

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundvorhaben: SonicQuality – Entwicklung einer neuen zerstörungsfreien, akustischen Prüfmethode zur effizienten und umweltschonenden Qualitätssicherung additiv gefertigter Serienbauteile

Förderkennzeichen: 03LB5010A-C

Projektträger: Projektträger Jülich - Projektträgerschaft für das Technologietransfer-Programm Leichtbau (TTP-LB)

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2022 - 30.09.2024

Verbundpartner/Autoren:

Vibrant GmbH:	Thomas Köhler
FTT Deutschland GmbH:	Paul Schwichtenberg
Fraunhofer IAPT:	Torben Dorbandt

Rev 1 vom 28.04.2025

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

I. Teil I - Kurzzusammenfassung	1
II. Teil II – Eingehende Darstellung des Projektes	5
II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	5
II.1.0 AP 0 – Projektmanagement und Berichterstellung	5
II.1.1 AP 1 – Generierung einer Anforderungsliste	5
II.1.2 AP 2 – Entwicklung der technologiespezifischen Prüfpläne sowie Fertigung der Prüfkörper	5
II.1.3 AP 3 - Entwicklung einer AM geeigneten Resonanzprüfung & Optimierung von PCRT für hochkomplexe AM Strukturen	22
II.1.4 AP 4 - Entwicklung einer AM geeigneten SIR Inspektion & Optimierung des Mess- und Analysesystem für hochkomplexe AM Strukturen	67
II.1.5 AP 5 - Digitale Fusion der zwei Qualitätsmetriken für eine neuartige umfängliche kombinierte Inspektion mittels SIR & PCRT	80
II.1.6 AP 6 - Validierung der effizienten akustischen Prüfmethodik in der Serienfertigung & Einbindung der Ergebnisse in den pränormativen Bereich	83
II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Verwendungsnachweises	89
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten	90
II.4 Voraussichtlicher Nutzen	90
II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	91
II.6 Geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	91
III. Literatur	93
A Anhang	VI

I. Teil I - Kurzzusammenfassung

Das Projekt „SonicQuality“ zielt darauf ab, eine neue zerstörungsfreie akustische Prüfmethode für die effiziente und umweltschonende Qualitätssicherung additiv gefertigter Bauteile zu entwickeln. Studien belegen das große Leichtbaupotential der 3D-Druck Technologien, bei denen durch Topologie Optimierung und bionisches Design Gewichtsersparnisse von über 40 % gegenüber konventionellen Bauteilen erzielt werden können [1][2][4]. 3D-Druck Technologien sind ressourcenschonend, da kaum Materialabfall entsteht und die Herstellung aufwändiger Werkzeuge entfällt [2][5][6].

Dennoch ist die industrielle Verbreitung gering, der Umsatz aus Maschinenverkäufen für Metall-3D-Drucker macht weniger als 1 % des Gesamtmarktes aus [3][7]. Dies liegt auch an der hohen Komplexität der Qualitätssicherung, die die Wirtschaftlichkeit der 3D-Druck Technologien beeinträchtigt.

Das Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer akustischen Prüfmethode zur umweltbewussten Qualitätssicherung von bionischen Metall-3D-Druck-Leichtbauteilen in der Luft- und Raumfahrt, Schienenfahrt, Automobilbau und Energieindustrie. Die Methode soll eine Kosteneinsparung von mindestens 90 %, eine Reduktion der Prüfzeit um 85 % und den Verzicht auf Verbrauchsmittel und Schadstoffe im Oberflächenprüfvorgang gegenüber dem Stand der Technik ermöglichen. Außerdem stellt sie eine erste Alternative zur Qualitätssicherung von nicht durchstrahlbaren Hochleistungswerkstoffen dar. Die neuen Anwendungspotenziale für den 3D-Druck sollen signifikante Ressourceneinsparungen und CO₂-Reduktionen zur Folge haben.

Im Fokus der Untersuchungen steht das pulverbettbasierte Schmelzen von Metall mittels Laserstrahl (PBF-LB/M), da es die relevanteste Metall-3D-Druck Technologie in den genannten Branchen ist [3][8]. Die gewählten akustischen Prüfverfahren sind unabhängig vom verwendeten Metall und der rauen Bauteiloberfläche optimal für die AM-Serienfertigung einsetzbar, was einen wesentlichen Vorteil gegenüber etablierten Prüfverfahren darstellt.

Die zu entwickelnde Qualitätssicherungsmethode (QS-Methode) basiert auf der intelligenten Kombination zweier zerstörungsfreier akustischer Prüfverfahren: der Prozesskompensierten Resonanzprüfung (PCRT) und der Vibro-Thermographie (SIR).

- **PCRT:** Diese innovative Technik ermittelt die strukturelle Beschaffenheit des Bauteils durch den Vergleich mit einem „Gold Standard“ und ist auf alle metallischen Werkstoffe anwendbar.
- **SIR:** Ermöglicht die Detektion von Rissen und anderen Fehlstellen an der Oberfläche und im inneren des additiv gefertigten Bauteils. Auch diese Technologie ist universell einsetzbar.

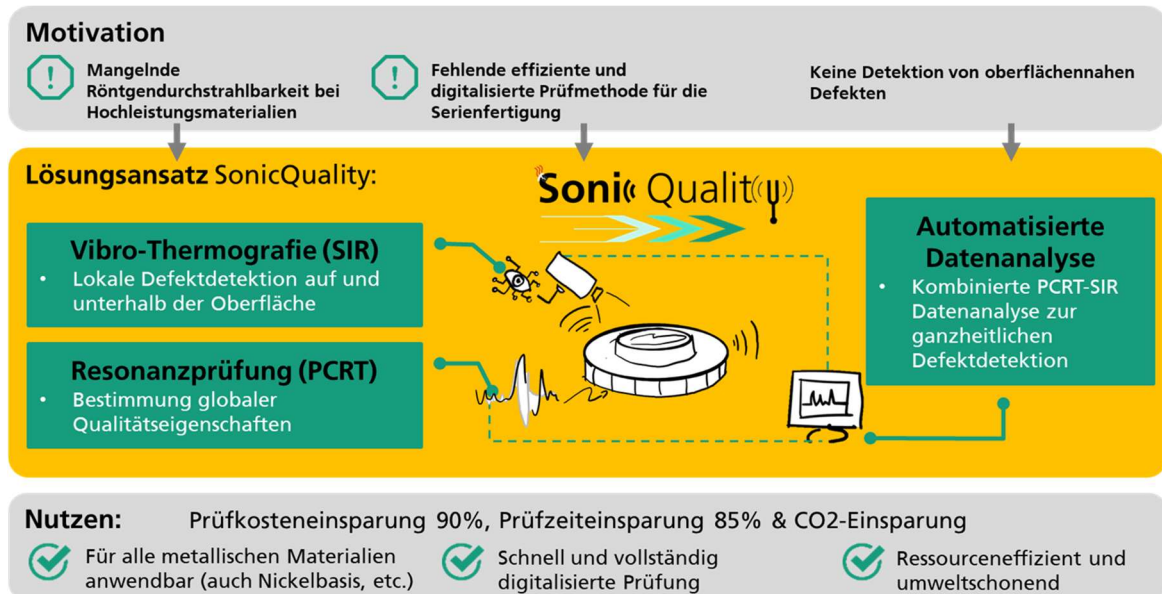


Abbildung I-1: Darstellung der Entwicklungsziele im Projekt am Demonstrator (siehe Bild von Impeller in Abbildung I-2)

Durch die Kombination zweier akustischer Prüfverfahren wird eine umfassende und effiziente Prüfung von additiv gefertigten Bauteilen ermöglicht. Diese Methodik reduziert Kosten, erlaubt die Prüfung nicht durchstrahlbarer Metalle und wird den branchenübergreifenden Einsatz von bionischen Leichtbauteilen erheblich fördern. Die Prozesskompensierte Resonanzprüfung (PCRT) ermöglicht eine globale Qualitätseinschätzung (Materialeigenschaft, Struktur) durch Resonanzabgleiche mit einem Goldstandard. Kritische oberflächennahen Defekte können lokal mithilfe der Vibro-Thermographie (SIR) nachgewiesen werden.

Während beide Verfahren bereits in der konventionellen Fertigung eingesetzt werden, stellt die intelligente Kombination dieser Messtechnologien zusammen mit digitalen Analysen einen Innovationssprung für die Qualitätssicherung in der additiven Fertigung dar. Eine vergleichbare Prüfmethodik für 3D-gedruckte Bauteile ist bislang nicht bekannt.

Vorteile gegenüber dem Stand der Technik:

- Direkte, zerstörungsfreie Ermittlung der Bauteilqualität mit einer signifikanten Reduktion der Kosten um mindestens 90 % und der Prüfzeit um mindestens 85 %.
- Schadstofffreie, verbrauchsarme Oberflächenprüfung ohne Chemikalieneinsatz.
- Die kombinierte Methode ist ideal für bionisch optimierte und geometrisch komplexe Bauteile in der Serienfertigung und kann automatisiert werden.
- Digitale Prüfergebnisse sind reproduzierbar und automatisierbar, wodurch aufwändige CT-Prüfungen vermieden werden.
- Die Resonanzprüfung ermöglicht Aussagen über die Materialeigenschaften in der Serienfertigung, wodurch die Notwendigkeit zusätzlicher Prüfkörper entfällt.

Insgesamt strebt das Projekt die Entwicklung einer effizienten und umweltschonenden Prüfmethodik an, die einen bedeutenden Beitrag zur Qualitätssicherung in der additiven Fertigung liefert.

Teil I - Kurzzusammenfassung

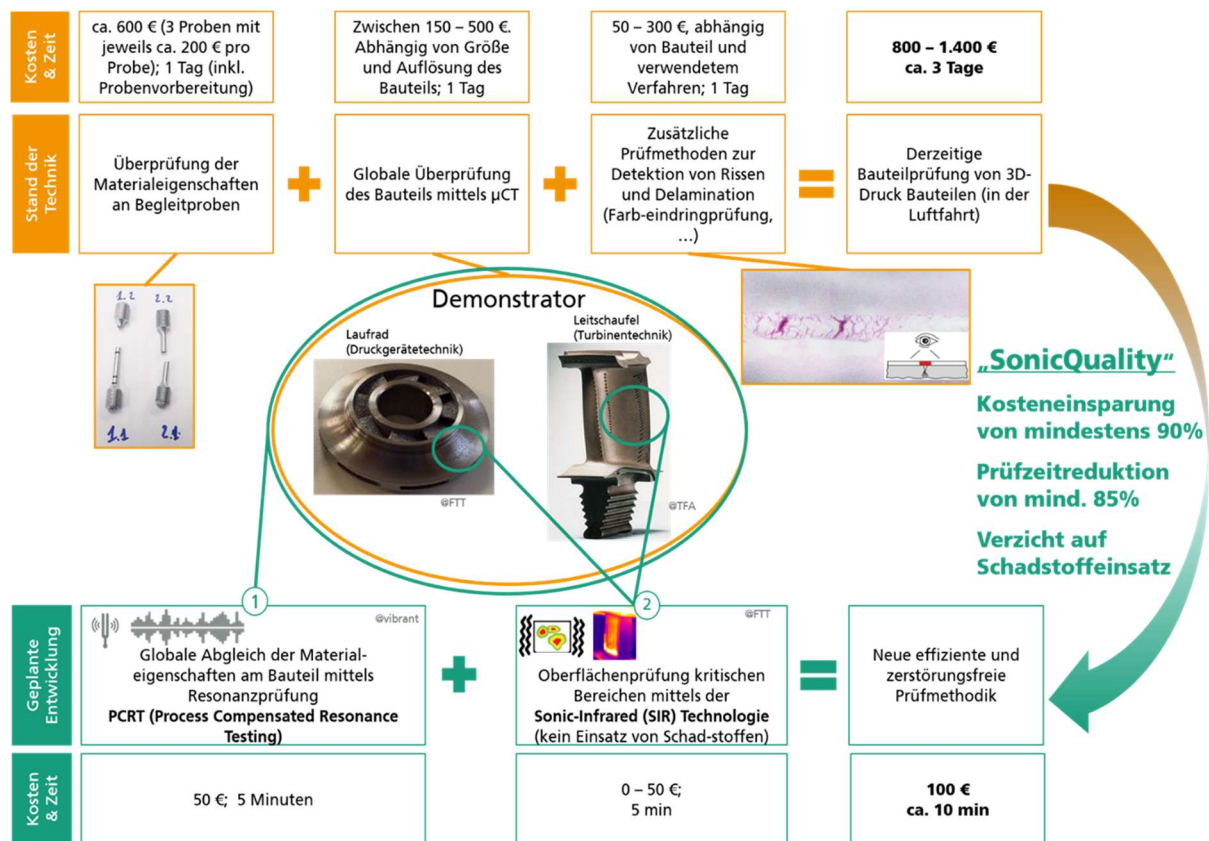


Abbildung I-2: Darstellung des Potentials der angestrebten Lösung gegenüber dem SdT

Das Projekt „SonicQuality“ ist auf eine Laufzeit von 24 Monaten angelegt, beginnend am 01.07.2022. Die Planung umfasst mehrere Arbeitspakete (AP), die in Abbildung I-3 dargestellt werden. Zu Projektbeginn wird in AP 1 eine umfassende Anforderungsliste erstellt, die in Workshops mit Verbundpartnern und assoziierten Unternehmen erarbeitet wird. Dies ist die Grundlage für die folgenden Arbeitspakete. In AP 2 werden Verfahren zur Erzeugung realitätsnaher Bauteildefekte entwickelt und Probekörper gefertigt. Darauf folgt in AP 3 die Optimierung der Prozesskompensierten Resonanzprüfung (PCRT) für komplexe Geometrien und in AP 4 die Weiterentwicklung der Vibro-Thermographie (SIR). In AP 5 erfolgt die digitale Fusion der beiden Qualitätsmetriken zur Schaffung einer kombinierten Inspektionsmethodik. Das Projekt endet mit der Validierung der neuen Prüfmethode in AP 6. Regelmäßige Meilensteinprüfungen sind fest eingeplant, um sicherzustellen, dass die Ziele erreicht werden und Anpassungen vorgenommen werden können, falls wissenschaftlich-technische Risiken auftreten.

Das Projektkonsortium wird durch die assoziierten Partner (Airbus Operations GmbH, Schöffler Technologies AG & Co. KG, Thetascan GmbH) und einen projektbegleitenden Ausschuss (pbA) unterstützt, die die Anwendbarkeit der Methode in den Zielbranchen Automobil, Energie-, Schienenfahrt- und Luftfahrtindustrie sicherstellen.

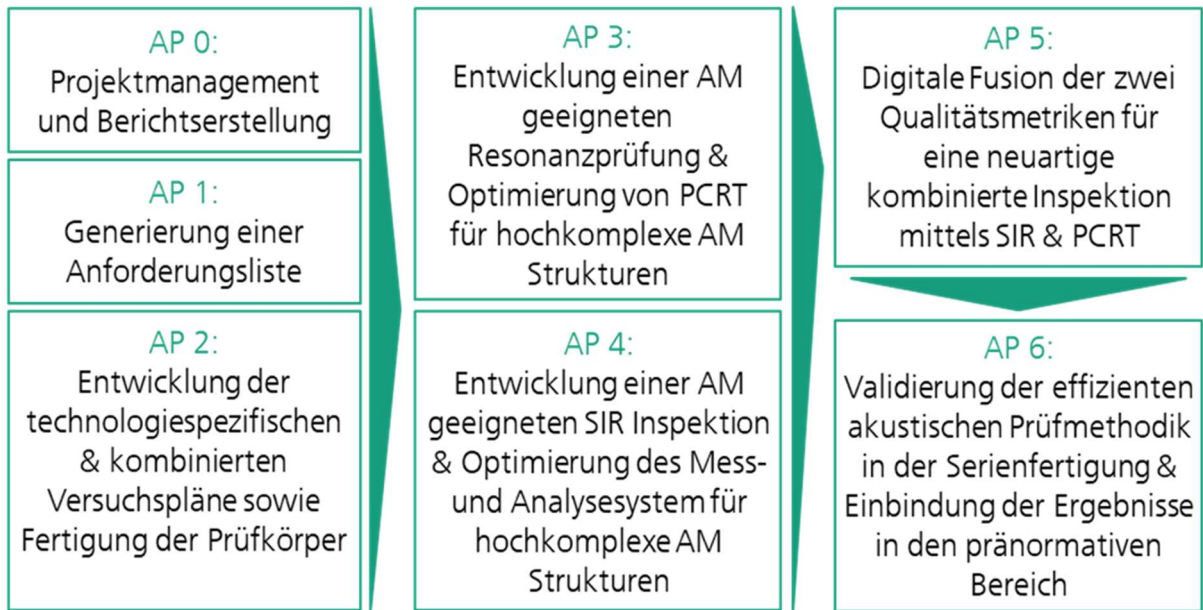


Abbildung I-3: Darstellung der geplanten Arbeitspakete des Vorhabens SonicQuality.

II. Teil II – Eingehende Darstellung des Projektes

II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

II.1.0 AP 0 – Projektmanagement und Berichterstellung

Als Konsortialführer übernahm die Vibrandt GmbH die Koordination des Projekts. Es fanden wöchentliche Online-Meetings zum regelmäßigen Austausch zwischen den Konsortialpartnern statt. In einem etwa halbjährlichen Rhythmus fanden im Wechsel bei den jeweiligen Projektpartnern vor Ort Treffen statt, bei denen über den aktuellen Stand berichtet und weitere Schritte definiert wurden.

II.1.1 AP 1 – Generierung einer Anforderungsliste

Zu Beginn des Projekts fand ein Workshop im Projektverbund mit den assoziierten Partnern und dem projektbegleitenden Ausschuss (pbA) statt, in dessen Verlauf die Anforderungen der Branchen gemeinschaftlich erarbeitet wurden.

Im Speziellen wurde diskutiert, welche AM-spezifischen Bauteildefektklassen besonders relevant sind und welche Entstehungsursachen ihnen zugrunde liegen. Hieraus wurden Defektprovokationsmethoden entwickelt, um im Arbeitspaket 2 (AP 2) Bauteile mit möglichst realitätsnahen und repräsentativen Defekten zu fertigen, anhand derer die Prüfmethoden PCRT und SIR weiterentwickelt und validiert werden können.

Als Ergebnis wurde eine Defektprovokationsmatrix erstellt, in der für die unterschiedlichen Defektklassen der additiven Fertigung mögliche Provokationsmethoden hinsichtlich ihrer Relevanz für die Industrie und der erwarteten Machbarkeit der Umsetzung bewertet wurden. Die Defektprovokationsmatrix ist im Anhang in der Tabelle hinterlegt.

II.1.2 AP 2 – Entwicklung der technologiespezifischen Prüfpläne sowie Fertigung der Prüfkörper

Im Arbeitspaket 2 (AP 2) wurden die Versuchspläne und Prüfprozeduren für die Prüfmethoden SIR und PCRT entwickelt, und es wurden sowohl qualitativ hochwertige Probekörper als auch Probekörper mit realitätsnahen, additiven Fertigungsdefekten zur Validierung der Prüfmethoden gefertigt.

II.1.2.1 Arbeitspaket 2.1: Voruntersuchungen für die Entwicklung von repräsentativen Defekten an Probekörpern

Zur Herstellung von Probekörpern mit realitätsnahen, AM-typischen Defekten wurden zunächst im AP 2.1 vom Fraunhofer IAPT Voruntersuchungen zur Erzeugung der Defekte an würfelförmigen Probekörpern durchgeführt, die mittels Schliffbildern ausgewertet wurden. Die Fertigung der Probekörper für die Vorversuche sowie die späteren endgültigen Probekörper erfolgte auf einer SLM 500 mit einem Bauraum von 280 x 500 x 365 mm und Titanpulver Ti64-53/20-A Grade 23 der Firma Tekna. Für die Voruntersuchungen hat das IAPT insgesamt 166 Würfel gefertigt, wobei teilweise bis zu drei unterschiedliche Parametersätze pro Würfel verwendet wurden (siehe Abbildung II-1).

Die untersuchten Mechanismen der Defekterzeugung basieren auf den in AP 1 erarbeiteten Anforderungen. Es wurden Variationen der Scanparameter, im CAD designte Defekte und weitere Einflüsse auf die Prozessstabilität untersucht. Tabelle II-1 listet alle untersuchten

Defektprovokationsmethoden sowie deren Auswertung hinsichtlich der Effektivität zur Erzeugung der AM-typischen Bauteildefekte auf. Durch die Variation der Fertigungsparameter konnten gut steuerbare unterschiedliche Porositäten und Porenarten im Bauteil erzeugt werden.



Abbildung II-1: Angefertigte Schiffe von Probekörpern für Voruntersuchungen in Kunststoffeinfettung

Tabelle II-1: Im Vorversuch untersuchte Defektprovokationsmethoden mit Bewertung hinsichtlich der Effektivität zur Erzeugung der AM-typischen Defekte. (+: sehr effektiv, +: wenig effektiv, 0: keine Wirkung)

	Defektmethode	LoF-Pore	Gas-Pore	Delamina- tion	Risse
Fertigungsparameter	Reduzierung Laserenergie	++	0	0	0
	Erhöhung Laserenergie	0	+	0	0
	Reduzierung Scangeschwindigkeit	0	++	0	0
	Erhöhung Scangeschwindigkeit	+	0	0	0
	Erhöhung Hatchabstand	+	0	0	0
	Erhöhung Konturabstand	++	0	0	0
Design	Belichtungsmuster	0	0	0	0
	Designte Poren	+	0	0	0
	Designte Delaminierung	++	0	+	0
Prozessbedingungen	Bauposition	0	0	0	0
	Umgebende Strukturen	0	0	0	0
	Unzureichende Pulverbeschichtung	++	0	0	0
	Temperaturschwankungen nach dem Baujob	0	0	0	0
	Baujob pausieren	0	0	0	0
	Verwendung eines beschädigten Beschichters	0	0	0	0
	Recyceltes Pulver	0	0	0	++

Mittels Verringerung des Energieeintrags in das Pulverbett durch Reduzierung der Laserenergie, Erhöhung der Scangeschwindigkeit, Erhöhung des Hatchabstands oder Vergrößerung des Abstands der Bauteilkontur zum Hatch konnten, wie im oberen Teil der Abbildung II-2 am Beispiel der Laserenergie zu sehen ist, Lack-of-Fusion-Poren erzeugt werden. Durch die Steigerung des Energieeintrags in das Pulverbett durch Erhöhung der Laserenergie oder Reduzierung der Scangeschwindigkeit konnten, wie im unteren Teil der Abbildung II-2 am Beispiel der Scangeschwindigkeit dargestellt, Gasporen erzeugt werden. Die Anzahl und die Größe der Poren ließen sich dabei gut über den Betrag der Änderung des Energieeintrags steuern. Die Reduzierung der Laserenergie und die Senkung der Scangeschwindigkeit haben sich dabei als die effektivsten Methoden herausgestellt, um gezielt Lack-of-Fusion- bzw. Gasporen in die Bauteile einzubringen.

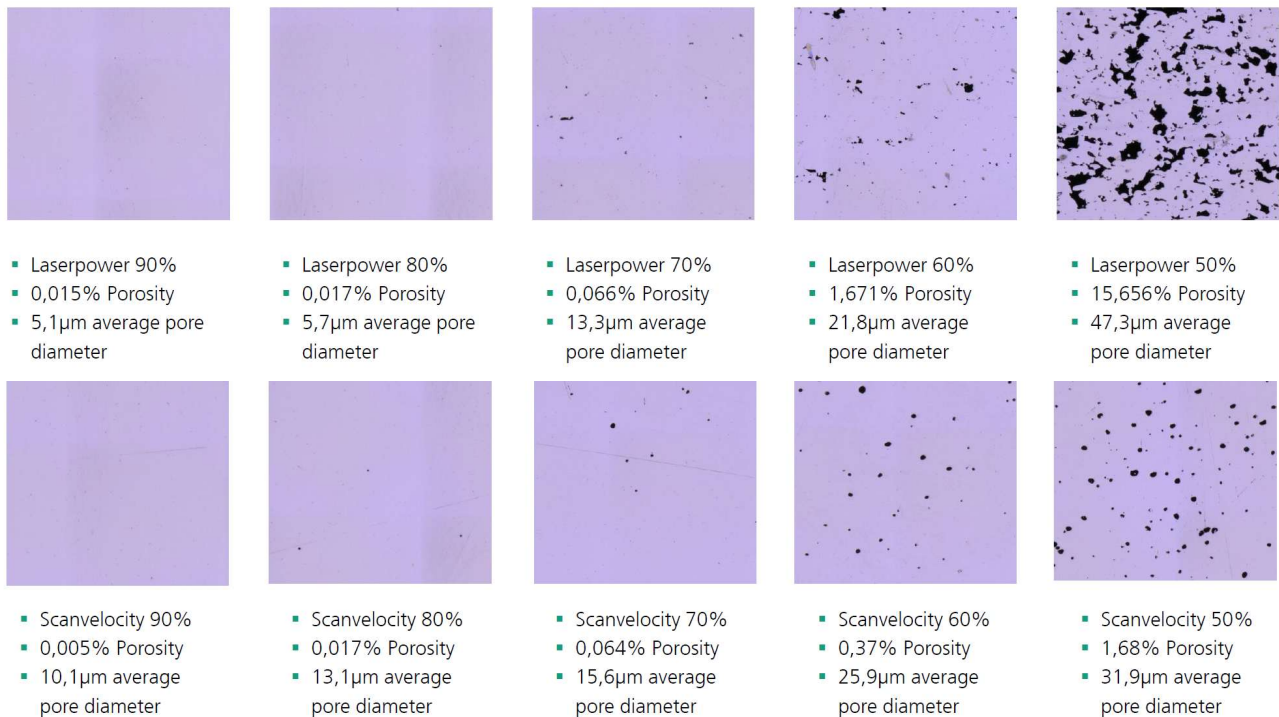


Abbildung II-2: Schliffbilder der Probewürfel, die den Einfluss der Laserenergie und Scangeschwindigkeit auf die Bauteilporosität zeigen. Laserenergie bzw. Scangeschwindigkeit angegeben in Prozent der Standardparameter.

Da sich die Fertigungsparameter auch für einzelne Schichten oder Bereiche des Bauteils einstellen lassen, konnten gezielt lokal begrenzte Bereiche mit definierter Position im Bauteil mit unterschiedlichen Porositäten und Porenarten erzeugt werden, wie Abbildung II-4 zeigt.

Durch die Wahl eines besonders ungünstigen Belichtungsmusters (Streifen über das gesamte Bauteil, deren Ausrichtung über alle Schichten gleichbleibt, im Gegensatz zum sonst üblichen Schachbrettmuster mit alternierender Ausrichtung) sollte ein möglichst großer Temperaturgradient während der Fertigung erzeugt werden, um die bauteilinternen Spannungen zu maximieren und Spannungsrisse im Bauteil zu provozieren. Die Fertigung mit der gewählten Ti64-Legierung hat sich jedoch als zu robust erwiesen, um auf diesem Wege Risse im Probewürfel oder in der finalen Demonstratorgeometrie zu erzeugen.

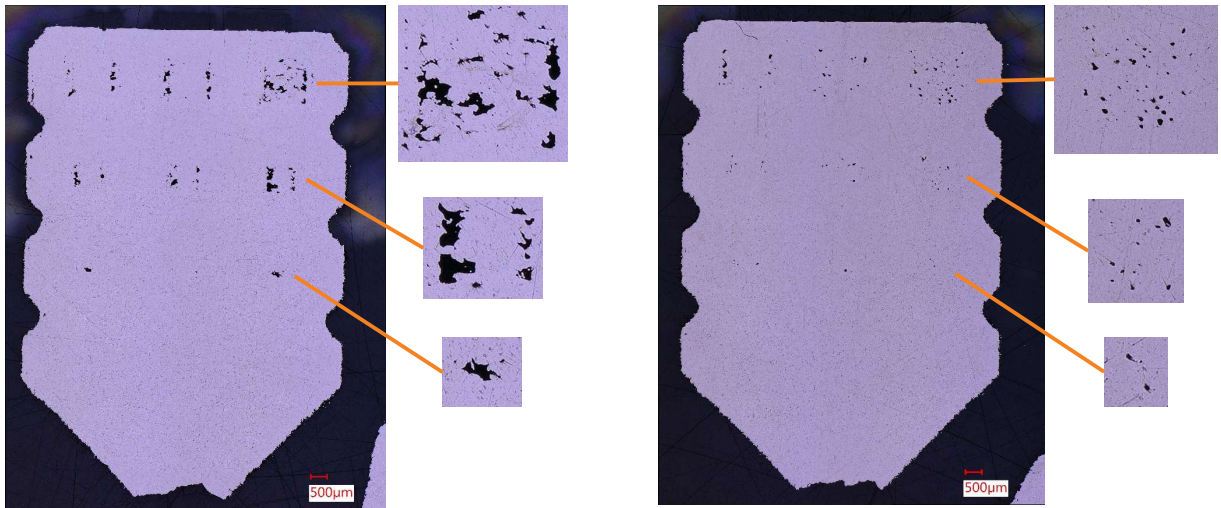


Abbildung II-4: Schlichtbilder von Probewürfeln mit lokal eingebrachten Porositätsbereichen. Links: LoF-Poren durch reduzierte Laserenergie, rechts Gasporen durch reduzierte Scangeschwindigkeit. In den Probewürfeln wurden jeweils von links nach rechts kubischen Bereichen mit 70%, 60% und 50% des jeweiligen Fertigungsparameters eingebracht. Von oben nach unten besitzen die kubischen Bereiche eine Kantenlänge von 1,5 mm, 0,96 mm und 0,48 mm. Die drei Bereiche mit 50% Parametereinstellung sind jeweils vergrößert dargestellt.

Durch das Einbringen von Aussparungen im CAD-Design des Bauteils sollte getestet werden, ob es möglich ist, einzelne Defekte mit einer definierten Größe gezielt an einer gewünschten Position einzubringen. Mit sphärischen Aussparungen sollten einzelne Poren erzeugt und durch flächige Aussparungen in Schichtausrichtungen Delaminierungen hervorgerufen werden. Während die sphärischen Aussparungen, wie in Abbildung II-3 zu sehen, keine realitätsnahen Defekte erzeugten, konnten mit den flächigen Aussparungen Anbindungsfehler generiert werden, die einer Delaminierung aufgrund eines mangelhaften Pulverauftrags über wenige Schichten ähneln.

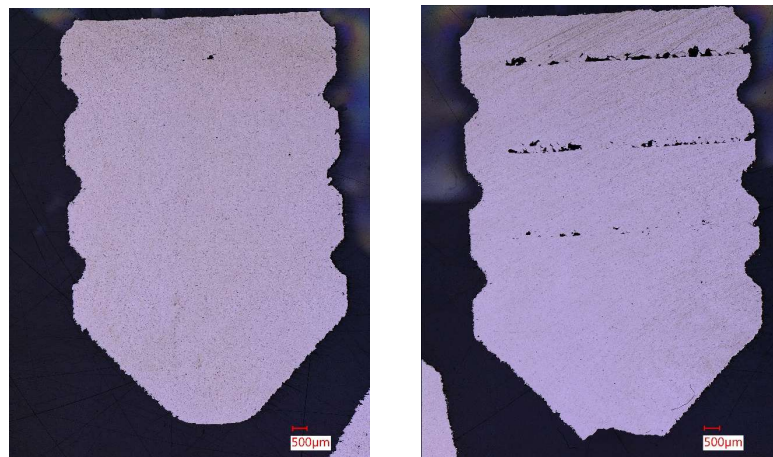


Abbildung II-3: Schlichtbilder von Probekörpern mit flächigen Aussparungen zur Defekterzeugung. Beim linken Probekörper betragen die Aussparungen in den einzelnen Abschnitten von oben nach unten eine Höhe von 3, 2 und 1 Schicht, im rechten Probekörper 6, 5 und 4 Schichten.

Es ist bekannt, dass die Position eines Bauteils auf der Bauplatzform einen Einfluss auf die Bauteilqualität haben kann. Dies kann beispielsweise auf positionsabhängige Schwankungen der Lasereigenschaften, der Gasstromrichtung des Schutzgases, unterschiedlichen thermischen Bedingungen oder der Pulverschichtauftragsrichtung zurückzuführen sein und stellt einen relevanten Einfluss in der industriellen Fertigung dar. Im Rahmen dieses Verbundvorhabens konnten auf der für die Versuche gewählten SLM 500 keine positionsabhängigen Änderungen der Bauteileigenschaften festgestellt werden, die für die Weiterentwicklung und Validierung der beiden Prüfmethoden relevant wären.

Des Weiteren ist bekannt, dass umgebende, gedruckte Strukturen einen Einfluss auf die Bauteilqualität haben können. Beim Aufschmelzen des Pulvermaterials bilden sich Schmauch und Spritzer, die sich insbesondere in Richtung der Schutzgasströmung wieder auf dem Pulverbett ablagern. Im Rahmen der Vorversuche wurden gezielt solche Ablagerungen im Bereich der Probekörper erzeugt, indem in jeder Schicht zunächst eine Umrandung um den Probekörper mit dem Laser belichtet wurde und danach erst der Probekörper gefertigt wurde. Entgegen vorheriger Annahmen konnten jedoch auf diese Weise keine messbaren Defekte in den Probekörpern erzeugt werden, da sich der Fertigungsprozess mit Ti64 als zu stabil herausgestellt hat.

Durch den schichtweisen Aufbau kommt es prozessbedingt während der Fertigung zu einem thermischen Gradienten im Bauteil, der zu starken bauteilinternen Spannungen führen kann. Bei sprunghaften Temperaturänderungen können sich diese Spannungen lösen und Risse im Bauteil erzeugen. Um dies künstlich zu begünstigen, wurde im Rahmen der Vorversuche die komplexe Demonstratorgeometrie nach der Fertigung und vor dem Spannungsarmglühen auf 200 °C im Ofen erhitzt und im Wasserbad abgeschreckt. Anschließend wurde das Bauteil mittels Schliffbildern und Farbeindringprüfung auf Risse untersucht. Hierbei konnten jedoch keine Risse erzeugt und festgestellt werden, da im Demonstrator aufgrund seiner Geometrie anscheinend nicht ausreichend thermisch bedingte Spannungen entstehen.

