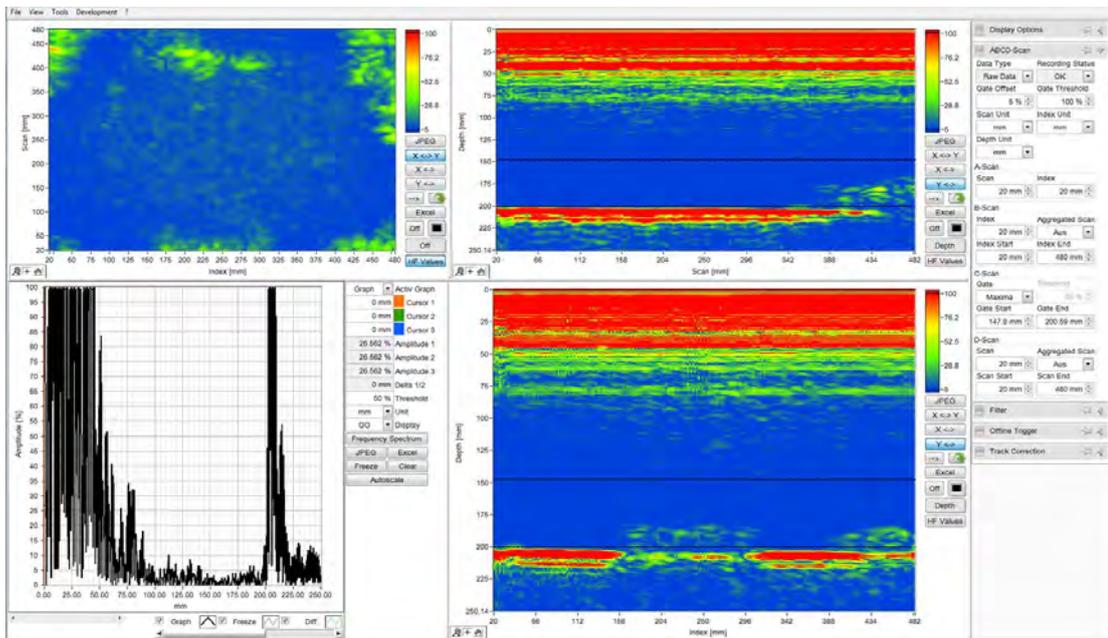


Abb. 5: Darstellung der US-Datenaufnahme als farbcodiertes B-Bild einer Scan-Spur (oben rechts), als farbcodiertes D-Bild einer Index-Spur (unten rechts) und als farbcodiertes Summen-C-Bild im Blendenbereich von 147mm - 200mm (oben links)

9. Allgemeines Vorgehen bei der mechanisierten Prüfung von Großgusskomponenten

9.1 Prüfung von der Dross-Gegenseite

Da sich Dross üblicherweise als Gruppenanzeige kurz vor der Rückwand darstellt, und diese auch unter Umständen ganz abschotten kann, sollten Großgusskomponenten mit Kugelgraphit (GJS) bei Zugänglichkeit standardmäßig, zum Nachweis der Dicke der Dross-Schichtdicke und/oder der flächigen Verteilung, von der Dross-Gegenseite mit Einzelschwingern-Senkrechtprüfköpfen für Longitudinalwellen geprüft werden.

Zur Ermittlung der Dross-Schichtdicke wird bei der Geräteverstärkung entsprechend der geforderten Registriergrenze, die Anzeige mit der kürzesten Laufzeit ermittelt und die Differenz zur Wanddicke gebildet.

9.2 Prüfung von der Dross-Seite

Ist die Zugänglichkeit zur Prüfbarkeit von der Dross-Gegenseite bei Großgusskomponenten mit Kugelgraphit (GJS) nicht gegeben, kann bei entsprechend bearbeiteter Oberfläche ebenfalls eine

Prüfung von der Dross-Seite aus mit SE-Senkrechtprüfköpfen für Longitudinalwellen erfolgen (siehe Abb.6 oben).