Unabhängig von den Vorversuchen für das Projekt SonicQuality traten an einer anderen Anlage des IAPTs mit einem anderen Ti64 Pulver Spannungsrisse in 10x10x10 mm Würfeln auf, siehe Abbildung II-5. Da mit dieser Pulvercharge in vorherigen Baujobs auf der gleichen Anlage mit gleichen Druckparametern keine Spannungsrisse erzeugt hat, wurde vermutet, dass es im Zuge der Pulveralterung zu einer erhöhten Oxidation, Nitrierung, Feuchtigkeitsaufnahme oder Änderung der Partikelgrößenverteilung gekommen ist. Die Bestimmung des Sauerstoffs und Stickstoffgehalts mittels Trägergasheißextraktion, des Feuchtigkeitsgehalts mittels Karl-Fischer-Titration und der Partikelgrößenverteilung mittels Camsizer waren jedoch unauffällig und es bleibt offen, wieso die Verwendung dieser Pulvercharge zu Rissen in Ti64 führt. Da dieses Phänomen jedoch reproduzierbar war, wurde es im Projekt SonicQuality mit aufgenommen zur Fertigung rissbehafteter Demonstratoren.

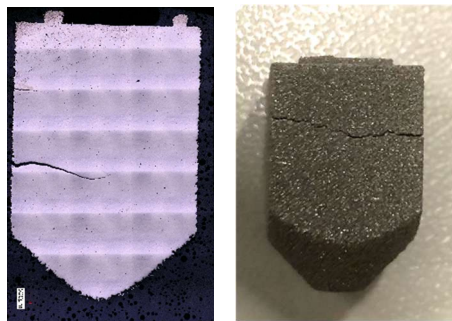


Abbildung II-5: Schliffbild (links) und Foto (rechts) von Würfel mit zur Rissen neigenden Ti64 Pulvercharge.

Von allen mit dem pbA erarbeiteten, aus der Literatur recherchierten und in den Vorversuchen untersuchten Methoden zur gezielten Defektprovokation haben sich die Reduzierung der Laserenergie sowie die Erhöhung des Konturabstands zur Erzeugung von LoF-Poren, die Reduzierung der Laserscangeschwindigkeit zur Erzeugung von Gasporen und das Einbringen von Aussparungen im CAD-Modell zur Nachbildung von Delaminierungen als die effektivsten und steuerbarsten Methoden herausgestellt.

Daher werden diese in den weiteren Arbeitspaketen zur Defekterzeugung in den Demonstratorbauteilen verwendet.

Dass mit den anderen Methoden, von denen zuvor erwartet wurde, dass sie realitätsnahe Defekte hervorbringen, keine Defekte erzeugt werden konnten, wird darauf zurückgeführt, dass die für das Projekt gewählte Ti64-Legierung äußerst gut prozessierbar und wenig anfällig für Prozessschwankungen ist. Zudem hat sich die Demonstratorgeometrie als sehr robust und wenig fehleranfällig erwiesen.

II.1.2.2 Arbeitspaket 2.2: Entwicklung des Resonanz-Versuchsplans mit defektfreien Probekörper zur Definition des Goldstandards für den Resonanzfingerabdruck

Die Prozesskompensierte Resonanzprüfung (**Process Compensated Resonant Testing, PCRT**) verwendet die Auswertung von Eigenfrequenzen zur Ermittlung von PCRT charakteristischen Kennzahlen, die eine Bewertung des Prüflings ermöglichen. PCRT-Kennzahlen basieren auf verschiedenen Standards, z.B. dem ASTM E3081 zur Bewertung der Prozessstreuung und Ermittlung eines Goldstandards, oder dem ASTM E2534 zur gezielten Diskriminierung von ungewünschten Defekten in Bauteilen. PCRT ist ein vergleichendes Prüfverfahren, daher ist in allen Anwendungen ein Training der PCRT-Algorithmen erforderlich. Der Trainingsaufwand wird dadurch belohnt, dass eine PCRT-Prüfanlage vollautomatische Bauteilprüfungen absolvieren kann.

Gemäß den physikalischen Gesetzen hängen Resonanz- oder Eigenfrequenzen von der Steifigkeit k und der Masse m ab.

$$f_r \approx \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Abbildung II-6: Abhängigkeit der Resonanzen von Steifigkeit und Masse

Durch die besondere Art der Anregung und Messung kann PCRT auch höhergeordnete Moden eines Bauteils sicher und reproduzierbar messen, und hat eine ausgeprägte Empfindlichkeit auf globale und lokale Störungen.

Die Veränderungen der Resonanzfrequenzen unterliegen komplexen Zusammenhängen, und sind bereits durch die Stabilität des zugrundeliegenden Produktionsprozesses bestimmt. Bei der Entwicklung des Versuchsplans stand im Vordergrund, die Versuchsanordnung so zu konzipieren, dass zum einen genügend Teile für eine repräsentative Referenzmenge zur Charakterisierung des Prozesses, und zum anderen auch genügend Teile mit den provozierten Defekten vorhanden sind.

Die Anregung durch PCRT erfolgt mit vergleichsweise kleiner Energie. Anders als bei der SIR-Technologie soll keine Reibung oder Wärme erzeugt werden. Bestandteil des Versuchsplans war daher auch, inwieweit eine SIR-Messung ein Bauteil verändert, und ob diese Veränderung in der PCRT-Messung erkennbar ist. Daher wurden ausgewählte Bauteile zuerst mit PCRT, dann mit SIR und anschließend nochmals mit PCRT gemessen. Zur Bewertung des Einflusses der SIR Messung wurde eine spezielle PCRT Auswertung gemäß ASTM E3213 Part To Itself PTI verwendet. PTI bewertet die relative Änderung eines Bauteils in einem Prozess P, in diesem Fall die SIR-Messung. PTI kann auch eingesetzt werden um andere Prozesse zu bewerten, bei denen eine nicht-visuelle Veränderung des Bauteils stattfindet. Dazu gehören z.B. Härten, Wärmebehandlung, Heiisostatisches Pressen (HIP) u.a.

Der Versuchsplan ist im Anhang abgebildet.

II.1.2.3 Arbeitspaket 2.3: Entwicklung des SIR-Versuchsplans für die Vibrothermografie zur Inspektion industrierelevanter Schlechteile mit induzierten, oberflächennahen Defekten

Die bildverarbeitende SIR Technologie ermöglicht eine zeitlich aufgelöste, zweidimensionale Aufnahme des Vorgangs der Anregung. Durch die Algorithmen der SIR-Auswertung lässt sich durch die zeitliche Auflösung eine dritte räumliche Komponente in Tiefenrichtung ermitteln.

Für die zweidimensionale Betrachtung bieten sich beim gewählten Impeller in Form einer Scheibe zwei Ansichten – Ober- und Unterseite bzw. *top* und *bottom* - an.

Das gewählte Design der Probekörperhalterung führt zu einer geringen Verschattung an der 3-Punkt-Einspannung, wodurch eine Rotation des Bauteils erforderlich ist. Hinzu kommt, dass bei einer einzelnen Messung nicht alle Bereiche des Probekörpers zu gleichen Teilen in Schwingung versetzt werden können. Die Einspannung stellt einen Schwingungsknoten dar, wodurch umliegende Bereiche nicht ausreichend ausgelenkt werden, um Risse zu detektieren. Vorversuche aus Arbeitspaket 4.2 zeigen, dass eine Rotation um 60° die Verschattung sowie die Problemstellung der Knotenpunkte bestmöglich eliminiert. Zudem bietet eine zweite Messung die Möglichkeit einer Bewertung der Reproduzierbarkeit von Messung und Auswertealgorithmen.

Schlussendlich werden pro Impeller vier Messungen durchgeführt. Jeweils für die Ansicht *top* oder *bottom* die 0°- und 60°-Ausrichtung.

Tabelle II-2: Testmatrix SIR je Seriennummer

Ansicht	Ausrichtung
top	0°
top	60°
bottom	0°
bottom	60°

II.1.2.4 Arbeitspaket 2.4: Entwicklung eines kombinierten Versuchsplans und einer geeigneten Prüfprozedur, um erweiterte kombinierte Qualitätsaussagen effizient und zuverlässig am Probekörper zu bestimmen

Der Versuchsplan wurde zusammen im Verbund gemeinsam entwickelt.

Im ersten Schritt, der additiven Fertigung, werden Probekörper und Begleitproben (Zugproben, Zylinder und Schliffproben) hergestellt. Der detaillierte Fertigungsversuchsplan bestehend aus Vorstudien, Bauteile zur Kalibrierung der Messverfahren und die Validierung wird in Kapitel II.1.2.5 und

Tabelle II-3 erläutert. Bei der Erstellung der Baujobs werden alle Proben durch eine Prägung auf der Mantelfläche serialisiert und die Sollparameter bzw. Defektarten in einer Bauteilakte begleitend dokumentiert. Im Anschluss erfolgt das Entpulvern und die Wärmebehandlung (Lösungsglühen, keine Härteverfahren). Im Anschluss werden die Supports entfernt und die Bauteile von der Bauplatte getrennt.

Da in der Risikobetrachtung aus der Antragsstellung eine weitere Schädigung des Bauteils durch die SIR-Technologie aufgeführt wurde und die PCRT-Anlage früher einsatzbereit war, wurde mit der PCRT Messung der Probekörper und Begleitproben als ersten Prüfschritt begonnen. Das SIR-Verfahren erfolgte im Anschluss, jedoch nur für die Probekörper / Demonstratoren, da die Begleitproben nicht mit dem Verfahren geprüft werden können. Die Bauteilakte wurde durch die PCRT und SIR Messungen ergänzt.

Stichprobenartig wurden einige Demonstratoren mittels CT gescannt und gegenüber den SOLL-Defektparametern auf reale Defekte überprüft. Zudem fanden PCRT Messungen von einigen Demonstratoren statt, um den Einfluss des SIR-Verfahrens auf die Bauteileigenschaften zu untersuchen.

Kombinierter Versuchsplan:

1. Additive Fertigung (Entpulvern)
2. Wärmebehandlung
3. Supportentfernung
(Versand)
4. PCRT
(Versand)
5. SIR
(Versand)
6. CT-Scan (Stichproben)
(Versand)
7. PCRT (Stichproben)

II.1.2.5 Arbeitspaket 2.5 Fertigung und Nachbearbeitung der Probekörper

Für die Weiterentwicklung der beiden Messverfahren werden am Fraunhofer IAPT Impeller als Hauptdemonstratoren als Gutteile zur Bildung eines Goldstandards sowie weitere mit spezifisch eingebrachten lokalen und globalen Defekten gefertigt. Zudem werden zylindrische Proben, mit denen die Vibrandt GmbH im PCRT-Messverfahren bereits Erfahrung gesammelt hat, sowie Quader für Schliffbilder und Zugproben als Begleitproben gedruckt. Abbildung II-7 zeigt das Baujobdesign auf der SLM 500. Pro Laserbereich der SLM 500 werden jeweils fünf Impeller in einem 45°-Winkel mit Supportmaterial gestützt gefertigt. In jedem Laserbereich werden zudem die drei Begleitprobengeometrien jeweils dreimal gefertigt. Da sich der hinterste Laserbereich der Anlage in der Vergangenheit als am anfälligsten für Prozessstörungen erwiesen hat, werden hier die Begleitprobengeometrien zur Überwachung zweimal zusätzlich gedruckt.

Nach der Fertigung wurden die Baujobs entpulvert und auf der Bauplattform unter Vakuum spannungsarm gegläht. Anschließend wurden die Bauteile mittels Drahterodieren von der Bauplattform getrennt und das Supportmaterial manuell entfernt. Insgesamt wurden 13 Baujobs gefertigt. Bei den Baujobs 2, 3, 4, 5 und 12 kam es zu Anlagenproblemen, die zu ungeplanten, realen Bauteildefekten führten, die für das Projekt verwendet werden konnten.

Tabelle II-3 gibt eine Übersicht über alle gefertigten Baujobs und die Anzahl der dabei gefertigten Impeller. Insgesamt wurden 162 Impeller gefertigt, darunter 54 Gutteile, 50 Bauteile mit geplanten Defekten und 58 Teile mit ungeplanten Defekten. Darüber hinaus wurden als Begleitproben je 173 Zugproben und zylindrische Begleitproben sowie 119 Schliffproben gefertigt.

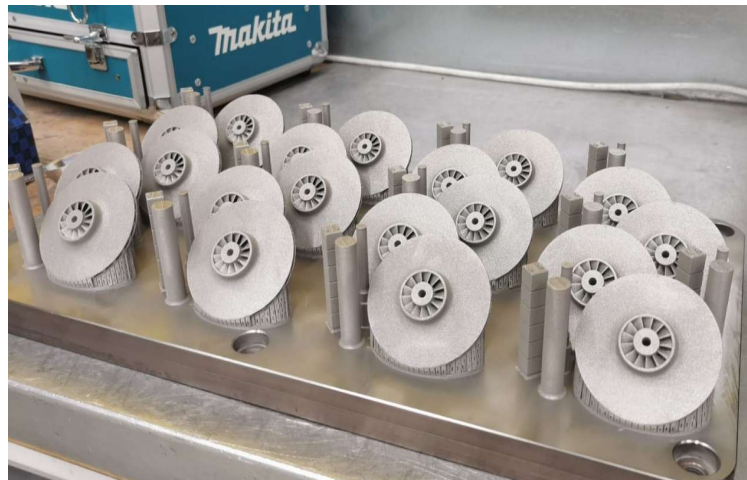
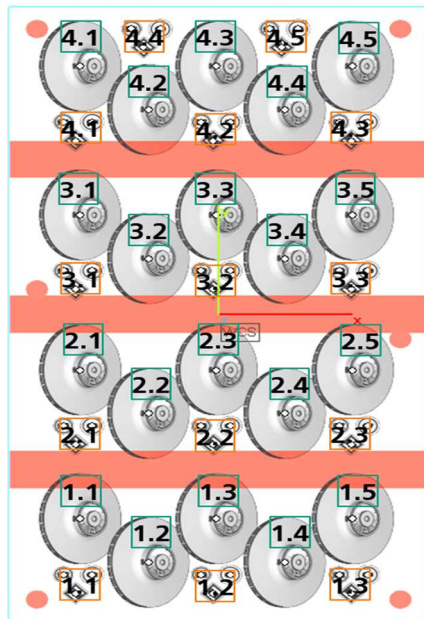


Abbildung II-7: Baujobdesign für Demonstratorbauteile. Links: Positionierung und Nummerierung von Impellern und Begleitproben. Die roten Linien kennzeichnen die Trennung zwischen den vier Laserbereichen der SLM500. Rechts: Foto von gefertigtem Baujob.

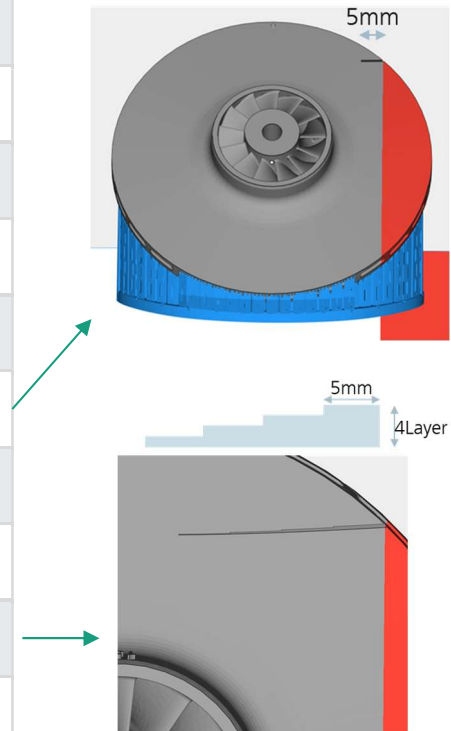
Tabelle II-3: Übersicht gefertigte Baujobs mit Anzahl der gedruckten Impeller als Demonstratorbauteile mit Aufteilung in ok, geplant nicht ok und ungeplant nicht ok.

Bau-job	Datum	Anzahl Teile	Geplant ok Geplant nok Ungeplant nok			Kommentar
BJ1	28.10.22	5	0	5	0	Erster Testdruck, keine Wärmebehandlung
BJ2	02.11.22	9	4	0	5	Probleme mit SLM500 (echte Defekte, Lof-Poren und Delamination)
BJ3	18.11.22	15	0	0	15	
BJ4	16.12.22	14	0	0	14	
BJ5	21.12.22	19	0	0	19	
BJ6	03.02.23	20	20	0	0	
BJ7	08.02.23	20	20	0	0	
BJ8	15.02.23	5	0	5	0	Fertigung auf M290 mit Rissigen Pulver
BJ9	24.02.23	20	4	16	0	
BJ10	03.03.23	20	4	16	0	
BJ11	16.01.24	5	2	3	0	Baujob für Blindtest
BJ12	30.01.24	5	0	0	5	Defekte Gaspumpe
BJ13	13.03.24	5	0	5	0	Baujob für Blindtest
		162	54	50	58	

Tabelle II-4 führt auf, welche Strategien im Detail für die Erzeugung geplanter Defekte in den Demonstratorbauteilen gewählt wurden. Bei der reduzierten Laserenergie und Scangeschwindigkeit wurden sowohl das gesamte Bauteil mit 70 %, 60 % und 50 % der jeweiligen Standardparameter gefertigt als auch Bauteile, bei denen nur ein kleiner Bereich von 1 x 1 x 1 mm mit den reduzierten Parametern und das restliche Bauteil mit Standardparametern gefertigt wurden. Die würfelförmigen Bereiche mit reduzierten Parametern wurden sowohl direkt an der Oberfläche als auch tiefer im Bauteil platziert. Hierdurch soll die Sensitivität der beiden Messverfahren auf kleine Bereiche mit LoF-Poren und Gasporen getestet werden, die sich oberflächennah oder tiefer im Bauteil befinden.

Tabelle II-4: Strategien für geplante Defekte in Demonstratoren mit erklärender Abbildung für die Bezeichnungen der designten Delaminierung

Strategien für geplante Defekte in Demonstratoren	
Reduzierte Laserenergie (LoF-Poren)	whole part (70%, 60%, 50%)
	1 mm cube, near surface (70%, 60%, 50%)
	1 mm cube, far surface (70%, 60%, 50%)
Reduzierte Scangeschwindigkeit (Gas Poren)	whole part (70%, 60%, 50%)
	1 mm cube, near surface (70%, 60%, 50%)
	1 mm cube, far surface (70%, 60%, 50%)
Erhöhter Konturoffset (Randporen)	0,1mm; 0,12mm; 0,14mm
Designte Delaminierung (Delaminierung)	5 Layer cutout, 5 mm length
	5 Layer cutout, 10 mm length
	4 Layer stepped cutout, 5 mm length
	4 Layer stepped cutout, 10 mm length
Recyceltes Pulver (Risse)	Cracking powder on EOS M290
Mangelhafte Wärmebehandlung	Wärmebehandlung bei reduzierter Temperatur
	Keine Wärmebehandlung



Wie bereits beschrieben, kam es während einiger Baujobs zu Fertigungsproblemen, die hier detailliert erläutert werden. Baujob 2 wurde als guter Baujob geplant, jedoch traten aufgrund von Anlagenproblemen bei allen Proben im Laserbereich 3 die in Abbildung II-8 erkennbaren Defekte auf. Im Zuge einer Anlagenwartung konnte ein Laserfokus-Offset des Lasers als Ursache identifiziert werden.

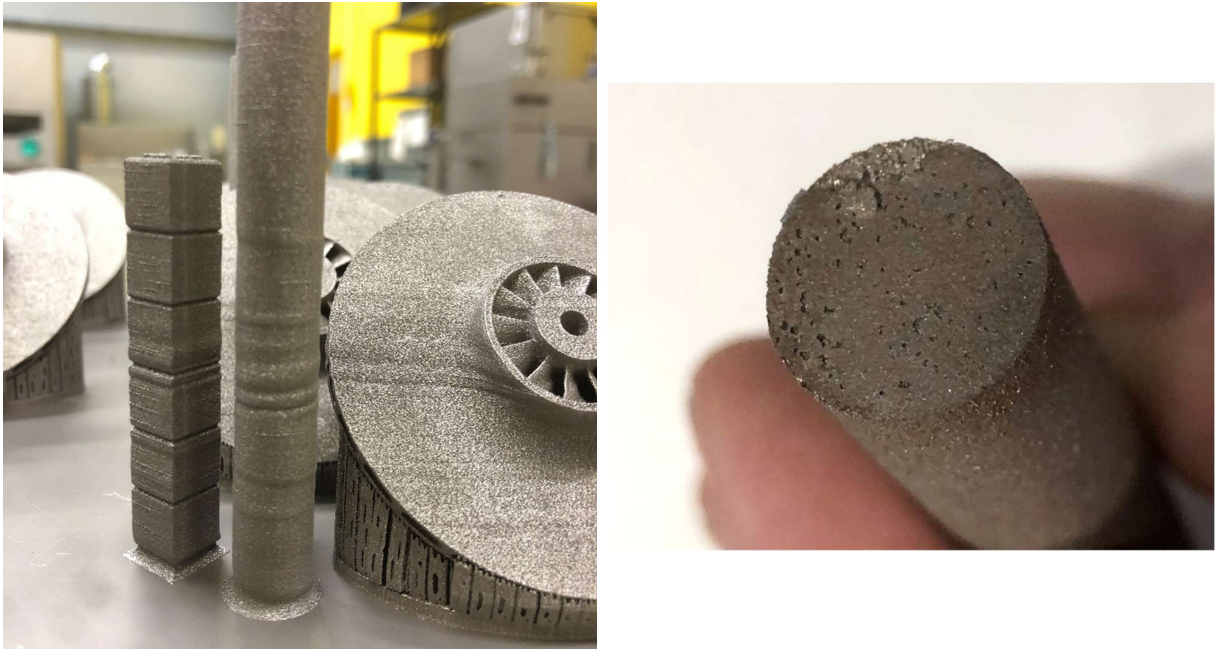


Abbildung II-8: Fotos von defektbehafteten Baujob 2 durch Laserfokus Offset. Links: Begleitproben und Impeller mit sichtbaren horizontalen Querschnittsänderungen. Rechts: Drahterodierte Fläche von Begleitprobe mit sichtbaren LoF-Poren.

Bei den Baujobs 3 und 4 kam es aufgrund einer abgenutzten Dichtung am Pulvertank der Anlage zu erheblichen Beschichtungsproblemen. In einigen Bereichen der Anlage wurde dadurch zu viel Pulver pro Schicht aufgetragen. Zudem wurden einige Pulverpartikel im Bauraum aufgewirbelt, die in den Strahlengang des Lasers gelangten und diesen teilweise streuten und absorbierten. Dies führte zu einer schwankenden LoF-Porosität sowie teilweise zu Delaminierungen, wie in Abbildung II-9 zu sehen ist.

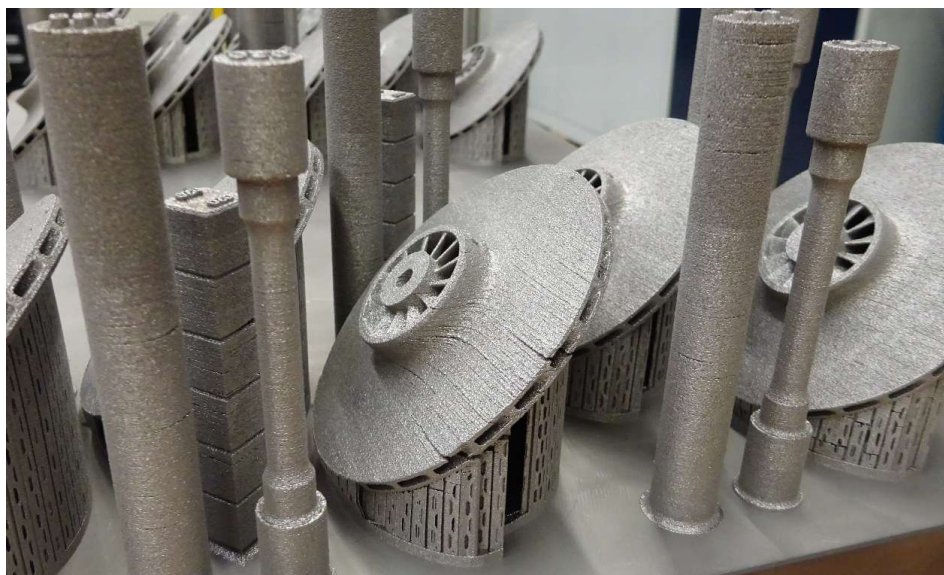


Abbildung II-9: Foto von Baujob 3: Impeller mit sichtbarer Delaminierung auf Grund unregelmäßigen Pulverauftrags.

Bei Baujob 5 kam es zu einem ungeklärten Abbruch des Baujobs etwa 2 mm vor der Fertigstellung des Impellers. Nach einer sechsstündigen Unterbrechung konnte der Baujob fortgesetzt und beendet werden. Durch die geänderten thermischen Bedingungen während der Unterbrechung kam es zu einem thermischen Verzug, der als Linie im Bauteil sichtbar ist.

Bei Baujob 12 führte ein Defekt der Pumpe für die Schutzgasströmung zu einem zu niedrigen Gasstrom über dem Pulverbett. Infolgedessen wurde der Schmauch über dem Schmelzbad nicht ordnungsgemäß abgeführt, sodass dieser die Laserstrahlung vermehrt streute und absorbierte. Dies führte zu einer Verringerung des Energieeintrags in das Pulver und zu einer Zunahme der LoF-Porosität.

II.1.2.6 Arbeitspaket 2.6: Labeling der Anomalien/Defekte in den gefertigten Probekörpern durch konventionelle Prüfung

Die in AP 2.5 gefertigten Probekörper sollen vom Fraunhofer IAPT mittels konventioneller Prüfverfahren geprüft und somit als OK oder nicht-OK Bauteile eingestuft werden. Insbesondere geht es darum, die als Goldstandard angedachten Gutteile auf Defektfreiheit zu überprüfen und sicherzustellen, dass die provozierten Defekte in den Schlechtteilen wie geplant eingebracht werden konnten, um die SIR- und PCRT-Technologie an diesen Bauteilen zu testen und zu kalibrieren.

Da das Anfertigen von 3D-Computertomographien (CT) sehr kostspielig ist, wurden CT-Scans nur stichprobenartig durchgeführt. Insgesamt wurden 42 Bauteile gescannt, wobei mindestens ein Bauteil jeder künstlichen Defektart, ein Gutteil jedes Baujobs und Bauteile, die in SIR oder PCRT auffällig waren, dabei waren. Aufgrund der komplexen Probengeometrie entstanden stark artefaktbelastete Bildaufnahmen mit mittelmäßiger Qualität, sodass nur begrenzt automatisierte Auswertelgorithmen angewendet werden konnten und die Auswertung größtenteils händisch erfolgte. An den kubischen Begleitproben wurden zudem Mikroschliffbilder angefertigt und Zugversuche an den Zugbegleitproben durchgeführt.

Aufgrund der Komplexität der Demonstratorgeometrie hat sich die geplante Archimedesprüfung am Bauteil als undurchführbar erwiesen, da sich an der rauen Oberfläche der innenliegenden Strukturen zu viele Luftbläschen gesammelt haben, die eine reproduzierbare Dichtebestimmung unmöglich machten.

Abbildung II-10 zeigt die Dichte und die Zugfestigkeit der Begleitproben der als Gutteil geplanten Proben im Vergleich zu den als Schlechtteil geplanten Proben. Die als Gutteil geplanten Begleitproben weisen eine mittlere Dichte von 99,98 % auf, mit einer Standardabweichung von 0,007 %. Die geringste gemessene Dichte beträgt 99,97 %. Damit weisen die als Gutteil geplanten Begleitproben eine hervorragende Dichte ohne Ausreißer auf. Die Zugfestigkeit der als Gutteil geplanten Begleitproben beträgt im Mittel 1154 MPa mit einer Standardabweichung von 18 MPa und liegt damit im typischen Bereich, der mit der genutzten SLM 500 erreicht wird. Die geplanten Schlechtteile weisen im Vergleich wesentlich geringere Dichten und höhere Abweichungen bei der Festigkeit auf. Abbildung II-11 zeigt exemplarisch ein 3D-CT-Schichtbild des Demonstrators. Die CT-Messungen der geplanten Gutteile zeigen

keine Auffälligkeiten. Mit diesen Ergebnissen werden alle als Gutteil geplanten Bauteile auch als OK eingestuft.

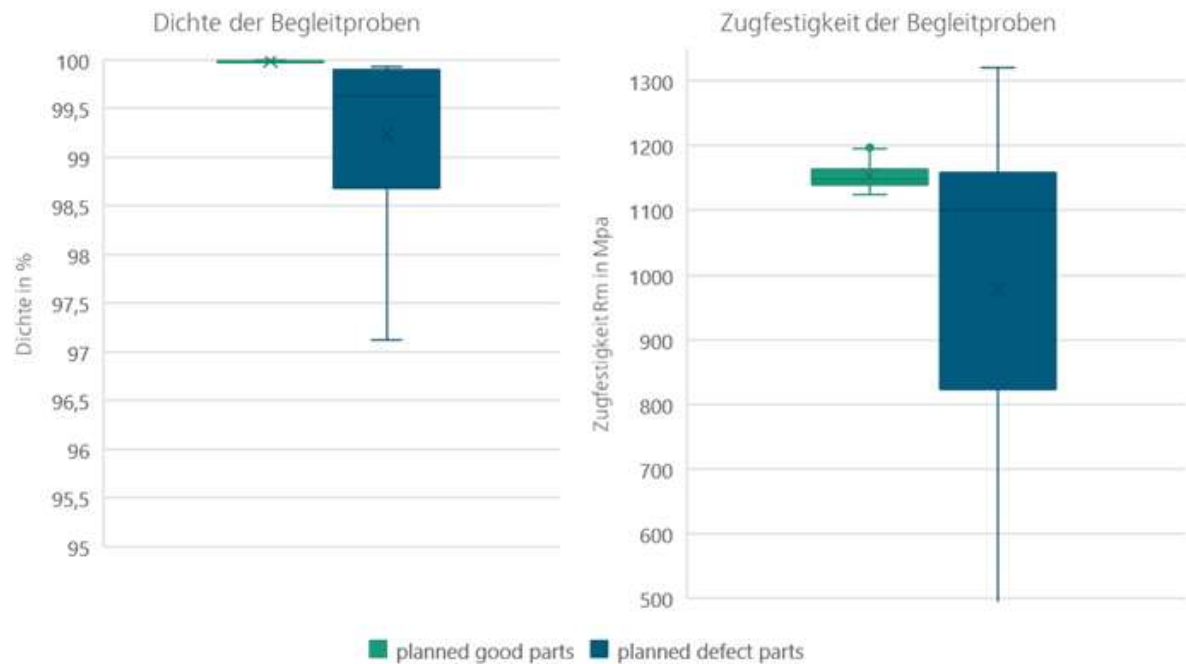


Abbildung II-10: Gegenüberstellung der Dichte und Zugfestigkeiten der als gut und als schlecht geplanten Begleitproben

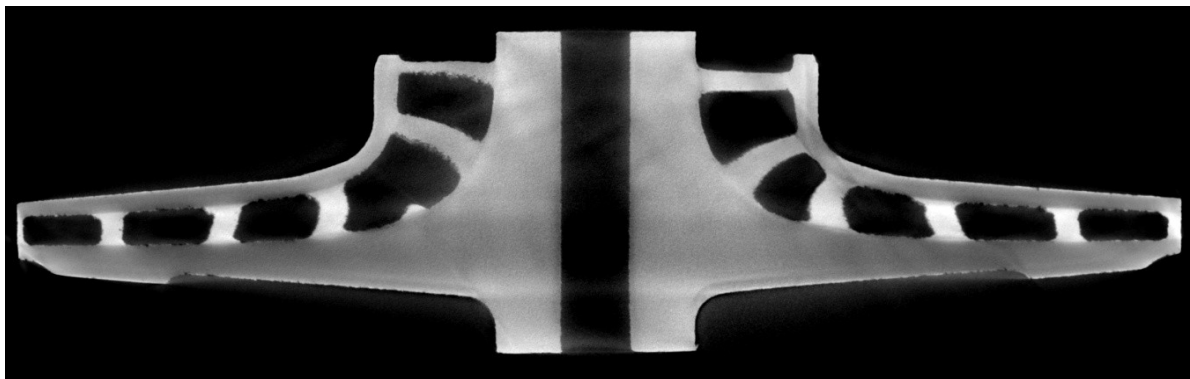


Abbildung II-11: Schichtbild aus 3D-Computertomographie eines Gutteils

Abbildung II-12 zeigt die Ergebnisse der Dichtemessungen und Zugprüfungen für die Begleitproben mit reduzierter Laserenergie sowie exemplarische Mikroschliffbilder. Die Proben zeigen eine signifikante Abnahme der Dichte und Zugfestigkeit mit reduzierter Laserleistung. Die Mikroschliffbilder verdeutlichen, dass mit abnehmender Laserleistung sowohl die Anzahl als auch die Größe der dendritischen LoF-Poren zunehmen. Diese sind im CT-Scan auch über das gesamte Bauteilvolumen der Demonstratorbauteile erkennbar, wie in Abbildung II-13 zu sehen ist. Im Bildausschnitt unten links lässt sich zudem erkennen, dass sich mit der lokalen Reduzierung der Laserenergie ein 1 x 1 x 1 mm großer Würfel erhöhter LoF-Porosität im Bauteil erzeugen ließ. Die Messungen zeigen, dass die

gewünschte Erzeugung von LoF-Poren von den Vorversuchen erfolgreich auf die Demonstratorgeometrie übertragen werden konnte.

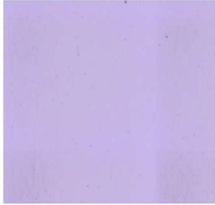
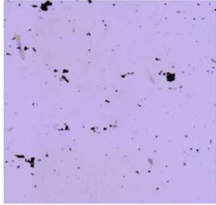
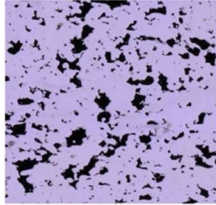
				
Laserenergie	100%	70%	60%	50%
Density mean	99,98%	99,62%	97,64%	91,00%
Density SD	0,007	0,002	0,11	0,281
Rm mean	1154 MPa	1061 MPa	861 MPa	519 MPa
Rm SD	18	23	69	4

Abbildung II-12: Mikroschliffbilder, Dichte und Zugfestigkeit der Begleitproben mit reduzierter Laserenergie in unterschiedlichen Energieabstufungen.