Aufgrund der oberflächennahen Sensitivität der SE-Senkrechtprüfköpfe für Longitudinalwellen und den damit verbundenen hohen Rückstreuanteilen kann keine zuverlässige Aussage über die Dross-Schichtdicke getroffen werden (siehe Abb.6 unten rechts).

Durch Prüfungen von der Dross-Seite kann jedoch eine flächige Verteilung des Dross anhand des C-Bildes abgebildet werden (siehe Abb.6 unten links).

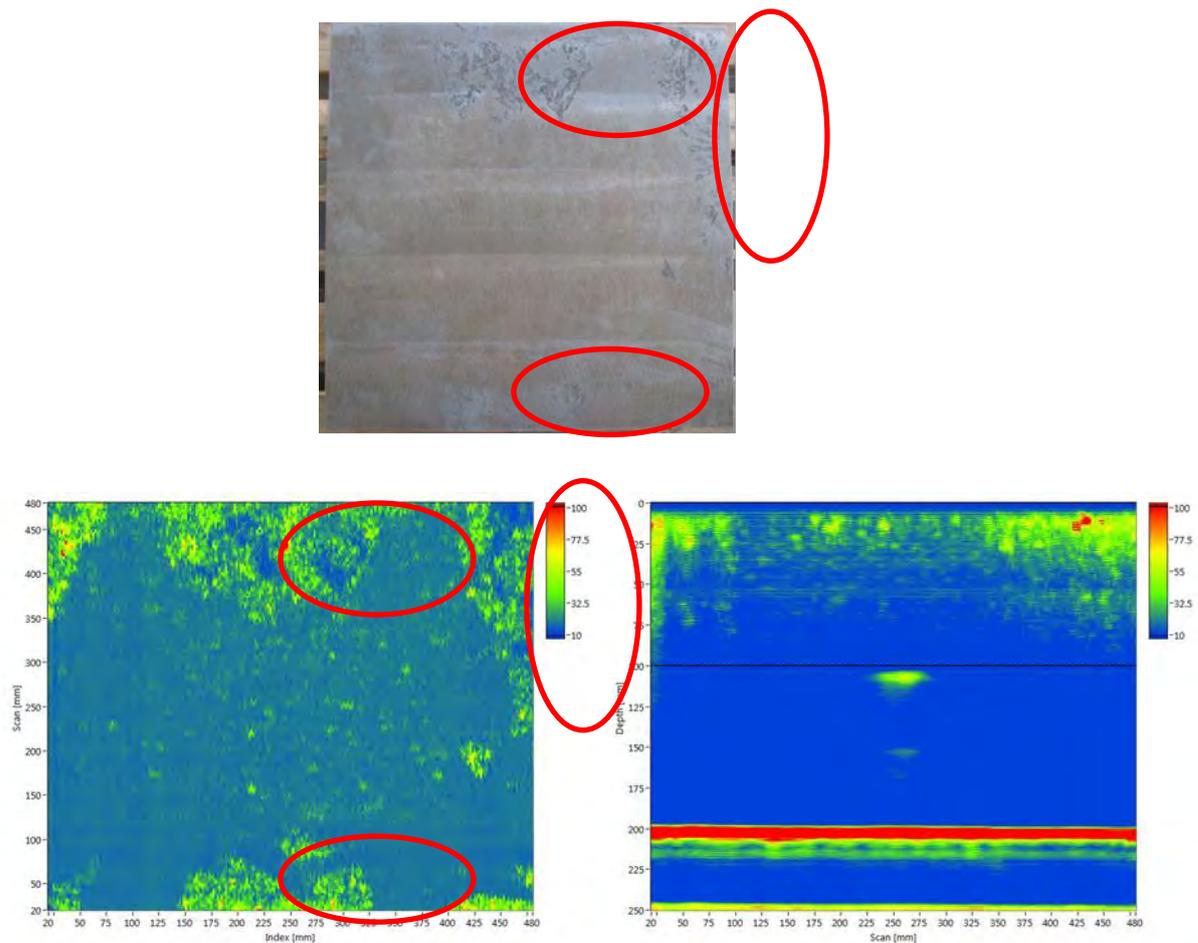


Abb. 6: Gefräste Bauteiloberfläche mit teils sichtbarer Drossfreilegung (oben), Darstellung der US-Datenaufnahme als farbcodiertes Summen C-Bild einer Prüfung von der Dross-Seite mit einem SE-Senkrechtprüfkopf für Longitudinalwellen im Blendenbereich von 0-100mm (unten links) und als farbcodiertes Summen B-Bild (unten rechts)