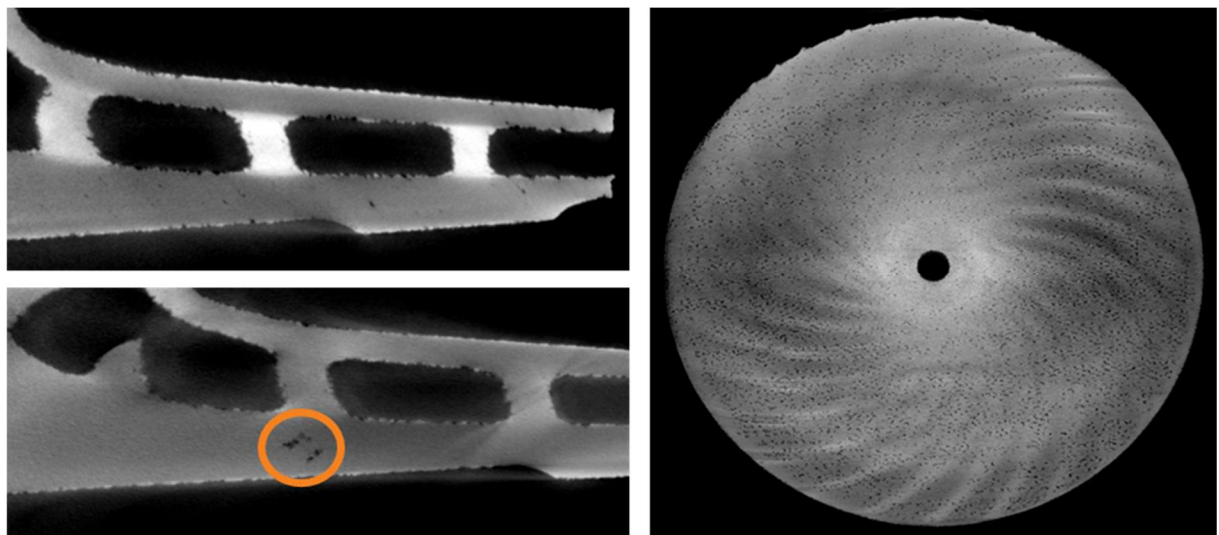


Abbildung II-13: CT-Schichtbilder von Demonstratorbauteilen, die mit reduzierter Laserenergie gefertigt wurden. Oben links: Impeller 120, gefertigt mit 70 % Laserenergie. Rechts: Impeller 130, gefertigt mit 50 % Laserenergie. Unten links: Impeller 129, gefertigt mit Standardparametern und einem 1 mm Würfel mit 70 % Laserenergie.

Abbildung II-14 zeigt die Ergebnisse der Dichtemessungen und Zugprüfungen für die Begleitproben mit reduzierter Laserscangeschwindigkeit sowie exemplarische Mikroschliffbilder. Die Mikroschliffbilder verdeutlichen, dass mit der Abnahme der Laserscangeschwindigkeit und der daraus resultierenden zunehmenden eingebrachten Energie sowohl die Anzahl als auch die Größe der sphärischen Gasporen zunehmen. Die Proben zeigen eine signifikante Zunahme der Porosität bei Reduzierung der Laserscangeschwindigkeit.

Die Zugfestigkeit nimmt trotz zunehmender Porosität erst ab 50 % Laserscangeschwindigkeit signifikant ab, da die sphärische Form der Poren nur einen geringen Einfluss auf die statische Zugfestigkeit hat und erst mit zunehmender Porosität eine Wirkung durch die reduzierte Materialmenge im Querschnitt erkennbar wird. Die CT-Scans zeigen, wie in Abbildung II-15 links exemplarisch zu sehen ist, dass die Poren homogen über das gesamte Bauteilvolumen verteilt sind. Im Bildausschnitt rechts lässt sich zudem erkennen, dass mit der lokalen Reduzierung der

Laserscangeschwindigkeit ein 1 x 1 x 1 mm großer Würfel erhöhter Gasporosität im Bauteil erzeugt werden konnte. Die Messungen zeigen, dass sich auch die Erzeugung von Gasporosität wie geplant entsprechend der Vorversuche erfolgreich auf die Demonstratorgeometrie übertragen ließ.

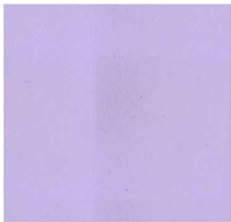
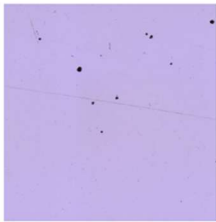
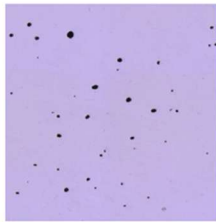
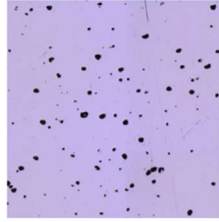
				
Scan- geschwindigkeit	100%	70%	60%	50%
Density mean	99,98%	99,91%	99,74%	96,76%
Density SD	0,007%	0,018%	0,021%	0,36%
Rm mean	1154 MPa	1154 MPa	1142 MPa	1072 MPa
Rm SD	18 MPa	1 MPa	5 MPa	4 MPa

Abbildung II-14: Mikroschliffbilder, Dichte und Zugfestigkeit der Begleitproben mit reduzierter Laserscangeschwindigkeit in unterschiedlichen Geschwindigkeitsabstufungen.

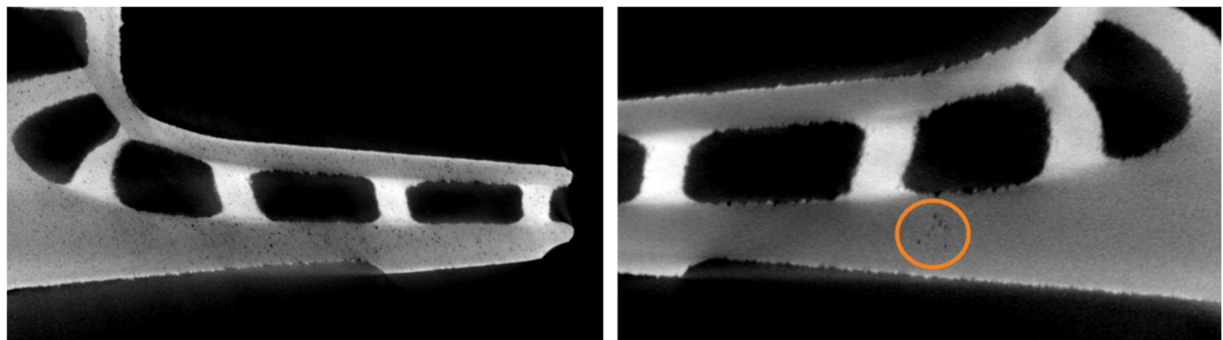


Abbildung II-15: CT-Schichtbilder von Demonstratorbauteilen, die mit reduzierter Laserscangeschwindigkeit gefertigt wurden. Links: Impeller 150, gefertigt mit 50 % Laserscangeschwindigkeit. Rechts: Impeller 127, gefertigt mit Standardparametern und einem 1 mm Würfel mit 50 % Laserscangeschwindigkeit.

Dass die designte Delaminierung durch das Ausschneiden eines flächigen Bereichs über mehrere Schichten im CAD-Design erfolgreich bei allen Demonstratorbauteilen umgesetzt wurde, konnte mit

bloßem Auge von außen erkannt werden und wurde zudem durch Mikroschliffbilder sowie Stichproben von CT-Scans, wie in Abbildung II-16 zu sehen ist, bestätigt.

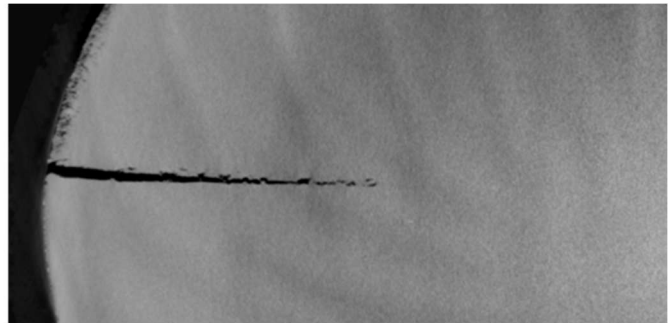
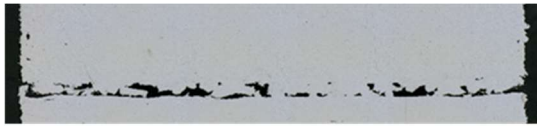


Abbildung II-16: Künstlich designte Delamination. Links: Mikroschliffbild von Begleitprobe mit künstlicher Delamination. Rechts: CT-Schnittbild von Demonstrator mit künstlicher Delamination

Im Baujob 8, der mit zu Rissen neigendem Ti64-Pulver auf der EOS M290 gefertigt wurde, weisen sämtliche Begleitproben im Schliffbild Risse auf, wie in Abbildung II-17 links zu sehen ist. Stichprobenartige CT-Scans der Impeller zeigen, wie rechts in der Abbildung dargestellt, dass auch in den Demonstratoren Risse erzeugt wurden. Die Zugfestigkeit der Begleitproben ist mit durchschnittlich 457 MPa stark reduziert.

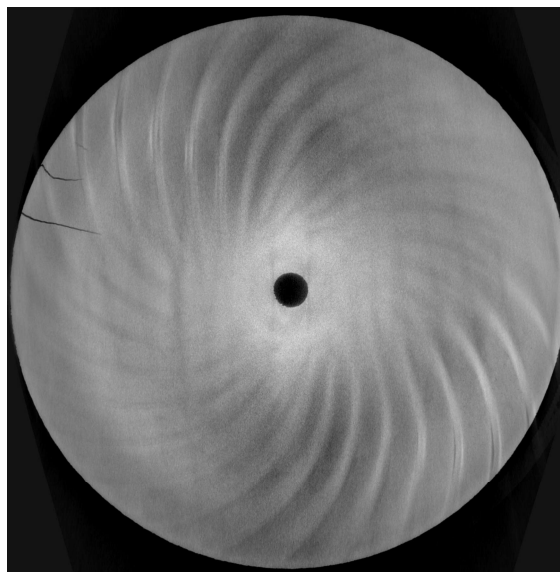
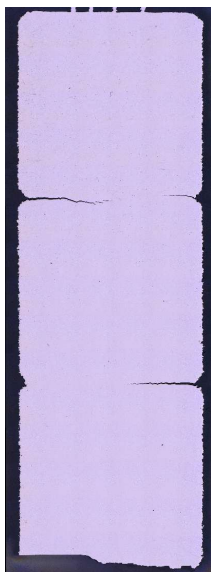


Abbildung II-17: Fertigung mit zu ris- sen neigendem Ti64 Pulver auf EOS M290 aus Baujob 8. Links: Mikroschliff- bild von Begleitprobe. Rechts: CT- Schnittbild von Impeller 108.

Zwischen den Proben, die mit guter Wärmebehandlung und mit Wärmebehandlung bei reduzierter Temperatur gefertigt wurden, ist im Mikroschliffbild sowie im CT-Scan kein Unterschied zu erkennen, während die mechanischen Eigenschaften wie erwartet abweichen. Abbildung II-18 zeigt die Zugfestigkeit der unterschiedlich wärmebehandelten Proben. Während die Zugfestigkeit für die Proben mit guter Wärmebehandlung im für das Material und die Anlage üblichen Bereich liegt, weisen die Proben

mit schlechter Wärmebehandlung eine deutlich höhere Streuung auf. Wie zu erwarten, zeigen die Proben mit schlechter Wärmebehandlung eine tendenziell höhere Zugfestigkeit bei niedrigerer Bruchdehnung.

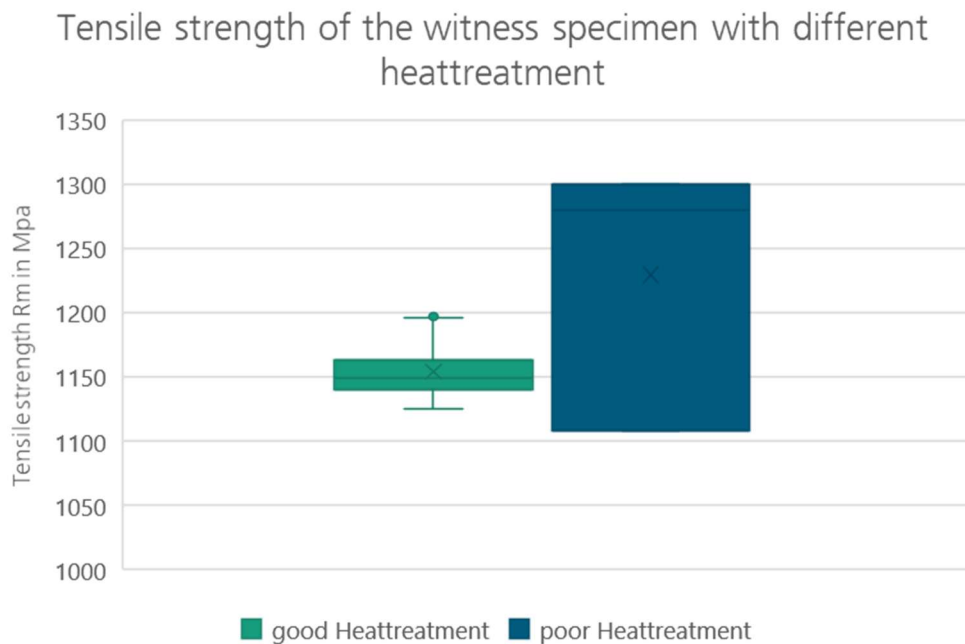


Abbildung II-18: Vergleich der Zugfestigkeit von Begleitproben, gedruckt mit Standard Parametern bei guter Wärmebehandlung und Wärmebehandlung bei reduzierter Temperatur.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass alle als Gutteil geplanten Proben und Demonstratoren bei der Untersuchung mit konventionellen Messmethoden ebenfalls als Gutteile bestätigt werden konnten. Zudem konnte sichergestellt werden, dass alle geplant eingebrachten Defekte entsprechend der Vorversuche auf die Demonstratoren übertragen wurden. Weiterhin wurde bestätigt, dass es sich bei den Bauteilen der durch Anlagendefekte belasteten Baujobs um Schlechteile handelt. Die Ergebnisse des Defektlabelings wurden bauteilspezifisch detailliert in der begleitenden Bauteilakte festgehalten, damit diese von den Projektpartnern zur Weiterentwicklung und Validierung der beiden Prüfmethoden verwendet werden können.

II.1.2.7 Arbeitspaket 2.7: Entwicklung eines umfangreichen statistisch abgesicherten Doppelblindtest zur Bewertung der Zuverlässigkeit und Effizienz der kombinierten Prüfmethodik

Zur Bewertung der Zuverlässigkeit und Effizienz der Prüfmethodiken werden die Demonstratoren und zylindrischen Begleitproben aus den Baujobs 10, 11, 12 und 13 vom Fraunhofer IAPT den Projektpartnern Vibrandt und FTTD ohne vorherige Informationen zu den geplanten eingebrachten Defekten sowie zu den durch konventionelle Prüfverfahren gefundenen Defekten zur Vermessung mittels PCRT und SIR übergeben. Diese Baujobs enthalten neben weiteren Gutteilen auch jeweils Bauteile mit jeder der zuvor geplanten Defektarten.

Da sich zu diesem Zeitpunkt im Projektfortschritt bereits gezeigt hat, dass der Defektnachweis mittels SIR aufgrund der nur geringen Anzahl repräsentativer Probekörper, die mit der Defektart „Risse“ hergestellt werden konnten, noch nicht ausreichend weit entwickelt werden konnte, wurden hierbei vermehrt zylindrische Begleitproben gefertigt. Aufgrund der einfacheren Geometrie konnte Vibrant diese besser für die Weiterentwicklung des PCRT-Verfahrens nutzen, und zudem konnte eine größere Stückzahl gefertigt werden. So wurden 84 zylindrische Begleitproben für die Vermessung mittels PCRT und 35 Impeller mit Begleitproben gefertigt. Das Ergebnis des Blindtestes ist unter Arbeitspaket 3.5 beschrieben.

II.1.3 AP 3 - Entwicklung einer AM geeigneten Resonanzprüfung & Optimierung von PCRT für hochkomplexe AM Strukturen

II.1.3.1 Grundlagen

Das PCRT-System von Vibrant besteht aus einem Steuercomputer, einem Transceiver-Signalgenerator und -Prozessor sowie einer Prüfvorrichtung mit Blei-Zirkonat-Titanat-Transducern (PZT), wie in Abbildung II-19 dargestellt. Mit einem Wandler wird eine gewobbelte Sinuswelle angeregt, und das Resonanzantwortsignal wird von den beiden anderen Wandlern (Ch 1 und Ch 2) empfangen. Die Auswirkungen von Temperaturschwankungen auf die Resonanzfrequenzen des Teils werden automatisch durch eine Temperaturmessung während der Prüfung kompensiert, und es sind keine Chemikalien, Koppelmedien oder eine umfangreiche Teilereinigung erforderlich.

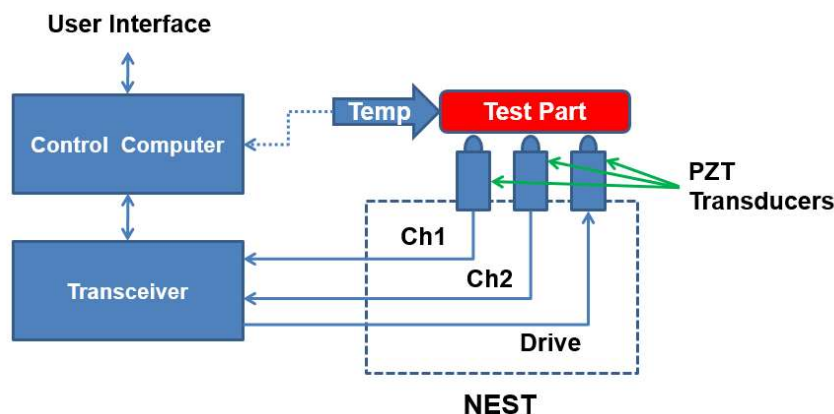


Abbildung II-19: PCRT Blockschaltbild

II.1.3.2 Auswertungsmethoden

II.1.3.2.1 Z- Score gemäß ASTM E3081

Eine Charakterisierung der Population gemäß ASTM E3081 kann mit Hilfe der PCRT-Z-Score-Statistik durchgeführt werden. Dieses Verfahren bewertet die Integrität und Prozessstreuung der Bauteile eines oder mehrerer Bau Jobs. Eine weitere NDT-Bewertung ist dazu nicht erforderlich. Bei AM-Bauteilen ermöglicht diese Methode der Populationscharakterisierung einen Vergleich der geometrischen Variabilität und der Variabilität der Materialeigenschaften innerhalb eines Bau Jobs (z. B. der Bau-Position), zwischen Bau-Jobs und zwischen verschiedenen AM Druckmaschinen. Eine Z-Score-Analyse berechnet den Mittelwert der Resonanzfrequenz und die Frequenzabweichung für jedes Teil für eine Vielzahl von Resonanzen und vergleicht sie mit einer Referenzpopulation. Zwei zusammenfassende Statistiken, der durchschnittliche Z-Score (über alle Resonanzen für ein einzelnes Teil) und die Z-Abweichung (Konsistenz im Muster der Resonanz-Z-Scores) werden in einem Z-Score-Diagramm

dargestellt. Abbildung II-20 zeigt beispielsweise eine Illustration einer Populationscharakterisierung anhand eines Z-Score-Diagramms. Die meisten der blauen Teile sehen tatsächlich gleich aus, aber der orangefarbene Teil fällt auf der Z-Abweichungsachse heraus. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Muster der Resonanzen nicht mit dem Muster der meisten Teile in der Population (blaue Teile) übereinstimmt.

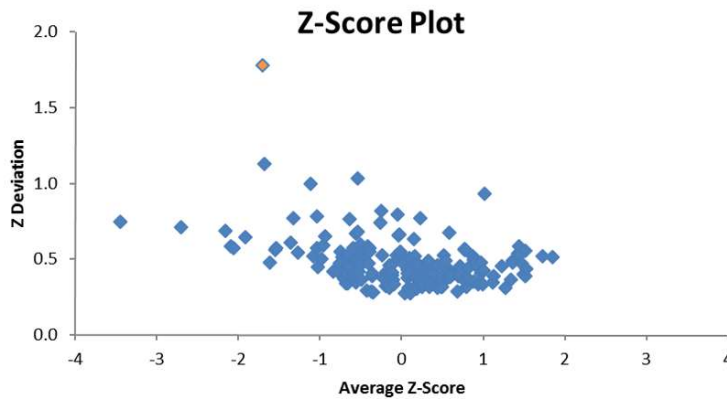


Abbildung II-20: Beispiel Z-Score Diagramm

Die Z-Score Darstellung erlaubt die Korrelation der Popluation mit einer Prozessverteilung wie in Abbildung II-21 gezeigt. Es ist also anzustreben, einen industriellen Prozess im Rahmen einer $\pm 2,5$ Sigma Streuung zu bewerten.

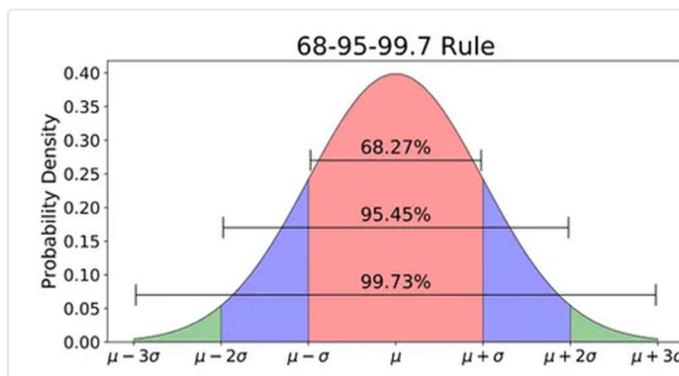


Abbildung II-21: Prozesskurve der Statistik

II.1.3.2.2 Vibrational Pattern Recognition VIPR gemäß ASTM E2534

Wenn Bauteile mit verlässlichen Klassifizierungen verfügbar sind, verwendet Vibrant die VIPR-Software (Vibrational Pattern Recognition), um diagnostische Resonanzfrequenzmuster zu identifizieren, die die „guten“ von den „schlechten“ unterscheiden. Um ein Targeted Defect Sorting Module (Fehlersortiermodul) zu erstellen, werden die Resonanzspektren der Referenzkomponenten als akzeptabel, inakzeptabel oder unbekannt klassifiziert. Die Klassifizierung geschieht nach bestem verfügbarem Wissen der Proben oder der verwendeten NDT-Methoden. Objektive Prüfverfahren sind bei der Klassifizierung gegenüber rein visuellen, subjektiven Verfahren zu bevorzugen. Diese Gruppe klassifizierter Komponenten wird als Referenzset oder Trainingssatz bezeichnet. Die Vibrational Pattern Recognition (VIPR)-Algorithmen von Vibrant identifizieren Frequenzmuster im Trainingssatz, die die akzeptablen und inakzeptablen Komponenten unterscheiden. Abbildung II-22 zeigt ein Beispiel für eine einfache Modenbeziehung, die durch das Frequenzdelta zwischen zwei Moden definiert ist.

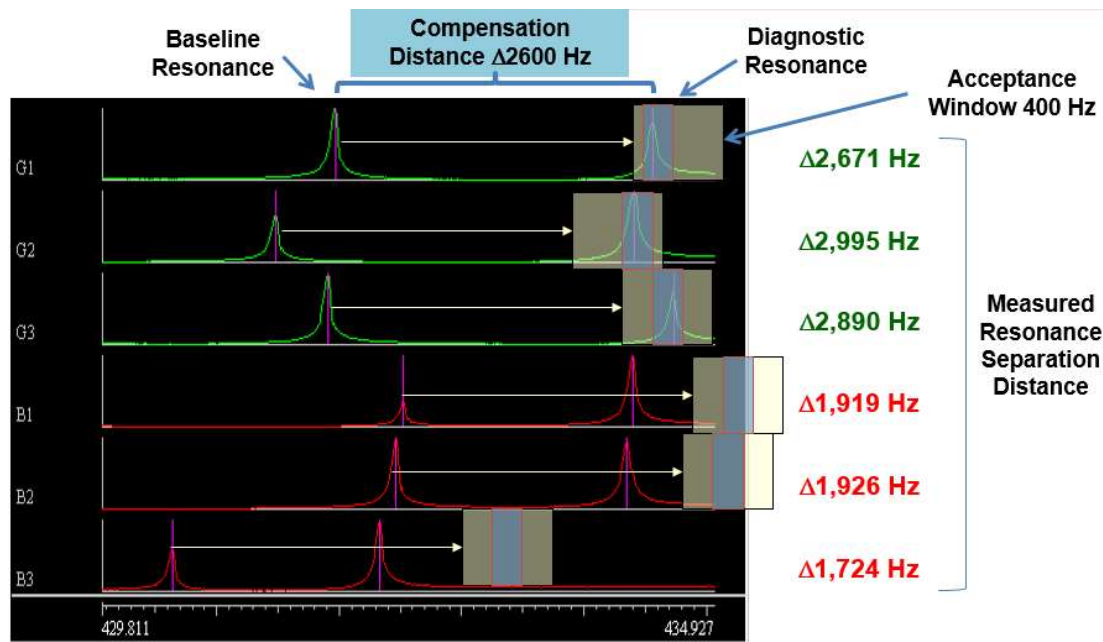


Abbildung II-22: Frequenzspektrum mit unterschiedlichen Mustern zwischen G1-G2-G3 und B1-B2-B3

II.1.3.3 Arbeitspaket 3.1

Titel: Entwicklung der Vorgehensweise zur Ausnutzung von Synergieeffekten (PCRT+SIR) zur effizienten Goldstandardentwicklung.

PCRT verwendet verschiedene Kennzahlen zur Bewertung der Bauteile. Die Kennzahlen wurden unter II.1.5 so mit den Ergebnissen der SIR-Messung überlagert, dass eine visuelle Bewertung beider Metriken möglich ist. Eine automatisierte Zusammenführung der Kennzahlen war auch innerhalb der verlängerten Projektzeit nicht möglich. Die Projektbeteiligten sind sich allerdings sicher, dass das Potenzial zur Zusammenführung der Ergebnisse besteht.

II.1.3.4 Arbeitspaket 3.2

Titel: Entwicklung einer bauteilspezifischen Prüfaufnahme für Probekörper sowie Begleitproben.

Für die Begleitproben wurde eine Prüfvorrichtung entwickelt, die eine Messung der relativ leichten und rauen Zylinder ermöglicht. In der Vorrichtung wurde eine Längenmesseinheit integriert, damit die Länge der Zylinder kontrolliert werden kann. Die Vorrichtung ist in Abbildung II-23 dargestellt.

Für die Impeller wurde ebenfalls eine angepasste Vorrichtung entwickelt und gebaut. Die Impeller werden auf einer der Geometrie angepassten Aufnahme platziert, und dann durch einen Hebemechanismus auf den 3 Piezo Sensoren zur Messung angehoben. Die Vorrichtung ist in Abbildung II-24 dargestellt.



Abbildung II-23: Prüfvorrichtung für Zylinderproben

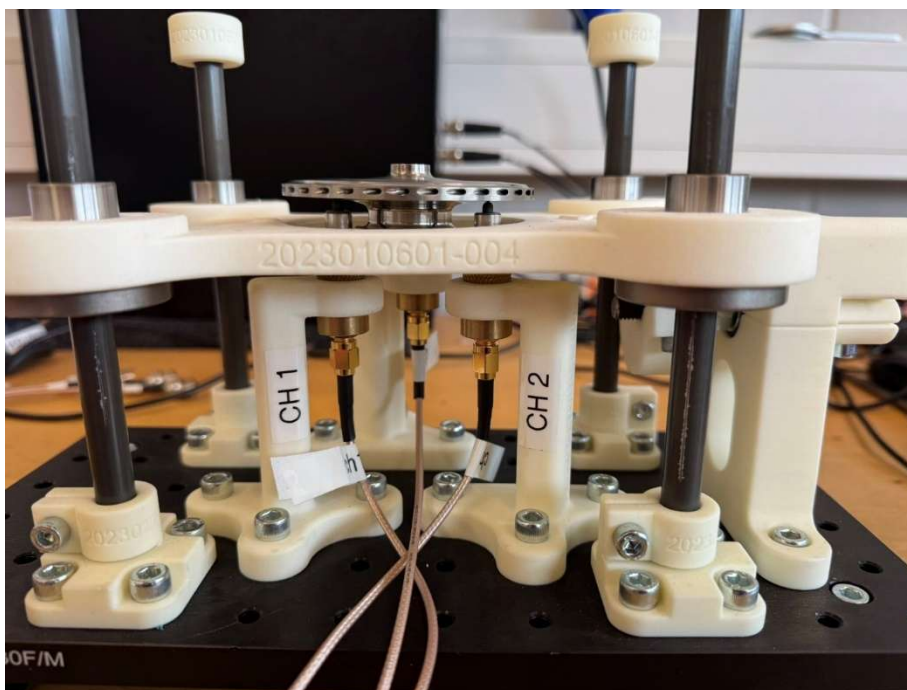


Abbildung II-24: Prüfvorrichtung für Impeller

II.1.3.5 Arbeitspaket 3.3

Titel: Entwicklung eines Simulationsmodells auf den geplanten Materialeigenschaften.

Die Simulation soll die erwartete Streuung und Abweichung der Testproben in diesem Projekt bewerten. Die Modelle werden verwendet, um die realen Materialeigenschaften des verwendeten Materials anhand von Zylinder Begleitproben, zu verstehen und die Materialeigenschaften der komplexen Geometriekomponente, der Laufräder, vorherzusagen. Zu diesem Zweck

wurde die komplexe Probengeometrie in ein entsprechendes FEM Modell übertragen. Die Materialeigenschaften werden zunächst gemäß Tabellenbuch angenommen und später bei Bedarf angepasst (Modell-Mess-Abgleich). Die Anpassung erfolgt durch Vergleich der Resonanzdaten der realen Probenresonanzen und unter Bezugnahme auf die mit einem Laser-vibrometer gewonnenen Daten, um die zugewiesenen Schwingungsmoden zu bestätigen.

II.1.3.5.1 Finit Element Netzstruktur

Um die Zuverlässigkeit der Ergebnisse in allen folgenden Abschnitten sicherzustellen, muss zunächst eine ordnungsgemäße Bewertung der Auflösung des verwendeten Finite Element Netzes durchgeführt werden. Nach der Festlegung eines Startwerts für die Maschenelementgröße wurde eine Verfeinerung durchgeführt, bis eine Konvergenz der siebten Resonanzfrequenz erreicht war (die als Frequenz gewählt wurde, die der ersten Nicht-Volumen-Verformungsart entspricht).

Die Elementgröße der vorletzten Iteration wird dann als Ergebnis verwendet (da die letzte Iteration die Lösung nicht wesentlich verbessert).

II.1.3.5.2 Definition der Geometrie

Ausgangspunkt ist ein CAD-Modell (siehe Abbildung II-25) mit der Geometrie des Zylinders; die Abmessungen sind in Abbildung II-26 angegeben.

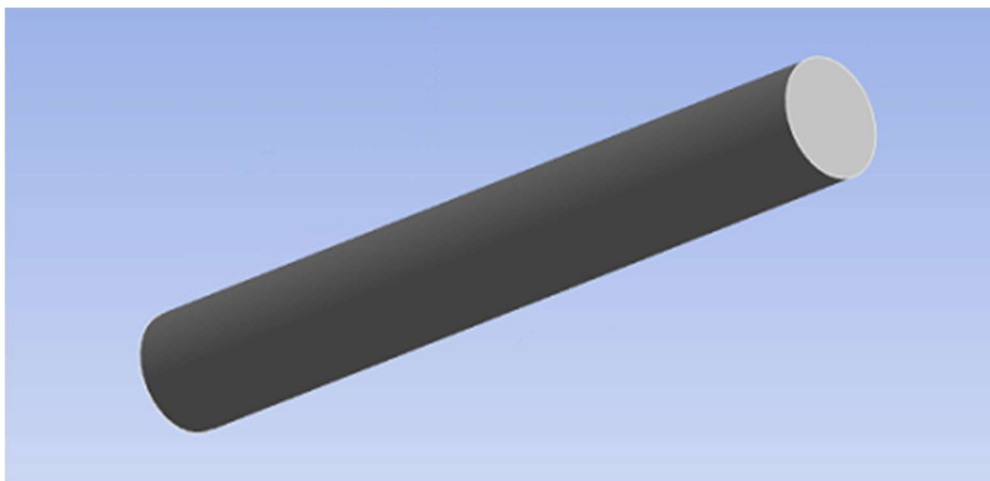


Abbildung II-25: Zylinder CAD Modell

Diameter [mm]	Height [mm]
12	86

Abbildung II-26: Zylinder CAD Abmessungen

Um festzustellen, ob das FEM Modell für die gefertigten Teile geeignet ist, wurde eine Reihe von Messungen an drei ausgewählten Proben (008, 050, 106) durchgeführt (die Proben wurden aufgrund der höchsten Anzahl an Messungen mit Laser Vibrometrie und PCRT ausgewählt). Die Ergebnisse sind in Abbildung II-27 aufgeführt.

Sample ID	Mass [g]	Diameter [mm]	Height [mm]
008	42.55	12.18	85.93
008	42.55	12.10	85.91
008	42.55	12.07	85.92
050	42.38	11.95	86.19
050	42.36	11.98	86.17
050	42.37	11.97	86.13
106	38.62	12.00	85.89
106	38.61	12.00	85.87
106	38.61	11.98	85.87
AVG	41.18	12.03	85.99

Abbildung II-27: Abmessungen der Zylinderproben

Die Masse wird der Vollständigkeit halber angegeben, wird aber zunächst nicht zur Dichtebestimmung verwendet (siehe II.1.3.5.3).

Durch den Vergleich des Mittelwertes der gemessenen Abmessungen (AVG) mit dem Modell wird festgestellt, dass es eine prozentuale Differenz von 0,25 % für den Durchmesser und - 0,012 % für die Höhe gibt. Diese Abweichungen sind gering genug, um das CAD-Modell als repräsentativ für die untersuchte Stichprobe zu betrachten.

Wenn weitere Proben untersucht werden sollen, sollte der gleiche Prozess mit der gesamten betroffenen Population wiederholt werden.

Nach der Definition der Modellabmessungen muss die Ausrichtung des Modells bestimmt werden. Zunächst wird die Zylinderachse an der Y-Achse des globalen Referenzsystems ausgerichtet. Dieser Schritt ist nicht besonders wichtig, da Ansys die Erstellung verschiedener Referenzsysteme zur Definition der Materialausrichtung ermöglicht. Dies ist nützlich, wenn der Einfluss der Druckrichtung untersucht wird (siehe II.1.3.5.7).

Zu diesem Zweck werden drei verschiedene Hilfsreferenzsysteme erstellt:

- Hilfsachse Z bei 90° in Bezug auf die globale Y-Achse: wird für die horizontale Drucksimulation verwendet. Dieses System ist redundant, da es mit dem globalen Referenzsystem identisch ist, wurde jedoch für mehr Klarheit erstellt.
- Hilfsachse Z bei 0° in Bezug auf die globale Y-Achse: wird für die vertikale Drucksimulation verwendet.
- Hilfsachse Z bei 45° in Bezug auf die globale Y-Achse: wird für den Druck bei 45° verwendet.

Ein Vergleich zwischen den Hilfsreferenzsystemen und dem globalen Referenzsystem ist in Abbildung II-28 dargestellt.

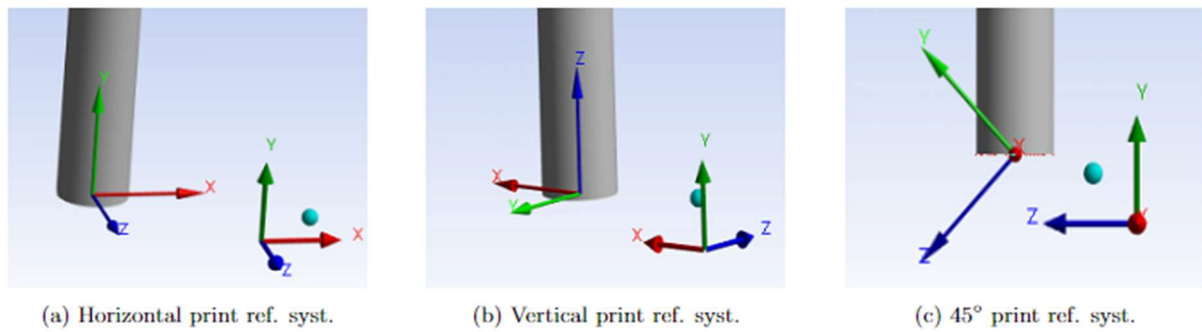


Abbildung II-28: Vergleich der Koordinatensysteme

II.1.3.5.3 Definition der Materialeigenschaften

Bei der Definition eines Simulationsmodells wird für Metalle Isotropie angenommen. Die Proben werden jedoch durch 3D-Druck hergestellt, der dafür bekannt ist, dass er einen gewissen Grad an Anisotropie einführt, wobei in der Regel zwischen Eigenschaften innerhalb und außerhalb der Bezugsebene (Druckebene) unterschieden wird. Dieses Verhalten wird als transversale Isotropie bezeichnet und stellt eine recht gute Annäherung an die Materialeigenschaften eines 3D Druck Teils dar, weshalb es für diese Studie letztendlich ausgewählt wurde.

In einem transversal isotropen Modell müssen fünf unabhängige Konstanten bestimmt werden, deren Werte durch Mittelung der Ergebnisse einer Zugtestreihe ermittelt werden können, die an Prüfkörpern durchgeführt wird, die in denselben Fertigungsprozessen wie die Proben hergestellt wurden. Die Ergebnisse dieser Mittelung sind in Abbildung II-29 dargestellt.

$E_x = E_y$ [GPa]	E_z [GPa]	ν_{xy}	$\nu_{xz} = \nu_{yz}$	G_{xy} [GPa]	$G_{xz} = G_{yz}$ [GPa]
111.43	107.5	0.3	0.27	42.86	42.32

Abbildung II-29: Verwendete gemittelte Materialeigenschaften

Zu beachten ist, dass beide Schermodule unter der Annahme eines isotropen Verhaltens bestimmt wurden, sodass sich die tatsächlichen unabhängigen Konstanten auf vier reduzieren. Dies ist auf das Fehlen mechanischer Testergebnisse unter Scherbelastung zurückzuführen. Ein verfeinertes Modell mit einer besseren Definition des unabhängigen Schermoduls wird in Abschnitt 6.5 untersucht.

Natürlich stellen diese durchschnittlichen Eigenschaften nur einen Ausgangspunkt für diese Untersuchung dar, und werden durch einen Inversionsprozess (siehe Abschnitt 6.5) an eine ausgewählte Probe angepasst.

Die Z-Achse wurde gemäß den zuvor definierten Hilfsreferenzsystemen als Richtung außerhalb der Ebene gewählt. Beim Einrichten der Simulationen kann nun dieselbe gerade definierte Materialkarte (mit dem Namen „custom 092“) verwendet werden, unabhängig von der Druckrichtung, und das Materialreferenzsystem in einem separaten Setup-Feld angegeben werden. Dieser Ansatz vereinfacht den Materialdefinitionsprozess, da das Einrichten eines Referenzsystems weit weniger zeitaufwendig ist als das Erstellen einer neuen Materialkarte für jede Druckausrichtung, insbesondere für nicht offensichtliche Ausrichtungen.

Natürlich muss auch die Dichte des Materials definiert werden. Als erster Schätzwert kann eine Dichte zwischen der angegebenen Mindestdichte (4,433 g/cm³) und der angegebenen Höchstdichte (4,513 g/cm³), die beim Drucken erreicht werden kann, oder der Durchschnittswert zwischen den beiden gewählt werden. In diesem Fall wird die Mindestdichte gewählt.

Später wird ein anderer Wert gewählt, der für die analysierte Probe spezifisch ist, da die Dichte während der Optimierung als konstant behandelt wird (siehe Abschnitt 6.5), was eine sehr genaue Bestimmung ihres tatsächlichen Werts von Anfang an erfordert.

II.1.3.5.4 Definition der Randbedingungen

Bei der Festlegung der Randbedingungen für eine FEM Modalanalyse ist eine genaue Nachbildung des in PCRT verwendeten Testaufbaus notwendig.

In diesem Fall wurden zwei PCRT Sensoren in der Mitte jeder Fläche des Zylinders platziert. Solche Wandler können mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad simuliert werden, aber da ihre Spitzen abgerundet sind, kann von einem einzigen Kontaktpunkt pro Sensor ausgegangen werden. Da das Teil während des Tests nicht driftet, ist eine Berücksichtigung der Reibung nicht erforderlich.

Das Problem hierbei ist, dass, da keine dynamische (z. B. harmonische) Analyse durchgeführt wird, die Größen der erhaltenen Verformungen nicht realistisch sind und die Festlegung von Punkt-Grenzbedingungen zu großen Nichtlinearitäten in ihrer Umgebung führt, was die Interpretation der Ergebnisse besonders schwierig, wenn nicht gar unmöglich macht. Daher wurde ein einfacherer Ansatz gewählt: Unter der Annahme, dass der Einfluss der Stützen auf die Lösung vernachlässigbar ist, wurde die Simulation mit einer Free-Free-Randbedingung (ohne Randbedingungen) durchgeführt. Es ist möglich, dass dies einen gewissen Einfluss auf die Dehnungsmoden hat, da das Teil bei realen Tests in axialer Richtung irgendwie eingeschränkt ist. Um dies zu bestätigen, ist ein Vergleich zwischen den Ergebnissen der Modalanalyse und denen der Vibrometrie erforderlich, und dann ist zu bestimmen, ob ein anderer Satz von Randbedingungen die Lösung verbessert (siehe II.1.3.5.10).

II.1.3.5.5 Überlegungen zur Netzstruktur

Bei der Vernetzung mit Standardeinstellungen sinkt die Jacobian Kennzahl (an Gauss-Punkten. Eckpunkte können ebenfalls ausgewählt werden) bestimmter Elemente auf suboptimale Werte, wenn nicht sogar inakzeptable Werte (siehe Abbildung II-31a). Dies führt wahrscheinlich nicht zur Ungültigkeit oder Beeinflussung der Analyseergebnisse, da das betreffende Teil eine recht einfache Geometrie aufweist. Um jedoch einen allgemeinen Arbeitsablauf zu bestimmen, der auch auf komplexere Komponenten angewendet werden kann, wurde ein Verfahren zur Netzoptimierung definiert. Insbesondere wurde eine „Sweep“-Methode eingeführt, die zu einem gemischten Netz mit drei Elementen auf den Flächen des Zylinders und vier Elementen auf der Seitenfläche führt (siehe Abbildung II-30).

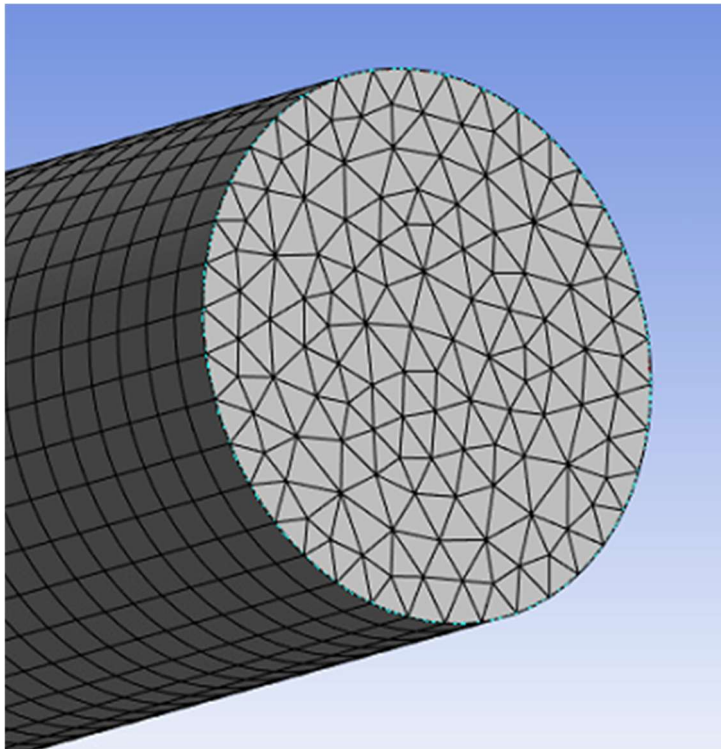
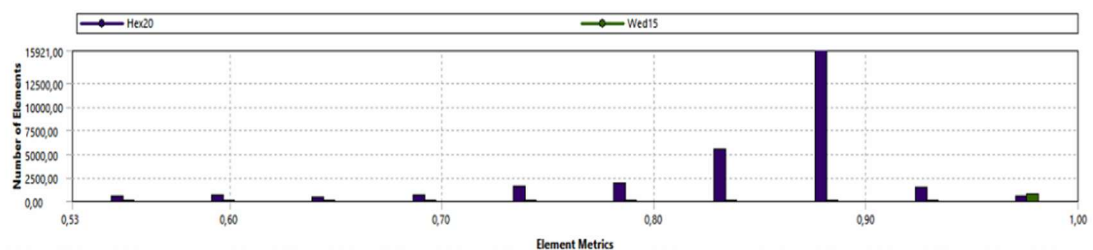
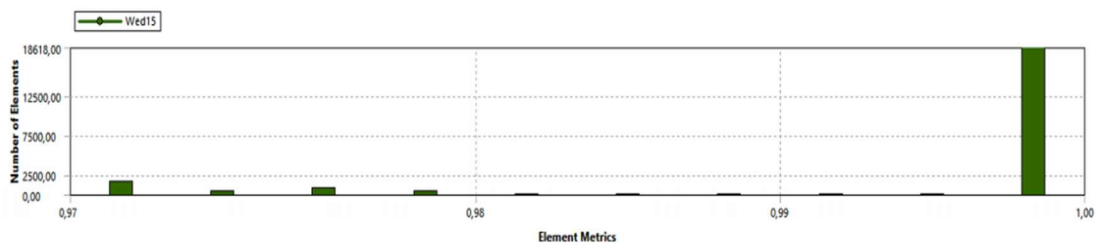


Abbildung II-30: FEM Netz für Zylinder

Dadurch wird die Oberflächenform besser berücksichtigt und die Jacobian Kennzahl erreicht für alle Elemente optimale Werte (siehe Abbildung II-31b). Beachten Sie, dass andere Marker, wie z. B. das Seitenverhältnis, in Kombination mit der Jacobischen berücksichtigt werden sollten, um eine umfassendere und zuverlässigere Bewertung der Netzqualität zu erhalten.



(a) Default meshing



(b) Sweep method

Abbildung II-31: Verteilung der Jacobian Kennzahlen

Nach der Definition der allgemeinen Netzooptionen muss eine Startelementgröße für den Verfeinerungsprozess ausgewählt werden. Als allgemeine Regel sollte ein Wert gewählt werden, der der Größe des kleinsten geometrischen Details des Modells entspricht: in diesem Fall entspricht dies dem Radius des Modells (6 mm). Wenn man von diesem Wert ausgeht, werden

automatische Einstellungen der Elementgröße vermieden, die zu ungewöhnlichen Sprüngen in seinem Wert führen könnten, was die Lesbarkeit der Konvergenzkurve beeinträchtigen würde.

II.1.3.5.6 Festlegung der Netzstruktur

Es ist zu beachten, dass unterschiedliche Materialeigenschaften zu unterschiedlichen Spannungskonzentrationen führen können, was bedeutet, dass ein gültiges Netz für eine bestimmte Materialorientierung für eine andere ungeeignet sein könnte. Da in diesem Fall die Materialeigenschaften der Isotropie recht nahekommen und die Geometrie eher einfach ist, sollte die Netzkonvergenz unabhängig von der Orientierung bei derselben Elementgröße erfolgen. Um jedoch einen möglichst allgemeinen Arbeitsablauf zu entwickeln und diese Hypothese zu validieren, werden alle drei Orientierungen analysiert.

Der gewählte Schritt für die Verfeinerung der Elementgröße beträgt 1 mm und wird beibehalten, bis die Elementgröße 1 mm erreicht. Hier kommt ein weiterer Parameter ins Spiel, der bisher ignoriert wurde: die Laufzeit der Analyse. Da der in II.1.3.5.12 durchgeführte Inversionsprozess aufgrund der hohen Anzahl erforderlicher Simulationen eine relativ kurze Laufzeit erfordert, wird bei Erreichen einer Elementgröße von 1 mm ein Schritt von 0,1 mm gewählt.

Die Ergebnisse der Konvergenzstudie für verschiedene Materialorientierungen sind in Tabelle 5 dargestellt, wobei die Konvergenziteration gelb hervorgehoben ist.

Name	Mesh Element Size [m]	Mesh Nodes	Mesh Elements	Total Deformation @ 7 [Hz]	Variation [%]	Worst Jacobian
DP0	0.006	502	112	6767.4	-	0.907
DP1	0.005	671	152	6771.9	0.0665	0.928
DP2	0.004	1235	322	6780	0.1196	0.881
DP3	0.003	2584	750	6782.1	0.0319	0.887
DP4	0.002	7746	2508	6783	0.0133	0.897
DP5	0.001	60486	21924	6783.2	0.0029	0.967
DP6	0.0009	78399	28608	6783.2	0.0000	0.971
DP7	0.0008	1.17E+05	43340	6783.2	0.0000	0.971

(a) Vertical print

Name	Mesh Element Size [m]	Mesh Nodes	Mesh Elements	Total Deformation @ 7 [Hz]	Variation [%]	Worst Jacobian
DP0	0.006	502	112	6886.4	-	0.907
DP1	0.005	671	152	6890.8	0.0639	0.928
DP2	0.004	1235	322	6899.1	0.1205	0.881
DP3	0.003	2584	750	6901.3	0.0319	0.887
DP4	0.002	7746	2508	6902.1	0.0116	0.897
DP5	0.001	60486	21924	6902.3	0.0029	0.967
DP6	0.0009	78399	28608	6902.3	0.0000	0.971
DP7	0.0008	1.17E+05	43340	6902.3	0.0000	0.971

(b) Horizontal print

Name	Mesh Element Size [m]	Mesh Nodes	Mesh Elements	Total Deformation @ 7 [Hz]	Variation [%]	Worst Jacobian
DP0	0.006	502	112	6782	-	0.907
DP1	0.005	671	152	6786.4	0.0649	0.928
DP2	0.004	1235	322	6794.6	0.1208	0.881
DP3	0.003	2584	750	6796.8	0.0324	0.887
DP4	0.002	7746	2508	6797.6	0.0118	0.897
DP5	0.001	60486	21924	6797.8	0.0029	0.967
DP6	0.0009	78399	28608	6797.8	0.0000	0.971
DP7	0.0008	1.17E+05	43340	6797.8	0.0000	0.971

Abbildung II-32: FEM Netz Einstellungen

Obwohl die siebte Resonanzfrequenz traditionell als Hauptkriterium für die Konvergenz verwendet wird, ist es wichtig zu beachten, dass diese Frequenz im Allgemeinen mit einer einfachen Schwingungsform, in der Regel einer Biegung, verbunden ist, für deren angemessene Beschreibung nicht wirklich eine große Anzahl von Elementen erforderlich ist. Die Situation

ändert sich bei komplexeren Schwingungsformen bei höheren Frequenzen, bei denen die Konvergenz bei einer höheren Elementanzahl eintreten kann.

Obwohl Abbildung II-32 eine Konvergenz bei ziemlich großen Elementgrößen nahelegt ¹, wurde daher beschlossen, aus Sicherheitsgründen ein strengeres Konvergenzkriterium² anzuwenden, was zu einer Konvergenz bei einer Elementgröße von 1mm für alle Druckrichtungen führt, und die ursprüngliche Hypothese bestätigt.

Diese Schlussfolgerung wirft zwei Hauptprobleme auf:

- Die Konvergenz könnte durch die schrittweise Verringerung der Variation der Elementgröße verzerrt werden.
- Es wird davon ausgegangen, dass die Konvergenz innerhalb angemessener Bereiche für die höheren Frequenzen liegt, da die prozentuale Abweichung für die siebte Frequenz Null beträgt, aber auch wenn dies eine durchaus plausible Annahme ist, ist sie nicht sicher.

Die einfachste Möglichkeit, diese Probleme zu lösen, besteht darin, die Konvergenzstudie zu wiederholen und dabei die Konvergenz einer höheren Frequenz mit einer komplexeren Schwingungsform zu berücksichtigen. Dabei sollten alle Ausrichtungen erneut überprüft werden, da es möglich ist, dass unterschiedliche Materialeigenschaften einen höheren Einfluss auf unterschiedliche Schwingungsformen haben. Die Wahl der Frequenz ist nicht trivial, da es sein könnte, dass ein Torsionsmodus, der bei Zwischenfrequenzen auftritt, viel mehr Elemente erfordert, um genau beschrieben zu werden, als ein Biegemodus, der bei höheren Frequenzen auftritt. Daher sollte eine mehrdimensionale Konvergenzstudie durchgeführt werden, die mehrere Frequenzen im hohen Bereich berücksichtigt.

Angesichts der geringen Komplexität der Geometrie und des experimentellen Charakters dieser Studie kann die in Abbildung II-32 dargestellte Lösung derzeit als ausreichend für die folgenden Schritte angesehen werden.

II.1.3.5.7 Ergebnisse der Modalanalyse

Die Ergebnisse der Modalanalyse, die mit den in Festlegung der Netzstruktur festgelegten Einstellungen durchgeführt wurde, sind in Abbildung II-33 dargestellt.

¹ unter Verwendung eines üblichen Konvergenzkriteriums einer prozentualen Abweichung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Iterationen von weniger als 1 %.

² prozentuale Abweichung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Iterationen von 0 %.

Mode [#]	Frequency [Hz]		
	Vertical	Horizontal	At 45°
7	6783.2	6902.3	6797.8
8	6783.2	6903.6	6799.6
9	17357	17641	17400
10	17357	17652	17414
11	17964	18021	18090
12	28607	29120	28662
13	31155	31621	31240
14	31155	31656	31287
15	35927	36041	36180
16	46858	47496	47000
17	46858	47573	47099
18	53891	54062	54271
19	57068	58062	57159
20	63662	64449	63870
21	63662	64583	64041
22	71855	72083	72361
23	81033	81944	81314
24	81033	82149	81572
25	85213	86614	85302
26	88698	90104	90451
27	98610	99613	98965
28	98610	9.99E+04	99326

Abbildung II-33: Modal Analyse für verschiedene Druckrichtungen

Es werden die Moden 7 bis 28 untersucht. Die untere Grenze ist darauf zurückzuführen, dass die ersten 6 Moden Bulk-Moden sind, die durch PCRT schwerer zu erkennen und erfolgreich abzugleichen sind, während die obere Grenze festgelegt wurde, um den Umfang der Analyse auf den Bereich der verfügbaren Vibrometrie-Ergebnisse zu beschränken.

Im folgenden Abschnitt wird ein Vergleich zwischen den drei Druckrichtungen durchgeführt.

II.1.3.5.8 Einfluss der Orientierung in der Druckmaschine

Wie bereits erwähnt, hat die Druckrichtung keinen Einfluss auf die Konvergenz der Maschenweite; dies gilt jedoch nicht für die Resonanzfrequenzen. Ein Vergleich der Variation der Resonanzfrequenzen zwischen den drei Druckrichtungen ist in Abbildung II-34 dargestellt.

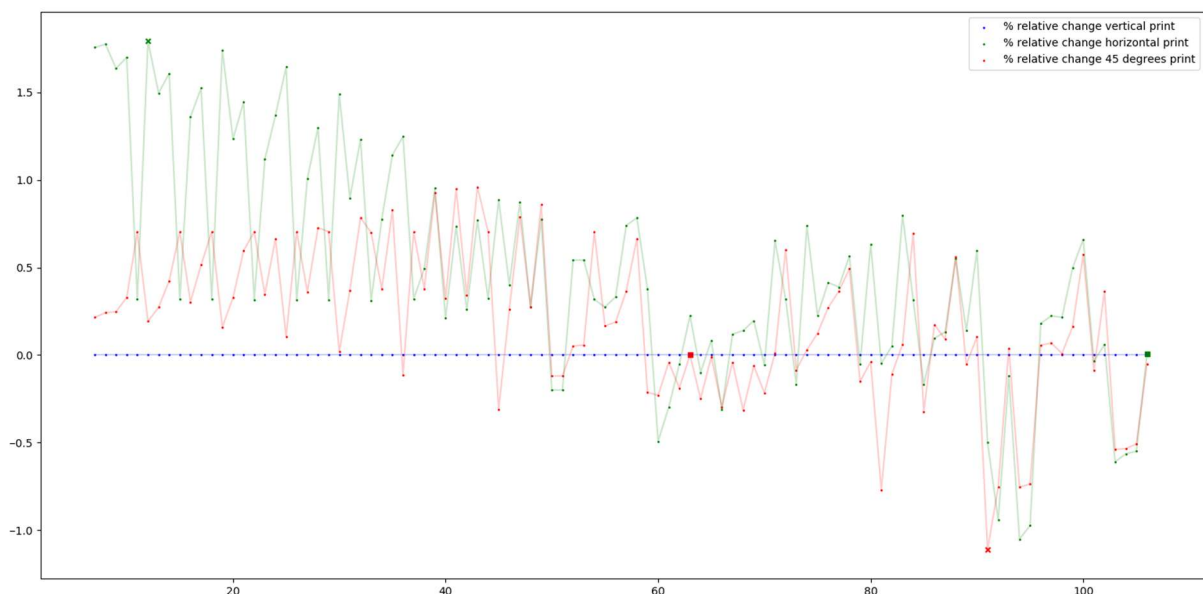


Abbildung II-34: Vergleich der Resonanzfrequenzen der 3 Druckrichtungen

Nimmt man den vertikalen Druck als Maßstab (Variation zu sich selbst = 0), so ist zu erkennen, dass der horizontal gedruckte Teil eine maximale Variation von etwa 1,79 % für Modus 12 erreicht, während der 45°-Druck ein Maximum (absoluter Wert) von -1,11 % für Modus 91 erreicht. Diese Maxima sind in der Grafik mit zwei Kreuzen dargestellt. Die Minimalwerte, bei denen die horizontalen und 45°-Drucke dem Benchmark entsprechen, werden durch zwei Quadrate dargestellt und treten jeweils bei den Modi 106 und 63 auf.

II.1.3.5.9 Einfluss der Material Eigenschaften

Die Variation der Resonanzfrequenzen der drei Druckrichtungen im Vergleich zu einem isotropen Modell ist in Abbildung II-35 dargestellt.

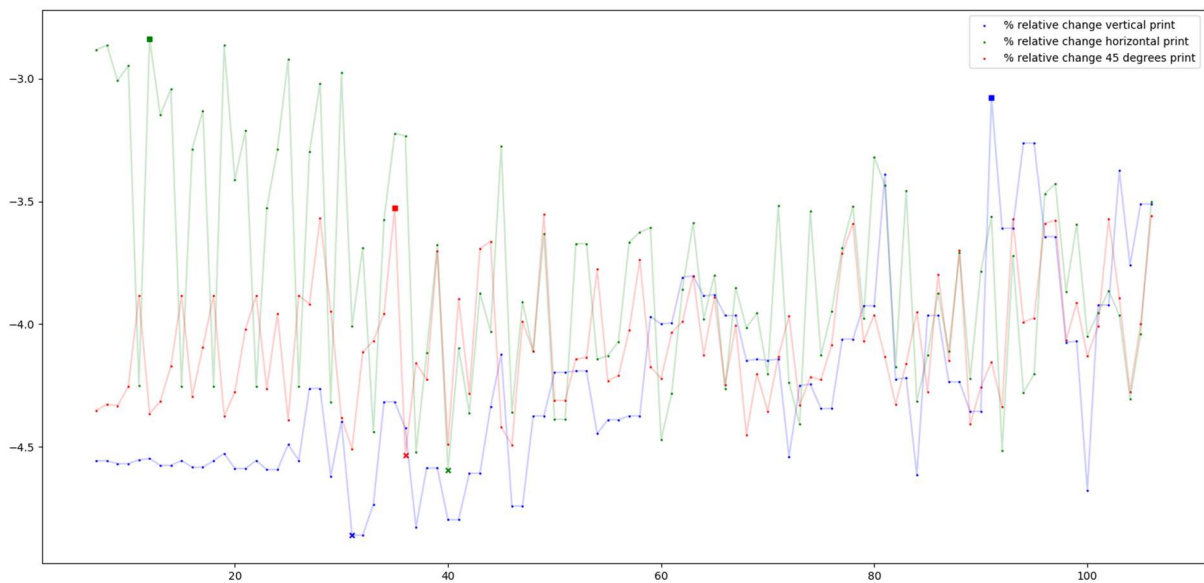


Abbildung II-35: Vergleich der Resonanzen mit einem isotropen Modell

Die gleichen Symbole wie im vorherigen Diagramm werden verwendet, um Maxima und Minima anzuzeigen. Die maximalen (absoluten) Abweichungen betragen 4,85 % für den vertikalen Druck, 4,59 % für den horizontalen Druck und 4,53 % für den 45° Druck. Die minimalen (absoluten) Abweichungen betragen 3,07 % für den vertikalen Druck, 2,83 % für den horizontalen Druck und 3,52 % für den 45° Druck.

II.1.3.5.10 Abgleich mit Laser Vibrometrie

Bei der Inversion stellt der Modenwechsel eine herausragende Fehlerquelle dar. Dieses Phänomen tritt auf, wenn sich die Reihenfolge der Eigenfrequenzen eines Teils ändert, während die Materialeigenschaften während des Inversionsprozesses angepasst werden. Bei der Inversion ist es notwendig, die über PCRT gemessenen Frequenzen mit den modalen Analysefrequenzen zu koppeln, wobei die Übereinstimmung der Geometriemodi als Hauptkriterium verwendet wird. Wenn also die anfängliche Schätzung der Materialeigenschaften einen Austausch eines Paares von Moden oder mehr verursacht und die experimentellen und FEM-Moden in aufsteigender Reihenfolge übereinstimmen, werden einige Moden falsch zugeordnet, was zu einem Fehler im Prozess führt, der wiederum eine falsche Schätzung der endgültigen Eigenschaften des Teils zur Folge hat.

Natürlich sollte bei jeder Iteration des Optimierungsalgorithmus überprüft werden, ob kein Modustausch vorliegt, aber aufgrund des automatisierten Charakters des Prozesses wäre es dazu notwendig, ein komplexes Skript für das Modal Assurance Criterion (MAC; modales Sicherheitskriterium) in den Arbeitsablauf einzuführen.

Um dies zu vermeiden, wird nur die korrekte Reihenfolge der Schwingungsformen in der ersten Schätzung überprüft, um sicherzustellen, dass zu Beginn des Prozesses kein Fehler aufgetreten ist. Dann wird davon ausgegangen, dass während der Optimierung kein Modenaustausch stattfindet, und am Ende wird eine abschließende Vorwärtssimulation zur Validierung durchgeführt, bei der die Schwingungsformen erneut überprüft werden, um sicherzustellen, dass kein Wechsel stattgefunden hat.

Da PCRT keine Informationen über die Schwingungsformen, sondern nur über die Frequenzen liefert, wurde Laservibrometrie zur Hilfe genommen. Mithilfe des Doppler-Prinzips bestimmt die Laservibrometrie sowohl die Resonanzfrequenzen als auch die Schwingungsformen eines Teils, was einen genauen Vergleich mit den Ergebnissen der Modalanalyse und die Identifizierung von Modenwechseln ermöglicht.

Die Ergebnisse lagen für die Seriennummern 008, 050 und 106 vor, wobei 050 ausgehört wurde, weil es unter Standardbedingungen gedruckt wurde. Der verwendete Frequenzbereich liegt zwischen 10 kHz und 100 kHz. Zur Visualisierung und Analyse der Daten wurde die Software „Polytech Scan Viewer“ verwendet.

Um den Vergleich zwischen Modalanalyse und Vibrometrie zu erleichtern, wurde für die Visualisierung der Ergebnisse der Simulationssoftware Ansys eine spezielle Konfiguration gewählt: Zunächst wurden die Verschiebungen in der globalen Z-Richtung (radiale Richtung, fest) berechnet. Anschließend wurde die radiale Richtung des Modells an der Normalen zum Bildschirm ausgerichtet, um den Kamerawinkel senkrecht zum Teil nachzuahmen. Schließlich wurde dasselbe Farbschema für die Datenvisualisierung gewählt, das auch von der Vibrometrie-Software verwendet wird, und der Verformungsmaßstab wurde auf 0 gesetzt, um unerwünschte Verformungen zu vermeiden. Diese Konfiguration führt zu Vergleichen wie in Abbildung II-36 dargestellt.

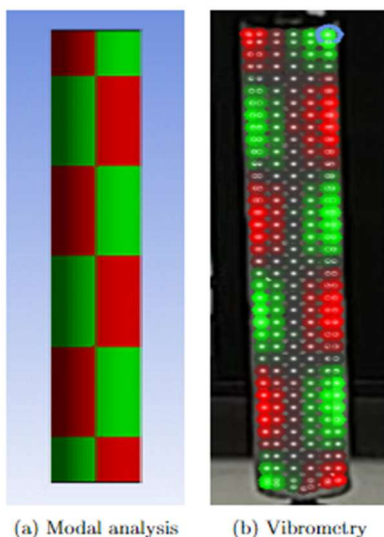


Abbildung II-36: Beispiele für visuell erkennbare Moden

II.1.3.5.11 Vorbereitung für Laser Vibrometrie

Bei der Messung der Bewegung eines Teils außerhalb der Ebene mit Laservibrometrie ist es wünschenswert, die Kamera so zu neigen, dass die erfassbaren Verschiebungen maximiert werden. Im Allgemeinen ist es nicht ideal, die Kamera senkrecht zur Oberfläche zu platzieren, da der Sensor weniger empfindlich auf Bewegungen entlang seiner Achse reagiert (d. h. wenn sich das Objekt direkt auf die Kamera zu oder von ihr weg bewegt, ändert sich die projizierte Position des Objekts auf dem Bildsensor nicht wesentlich). Ein besserer Ansatz wäre es, die Kamera in einem Winkel von 45° zu platzieren, um die Z-Verschiebung auf die Bildebene zu projizieren und leicht erkennbare seitliche Verschiebungen zu erhalten. Dabei ist es wichtig, das System entsprechend zu kalibrieren, um die tatsächliche Z-Verschiebung aus den erkannten zu extrahieren. Eine solche Kalibrierung erfordert die Berücksichtigung der Oberfläche der Teile (Reflexion und Textur) und der präzisen Geometrie, was eine Neukalibrierung für jede Seriennummer erforderlich macht, wenn sich eines dieser Elemente ändert.

Da der Zweck der Vibrometrie in diesem Fall nicht die genaue Berechnung der Verschiebungsgröße, sondern die Bestimmung der Schwingungsformen ist, könnte eine senkrechte Anordnung ausreichen, was Zeit für die Ausrichtung und Kalibrierung spart. Darüber hinaus ist die raue Textur der analysierten unbehandelten Teile vorteilhaft, da sie die Empfindlichkeit der Kamera für Verschiebungen senkrecht zu ihrer Achse erhöht.

Da ein genauer Vergleich jedoch bei der Bestimmung eines optimalen Arbeitsablaufs hilfreich sein könnte, werden beide Kamerakonfigurationen analysiert. Zu diesem Zweck wird Probe 008 verwendet, da sie die einzige ist, für die sowohl Ergebnisse für die senkrechte als auch für die 45° -Achse verfügbar sind. Später werden auch die Ergebnisse von Probe 050 vorgestellt.

Nachdem alle erkennbaren nicht degenerierten³ Schwingungsmoden in der Polytech-Software ausgewählt wurden, wurden sie manuell mit den Schwingungsmoden der Modalanalyse abgeglichen (durch Vergleich der Formen wie zuvor erläutert).

Zur Vereinfachung der Notation werden die Vibrometriemoden in aufsteigender Reihenfolge, beginnend bei etwa 6000 Hz, bezeichnet. Die Ergebnisse dieses Prozesses sind in Abbildung II-37 dargestellt.

³ Ein degenerierter Modus in der Modalanalyse bezieht sich auf mehrere Schwingungsmoden, die dieselbe Eigenfrequenz aufweisen, was in der Regel auf die symmetrischen Eigenschaften des Systems zurückzuführen ist.

	Modal Analysis [Hz]	Vibrometry at 0° [Hz]	Variation [%]
1	6783	7707	13.62
2	17357	17564	1.19
3	17964	18476	2.85
4	28607	-	-
5	31155	32175	3.27
6	35927	36912	2.74
7	46858	48498	3.50
8	53891	55437	2.87
9	57068	59423	4.13
10	63662	65767	3.31
11	71855	73810	2.72
12	81033	83776	3.32
13	85213	88380	3.72
14	89819	92292	2.75

Abbildung II-37: Vergleich Modal Frequenzen Simulation und Vibrometrie bei 0° für Teil 008

Alle Schwingungsformen können der Reihe nach abgeglichen werden, mit Ausnahme von Schwingungsform 4, die von der Vibrometrie-Einrichtung nicht erfasst werden kann. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass Schwingungsform 4 eine nur positive Z-Verschiebung verursacht (siehe Abbildung II-38), die mit einer senkrechten Sensoreinrichtung kaum nachweisbar ist.