9.3 Vergleich einer mechanisierten Ultraschallprüfung von der Dross-Gegenseite und der Dross-Seite

Nachfolgende Abbildungen zeigen den Vergleich einer mechanisierten Ultraschallprüfung von der Dross-Gegenseite und der Dross-Seite am Beispiel eines Testkörpers welcher im Rahmen des Projektes „UnverDROSSen“ vermessen wurde.

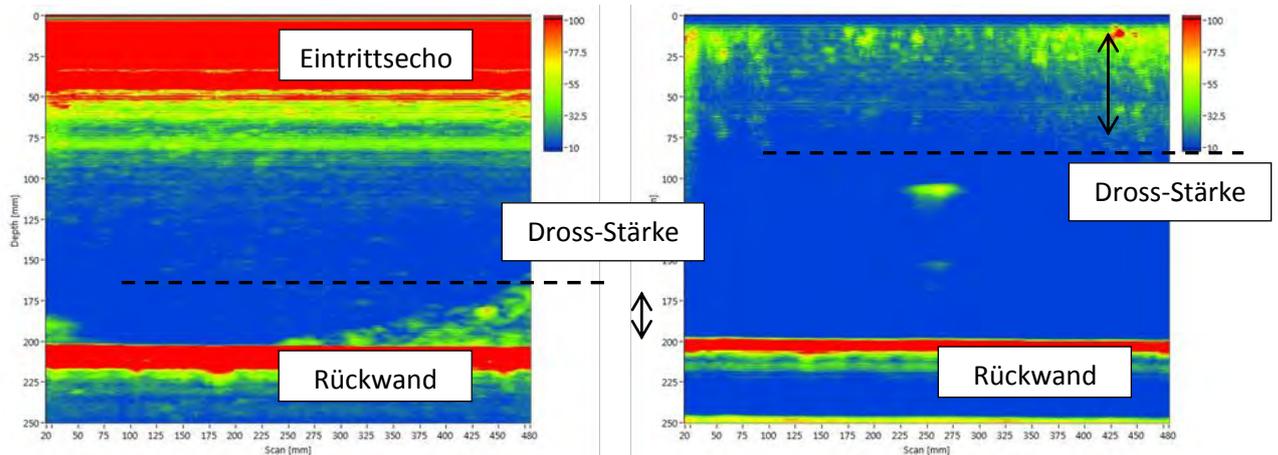


Abb. 7: Vergleich der aufgenommenen US-Daten anhand des B-Bildes; links: Dross-Gegenseite, rechts: Dross-Seite