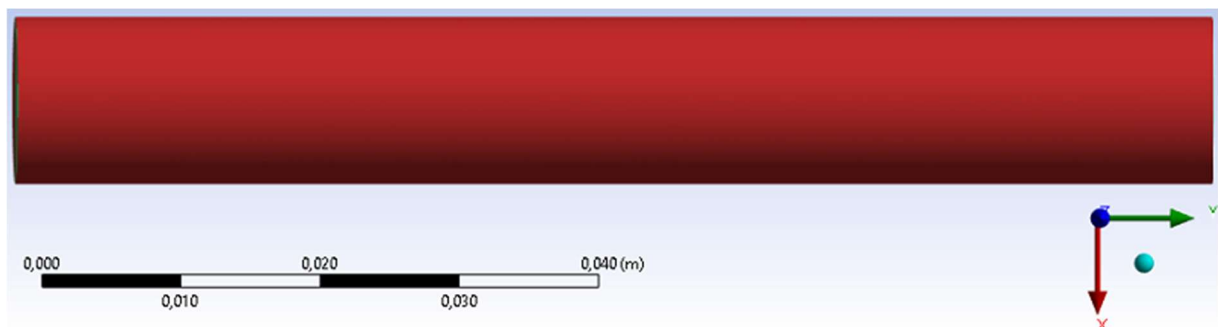


Abbildung II-38: Mode 4 in der Modal Analyse

Es ist auch zu erkennen, dass Mode 1 die höchste Abweichung (13,62 %) zwischen Modalanalyse und Vibrometrie aufweist, was erwartbar ist, da die Frequenzen niedrigerer Modi schwieriger zu bestimmen sind. Aufgrund des geringen Vertrauens in die Referenzfrequenz für diesen Mode und der Tatsache, dass die bei der Inversion verwendeten PCRT-Ergebnisse erst bei 10000 Hz beginnen, wird Mode 1 in den folgenden Abschnitten nicht verwendet.

Mit den gleichen Voraussetzungen und Verfahren, die im vorherigen Abschnitt beschrieben wurden, werden die Ergebnisse in Abbildung II-39 mit einer Laserachse von 45° erzielt.

	Modal Analysis [Hz]	Vibrometry at 45° [Hz]	Variation [%]
1	6783	7701	13.53
2	17357	17570	1.23
3	17964	18476	2.85
4	28607	30146	5.38
5	31155	31150	-0.02
6	35927	36910	2.74
7	46858	48490	3.48
8	53891	55430	2.86
9	57068	59420	4.12
10	63662	65760	3.30
11	71855	73800	2.71
12	81033	83720	3.32
13	85213	88370	3.70
14	89819	92290	2.75

Abbildung II-39: Vergleich Modal Frequenzen Simulation und Vibrometrie bei 45° für Teil 008

Mit einem 45° Winkel können Übereinstimmung erzielt werden, und im Gegensatz zur vorherigen Versuchsaufstellung mit 0° kann Modus 4 fixiert und seine Form bestimmt werden.

Dennoch ist bei den Modi 4, 9 und 13 ein seltsames Verhalten zu beobachten, da ihre Formen nicht mit ihren Pendants in der Modalanalyse übereinstimmen, aber die Nichtübereinstimmung nach einem Muster auftritt (siehe Abbildung II-40).

Wie zu sehen ist, ist in Modus 4 ein „Frequenzband“ in der Modalanalyse vorhanden, während in der Vibrometrie zwei Frequenzbänder angezeigt werden; dieses Muster wiederholt sich in Modus 9 und 13, wobei in den Vibrometrieergebnissen ein zusätzliches Frequenzband angezeigt wird. Da keine anderen Modi vorhanden sind und das Muster konsistent ist, können sie dennoch sicher zugeordnet werden. Dennoch wäre es interessant herauszufinden, was dieses Verhalten verursacht.

Ein erster Schritt zur Erklärung könnte darin bestehen, die Gemeinsamkeiten dieser Modi zu bestimmen. Sobald die 3D-Verformung jedes Modus berechnet ist, ist deutlich zu erkennen, dass die Modi 4, 9 und 13 kompressiv/extensional sind. Dann ist es wichtig zu verstehen, welche Elemente sich zwischen dem virtuellen Aufbau der Modalanalyse und dem experimentellen Aufbau der Vibrometrie unterscheiden. Der Hauptunterschied liegt natürlich in den Grenzbedingungen, da die Modalanalyse in einer frei-frei-Konfiguration (keine Grenzbedingungen) stattfindet, während bei der Vibrometrie-Konfiguration die Zylinder zwischen den Piezo Sensoren eingespannt sind.

Schließlich können diese beiden Beobachtungen kombiniert werden: Da der Zylinder an seinen Enden eingespannt ist, können sich die Druck-/Dehnungsmoden nicht so ausprägen, wie in einer freien Konfiguration. Die Folgen davon lassen sich leicht für Modus 4 veranschaulichen: Durch die Randbedingungen wird die Verformung beeinflusst und verursacht eine Biegung im Teil (daher das „Bandmuster“).

Um diese Hypothese zu validieren, kann eine Reihe von Randbedingungen (RB) in den Simulationsaufbau integriert werden. Wie bereits erwähnt, führt die Modalanalyse jedoch häufig zu übertriebenen und unrealistischen Verformungen, insbesondere im Bereich der angewandten Randbedingungen, wodurch die Ergebnisse unzuverlässig werden.

Dies kann auf zwei verschiedene Arten gelöst werden: Die erste Möglichkeit wäre die Durchführung einer harmonischen Analyse, um realistische Verformungen zu erzeugen. Der Hauptnachteil dieser Methode ist die längere Einrichtungszeit und die zusätzlichen Anforderungen im Prozess der Definition von Lasten und Randbedingungen sowie eine längere Laufzeit für jede Simulation, was sich während des iterativen Optimierungsprozesses sehr schnell summiert. Die zweite Lösung besteht darin, die Randbedingungen zu verändern, die zwar weniger realistisch, aber dennoch repräsentativ für die ursprünglichen Randbedingungen sind. Die Konfiguration der Modal-Analyse wird nicht verändert. Auch wenn dies zu gröberen Ergebnissen führt, kann es dennoch verwendet werden, um die Auswirkungen der Randbedingungen auf die Schwingungsformen zu bestimmen. Nach Abwägung der Vor- und Nachteile wurde der zweite Ansatz bevorzugt, bei dem eine Beschränkung auf die axiale Translation aller Punkte auf jeder der Zylinderflächen gewählt wurde, während sowohl die radiale Verschiebung als auch vollständige Drehungen in alle Richtungen weiterhin möglich sind.

Mit diesem Ansatz wurde eine exakte Übereinstimmung mit allen 14 Schwingungsformen der 45-Grad-Vibrometrie erzielt, wodurch die bei den Schwingungsformen 4, 9 und 13 beobachtete Nichtübereinstimmung behoben wurde. Dennoch kam es als Nebeneffekt zu einer beträchtlichen Verschiebung vieler Frequenzen, was zu vielen Modenwechseln führte.

Dies ist nur eine mögliche Erklärung für das Phänomen, und es sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um die genauen Gründe zu ermitteln. Es wäre beispielsweise interessant zu verstehen, warum dieses Verhalten bei der 0°-Vibrometrie nicht auftritt.

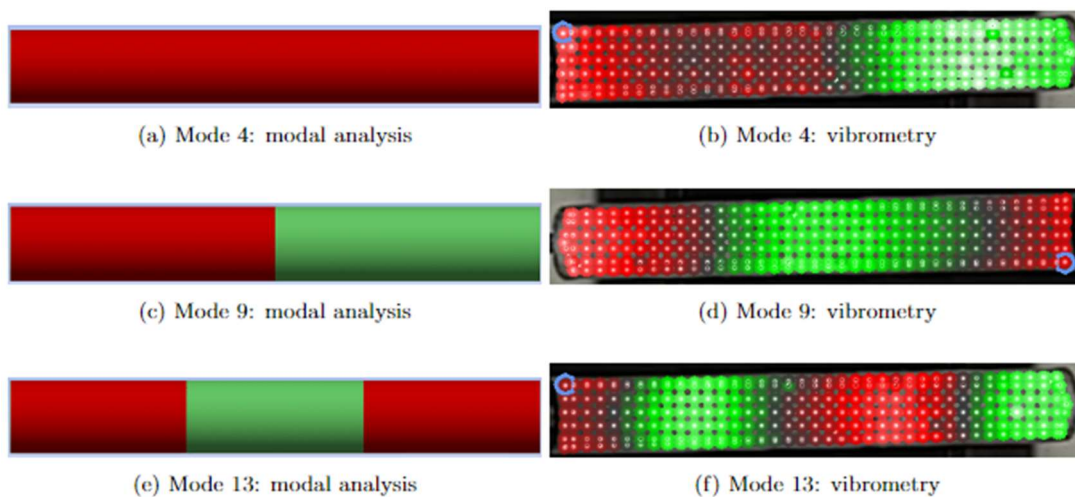


Abbildung II-40: Vergleich der abweichenden Schwingungsformen Mode 4, 9 und 13

Zusammenfassend halten wir fest: Da kein Interesse daran besteht, die genaue Größe der Verschiebungen für die Inversion zu bestimmen, stellt eine 0°-Einstellung den besten Kompromiss zwischen zuverlässigen Daten und der dafür erforderlichen Zeit dar. Bei korrekter Kalibrierung und Kenntnis der Diskrepanz bei den Kompressions-/Extensionsmodi ist die 45°-Einstellung eine gültige Alternative, wenn die Bestimmung aller Modi mit einem höheren Präzisionsgrad von entscheidender Bedeutung ist, da Modus 4 durch die 0°-Einstellung nicht fixiert werden konnte.

Da festgestellt wurde, dass die nicht übereinstimmenden Schwingungsformen in der 45°-Vibrometrie alle mit den jeweiligen Schwingungsformen in der Modalanalyse verknüpft werden können, wurde diese Anordnung auch für die Probe verwendet, die im Inversionsprozess verwendet werden sollte (Seriennummer 050). Die Ergebnisse sind in Abbildung II-41 dargestellt.

	Modal Analysis [Hz]	Vibrometry at 45° [Hz]	Variation [%]
1	6783	7517	10.82
2	17357	17511	0.89
3	17964	18544	3.23
4	28607	30867	7.90
5	31155	32523	4.39
6	35927	37169	3.46
7	46858	49197	4.99
8	53891	55697	3.35
9	57068	60541	6.09
10	63662	66531	4.51
11	71855	74250	3.33
12	81033	84560	4.35
13	85213	90021	5.64
14	89819	92810	3.33

Abbildung II-41: Vergleich Modal Frequenzen Simulation und Vibrometrie bei 45° für Teil 050

Sowohl Mode 1 als auch 4 zeigen eine erhebliche Abweichung zwischen den Ergebnissen der Modalanalyse und der Vibrometrie, was dazu führt, dass im folgenden Abschnitt eine Auswahl der zu verwendenden Modi getroffen werden muss.

II.1.3.5.12 Inversion mit optiSLang

In diesem Abschnitt wird der Inversionsprozess detailliert beschrieben. Kurz gesagt besteht die Idee dahinter darin, von einer anfänglichen Schätzung der Materialeigenschaften des Bauteils (Probe 050, vertikale Druckrichtung) auszugehen und eine Modalanalyse durchzuführen; anschließend werden die berechneten Resonanzfrequenzen mit den PCRT-Ergebnissen für dasselbe Bauteil verglichen und eine Zielfunktion definiert, um den Optimierungsprozess voranzutreiben. Schließlich werden die Eingabevariablen innerhalb eines vordefinierten Bereichs durch einen Optimierungsalgorithmus angepasst, bis eine Konvergenz erreicht ist.

Die Ausgangswerte für die Materialparameter des Optimierungsprozesses sind in Abbildung II-29 definiert. Zur Erinnerung: Als Materialmodell wurde die transversale Isotropie gewählt, und die angegebenen Werte sind ein Durchschnitt der Ergebnisse einer Zugversuchskampagne. Die fehlenden Ergebnisse der Scherversuche reduzieren die Anzahl der unabhängigen Parameter von fünf auf vier, da beide Schermodule aus der maßgeblichen Gleichung des isotropen Verhaltens abgeleitet werden müssen.

Da die Starteigenschaften ein Durchschnitt vieler Proben sind, stellen sie eine vernünftige erste Schätzung für das Material dar, unterscheiden sich aber dennoch ausreichend von den Eigenschaften der spezifischen Probe, die wir analysieren, sodass eine Inversion als Feinabstimmungslösung gerechtfertigt ist, um Herstellungsfehler und Empfindlichkeitsbereiche von Zugversuchen zu berücksichtigen.

Was die Dichte der Probe (ρ) betrifft, so wird ein fester Wert im Inversionsprozess verwendet. Dies wurde hauptsächlich aus zwei Gründen getan:

- In einer Vorstudie wurde festgestellt, dass kleine Änderungen der Dichte den OF-Wert stark beeinflussen, sodass der Algorithmus diese Variation bevorzugt, um eine Minimierung des endgültigen Restwerts zu erreichen. Dies erhöht die Anzahl der Parameterkombinationen, die zu einer OF-Minimierung führen, erheblich, was wiederum zu unzuverlässigen Ergebnissen führt. Im Allgemeinen ist es wünschenswert, die Anzahl unabhängiger Parameter zu minimieren, um die Zuverlässigkeit (z. B. Genauigkeit, Wiederholbarkeit) zu erhöhen.
- Darüber hinaus ist es in diesem speziellen Fall aufgrund der einfachen Probengeometrie relativ einfach, die Dichte auch ohne Spezialausrüstung zu ermitteln. Daher sollte die Idee, eine Schwingungsinversion zur Bestimmung einer solchen Eigenschaft zu implementieren, verworfen werden.

Da keine Einrichtung für Archimedes-Messungen zur Verfügung stand, wurde eine einfache Messkampagne durchgeführt, bei der der Durchmesser und die Höhe der Probe mit einem digitalen Messschieber und die Masse mit einer digitalen Waage ermittelt wurden, wie in Tabelle 2 dargestellt. Anschließend wurde die Dichte von Probe 050 durch Mittelung der drei Messungen gemäß ihrer Definition ($\rho = \text{Masse/Volumen}$) ermittelt, was zu folgendem Ergebnis führte:

$$\rho = \frac{m}{\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 H} = \frac{42.37 \text{ [g]}}{\pi \left(\frac{11.97}{2} \text{ [mm]}\right)^2 \times 86.16 \text{ [mm]}} = 0.004372 \text{ [g/mm}^3\text{]}$$

Wie bereits erläutert, wird in dieser Untersuchung ein modifiziertes transversal isotropes Modell verwendet. Da die Software Ansys keine Definition der transversalen Isotropie zulässt (nur Isotropie, Orthotropie und Anisotropie sind verfügbar), wird ein solches Materialmodell durch manuelle Eingabe desselben Wertes für verschiedene Parameter (z. B. E_x wird auf denselben Wert wie E_y gesetzt) eines orthotropen Modells erstellt. Daher werden beim Start eines Optimierungslaufs in optiSLang alle neun Parameter als unabhängig betrachtet, und im optimierten Satz könnten Beziehungen zwischen ihnen bestehen, die die Einschränkungen der transversalen Isotropie nicht berücksichtigen (z. B. $E_x \neq E_y$).

Natürlich gibt es Lösungen für dieses Problem. Eine davon ist die APDL-Skripterstellung, mit der einige Parameter am Ende einer Optimierungsiteration überschrieben werden können, um die transversale Isotropie aufrechtzuerhalten. Eine andere, schneller zu implementierende Methode ist die Festlegung der Parameterbeziehungen in Ansys Mechanical. Beispielsweise kann E_y als abhängiger Parameter festgelegt werden, indem er mit der Gleichung $E_y = E_x$ anstelle eines Werts definiert wird, während E_x natürlich als unabhängiger Parameter beibehalten wird, der durch einen bestimmten Wert definiert wird, der dann durch den Optimierungsalgorithmus variiert wird.

Obwohl diese Lösungen existieren, könnte es von Vorteil sein, sie nicht sofort umzusetzen. Tatsächlich ist die transversale Isotropie ein angenommenes Verhalten für die Komponente, und idealerweise liegen die realen Eigenschaften nahe daran; dennoch ist es sehr wahrscheinlich, dass es kleine Abweichungen gibt, und wenn man zulässt, dass die Parameter frei variieren, könnte man sie besser berücksichtigen und die Vorhersage verbessern. Andererseits könnte die Berücksichtigung von neun unabhängigen Parametern dem Algorithmus zu viel Freiheit geben und Parameterkombinationen ermöglichen, die zwar immer noch eine Minimierung der Zielfunktion bewirken, aber überhaupt nicht repräsentativ für die realen Eigenschaften sind. Dieses Problem wird im Folgenden genauer untersucht und es werden mögliche Lösungen vorgeschlagen. Vorerst wird ein Modell mit neun unabhängigen Parametern implementiert und bei Bedarf werden Änderungen vorgenommen.

Der Optimierungsalgorithmus benötigt den minimalen und maximalen Wert, den jeder Parameter im Prozess annehmen kann, daher muss für jeden Parameter ein Bereich definiert werden. Dies ist wahrscheinlich der wichtigste Schritt im Prozess, da ein zu weites „Öffnen“ der Bereiche zu ähnlichen Ergebnissen führen kann wie eine hohe Anzahl unabhängiger Parameter, sodass der Algorithmus auf eine Reihe von Minima zugreifen kann, die zwar eine bessere OF-Minimierung als die tatsächliche Lösung bieten, aber einen Parametersatz erzeugen, der nicht repräsentativ für die tatsächlichen Eigenschaften des Materials ist. Andererseits könnte ein zu starkes „Schließen“ der Bereiche die tatsächliche Lösung aus dem untersuchbaren Raum ausschließen. Ein Indikator für ein Optimum außerhalb eines definierten Bereichs ist der endgültige invertierte Wert eines Parameters, der an einem der beiden Enden der Parametergrenzen liegt.

Um die Angelegenheit zu verkomplizieren, muss jeder Bereich einzeln definiert werden, und Änderungen an einem dieser Bereiche können dazu führen, dass sich das Optimum für andere Parameter außerhalb des definierten Bereichs verschiebt.

Im Idealfall sollte man erwarten, dass die Poisson-Verhältnisse sehr nahe an ihren Ausgangswerten liegen, da sie während der Herstellung nicht stark variieren sollten, was dazu führt, dass ihre Bereiche enger sind als die der anderen. Als Ausgangspunkt wird jedoch für jeden Parameter eine Abweichung von $\pm 20\%$ zugelassen. Diese Anfangseinstellungen sollen die Gewissheit bieten, dass die tatsächliche Lösung in dem vom Algorithmus erforschbaren Raum enthalten ist, und können verfeinert werden, wenn die Inversion unrealistische Ergebnisse liefert.

Um den Inversionsprozess voranzutreiben, muss eine Zielfunktion (OF) definiert werden. Unter Bezugnahme auf Abbildung II-41 können die Modi 1 und 4 als Ausreißer identifiziert werden, da die Ergebnisse von Modal- und Vibrometrie-Messung stark voneinander abweichen. Da die Ausreißer-Variationen konsistent sind, aber innerhalb vernünftiger Grenzen liegen, und der Gesamtpool an Frequenzen, die verwendet werden können, eher klein ist, und im Allgemeinen eine höhere Anzahl von Termen in der OF zu einem besseren Ergebnis führen sollte, ist es hier ein guter Ansatz, alle Modi in einem ersten Inversionslauf zu berücksichtigen und zur OF-Definition zurückzukehren, wenn die Ergebnisse nicht zufriedenstellend sind.

Durch die unterschiedlichen Messbereiche die zwischen PCRT und Vibrometrie verwendet wurden wird der Modenpool auf 13 beschränkt. Die in der OF-Definition verwendeten PCRT-Messungen sind in Abbildung II-42 aufgeführt, zusammen mit den abgeglichenen Frequenzen der Modal-Analyse.

	Modal Analysis [Hz]	PCRT [Hz]	Variation [%]
1	17357	18339	5.6577
2	17964	18710	4.1528
3	28607	30332	5.9985
4	31155	32695	4.9430
5	35927	37191	3.5182
6	46858	49086	4.7548
7	53891	55712	3.3790
8	57068	60293	5.6512
9	63662	66631	4.6637
10	71855	74214	3.2830
11	81033	84754	4.5920
12	85213	89831	5.4193
13	89819	92779	3.2952

Abbildung II-42: Auswahl PCRT Frequenzen für die OF Definition

Zu beachten ist die geänderte aufsteigende Sortierung nachdem der Mode unter 10-kHz ausgeschlossen wurde. Die verwendete OF Formel ist in Abbildung II-43 erläutert.

$$OF = |f_{1 \text{ modal}} - f_{1 \text{ PCRT}}| + |f_{2 \text{ modal}} - f_{2 \text{ PCRT}}| + \dots + |f_{13 \text{ modal}} - f_{13 \text{ PCRT}}|$$

Abbildung II-43: Verwendete OF-Formel

Natürlich können verfeinerte OFs entwickelt werden, indem Techniken wie Gewichtungen für jeden Term, Manhattan-Distanz oder quadratische Normen eingeführt werden. Aus Zeitgründen (da alle folgenden Schritte einmal für jede OF durchgeführt werden müssen) konnte kein Vergleich zwischen verschiedenen OFs durchgeführt werden, um die Auswirkungen dieser Modifikationen zu bestimmen, aber weitere Analysen werden empfohlen.

Eine weitere Überlegung muss hinsichtlich der Art des OF selbst angestellt werden. Wie bereits erwähnt, kann der Designumfang aufgrund zu vieler Parameter oder zu großer Parameterbereiche mehrere Optima für OF enthalten, die nur auf der Minimierung der Residuen basieren, wobei einige eine bessere Übereinstimmung mit dem PCRT aufweisen als die, die wir mit den tatsächlichen Materialeigenschaften erhalten würden. Um dieses Problem zu entschärfen, kann eine Inversion mit mehreren Kriterien durchgeführt werden, mit zusätzlichen Einschränkungen, die zu große Abweichungen von der anfänglichen Schätzung der Materialeigenschaften bestrafen, die nahe genug an den tatsächlichen Werten liegen sollten (insbesondere in dieser spezifischen Studie, in der die durchschnittlichen Eigenschaften von Zugversuchen als anfängliche Schätzung verwendet wurden). Einfache zusätzliche Ziele wurden mit geringem Erfolg umgesetzt, was auf die Notwendigkeit verfeinerter Lösungen hindeutet; auch hier werden weitere Studien empfohlen.

Sobald die Zielfunktion definiert ist, beginnt die Optimierung, die mit der Software Ansys optiSlang durchgeführt wird, und als erster Schritt wird ein Metamodell erstellt. Ein Metamodell (oder Ersatzmodell) ist im Zusammenhang mit der FEM ein mathematisches Modell oder eine

Funktion, die die Beziehung zwischen Eingabeparametern und Ausgaben des Modells annähert. Durch die Verwendung einer mathematisch definierten Antwortfläche anstelle von FEM-Simulationen wird die Rechenzeit für jeden Optimierungslauf drastisch reduziert.

Zur Erstellung der Response Surface Methodik verwendet die Software Daten, die aus einer Reihe von Stichproben (d. h. einer Reihe von FEM-Simulationen mit unterschiedlichen Kombinationen von Eingabeparametern) generiert werden, die durch eine von vielen verschiedenen Stichprobenverfahren definiert werden. Zu den beliebtesten gehört das Advanced Latin Hypercube Sampling: Einfach ausgedrückt ist das reguläre LHS eine statistische Methode, bei der der Eingabebereich basierend auf der Gesamtzahl der Stichproben in Intervalle unterteilt wird und dann für jedes Intervall eine Stichprobe zufällig ausgewählt wird, sodass der gesamte Bereich jeder Variablen gleichmäßig untersucht wird. In der erweiterten Version der Methode wird die Stichprobenverteilung verfeinert, um die Eingabekorrelation zu minimieren oder den Abstand zwischen den Stichprobenpunkten zu maximieren. Sobald das Metamodell erstellt ist, wird ein Optimierungsalgorithmus ausgewählt, und im Falle mehrerer Algorithmen muss ihre Beziehung definiert werden (z. B. Reihenfolge der Anwendung, globaler/lokaler Umfang).

Für diese Studie wurde ein auf einem adaptiven Metamodell basierender Optimierungsprozess (AMOP) implementiert: Kurz gesagt beginnt der Optimierungsprozess bereits während der Erstellung des Metamodells, sodass die Stichprobenauswahl angepasst wird, um die Genauigkeit des Modells im interessierenden Bereich (d. h. um das Optimum herum) zu verbessern, und ein erster grob optimierter Satz von Eingabeparametern für die ausgewählten Optimierungsalgorithmen verfügbar ist.

Beachten Sie, dass für die Stichprobenbildung ein Wertebereich für jeden Parameter definiert werden muss und in der Regel ein großer Bereich bevorzugt wird, solange die Stichprobendichte zufriedenstellend ist, sodass während der Optimierung Verfeinerungen der Bereiche durchgeführt werden können, ohne dass neue Metamodelle erstellt werden müssen. In diesem Fall wird jedoch, da ein AMOP verwendet wird, bei jeder Neubewertung der Parameterbereiche ein neues Metamodell erstellt, sodass selbst der vorläufige Optimierungslauf durch das AMOP ordnungsgemäß auf die gewünschten Eigenschaften ausgerichtet ist. Darüber hinaus haben Experimente gezeigt, dass die Durchführung einer Optimierung unter Verwendung eines Metamodells mit nicht übereinstimmenden Bereichen zu unregelmäßigen Ergebnissen führt, aber diesbezüglich sollten weitere Analysen durchgeführt werden.

Als erster Ansatz zur Bestimmung des besten zu verwendenden Optimierungsalgorithmus wurden verschiedene Algorithmen mit Standardeinstellungen⁵ getestet und ihre OF-Residuen bei Konvergenz verglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung II-44 dargestellt.

	ARSM	EA	NLPQL	PSO	SIMPLEX
Young's Modulus X direction [Pa]	1.31358e+11	9.31088e+10	9.04542e+10	1.23917e+11	1.33663e+11
Young's Modulus Y direction [Pa]	9.74624e+10	9.73329e+10	1.02528e+11	9.27593e+10	9.01649e+10
Young's Modulus Z direction [Pa]	1.18174e+11	1.1889e+11	1.18392e+11	1.18153e+11	1.18393e+11
Shear Modulus XY [Pa]	3.98215e+10	5.10676e+10	5.06656e+10	3.75628e+10	4.03134e+10
Shear Modulus XZ [Pa]	4.58293e+10	4.45346e+10	4.66719e+10	4.56027e+10	4.26644e+10
Shear Modulus YZ [Pa]	4.40378e+10	4.49151e+10	4.29718e+10	4.41999e+10	4.7058e+10
Poisson's Ratio XY	0.24114	0.25393	0.261359	0.301328	0.240152
Poisson's Ratio XZ	0.279913	0.249206	0.262837	0.252423	0.264476
Poisson's Ratio YZ	0.296455	0.273242	0.318234	0.223817	0.254474

Abbildung II-44: Vergleich der Parameter verschiedener Algorithmen

Beachten Sie, dass sowohl die „Nichtlineare Programmierung durch quadratische Lagrange-Funktion“ (NLPQL), die „Adaptive Response Surface Method“ (ARSM) als auch die „Downhill Simplex Method“ (SIMPLEX) deterministische Methoden sind, sodass sie bei gleichen Startparametern und -bedingungen bei jedem Durchlauf das gleiche Ergebnis liefern, während die „Particle Swarm Optimization“ (PSO) und der „Evolutionary Algorithm“ (EA) sind von der Natur inspirierte stochastische Methoden, die aufgrund ihres probabilistischen Charakters bei verschiedenen Programmausführungen leicht unterschiedliche Ergebnisse liefern.

Mit den in Abbildung II-44 ermittelten Parametern können wir den OF-Restwert (im Folgenden „Abweichung“ genannt) mithilfe des Metamodells berechnen. Anschließend wird eine Vorwärts-FEM-Validierung durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Prozesses sind in Abbildung II-45 dargestellt.

	ARSM	EA	NLPQL	PSO	SIMPLEX
Difference (Metamodel) [Hz]	556.995	826.671	597.1	1318.08	1276.96
Difference (FEM) [Hz]	1771	1752	1782	1655	2206

Abbildung II-45: Unterschiede der Algorithmen

Es ist offensichtlich, dass einige Methoden durch das Metamodell bessere Ergebnisse liefern als andere, aber fast alle FEM-Simulationen liegen recht nah beieinander. Dies ist besorgniserregend, da Abbildung II-44 zeigt, dass einige der vorhergesagten Eingaben zwischen den beiden Methoden recht unterschiedlich sind (z. B. Poisson-Verhältnis XY zwischen ARSM und PSO).

Daraus lässt sich schließen, dass 1) einige Parameter fast keinen Einfluss auf den Unterschied haben, was es extrem schwierig macht, sie umzukehren, oder 2) sehr unterschiedliche Kombinationen von Eingabeparametern ähnliche Unterschiede erzeugen können, was die gesamte Umkehrung erschwert. Dieses Problem wird im Folgenden näher erläutert.

Zunächst sollte ein Algorithmus ausgewählt werden, und da aus dem vorherigen Vergleich keine schlüssigen Ergebnisse gezogen werden können, wird eine Auswahl aus allgemeinen Überlegungen getroffen. Da es wichtig ist, die Konvergenz zu lokalen Minima zu verhindern, sollte ein erster Algorithmus mit globalem Umfang angewendet werden: Zu diesem Zweck stellt ein evolutionärer Algorithmus mit globalen Einstellungen eine gute Wahl dar. Wie bereits erwähnt, handelt es sich hierbei um eine stochastische Methode, die eine Wiederholbarkeit verhindert. Um dieses Problem zu lösen und die Lösung weiter zu verfeinern, kann nach der globalen Methode eine lokale deterministische Methode angewendet werden: Ein guter Kandidat ist NLPQL, das bei einer bestimmten, durch den EA definierten Umgebung immer den gleichen Satz optimierter Parameter erzeugen sollte. Der Inversions-Workflow ist in Abbildung II-46 dargestellt.

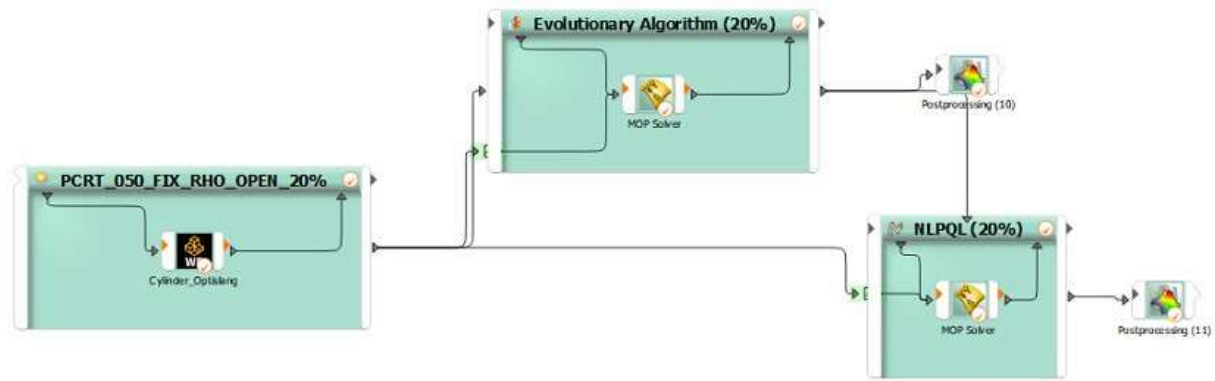


Abbildung II-46: Inversions-Workflow

Um zu beweisen, dass der gewählte Optimierungsablauf konsistente Ergebnisse liefert, wurden mehrere Programmdurchläufe mit derselben Bereichsdefinition ($\pm 20\%$ für alle Parameter) durchgeführt, und die Ergebnisse sind in Abbildung II-47 aufgeführt.

	Run #1	Run #2	Run #3	AVG	ST. DEV.	% ST. DEV.
Young's Modulus X direction [Pa]	1.155E+11	1.093E+11	1.126E+11	1.124E+11	3.100E+09	2.76
Young's Modulus Y direction [Pa]	9.659E+10	1.015E+11	9.910E+10	9.907E+10	2.454E+09	2.48
Young's Modulus Z direction [Pa]	1.185E+11	1.181E+11	1.181E+11	1.183E+11	2.286E+08	1.93
Shear Modulus XY [Pa]	3.340E+10	3.720E+10	3.675E+10	3.578E+10	2.072E+09	5.79
Shear Modulus XZ [Pa]	4.617E+10	4.611E+10	4.586E+10	4.605E+10	1.666E+08	3.62
Shear Modulus YZ [Pa]	4.372E+10	4.370E+10	4.398E+10	4.380E+10	1.544E+08	3.53
Poisson's Ratio XY	2.483E-01	2.456E-01	2.402E-01	2.447E-01	4.133E-03	1.69
Poisson's Ratio XZ	3.154E-01	2.871E-01	2.886E-01	2.970E-01	1.590E-02	5.35
Poisson's Ratio YZ	2.784E-01	3.156E-01	3.036E-01	2.992E-01	1.895E-02	6.33
Difference (Metamodel) [Hz]	5.321E+02	5.278E+02	5.550E+02	5.383E+02	1.467E+01	2.73
Difference (FEM) [Hz]	1.75E+03	1.96E+03	1.97E+03	1.892E+03	1.242E+02	6.57

Abbildung II-47: Ergebnisse der 2-stufigen Optimierung

Eine bemerkenswerte Beobachtung ist, dass die zweistufige Optimierung im Durchschnitt etwas schlechter abschneidet als eine einzelne NLPQL in Bezug auf die Reduzierung der OF-Residuen, was letztere als beste Option für den Inversionsprozess (auch in Bezug auf die Ausführungszeit) nahelegt. Bei Versuchen wurde jedoch beobachtet, dass die zweistufige Methode bei einer Reduzierung der Parameterbereiche konsistenter arbeitet; daher wird sie für die folgenden Schritte der einzelnen NLPQL vorgezogen.

Die Parameter, die Werte an ihrer unteren oder oberen Grenze ($\pm 20\%$) annehmen, sind orange hervorgehoben. In einem normalen Optimierungsprozess bedeutet ein Parameter, der einen oberen/unteren Grenzwert annimmt, einfach, dass dieser Wert das beste Design darstellt, wenn die Bereiche so gewählt wurden, dass sie innerhalb bestimmter anderer Entwurfsgrenzen bleiben und nicht weiter erweitert werden können. Bei der Inversion gibt es jedoch keine Einschränkung für die weitere Erweiterung eines Bereichs, wenn ein Parameter einen oberen/unteren Grenzwert annimmt, sodass das tatsächliche Optimum (d. h. die tatsächliche Materialeigenschaft) gefunden werden kann. Das Problem dabei ist, dass wiederum unrealistische Lösungen entstehen, wenn dem Algorithmus Zugang zu einem sehr großen Entwurfsraum gewährt wird. Eine Möglichkeit, das Problem zu entschärfen, besteht darin, mehrere Durchläufe durchzuführen, sodass der Durchschnitt dieser Durchläufe innerhalb der Bereiche bleibt.

Das optimale Ergebnis wurde erreicht, indem jeder Parameterbereich einzeln auf iterative Weise angepasst wurde. Die endgültige Bereichskonfiguration ermöglicht eine Abweichung von $\pm 2 \%$ für die Poisson-Verhältnisse und eine Abweichung von $\pm 10 \%$ für alle anderen Parameter, und die Ergebnisse daraus sind in Abbildung II-48 aufgeführt (werte bezogen auf die Standardwerte gemäß Abbildung II-47).

	Run alt.	Variation [%]
Young's Modulus X direction [Pa]	1.107E+11	-1.51
Young's Modulus Y direction [Pa]	1.138E+11	14.91
Young's Modulus Z direction [Pa]	1.183E+11	-0.02
Shear Modulus XY [Pa]	4.715E+10	31.75
Shear Modulus XZ [Pa]	4.479E+10	-2.72
Shear Modulus YZ [Pa]	4.456E+10	1.73
Poisson's Ratio XY	2.979E-01	21.76
Poisson's Ratio XZ	2.701E-01	-9.08
Poisson's Ratio YZ	2.717E-01	-9.18
Difference (Metamodel) [Hz]	7.248E+02	34.66
Difference (FEM) [Hz]	1.082E+03	-42.82

Abbildung II-48: Vergleich der Ergebnisse bezogen auf den Mittelwert

Die Parameter, die gebundene Werte annehmen, sind orange hervorgehoben. Da der Ausgangspunkt für den Optimierungsprozess der Mittelwert der Zugversuche war, scheint die zweite Metamodell-Lösung (d. h. die Kombination der Parameterbereiche $\pm 10 \%$ und $\pm 2 \%$) die realistischste zu sein, da sie diesen am nächsten kommt und gleichzeitig der transversalen Isotropie am nächsten kommt.

Es ist offensichtlich, dass eine Einschränkung des Design-Raums zu einer Erhöhung der berechneten Differenz des Metamodells um 34,7 % führt, da der Algorithmus weniger Optima erreichen kann. Auffällig ist jedoch, dass eine Verringerung der berechneten FEM-Differenz um 43 % beobachtet wird, wobei viele Parameter Werte annehmen, die sich stark von den AVG-Werten unterscheiden (bis zu 32 % Unterschiede).

Da die neuen Bereiche von Beginn des Prozesses an implementiert wurden, einschließlich der Erstellung eines zweiten Metamodells, ist die einfachste Erklärung dafür, dass das Metamodell mit $\pm 20 \%$ eine geringe Vorhersagequalität hatte, möglicherweise aufgrund schlechter Standardeinstellungen für die Stichprobe. Eine Analyse der Prognosekoeffizienten (CoP) scheint dies jedoch nicht zu bestätigen, da sie mit denen des zweiten Metamodells vergleichbar waren. Dennoch wurden Experimente durchgeführt, bei denen versucht wurde, ein Metamodell $\pm 20 \%$ mit Optimierungseinstellungen $\pm 10 \%$ und $\pm 2 \%$ zu verwenden, und es wurden unbefriedigende Ergebnisse erzielt, was darauf hindeutet, dass die Verfeinerung der Bereiche im Optimierungsprozess allein nicht ausreicht, um eine verbesserte Lösung zu erzielen, und dass die Metamodell-Einstellungen eine bedeutende Rolle spielen.

Da die CoP nicht die Lösung zu sein scheint, besteht eine alternative Möglichkeit, die Qualität des Metamodells zu messen, darin, die durch das Metamodell berechnete Differenz mit der durch FEM erhaltenen zu vergleichen. Je näher sie beieinander liegen, desto besser ist die Vorhersagefähigkeit des Metamodells. Es sollten jedoch weitere Analysen durchgeführt werden, um das Phänomen besser zu verstehen, beginnend mit einer manuellen Feinabstimmung

der Stichprobenoptionen. Beispielsweise könnte die Anzahl der maximal zulässigen Stichproben während der Metamodellerstellung von der Standardeinstellung (300) auf eine höhere Zahl erhöht werden, wobei zu beachten ist, dass bei der Erstellung des Metamodells $\pm 20\%$ nur 200 Stichproben vom System als notwendig erachtet wurden, obwohl 300 zulässig waren.

Wenn man die Bereiche $\pm 20\%$ beibehält, aber 1000 Proben zulässt, werden vom System nur 334 verwendet, um ein Metamodell zu erstellen. Wenn NLPQL jedoch sowohl auf das 300- als auch auf das 1000-Proben-Metamodell angewendet wird, sind die Ergebnisse interessant. Das Metamodell mit 300 Proben zeigt höhere Vorhersagefähigkeiten mit einer Differenz zwischen der FEM- und der Metamodell-Lösung von $(1784 - 597 =) 1187$ Hz im Vergleich zum Metamodell mit 1000 Proben, das eine Differenz von $(2667 - 609 =) 2058$ Hz erzeugt. Bemerkenswert ist, dass das Metamodell mit 300 Stichproben ebenfalls eine bessere optimierte Lösung liefert. Dies ist ziemlich seltsam und widerspricht dem gesunden Menschenverstand, da eine Erhöhung der Stichprobenanzahl immer die Vorhersagefähigkeiten eines Metamodells verbessern sollte. Dies könnte auf den für den Test verwendeten Algorithmus zurückzuführen sein, da bei Verwendung eines evolutionären Algorithmus mit globalen Einstellungen das Metamodell mit 1000 Stichproben etwas besser abschneidet $(1541 - 625 = 916$ Hz gegenüber $2207 - 1093 = 1114$ Hz).

Da die CoPs gut sind und der Unterschied zwischen Metamodell- und FEM-berechneten Werten nicht so groß ist, wird vorerst davon ausgegangen, dass das Metamodell mit 300 Proben keine Vorhersagbarkeit oder Probleme bei der Probenahme aufweist.

Es stellt sich jedoch ein grundlegendes Problem: Wenn die Lösung durch willkürliches Anpassen der Parameterbereiche in der Metamodelldefinition verbessert werden kann, welche Regel sollte dann für deren Auswahl gelten?

Da die für diese Studie verwendeten Daten aus einer Zugversuchskampagne stammen und die Durchschnittswerte dieser Tests als Ausgangspunkt für die Inversion verwendet werden, könnte ein guter Ansatz zur Definition der Bereiche für jeden Parameter auf eine Weise, die den Prozess für mehrere Proben wiederholbar macht, darin bestehen, $\pm$ die Standardabweichung jeder gemessenen Materialeigenschaft zu nehmen. Die Bereiche für eine und zwei Standardabweichungen sind in Abbildung II-49 aufgeführt.

	1 Standard Deviation		2 Standard Deviations	
	Lower Bound	Upper Bound	Lower Bound	Upper Bound
Young's Modulus X direction [Pa]	1.087E+11	1.142E+11	1.059E+11	1.170E+11
Young's Modulus Y direction [Pa]	1.087E+11	1.142E+11	1.059E+11	1.170E+11
Young's Modulus Z direction [Pa]	9.642E+10	1.186E+11	8.534E+10	1.297E+11
Shear Modulus XY [Pa]	4.145E+10	4.427E+10	4.004E+10	4.568E+10
Shear Modulus XZ [Pa]	3.771E+10	4.693E+10	3.310E+10	5.154E+10
Shear Modulus YZ [Pa]	3.771E+10	4.693E+10	3.310E+10	5.154E+10
Poisson's Ratio XY	2.720E-01	3.280E-01	2.440E-01	3.560E-01
Poisson's Ratio XZ	2.250E-01	3.150E-01	1.800E-01	3.600E-01
Poisson's Ratio YZ	2.250E-01	3.150E-01	1.800E-01	3.600E-01

Abbildung II-49: Wertebereiche der Standardabweichung

Durch die Verwendung dieser Zahlenbereiche ist sichergestellt, dass die optimierten Eigenschaften Werte annehmen, die in den meisten Zugmessungen liegen, und sogar obere/untere Grenzwerte zulässig sind.

Bei Verwendung von 1 Standardabweichungsbereich ergeben sich die Ergebnisse in Abbildung II-50.

	Inverted values
Young's Modulus X direction [Pa]	1.112E+11
Young's Modulus Y direction [Pa]	1.100E+11
Young's Modulus Z direction [Pa]	1.186E+11
Shear Modulus XY [Pa]	4.240E+10
Shear Modulus XZ [Pa]	4.474E+10
Shear Modulus YZ [Pa]	4.449E+10
Poisson's Ratio XY	0.326
Poisson's Ratio XZ	0.272
Poisson's Ratio YZ	0.315
Difference (Metamodel) [Hz]	734.692
Difference (FEM) [Hz]	1320

Abbildung II-50: Ergebnisse im Bereich von 1 Sigma Standardabweichung

Die Parameter, die gebundene Werte annehmen, sind orange hervorgehoben. Mit diesem Ansatz werden für alle Materialeigenschaften angemessene Werte ermittelt, und der endgültige Restwert von 1320 Hz ergibt einen Restwert pro Modus von $(1320/13 =) 101,5$ Hz, was angesichts der zahlreichen Unsicherheitsquellen des Systems und der verwendeten Verfahren als akzeptabel angesehen wird. Durch Verfeinerung der Inversionsalgorithmen und Mittelung mehrerer Optimierungen kann dieser Wert jedoch weiter reduziert werden.

Da bei den Zugversuchen Begleitproben verwendet wurden und aufgrund der Unterschiede, die während der Herstellung/Handhabung auftreten können, werden leichte Abweichungen zwischen den Testergebnissen für Probe 050 und den invertierten Eigenschaften als normal angesehen. Um sie zu reduzieren, ist es ratsam, bei zukünftigen Forschungen Inversionsverfahren und Zugversuche an denselben Proben durchzuführen, um diese Art von Abweichung auf ein Minimum zu reduzieren. Da für die Inversion keine Zugversuche erforderlich sind (in dieser Studie wurde der Durchschnitt der Zugversuche als Ausgangspunkt verwendet, um den Prozess zu optimieren und weitere Verfeinerungen zu reduzieren, es können jedoch auch Standardwerte gemäß Tabellenbuch verwendet werden), reicht es aus, zuerst die Probe zu invertieren und dann einen Zugversuch durchzuführen.

Das Inversionsverfahren kann für den Parametersatz „zwei Standardabweichungen“ wiederholt werden, und es kann ein Vergleich durchgeführt werden, um Verbesserungen der Anpassung zu ermitteln.

Ein alternativer Ansatz für den Inversionsprozess besteht darin, ein elliptisches isotropes Modell zur vorläufigen Bestimmung einer akzeptablen Lösung zu verwenden. Ein solches Modell hat vier unabhängige Materialeigenschaften, und alle anderen fünf Eigenschaften können durch mathematische Beziehungen abgeleitet werden.

Wie bereits erwähnt, kann dieses Modell durch Parameterbeziehungen in „Ansys Workbench“ in den Arbeitsablauf integriert werden. Mit diesen Beziehungen können einige (abgeleitete)

Parameter als Funktionen anderer (unabhängiger) definiert werden und dürfen daher während der Optimierung nicht frei variieren, wodurch elliptische Isotropie bei jeder Iteration und als endgültige Lösung gewährleistet wird.

Durch die Implementierung der zuvor besprochenen „1 Standardabweichung“-Bereiche werden die vier optimierten unabhängigen Parameter, die in Abbildung II-51 dargestellt sind, durch die zuvor definierte zweistufige Optimierung erhalten.

	Value
Young's Modulus X direction [Pa]	1.142E+11
Young's Modulus Z direction [Pa]	1.180E+11
Poisson's Ratio XY	0.305
Poisson's Ratio XZ	0.309
Difference (Metamodel) [Hz]	1122.5
Difference (FEM) [Hz]	1576

Abbildung II-51: Elliptische Parameter für 1 Sigma Standardabweichung

Die Parameter, die festgelegte Werte annehmen, sind orange hervorgehoben. Alle anderen Parameter werden von den Parametern in Abbildung II-51 durch die folgenden Zusammenhänge abgeleitet:

$$E_y = E_x = 1.142E + 11 [Pa]$$

$$\nu_{yz} = \nu_{xz} = 0.309$$

$$G_{xy} = \frac{E_x}{2(1 + \nu_{xy})} = 4.376E + 10 [Pa]$$

$$G_{xz} = \frac{E_x E_z}{E_x(2\nu_{xz} + 1) + E_z} = 4.451E + 10 [Pa]$$

$$G_{yz} = G_{xz} = 4.451E + 10 [Pa]$$

Insbesondere sind sowohl die Erstellung des Metamodells als auch der Optimierungslauf aufgrund der Reduzierung der Komplexität des Problems erheblich schneller, was schnellere Iterationen und die Definition der besten Einstellungen ermöglichten.

Darüber hinaus macht die Reduzierung der unabhängigen Parameter den Prozess viel weniger empfindlich gegenüber dem gewählten Optimierungsalgorithmus. Als Referenz werden die Ergebnisse einer einstufigen NLPQL-Optimierung mit den Ergebnissen verglichen, die gerade mit der zweistufigen Optimierung erzielt wurden, und die Ergebnisse sind in Abbildung II-52 dargestellt.

	2-steps	1-step	Variation [%]
Young's Modulus X direction [Pa]	1.142E+11	1.142E+11	0.00%
Young's Modulus Z direction [Pa]	1.180E+11	1.179E+11	0.084%
Poisson's Ratio XY	0.305	0.297	2.69%
Poisson's Ratio XZ	0.309	0.308	0.32%
Difference (Metamodel) [Hz]	1122.5	1129.49	-0.62%
Difference (FEM) [Hz]	1576	1550	1.68%

Abbildung II-52: Vergleich der ein- und zweistufigen Optimierung

Ein einstufiger Prozess ermöglicht noch schnellere Iterationen, und eine genauere zweistufige Optimierung kann in fortgeschrittenen Phasen des Inversionsprozesses in Kombination mit komplexeren Materialmodellen durchgeführt werden, wodurch viel Rechenzeit eingespart wird.

Vibrant hat in diesem Projekt versucht, so viele Ideen und Verfahren wie möglich im Zusammenhang mit der vibrometriegestützten PCRT-Inversion zu untersuchen, und nur eine ausgewählte Anzahl wurde dann in den Bericht aufgenommen. Einige davon stellen einen guten Ausgangspunkt für zukünftige, gezieltere Forschung dar, andere können bereits zur Festlegung optimaler Verfahren verwendet werden. Aus beiden können Empfehlungen abgeleitet werden

Die wichtigste Empfehlung besteht darin, die Anzahl der für die Inversion verwendeten Modi zu erhöhen und dabei besonders darauf zu achten, welche Parameter die einzelnen Modi hauptsächlich beeinflussen, um ein OF zu erstellen, in dem jeder Parameter mehr oder weniger gleichmäßig vertreten ist. Dadurch werden Lösungen vermieden, die von wenigen Parametern dominiert werden, bei denen es unmöglich wäre, die Eigenschaften mit geringerem Einfluss genau zu bestimmen.

Nach der Erstellung der Metamodelle wurden für jedes einzelne Modell Sensitivitätsstudien durchgeführt, wobei ein gemeinsames Problem festgestellt wurde. Am Beispiel des Metamodells, das für den „1 Standardabweichung“-Durchlauf verwendet wurde, ist die Prognosekoeffizientenmatrix in Abbildung II-53 dargestellt, und eine Vergrößerung davon in Abbildung II-54.

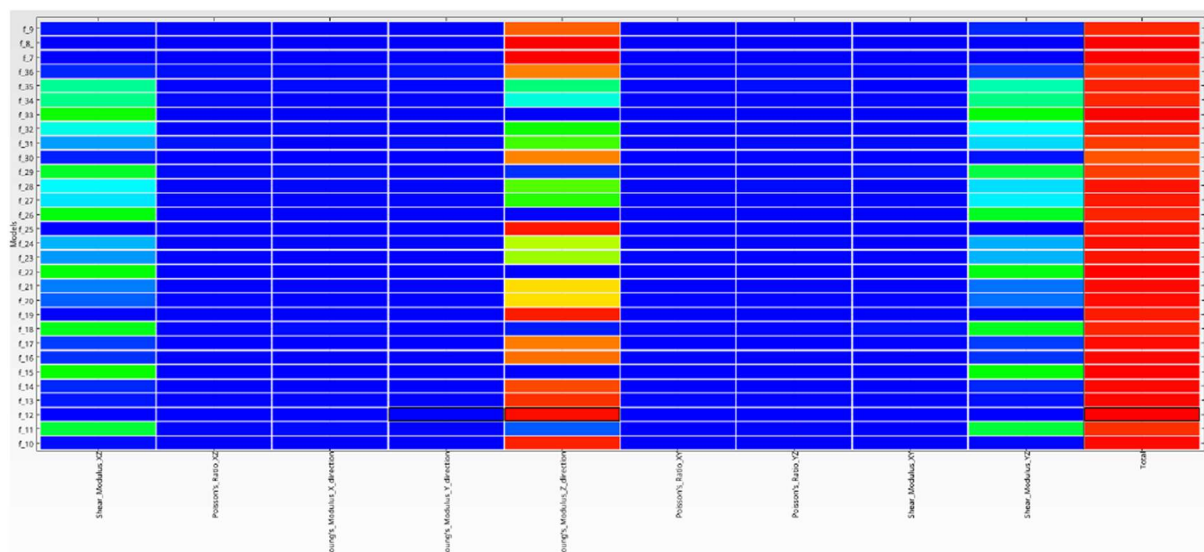


Abbildung II-53: CoP Matrix für 1-Standardabweichung Metamodell

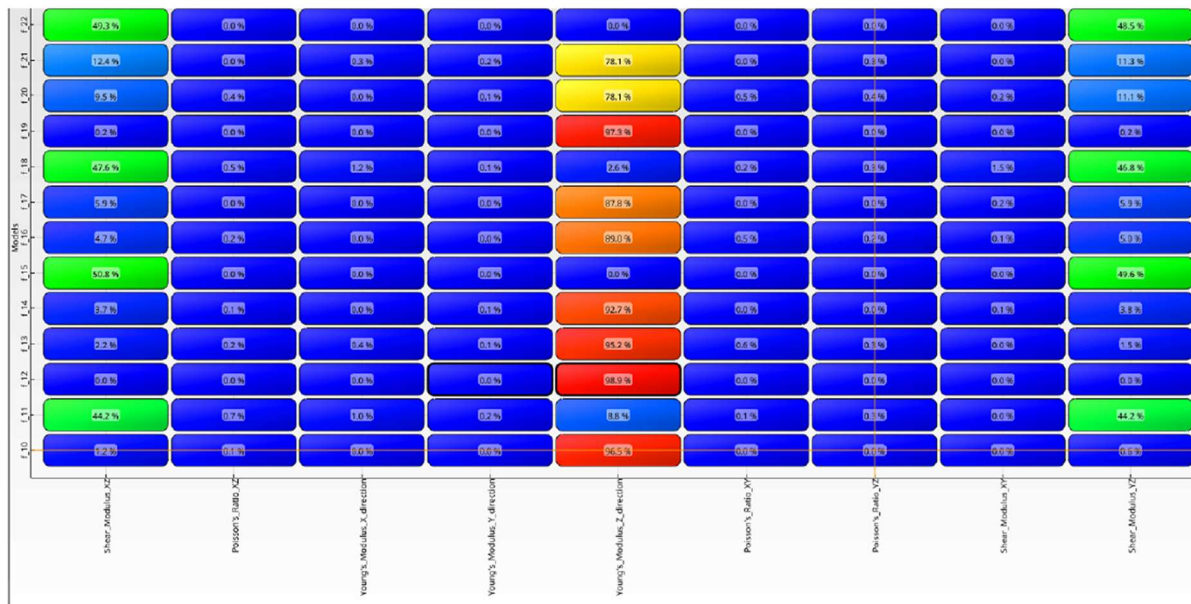


Abbildung II-54: Ausschnitt CoP Matrix für 1-Standardabweichung Metamodell

Es ist ersichtlich, dass die meisten Moden des Elastizitäts-Moduls in Z-Richtung dominiert werden, und einige von der Scherung in YZ und XZ, weshalb für diese gute Vorhersagen erwartet werden. Alle anderen Parameter haben im Grunde keinen Einfluss auf die Bestimmung der Frequenzen, daher wird die OF-Optimierung keine schlüssigen Ergebnisse zu diesen liefern. Es ist wichtig zu beachten, dass diese Schlussfolgerung nur für die definierten Bereiche gilt, d. h. dass durch Variieren der Werte außerhalb der definierten Bereiche für einige der Parameter unterschiedliche Prozentsätze des Einflusses erreicht werden können. Wenn Variationen jedoch gleichermaßen auf alle Parameter angewendet werden, sollte dies nicht passieren.

Da das Ziel dieser Arbeit darin bestand, die Ergebnisse der Vibrometrie in das PCRT-Inversionsverfahren zu integrieren, um eine korrekte Modenanpassung zu gewährleisten, wurden nur Modi verwendet, für die sowohl Vibrometrie- als auch PCRT-Ergebnisse verfügbar waren. In zukünftigen Untersuchungen sollte eine angemessene Anzahl von Modi sowohl in Vibrometrie als auch in PCRT registriert werden, um eine korrekte Auswahl der in der OF-Definition verwendeten Modi zu ermöglichen, die durch eine sorgfältige Auswertung der CoP-Matrix erfolgen sollte.

II.1.3.6 Arbeitspaket 3.4

Titel: PCRT Datenaufnahme und Messung der Probekörper im Zustand "as-built" und wärmebehandelt.

Die Messung der Proben erfolgt jeweils einzeln. Neben der Identifikationsnummer werden Gewicht und Länge gemäß Versuchsplan erfasst und dokumentiert.

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt unter Arbeitspaket 3.5 II.1.3.7.

II.1.3.7 Arbeitspaket 3.5

Titel: Analyse der Daten und Korrelation zwischen Frequenzabweichung und Fehlerart und -klasse.

II.1.3.7.1 Ergebnisse Zylinderproben

Im Rahmen des Projektes wurden zylindrische Begleitproben gedruckt und mit PCRT analysiert. Die Z-Score Charakterisierung der Zylinder Population ermöglicht eine Quantifizierung der Variationsquellen und zeigt die Gesamtkonsistenz der Stichprobe an. Die Ergebnisse der PCRT-Z-Score-Analyse sind im Anhang ausführlich beschrieben. Ein Großteil des Populations-clusters ist zwischen $\pm 2,3\sigma$ im Z-Durchschnittswert und unter 2 im Z-Abweichungswert verteilt, Abbildung II-55 Vergrößertes Z-Diagramm für Zylinderproben. Das entspricht einer Normalverteilung eines stabilen Prozesses siehe Abbildung. Der vollständige Z-Score ist in Abbildung II-56 dargestellt. Die Grenzen werden unter Berücksichtigung eines 99-prozentigen Konfidenzintervalls gebildet. Die größte Empfindlichkeit wurde bei schlechter/fehlender Wärmebehandlung, Änderungen der Laserleistung und Scangeschwindigkeit sowie bei Teilen festgestellt, die in einem Winkel von 45 Grad gedruckt wurden.

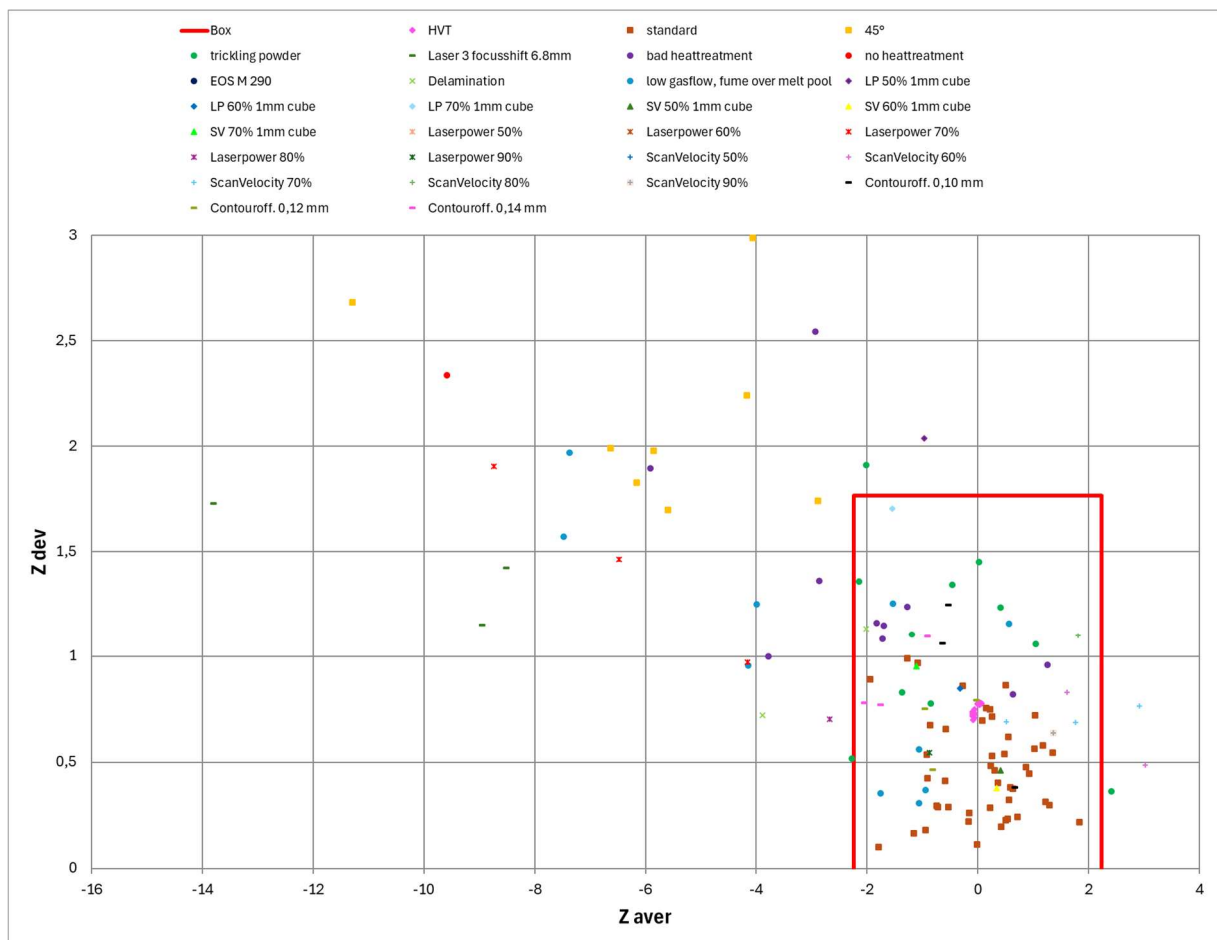


Abbildung II-55: Z-Score Auswertung Zylinder, vergrößert

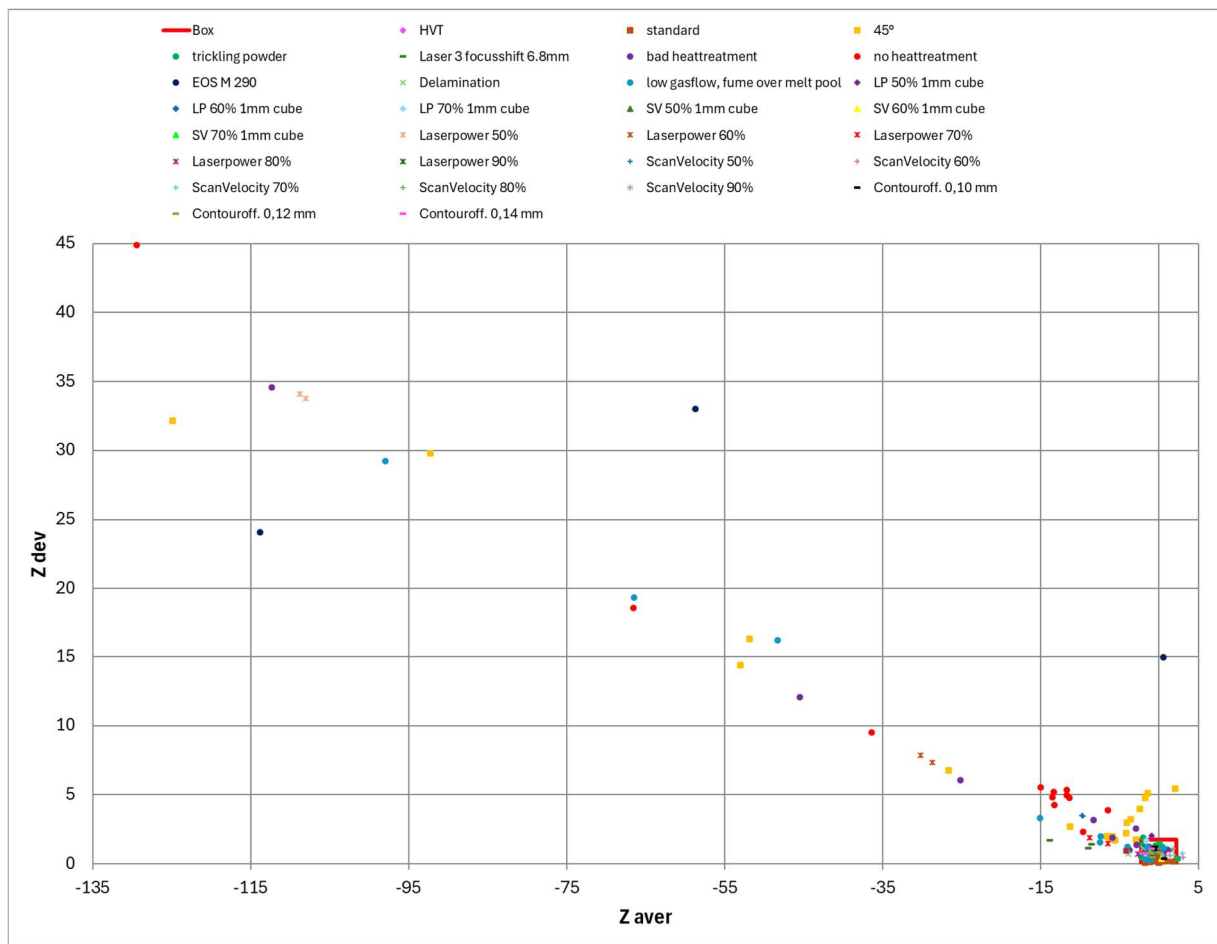


Abbildung II-56: Z-Score Auswertung Zylinder

Auf Grundlage der gemessenen Daten kann VIPR-Muster anhand von 3 Resonanzfrequenzen aus dem gesamten Resonanzspektrum identifizieren, und damit die Mehrheit der als „schlecht“ eingestuften Teile von der Mehrheit der als „gut“ eingestuften Teile trennen. Nur die Defekte, die durch kleine lokale Veränderungen entstanden sind, z. B. 1 mm Würfel, und Scan-Geschwindigkeiten von 80 % und 90 %, rieselndes Pulver und einige Proben mit niedrigem Gasgehalt, werden nicht separiert. Eine Lösung dazu besteht darin, jeweils eigene VIPR-Sortierungen für spezifische Defekte zu erstellen. In der grafischen Benutzeroberfläche (GUI) des Projekts werden separate VIPR-Sortierungen für bestimmte Defekttypen vorgeschlagen. In einer Produktionsumgebung können mehrere Sortierungen kombiniert und damit automatisiert nacheinander getestet werden.