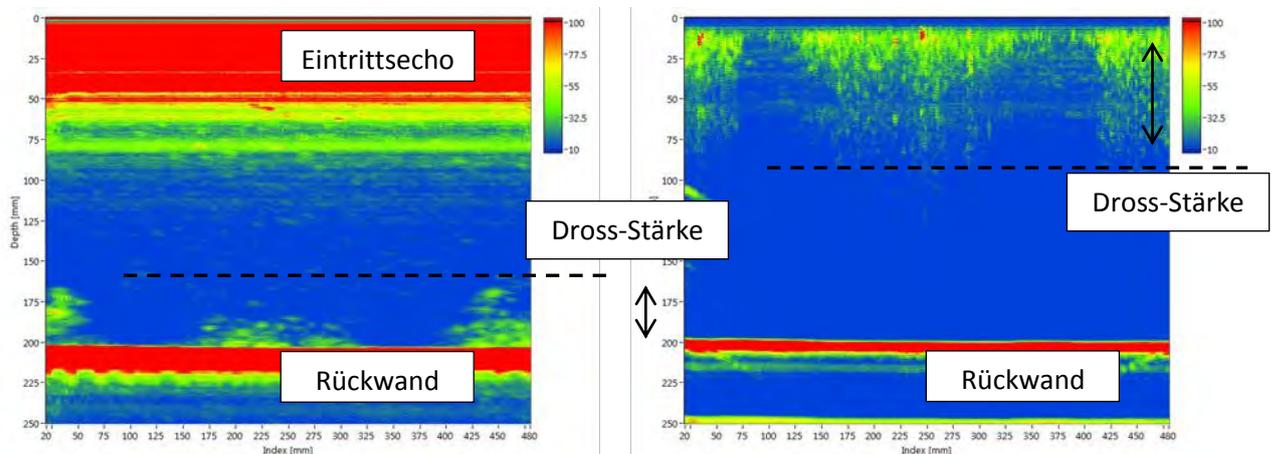


Abb. 8: Vergleich der aufgenommenen US-Daten anhand des D-Bildes; links: Dross-Gegenseite, rechts: Dross-Seite

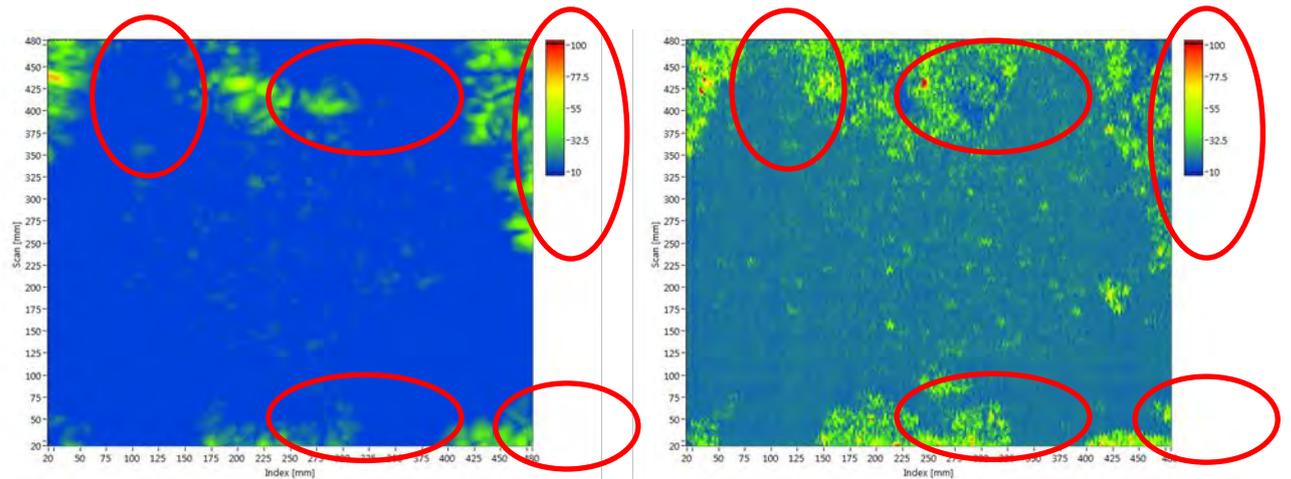


Abb. 9: Vergleich der aufgenommenen US-Daten anhand des C-Bildes, links: Dross-Gegenseite, rechts: Dross-Seite

Wie aus Abb. 7 und 8 zu erkennen ist, lässt sich nur aus den Messdaten von der Dross-Gegenseite eine genaue Dross-Ausprägung in Tiefenrichtung aus den rekonstruierten B- und D-Bildern ermitteln (jeweils linke Abbildung in Abb. 7 und 8), indem man von der Rückwand ausgehend die Anzeige mit der kürzesten Laufzeit ermittelt und die Differenz zur Wanddicke abbildet.