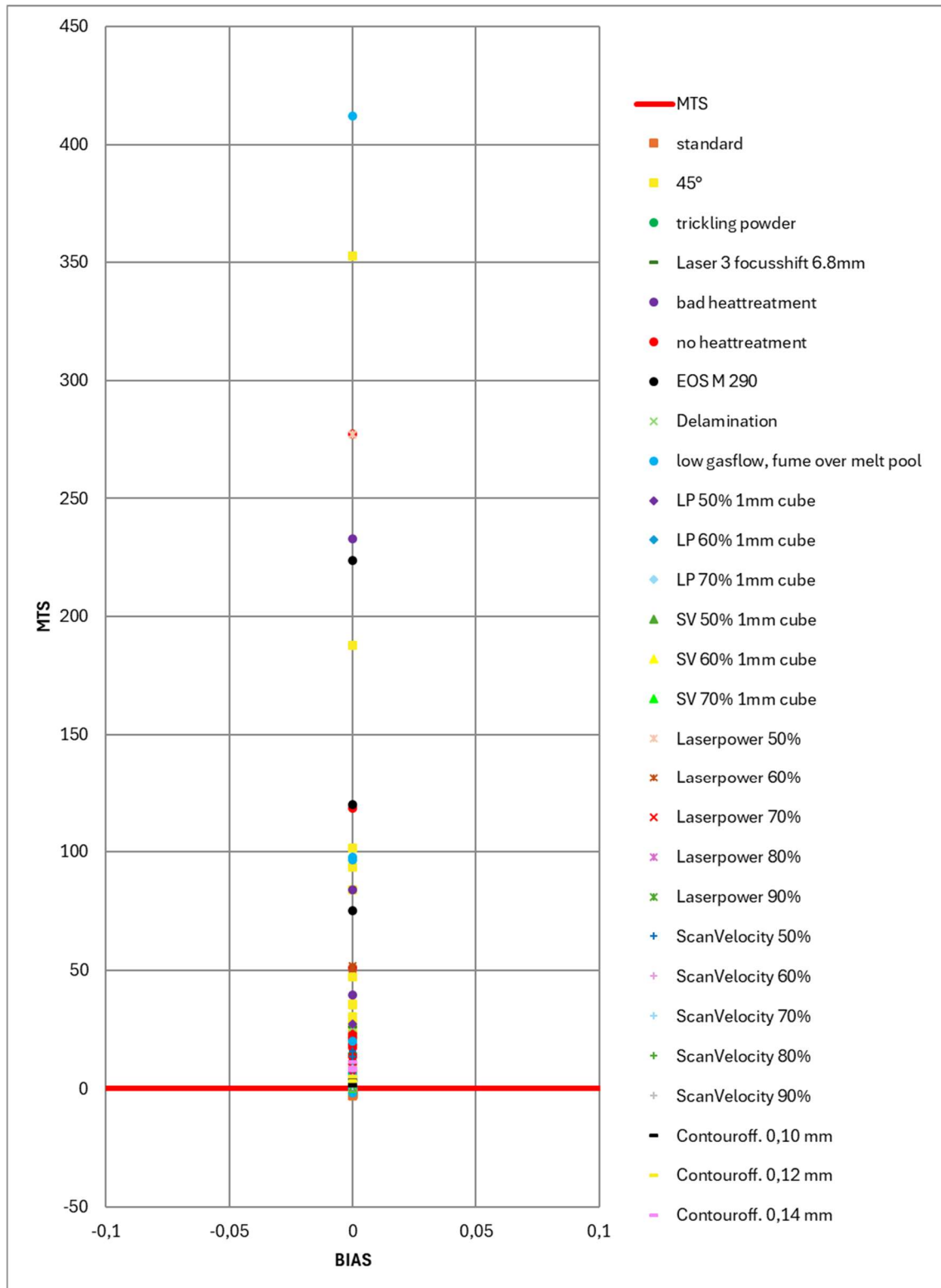


Abbildung II-57: VIPR-Sortierung für Zylinder

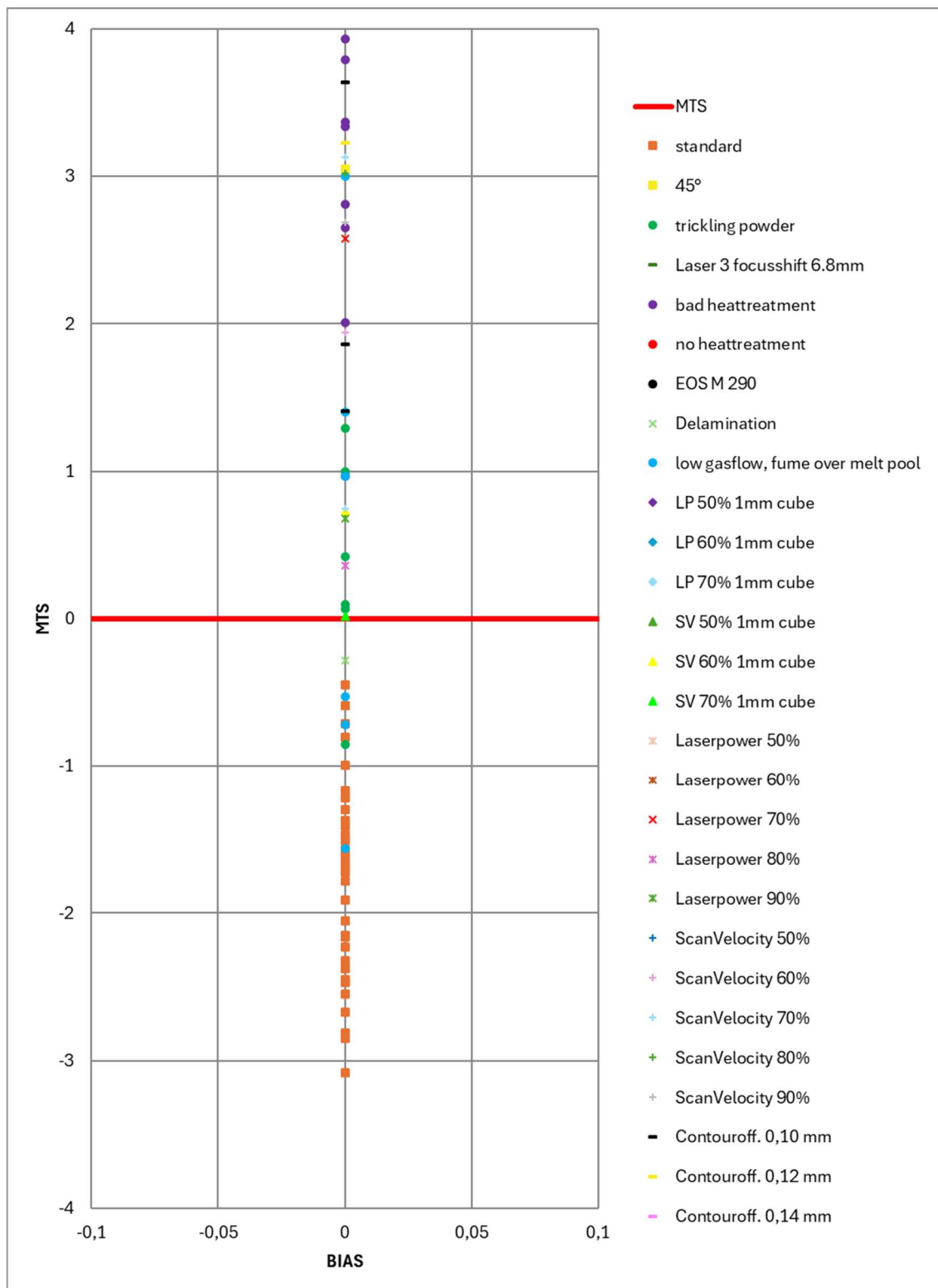


Abbildung II-58: VIPR-Darstellung des Grenzbereichs

II.1.3.7.2 Blindtest Zylinder

Um die Leistung der vorgeschlagenen Z- und VIPR-Lösungen zu testen, wurden Zylinderproben für Blindtests gedruckt (aus Kostengründen mussten wir auf den Impeller Blindtest verzichten). Es wurden Zylinder mit „normalen“ Druckeinstellungen sowie Zylinder mit den gemäß Defekt-Provokationsmatrix veränderten Einstellungen gedruckt, verschiedene Typen werden in unterschiedlichen Farben und Formen dargestellt. Aus dem Z-Plot in Abbildung II-59 geht

hervor, dass eine Laserleistung von weniger als 80 % und eine Scangeschwindigkeit von weniger als 70 % sicher erkannt werden können. Die lokale Materialänderung, z. B. die Implementierung eines 1mm-Würfels und eine höhere Laserleistung und Scangeschwindigkeit, befinden sich jedoch innerhalb des Kastens neben den Standardproben. Das ist insofern nicht verwunderlich, weil diese lokalen Defekte nicht über die Prozessüberwachung gemäß ASTM E3081 erkennbar sind, sondern eine speziell trainierte Defekterkennung benötigen.

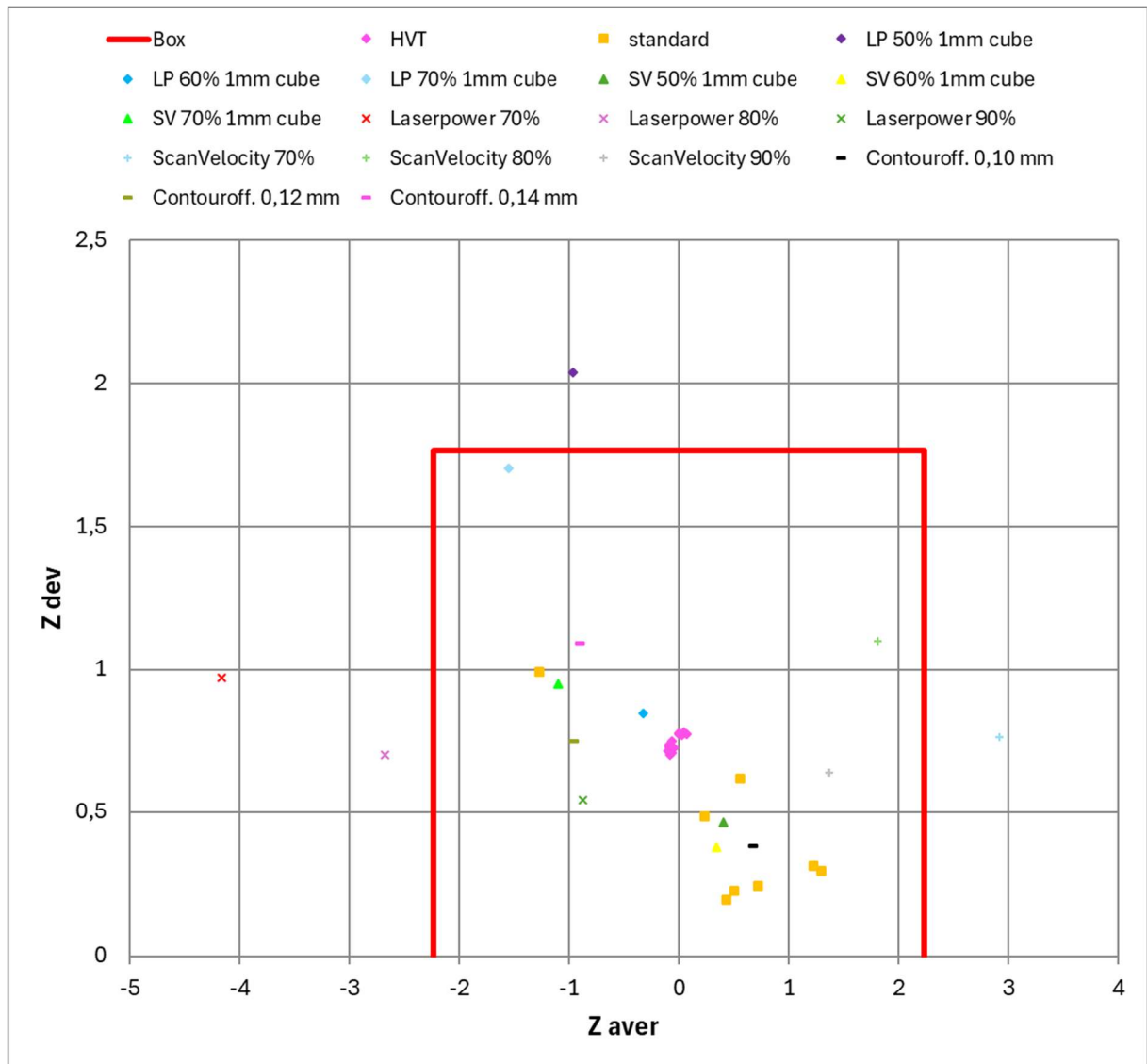


Abbildung II-59: Zylinder Blindtest Z-Score

Daher wurde der Blindtest mit dem VIPR-Modul gemäß ASTM E2534 durchgeführt. In Abbildung II-60 bzw. Abbildung II-61 sind die Ergebnisse dargestellt.

Mit VIPR ist die sichere Erkennung und Unterscheidung aller provozierten Defekte möglich.

Drei Zylinder mit Standardeinstellungen werden durch das VIPR-Modul ebenfalls als NIO erkannt. Dafür kommen verschiedene Gründe in Betracht, die aber im Projektverlauf nicht abschließend geklärt werden konnten. Mögliche Ursachen dieser Zuordnung sind:

- Die relativ geringe Anzahl von Teilen die für das VIPR-Training verwendet wurden. trainiert wurde. Es ist bekannt, dass für ein gutes Training Set eine größere Stichprobe sowohl für „gute“ als auch für „schlechte“ Bauteile wünschenswert ist.
- Unsicherheit in den provozierten Defekten. Die Defekt-Ausprägung wurde nicht verifiziert, sondern vielmehr gehen wir davon aus, dass alle Defekt Provokationen auch real den gewünschten Defekt aufweisen. Das wäre insbesondere im Grenzbereich zwischen IO und NIO zu überprüfen.

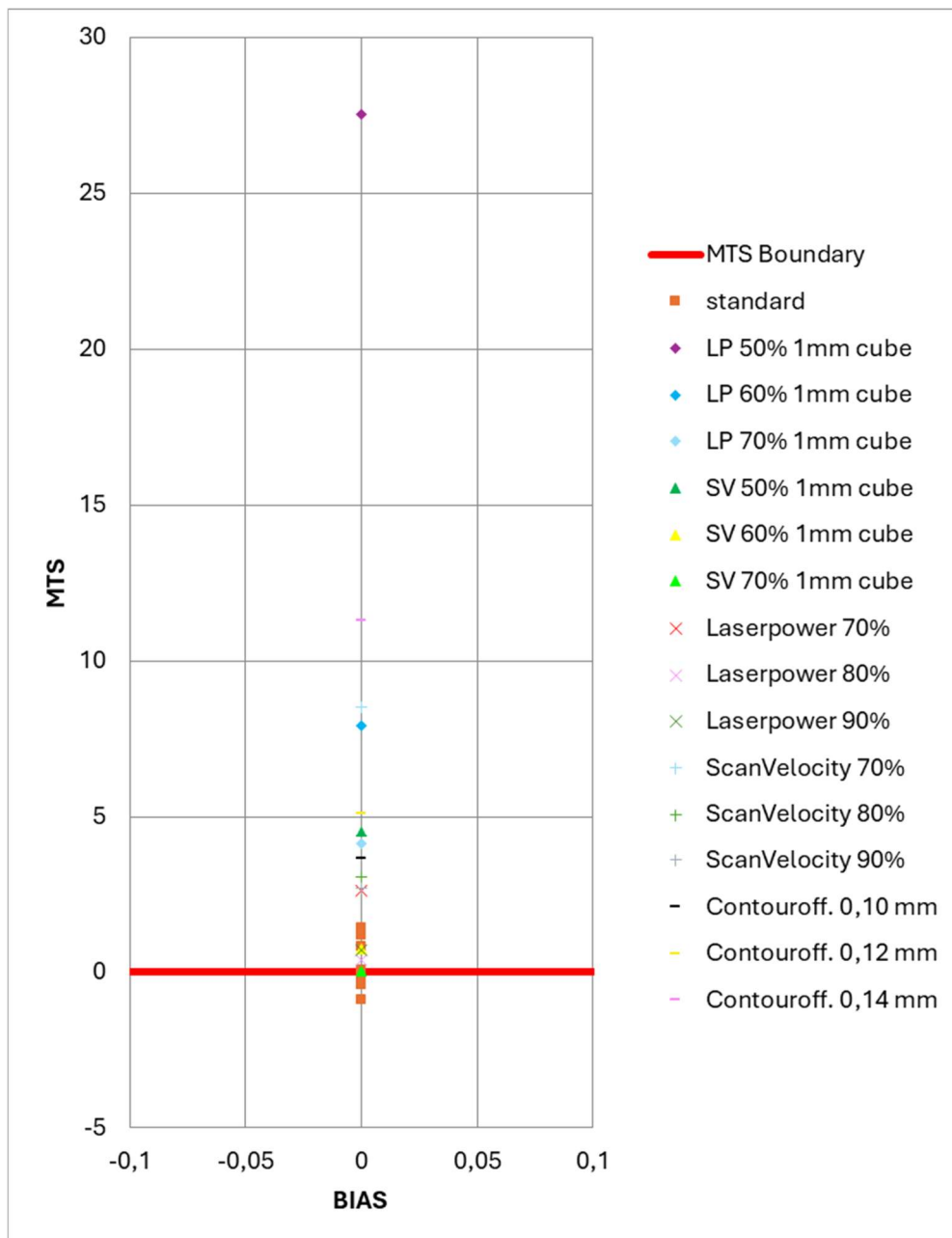


Abbildung II-60: Zylinder Blindtest VIPR

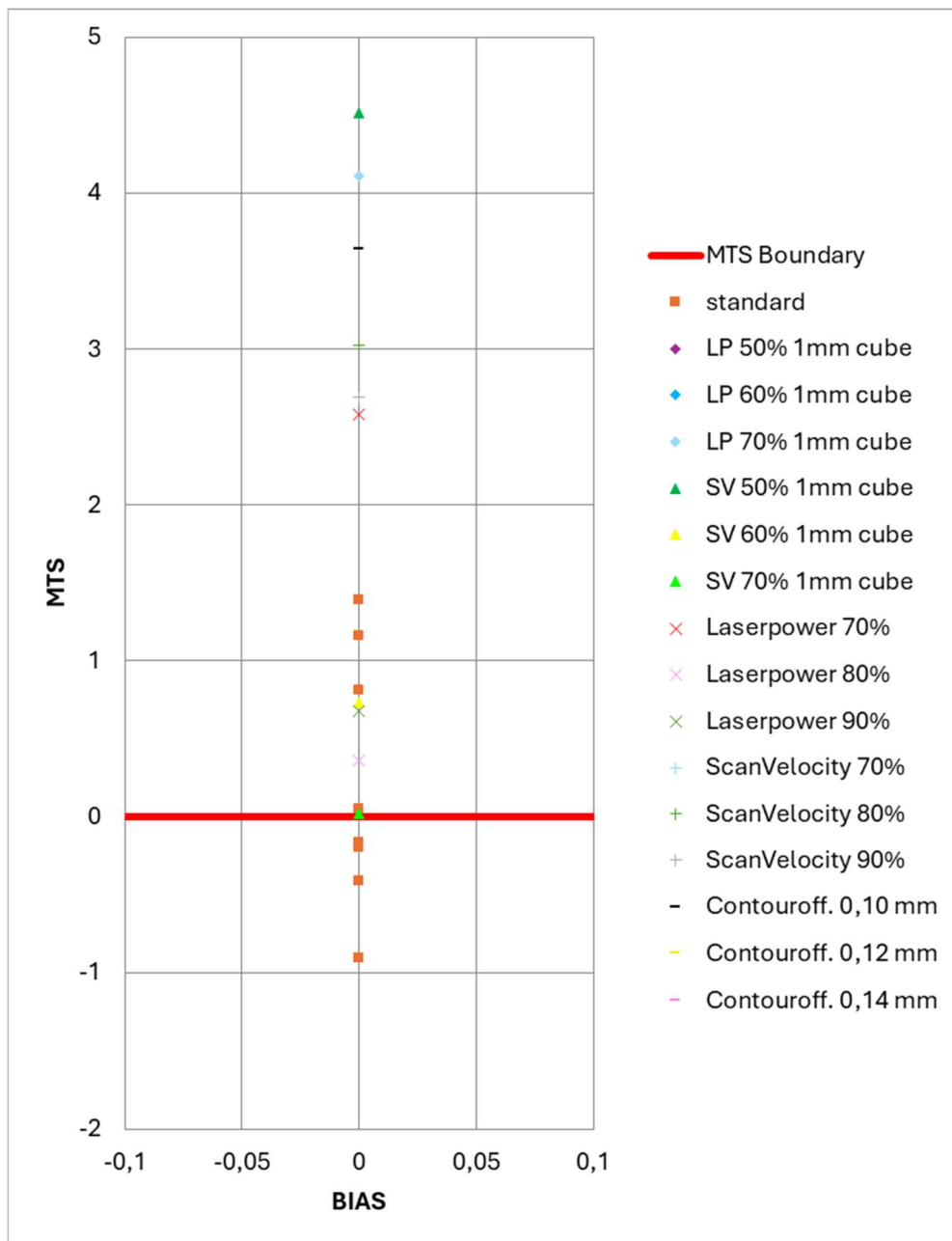


Abbildung II-61: Zylinder Blindtest VIPR, vergrößert

II.1.3.7.3 Auswertung Impeller

Abbildung II-62 zeigt ein Beispiel für ein Resonanzfrequenzspektrum eines PCRT-Scans im Bereich von 18 kHz bis 31 kHz. Die Frequenz wird auf der x-Achse dargestellt, wobei die Frequenz von links nach rechts zunimmt. Die y-Achse ist die Amplitude der Resonanzschwingung für jedes gemessene Teil. PCRT erfasst Resonanzfrequenzdaten sowohl im akustischen als auch im Ultraschallbereich, wobei die Frequenzbandbreite für die einzelnen Komponenten und Materialien konfiguriert wird. Das deutlich sichtbare Muster folgt der Position auf der Bauplatte. Ein Beispiel für die Bewertung und Überprüfung der Wiederholbarkeit des Druckprozesses.

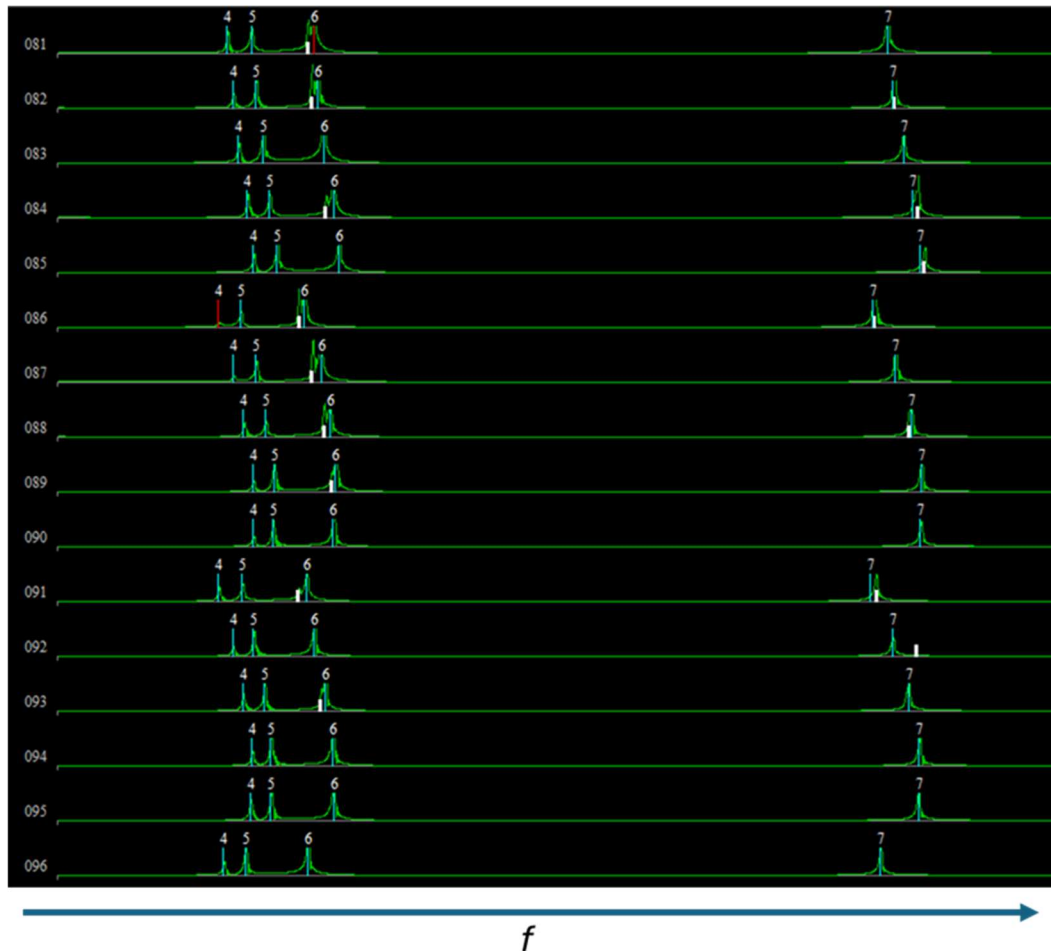


Abbildung II-62: Ausschnitt Frequenzspektrum 18 kHz bis 31 kHz

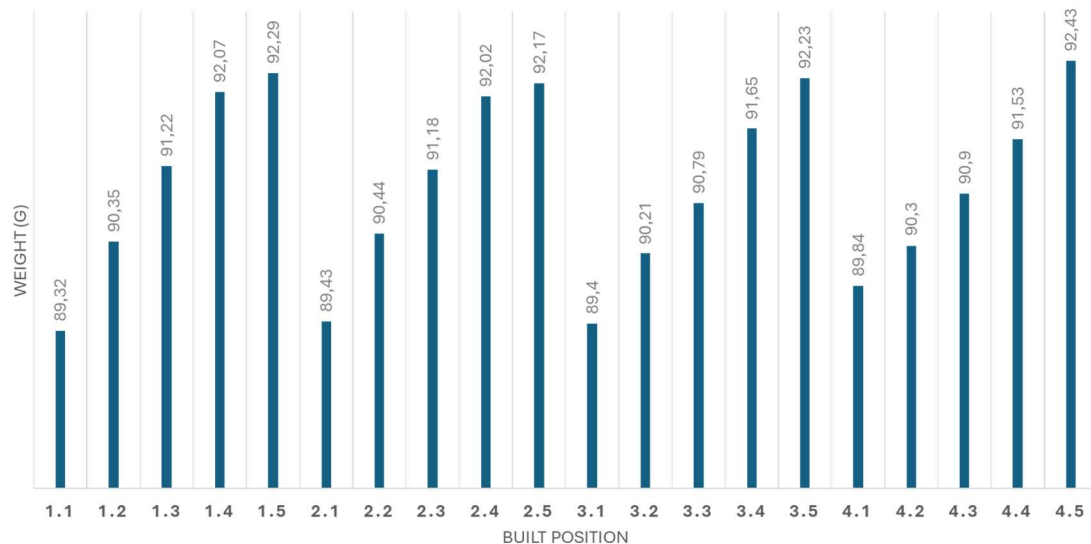


Abbildung II-63: Impeller Gewicht über Bauposition Baujob 6

Es wurde eine Abhängigkeit zwischen dem Gewicht und der Druckposition auf der Bauplatte festgestellt. Allerdings folgt nicht nur das Gewicht diesem Muster. Bei fehlerhaften Parametern in der Maschine, wie z. B. einem geringen Gasfluss, Rauch über dem Schmelzbad, erhöhter Laserabsorption und Streuung, die IAPT bei seinem letzten Druckauftrag festgestellt hat,

wird das Muster in entgegengesetzte Richtungen beeinflusst, wie in Abbildung II-64 dargestellt. Die Änderung des Musters kann also möglicherweise auf Änderungen an der Maschine hinweisen. Diese Möglichkeit muss mit einer größeren statistischen Stichprobe und möglichen Druckfehlern weiter untersucht werden.

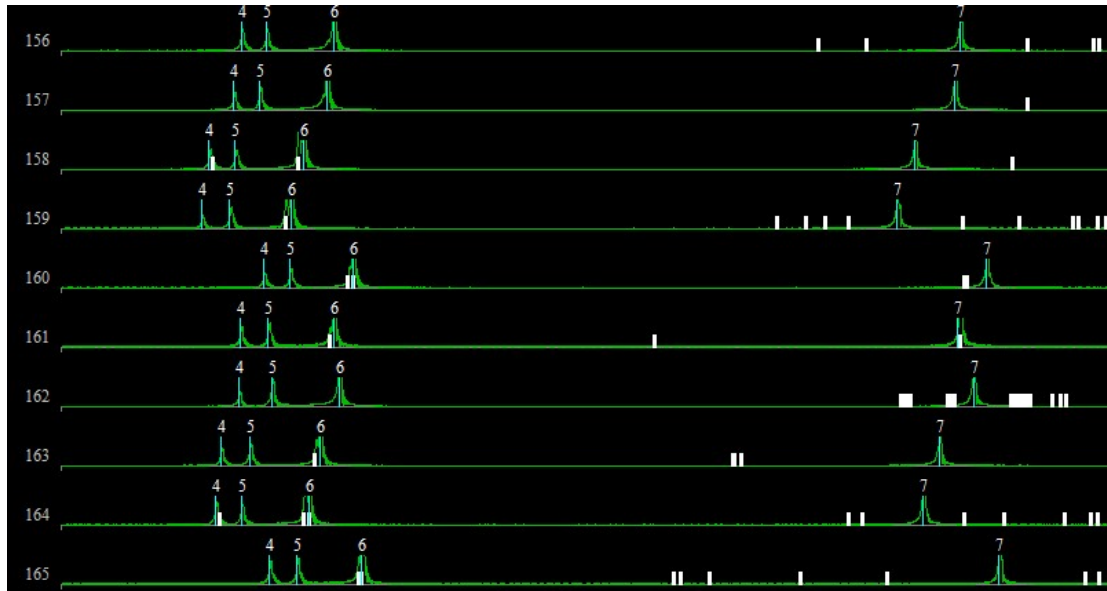


Abbildung II-64: Einfluss von falschen Laserparametern auf das Resonanzverhalten

Die Bewertung der Population ermöglicht einen Vergleich der Einflüsse von Variationsquellen und zeigt die Gesamtkonsistenz der Stichprobe an. Die Ergebnisse der PCRT-Z-Score-Analyse werden im Anhang ausführlich dargestellt. Ein Großteil des Populationsclusters ist zwischen $\pm 2,5\sigma$ im Z-Durchschnittswert und unter $\pm 1\sigma$ im Z-Abweichungswert verteilt, siehe Abbildung II-65. Der vollständige Z-Wert ist in Abbildung II-66 dargestellt. Die Grenzen werden unter Berücksichtigung eines 99-prozentigen Konfidenzintervalls gebildet. Die größte Empfindlichkeit wird bei Unregelmäßigkeiten der Beschichtung, Änderungen der Laserleistung und der Scangeschwindigkeit festgestellt.



Abbildung II-65: Impeller Z-Score, Detail

Die meisten dieser Teile weisen eine hohe Standardabweichung des Z-Scores auf (Abbildung II-65), was bedeutet, dass die Resonanzen dieser Teile in einem anderen Frequenzmuster liegen als die Referenz. Die Teile, die links oder rechts vom Begrenzungsfeld liegen, weisen niedrigere oder höhere durchschnittliche Resonanzfrequenzen auf als die Referenz.

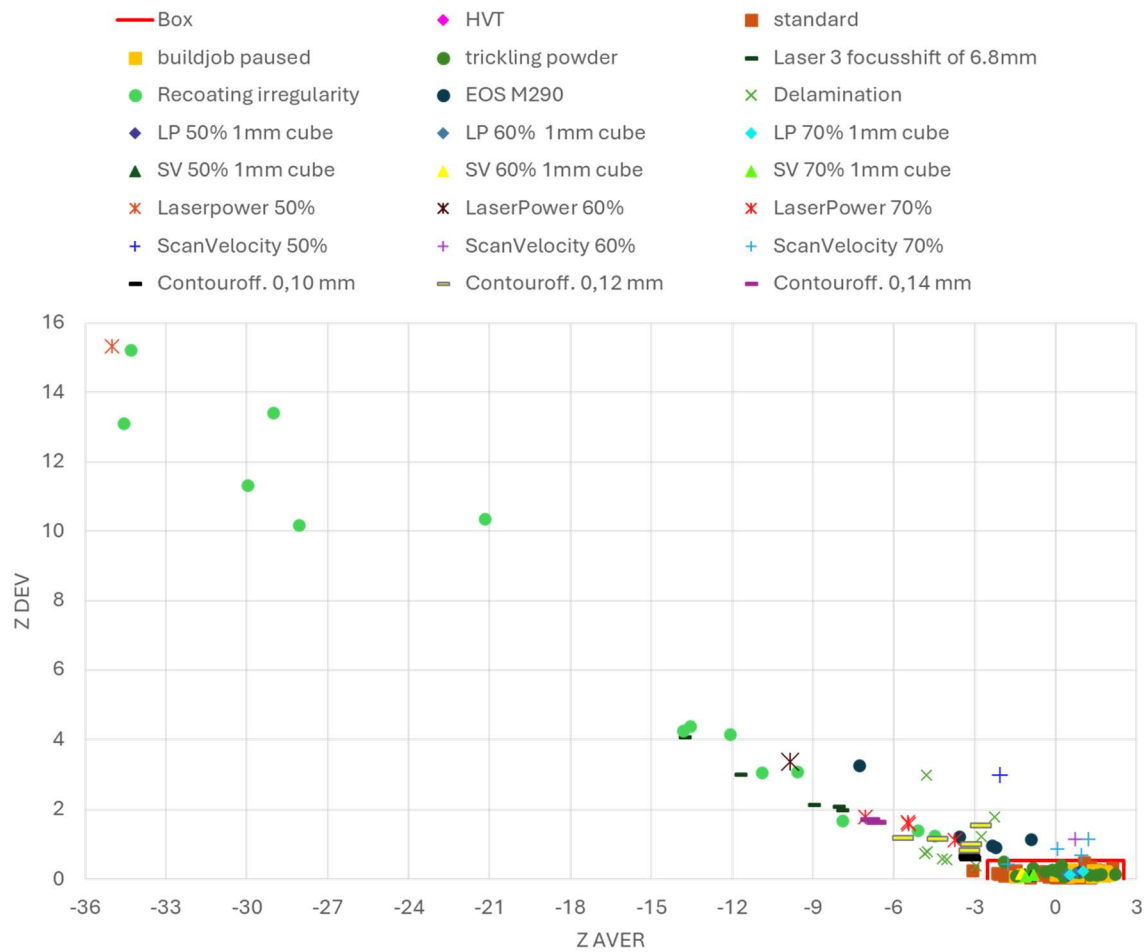


Abbildung II-66: Impeller Z-Score, gesamt

Aufgrund der bereitgestellten Klassifizierung kann VIPR Muster anhand von 3 Resonanzfrequenzen über das gesamte Breitband hinweg identifizieren, das die Mehrheit der als „schlecht“ eingestuften Teile von der Mehrheit der als „gut“ eingestuften Teile trennt. Nur die Defekte, die durch eine kleine lokale Änderung entstanden sind, z. B. ein 1-mm-Würfel, und ein angehaltener Bauauftrag wurden nicht getrennt. In der grafischen Benutzeroberfläche des Projekts werden jedoch separate VIPR-Sortierungen für bestimmte Defekttypen vorgeschlagen. Diese können zu einer Kette kombiniert und nacheinander getestet werden.