Im Gegensatz hierzu kann mittels einer Prüfung von der Dross-Seite ausgehend keine gesicherte Aussage über die Dross-Schichtdicke getroffen werden (jeweils rechte Abbildung in Abb. 7 und 8).

So liegt gemäß der Auswertung des B-Bildes von der Dross-Gegenseite aus eine Ausprägung von etwa 160 mm-Rückwand (200mm) vor (siehe Abb. 7 links, schwarz gestrichelte Linie), wohingegen das B-Bild von der Dross-Seite aus gesehen eine Dross-Schichtdicke von 0-100 mm vermuten lässt (siehe Abb. 7 rechts, schwarz gestrichelte Linie).

Selbes gilt für die vergleichende Darstellung und die Auswertung der D-Bilder von beiden Seiten. Auch in diesem Fall sind Abweichungen bzgl. der Tiefenausprägung des Dross zwischen den beiden Einschallrichtungen (Dross-Gegenseite vs. Dross-Seite) zu erkennen (siehe Abb. 8, schwarz gestrichelte Linie).

Anhand der C-Bilder (siehe Abb. 9) können für Prüfungen unabhängig von der Einschallrichtung, bei entsprechend bearbeiteter Probenoberfläche, die flächige Verteilung des Dross abgebildet werden (siehe Abb.9, rot markierte Bereiche).

11. Prüfbereich/Aufnahmelange

Der Prüfbereich bzw. die Aufnahmelange ist so einzustellen, dass dieser die gesamte Bauteildicke um mindestens 20% überschreitet.

12. Verstärkungsabhängige Korrektur

Die Ermittlung der verstärkungsabhängigen Korrektur (Tiefenausgleichskurve) erfolgt in einem planparallelen Bereich des Bauteils, indem der Abschwächungswert (in dB) des zweiten Rückwandechos in Bezug auf das erste Rückwandecho gesetzt wird und durch die Bauteildicke dividiert wird. Die aufgenommene Tiefenausgleichskurve kann in der Software hinterlegt und direkt online auf die Prüfung angewendet werden.

13. Auswertung der Ultraschallprüfergebnisse

Die Auswertung der Ultraschallprüfergebnisse erfolgt durch die Vermessung der Ultraschallanzeigen in den Ultraschall-Ergebnisbildern (siehe Abb. 10). Es können für die verschiedenen Ergebnisbilder Markiercursor gesetzt werden und die entsprechenden Werte an der Index- und Scanachse (x- und y-Achse) abgelesen werden.

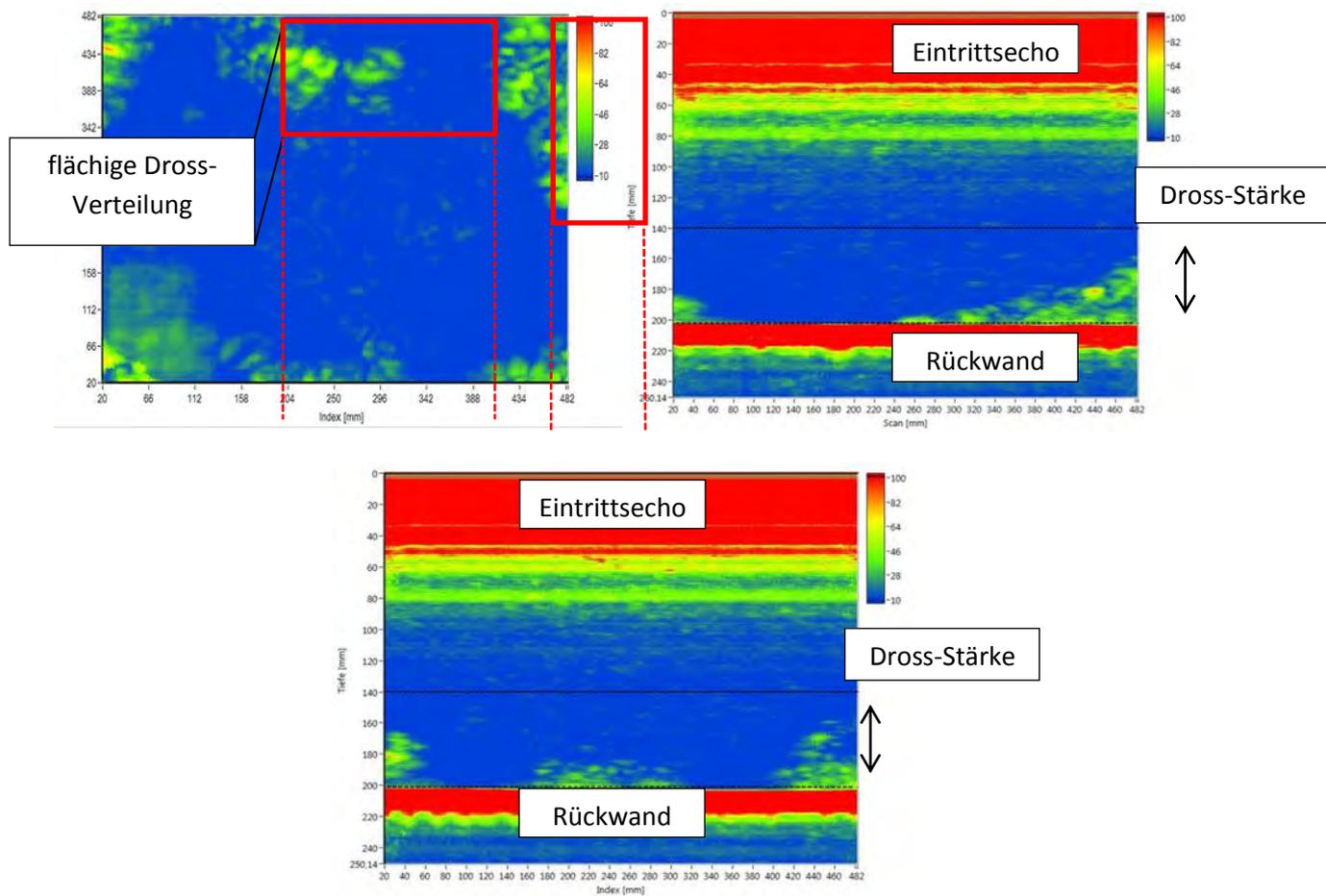


Abb. 10: Auswertung der Ultraschallprüfergebnisse: Summen C-Bild im Blendenbereich von 140-200 mm (oben links) inkl. der flächenhaften Fehlermessung (rote Rechtecke), Summen B-Bild über alle Spuren in Scanrichtung hinweg mit ermittelter Tiefenausdehnung (oben rechts), Summen D-Bild über alle Spuren in Indexrichtung hinweg mit ermittelter Tiefenausdehnung (unten)

Bei Prüfungen von der Dross-Gegenseite ausgehend, können aus den rekonstruierten B- und D-Bilder die Ausprägung von Inhomogenitäten (Dross) in Tiefenrichtung und deren flächige Verteilung aus den rekonstruierten C-Bildern ausgewertet werden.

14. Prüfbericht

Der Prüfbericht wird in der Prüfsoftware erstellt und muss mindestens die folgenden Informationen enthalten:

- Kenndaten des geprüften Gusstückes
- Prüfumfang
- Verwendete Ultraschall-Prüfelektronik

- Verwendete Prüfköpfe
- Eingesetzte Prüftechnik mit Angabe des geprüften Bereichs
- Alle für die Empfindlichkeitseinstellung notwendigen Angaben
- Alle Angaben zur Ultraschallprüfbarkeit
- Angaben über alle kennzeichnenden Merkmale von registrierpflichtigen Anzeigen (z.B.: Abnahme RW, Lage und Ausdehnung in Wanddickenrichtung und Beschreibung der Lage)
- Prüfdatum und Name der verantwortlichen Person
- Verlauf der Scanmuster in Bezug auf das Bauteil
- Typ, Funktionsweise des Prüfmanipulators