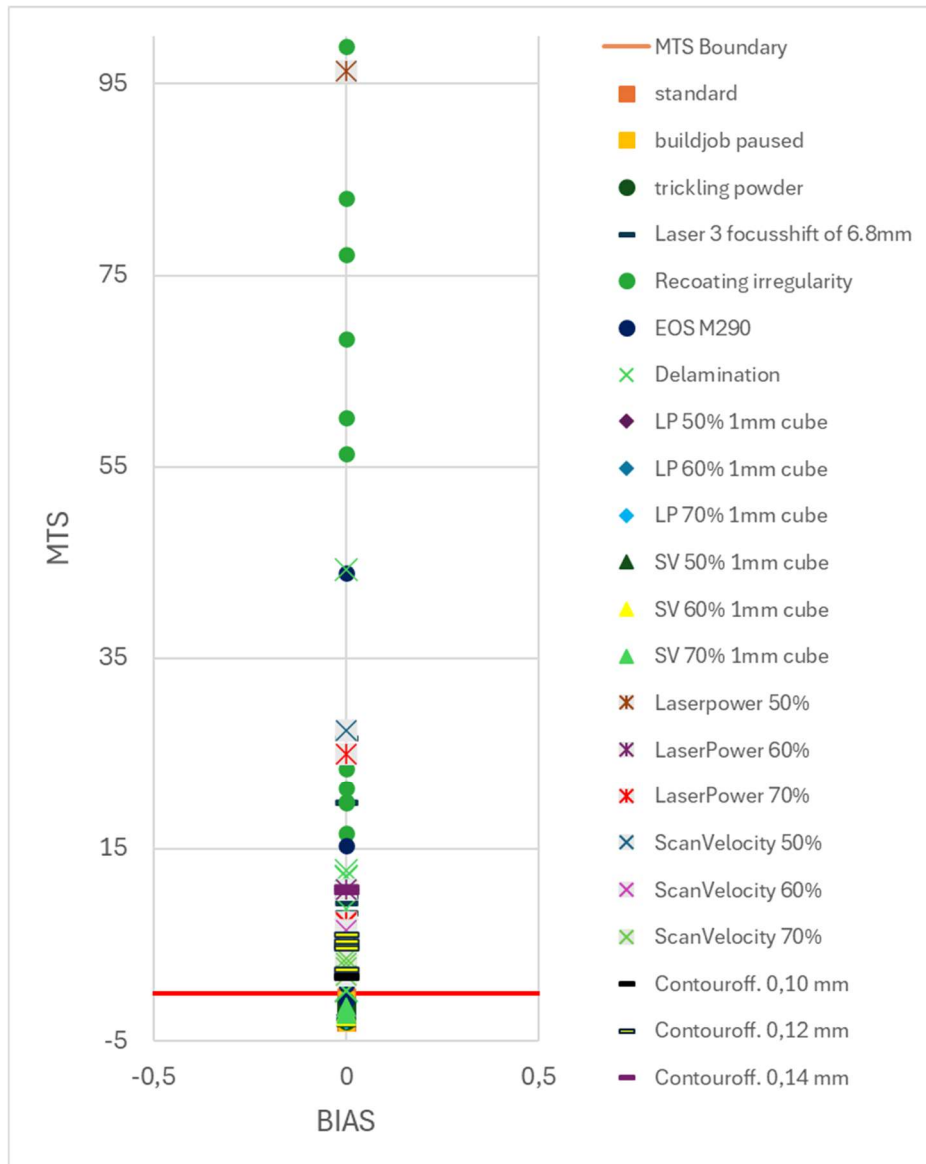


Abbildung II-67: Impeller VIPR Sortierung

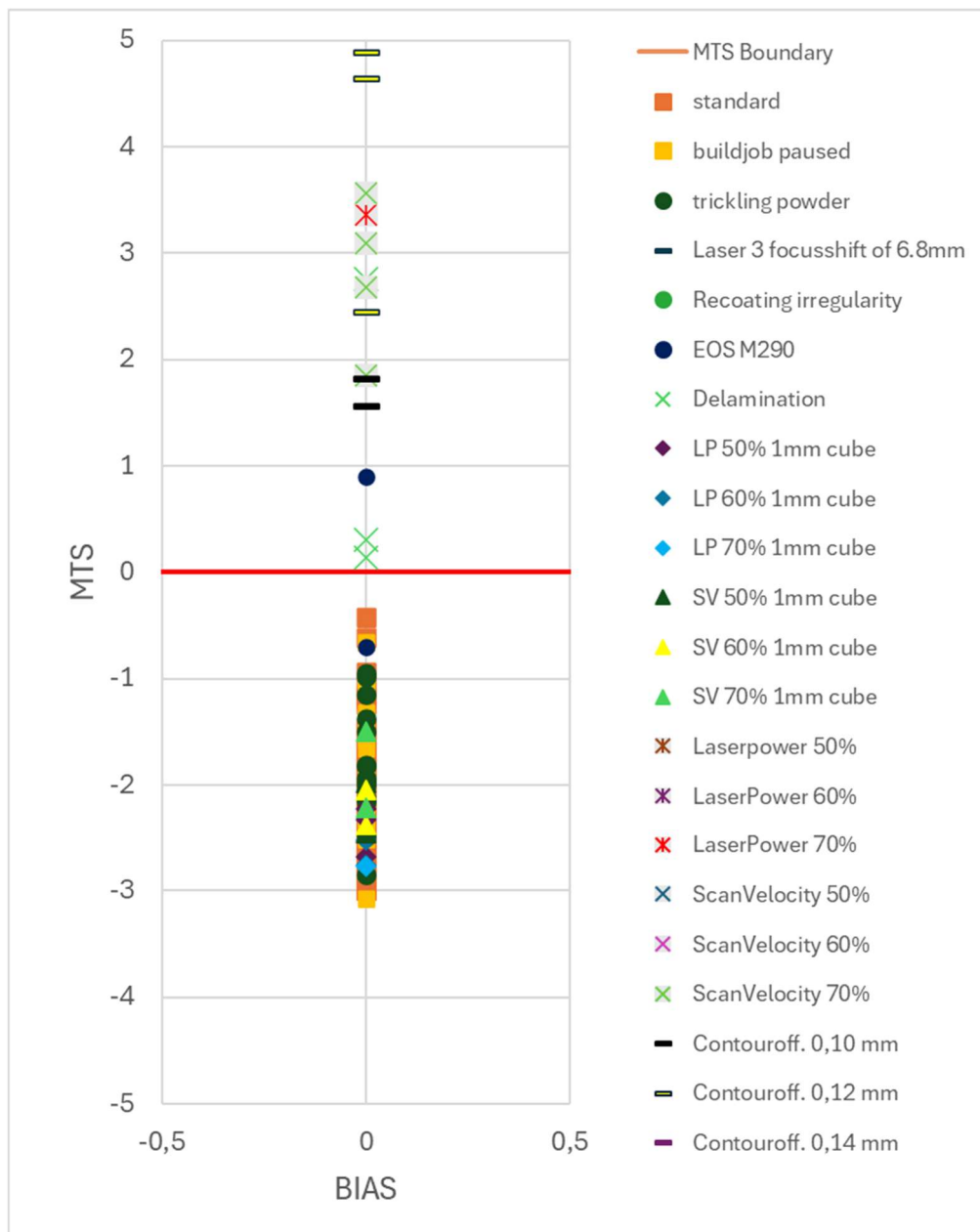


Abbildung II-68: Impeller VIPR Sortierung, Detail

Die Auswirkungen der SIR-Technik auf den Impeller wurden durch Messung der Frequenzmodi ausgewählter Teile untersucht. Einige Teile wurden mehrmals mit SIR und dann bei Vibrant mit PCRT gemessen.

Das Ergebnis dieses Vergleichs ist in Abbildung II-69 dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung ist unter

AP 6 - Validierung der effizienten akustischen Prüfmethodik in der Serienfertigung & Einbindung der Ergebnisse in den pränormativen Bereich in Kapitel 0 ausgeführt.

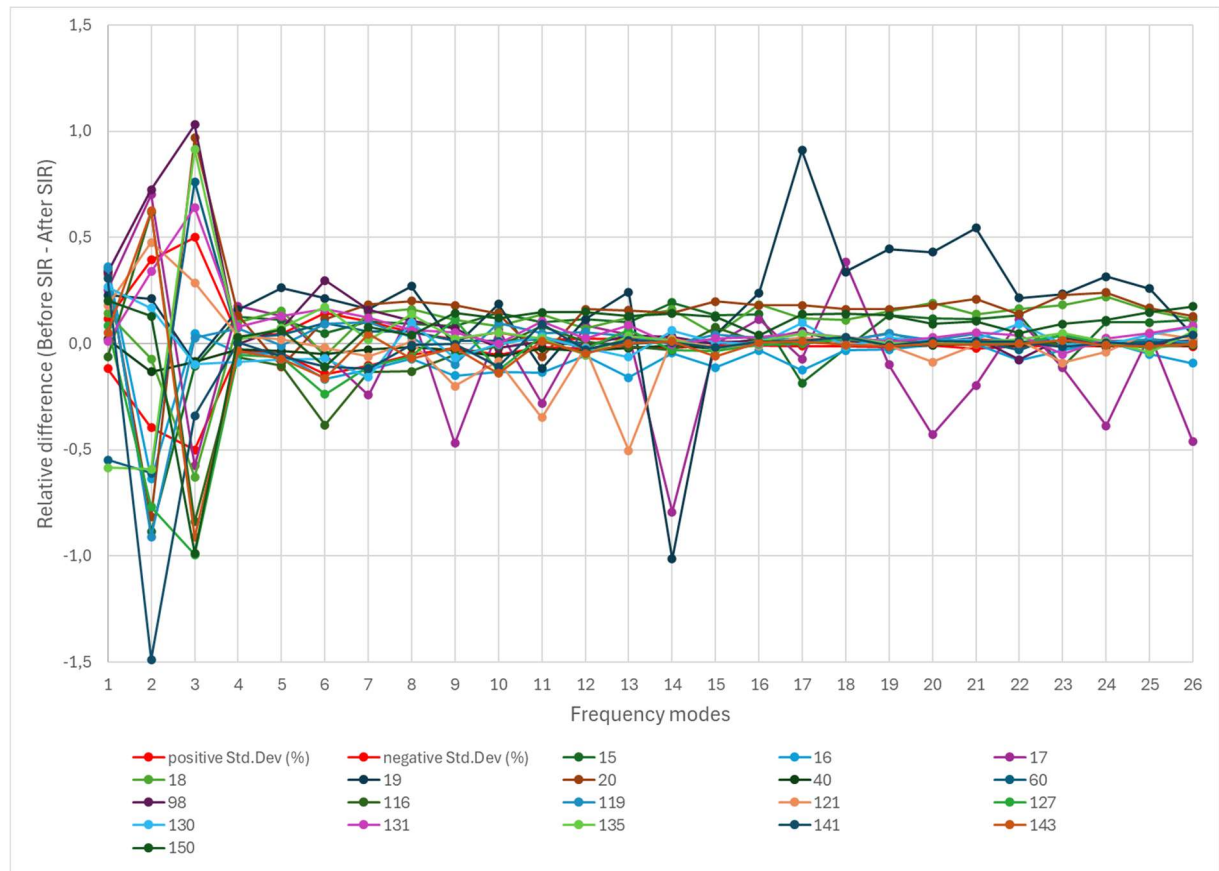


Abbildung II-69: Einfluss der SIR Methode auf die PCRT Resonanzen

II.1.3.8 Arbeitspaket 3.6

Titel: PCRT Datenaufnahme und Messung der Probekörper im Zustand "as-built" und wärmebehandelt

Die Messung der Proben erfolgt jeweils einzeln. Neben der Identifikationsnummer werden Gewicht und Länge gemäß Versuchsplan erfasst und dokumentiert.

Die Ergebnisse sind zusammengefasst in AP3.5.

II.1.3.9 Arbeitspaket 3.7

Titel: Detektion der Materialeigenschaften durch PCRT und Überlagerung der Daten mit den Ergebnissen der Zugprüfung.

Die Ergebnisse der Zugprüfung wurden unter dem Kapitel II.1.3.5.12 verwendet und erläutert.

II.1.4 AP 4 - Entwicklung einer AM geeigneten SIR Inspektion & Optimierung des Mess- und Analysesystem für hochkomplexe AM Strukturen

Grundlagen

Die Messmethodik der SIR-Inspektion beruht auf einer hochfrequenten Anregung mit einer niedrigen Amplitude zur zerstörungsfreien Rissprüfung von Bauteilen. Innerhalb des Bauteils wird ein modales Chaos – eine Ausprägung mehrerer, teilweise überlagerter Schwingformen erzeugt. Im Falle eines vorhandenen Risses mit freien Rissflanken führt dies zu einer gegenläufigen Relativbewegung der Rissflanken. Liegen die Flanken eng aufeinander („Kissing Surfaces“) wird durch die Relativbewegung Reibungswärme erzeugt, die mit Hilfe der IR – Kamera aufgenommen werden kann. Der Ort der Wärmequelle entspricht dann dem Ort der Kontaktflächen der Rissflanken.

Je nach Lage und Ausrichtung des Risses lassen sich unterschiedliche Charakteristika des IR-Signals beobachten, welche sich zu unterschiedlichen Defekttypen und Auswirkungen auf die Funktionsintegrität des Bauteils zuordnen lassen. Oberflächennahe Risse lassen sich mit der Technologie am besten detektieren und stellen so eine kosteneffiziente und umweltfreundliche Alternative zur herkömmlich Farbeindringprüfung dar. Auch Risse unterhalb der Oberfläche können zu einem gewissen Grad erfasst werden, was mit herkömmlichen Methoden nicht möglich ist.

II.1.4.1 Arbeitspaket 4.1

Titel: Entwicklung einer AM geeigneten SIR Inspektion & Optimierung des Mess- und Analysesystem für hochkomplexe AM Strukturen

AP4.1 sieht die Konstruktion der SIR-Inspektionszelle unter Einbeziehung der SIR-Messtechnik, unter anderem die Verwendung einer hochsensitiven IR-Kamera, sowie die Konstruktion geeigneter Bauteilaufnahmen vor. Das Arbeitspaket schließt mit einer erfolgreichen Inbetriebnahme der Messzelle ab.

Die von FTTD entwickelte SIR Inspektionszelle ist Abbildung II-70 gezeigt. Sie besteht aus einem kompakten Tischwagen, der die Anregungseinheit mit Steuergerät sowie Elektronik und Pneumatik beherbergt. Die Tischplatte bietet Schnittstellen für die Bauteilaufnahmen und den pneumatischen Schwenkarm, der die IR Kamera führt. Bei der Auswahl der Anregungseinheit und der IR – Kamera konnte auf bereits bestehende Erfahrung des verbundenen Unternehmens FTTInc. zurückgegriffen werden.

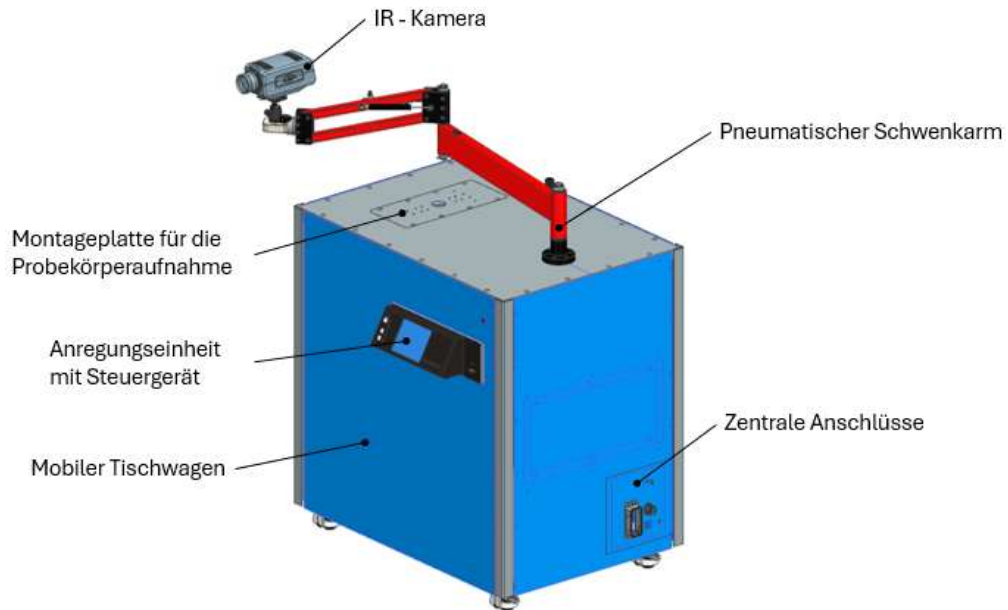


Abbildung II-70: SIR-Testzelle

Die kompakte Bauweise und Verwendung eines Tischwagens als Basiskonstruktion ermöglicht einen mobilen Einsatz der Messzelle. Des Weiteren erlaubt der pneumatische Schwenkarm die Inspektion des Probekörpers aus mehreren Ansichten ohne dem Probekörper selbst umspannen zu müssen.

Für die Erstellung des Spannkonzepthes wurde eine Anforderungsliste (Tabelle II-5) erstellt.

Das daraus abgeleitete Spannkonzzept ist in Abbildung II-71 dargestellt. Der Probekörper wird dabei an drei Punkten am äußeren Durchmesser mittels Spannhebeln geklemmt. Die Anregung des Probekörpers erfolgt vertikal über die Stempel – Anregungseinheit – Kontaktfläche.

Die Vermessung eines Probekörpers erfordert insgesamt vier IR-Aufnahmen, wobei die Kameraposition unverändert bleibt (vertikale Draufsicht) und nur die Position des Probekörpers variiert wird. Die Vorgehensweise folgt dem SIR-Versuchsplan aus Kapitel II.1.2.3.

Die Inspektion erfolgt zunächst für die 0° - Ausrichtung, anschließend wird die Einspannung gelöst und der Probekörper um 60° um die vertikale Achse im Uhrzeigersinn gedreht. Hierfür waren sowohl in der Spannvorrichtung als auch im Probekörper Makierungen für eine bessere Ausrichtung vorgesehen.

Potenzielle Risse, die durch die 3 – Punkt – Lagerung vorher verdeckt waren, können nun erkannt werden. Diese Schritte werden für die Inspektion der Unterseite des Probekörpers wiederholt.

FTTD hat insgesamt 3 Versionen diese Spannkonzepthes erarbeitet und die Inspektionsqualität iterativ durch weniger Verschattung und einstellbarer Klemmkraft verbessert. Es wurden auch zwei alternative, nachgiebigere Konzepte untersucht, welche jedoch nicht die benötigten Moden anregen konnten.

Tabelle II-5: Anforderungen an das Spannkonzep

Konstruktionsanforderung	Konstruktionsmaßnahme
Die Einspannung soll...	
....nachgiebig genug sein, um das Herausbilden des modalen Chaos zu ermöglichen.	• Materialauswahl: 3D gedrucktes faser-verstärktes Nylon • Weitere Vorteile: Nylon ermöglicht Nutzung der Vorteile des 3D Drucks: Rapid – Prototyping, Höchste Konstruktionsfreiheit, Variable und schnelle In – House – Fertigung
... steif genug sein, um den Probekörper ortsfest zu halten, umso eine scharfe IR – Aufnahme zu erhalten.	• 3 – Punkt – Lagerung • Einspannung mittels Spannhebeln • Positionierungshilfen ermöglichen konzentrische Positionierung des Probekörpers sowohl in der Einspannung als auch oberhalb der Anregungseinheit
... die Sicht auf den Probekörper so wenig wie möglich verdecken und eine freie Top-Down-Ansicht sowie eine Seitenansicht ermöglichen.	• 3 – Punkt – Lagerung am äußeren Rand des Probekörpers • Geringe Verschattung der Probekörper durch materialreduziertes Design
... einen Metall – Metall – Kontakt vermeiden, um eine Beschädigung des Bauteils und den Verschleiß der Anregungseinheit vorzubeugen	• Verwendung eines Stempels • nichtmetallische Zwischenlage zwischen den Kontaktflächen (Probekörper-Stempel sowie Stempel – Anregungseinheit)
...ein einstellbare und kontrollierbare Spannkraft besitzen.	• Einstellen der Spannkraft über die Vorspannkraft der Schrauben an den Spannhebeln
...ein schnelles Ein- und Umspannen des Probekörpers ermöglichen	• Verwendung von Spannhebeln
...eine reproduzierbare Ausrichtung des Bauteils ermöglichen.	• Skala im Basisbauteil der Spannvorrichtung sowie eine Schablone mit Winkelangabe

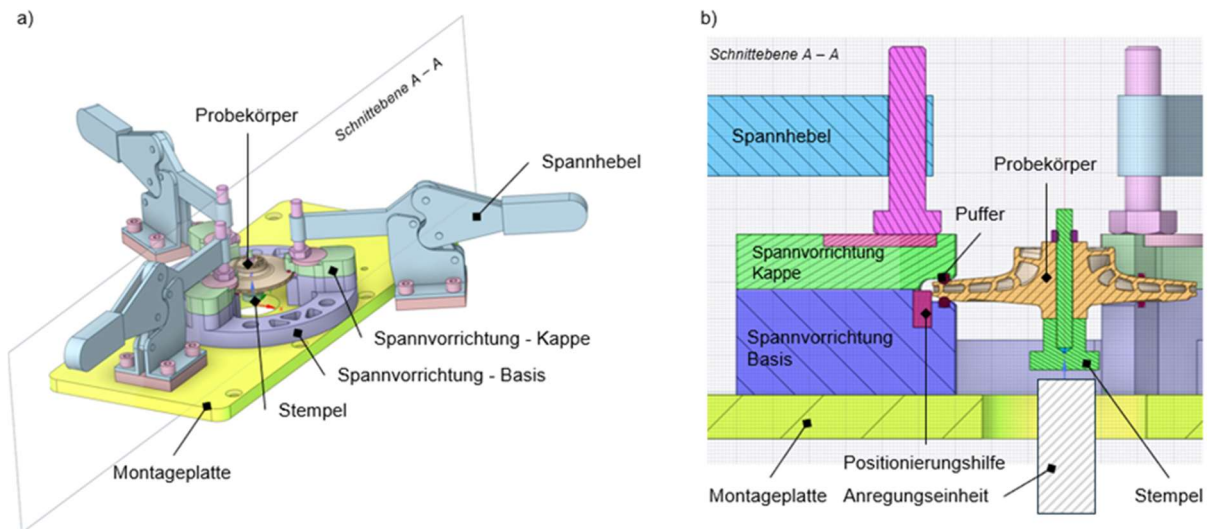


Abbildung II-71: Probekörper mit Spannvorrichtung a) dimetrische Ansicht, b) Schnittansicht A-A

II.1.4.2 Arbeitspaket 4.2

Titel: Validierung des SIR-Systems durch Tauglichkeitsuntersuchungen fehlerbehafteter additiver Probekörper mit bekannten Defekten

Das Arbeitspaket widmet sich der Validierung des SIR Systems. Ausgehend von initialen Inspektionsparametern anhand von Erfahrungswerten soll die Tauglichkeit des SIR Systems geprüft werden. Hierfür werden die SIR Aufnahmen der defektbehafteten Probekörper erstellt. Grundvoraussetzung ist eine hinreichende Anzahl an Schlechteilen, die zum Einfahren des Inspektionsprozesses benötigt werden.

Das Arbeitspaket 4.2 war maßgeblich von den Verzögerungen aus der Probekörperherstellung betroffen. Zusammen mit der Projektentscheidung, erst die PCRT Messungen durchzuführen, lagen FTDD erst zur Projekthalbzeit die ersten Probekörper in geringer Stückzahl vor. Der Impeller 28 wies dafür eine hohe Anzahl an Defekten auf und diente daher als Benchmark für die Untersuchungen in AP4.2.

Für die ersten Tests konnte FTDD auf im Unternehmensverbund FTInc. entwickelte Parametersätze für die Anregung sowie einer SIR-Software zurückgreifen.

Bei den initialen Parametersätzen handelt es sich um eine leichte Anregung. Eine (weitere) Beschädigung des Bauteils sollte ausgeschlossen werden. Durch eine kleinschrittige Erhöhung von Energie und Amplitude der Anregung konnte das SIR-Signal bis zum Erreichen der Ziele von AP4.2 verstärkt werden.

Die vorhandene Software verfügte zu Beginn des Forschungsvorhabens lediglich über die Grundfunktionen wie dem Stream der IR-Signals während der SIR-Messung sowie ein paar Funktionen zur Visualisierung. Eine Beispielaufnahme ist in Abbildung II-72 dargestellt.

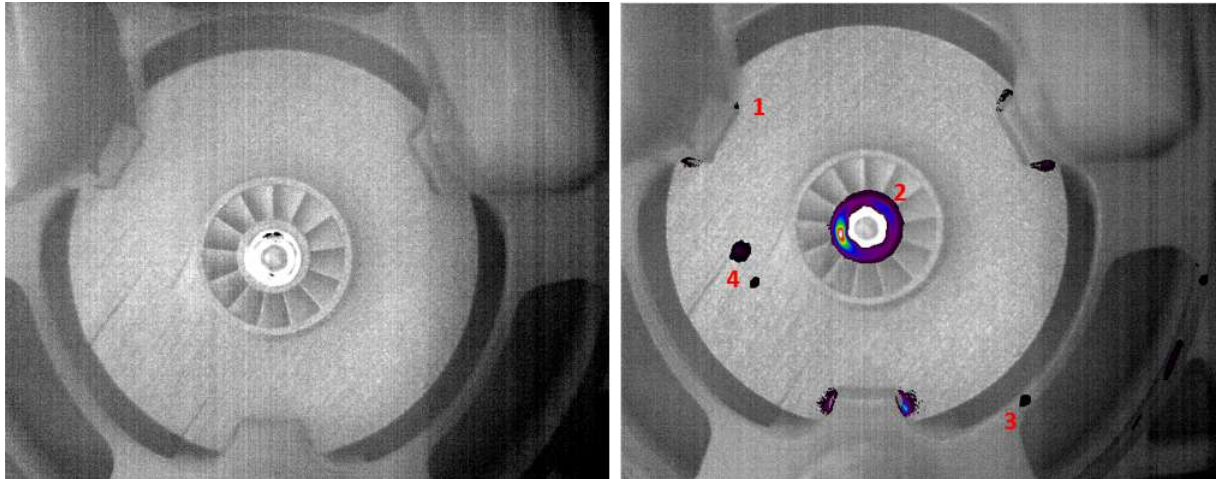


Abbildung II-72: links: IR-Graustufensignal ohne Anregung;
rechts: Max. Response IR-Signal während der Anregung mit Farbskala

Abbildung II-72 zeigt in der linken Darstellung das initiale IR-Signal vor der Anregung, auch als *First Frame* bezeichnet. Während der Anregung bzw. Messdauer wird das IR-Signal aufgezeichnet und über eine Farbcodierung nach dem maximalen IR-Signal in Relation zum *First Frame* skaliert. Die rechte Darstellung aus Abbildung zeigt dabei vier Charakteristika der SIR-Aufnahmen. In Bereichen der Einspannung (1) wird Reibungswärme freigesetzt. An Orten nahe der Anregung (2) lässt sich ebenfalls ein starkes IR-Signal beobachten. Während des Messvorgangs treten zumeist auch Störsignale wie Reflektionen (3) auf. Die Defektpositionen (4) sind daher stark von der maximalen IR-Signal abhängig und können gegebenenfalls mit den vorhandenen Algorithmen zum Post-Processing übersehen werden. In der Aufnahme für Impeller 28 aus Abbildung werden mit initialen Softwareversion zwei Defekte durch den Benutzer erkannt. Der Stand der SIR-Software lässt weder genauere Angaben zur Defektposition oder Defektart zu. Eine Option zum Speichern der Aufnahmen ist nicht vorhanden. Eine mögliche Ausgabe ist lediglich ein Screenshot aus der Benutzeroberfläche.

Die Untersuchungen aus AP4.2 zeigen die Anwendbarkeit der SIR-Technologie für additive Bauteile. Die Grundvoraussetzungen für eine Messwertaufnahme wie beispielsweise ein validierter Initialparametersatz für die Anregung sowie eine Software zum Steuern und Visualisierung der SIR-Messung sind vorhanden. Im Post-Processing der Messwerte fehlt es an Algorithmen zur Einteilung des Infrarotsignals in defektrelevante (Abbildung II-72, 4) und defekt unrelevante (Abbildung II-72, 1-3) Messwerte. Tiefergehende Auswertelgorithmen zur näheren Beschreibung des Defektes wie Größe und Position müssen entwickelt werden. Die Option zum Speichern der Messwerte muss gegeben sein. Die systematische Steigerung des SIR-Signals an den Defektpositionen in Arbeitspaket 4.3 soll das Finden von Rissen mittels Softwarealgorithmen vereinfachen.

II.1.4.3 Arbeitspaket 4.3

Titel: Steigerung des Inspektionsnachweises unterschiedlicher Fehlerarten durch Optimierung der SIR-Parameter

Basierend auf den initialen Settings soll eine systematische Steigerung der SIR Signalstärke durch Variation der Inspektionsparameter erfolgen. Dabei soll eine weitere Schädigung durch eine zu intensive Anregung der Bauteile vermieden werden.

Das Arbeitspaket widmet sich zudem der Reproduzierbarkeit des Inspektionsprozesses und ergänzt die Parameteroptimierung durch numerische FE- sowie bruchmechanischen Untersuchungen. Neben der Defektart „Risse“ soll auch die Leistungsfähigkeit des SIR für andere Defektarten wie Poren, Lack of Fusion Fehlern und Pulvereinschlüsse vor der Wärmebehandlung bewertet werden.

Für die Parameterstudie stand FTTD ein rissbehafteter Impeller (SER28) zur Verfügung. Für eine bessere Aussagekraft wären mehr Referenzbauteile mit Rissen erforderlich gewesen. Dennoch konnte die Parameterstudie in einem kleineren Umfang durchgeführt werden.

Der Operator ist in der Lage über ein kleines Display an der Anregungseinheit die eingebrachte Amplitude, Energie und Frequenz abzulesen und in eine TestLog-Datei zu übertragen. Ein automatisches Auslesen der Daten war durch die verfügbaren Schnittstellen, welche das Gerät zur Anregung bietet, nicht möglich. Das Aufzeichnen der IST-Werte des Anregungssystem soll zudem eine Reproduzierbarkeit der Messungen untereinander ermöglichen. Ist ein Teil nicht korrekt gespannt, kann dies durch das TestLog nachvollzogen und die Messung wiederholt werden.

Bei der Bewertung der Parameterstudie wurde sich vorrangig auf die Videoaufzeichnung des IR-Signals und die Ausgelesenen IST-Werte des Anregungssystem gestützt. Die Algorithmen und Methodik wurde im Laufe des Projektes noch weiter verfeinert (siehe II.1.4.5). Zum frühen Zeitpunkt des Projektes standen jedoch nur diese Werkzeuge zur Verfügung.

Die Winkelabhängigkeit wurde bereit in Kapitel II.1.4.2 genannt und deren Einfluss auf die Testresultate beschrieben. In der Studie wurden ausgehend vom initialen Parametersatz vorallem die Anregungsparameter wie Amplitude, Energie und Dauer der Anregung variiert. Es zeigt sich, dass ein gewisser Schwellwert an eingebrachter Energie notwendig ist, um Defekte wie Risse sichtbar zu machen. Die Parameterkombinationen zum Erreichen dieses Schwellwertes liegen nahe den Erfahrungswerten mit dem initialen Parametersatz.

Ein höheres Energieniveau steigert die Defektnachweisbarkeit nicht. Zudem gibt die Maschine bei einer zu hohen eingebrachten Energie eine *Overload*-Meldung aus. Indirekt kann ein zu hohes Energieniveau nur über eine zu hohe Anregungsdauer erreicht werden. Solange die Anregungszeit unterhalb eines ermittelten Limits bleibt, sollte eine Schädigung des Bauteils ausgeschlossen sein. Die Parameterstudie wurde mit einem überarbeiteten Parametersatz abgeschlossen.

Es wurde versucht mittels FE- und Modalanalyse die Anregung aus den Tests nachzuvollziehen. Wie in den Grundlagen 0 beschrieben, nutzt die SIR-Technologie das Prinzip des modalen Chaos - eine Ausprägung mehrerer, teilweise überlagerter Schwingformen. Dies bringt den Vorteil, dass alle Bereiche des Bauteils angeregt werden und potenzielle Risse Reibung erzeugen. Mittels numerischer Methoden ist es jedoch nicht möglich das modale Chaos in der Simulation abzubilden, da es zu viele Unbekannte bei der Wahl der Randbedingungen gibt.

Abgleichend mit der Bauteil- und Fehlerakte aus Tabelle A-2 konnte ermittelt werden, dass die SIR-Technologie Spannungsrisse und die künstlich eingebrachten Delaminationen im Inneren des Bauteils als Fehlertyp detektieren konnte. Sehr kleine, künstlich eingebrachte Delaminationen (<5 Layer zu je

60 µm mit einer Länge $\leq 5\text{mm}$) können auch im Inneren nicht erfasst werden. Eine aufbauende Studie zur Anwendbarkeit des SIRs auf unbeabsichtigt auftretende Delamination könnte einen weiteren Erkenntnisgewinn liefern.

Gasporen konnten mit dem SIR nicht erfasst werden. Es wird vermutet, dass diese zu klein sind und bei der Anregung nicht die erforderlichen Flanken für die Reibung besitzen.

Angesintertes Pulver kann sich durch die SIR-Messungen lösen. Das lassen Beobachtungen aus II.1.6.1 vermuten.

II.1.4.4 Arbeitspaket 4.4

Titel: Neubewertung fehlerhafter Probekörper nach mechanischer Nacharbeit und Bewertung des Drifts des SIR Inspektionsergebnisses

Das Arbeitspaket untersucht den Einfluss von für AM-Bauteile üblicher mechanischer Nacharbeit auf den akustischen Inspektionsdatensatz. Zu den gängigen Nachbearbeitungsverfahren zählen das Überdrehen der äußeren Kontur sowie das Strömungsschleifen der inneren Kontur, um aus dem additiven Rohling ein Funktionsbauteil herzustellen. Der Drift in der Inspektionsantwort und somit die Sensitivität beider akustischer Verfahren soll untersucht werden.

Mit der Definition der Anforderungen in Arbeitspaket 1 und der Fertigungsplanung in Arbeitspaket 2 wurde sich für eine Near-Net-Shape Kontur (nah der finalen Kontur) des Demonstrators entschieden. Dies bot den Vorteil, die Materialkosten pro Probekörper zu reduzieren und eine höhere Anzahl an Probekörpern zu fertigen. In der frühen Phase des Projektes stellte dieser Entschluss einen entscheidenden Vorteil dar. Zum Projektende wurde jedoch klar, dass eine Untersuchung der typischen Nachbearbeitungsschritte nicht mehr möglich war, da kein Material zum Entfernen durch Drehbearbeitungen vorhanden war.

Der Drift in der Inspektionsantwort durch das Strömungsschleifen wurde ebenfalls als wenig zielführend eingeschätzt. Die komplexen Innenkanäle des Demonstrators sind mit den bekannten Verfahren zur Nachbearbeitung (AFM – Abrasive Flow Machining) schwer zugänglich. Es verbleiben oft Rückstände der Schleifpaste im Inneren. Das PCRT-Verfahren kann zudem die bestehenden Modelle bei einer Geometrieänderungen nicht nutzen. Es muss wieder ein Goldstandard aufgebaut werden. Für das SIR waren die meisten Defekte in den Probekörpern nicht sichtbar, sodass eine Nachbearbeitung diesen Umstand nicht geändert hätte.

Aus diesen Gründen wurde ein Änderungsantrag eingereicht. Nach Zustimmung des Änderungsantrages wurde ein Teil des vorgesehenen Budgets für die Nachbearbeitung der Probekörper als ein F&E-Unterauftrag an das IAPT erteilt (18k €, gemäß 0850 der Gesamtverkalkulation von FTTD), um weitere Probekörper aus bekannt rissanfälligen Werkstoffen und Parametereinstellungen zu fertigen. Somit sollte die Datenbasis für die SIR-Technologie vergrößert werden.

Für die Fertigung weiterer Impeller mit rissanfälliger Materiallegierung am IAPT wurden zwei Aluminiumlegierungen gewählt, die sich in der Vergangenheit als rissanfällig gezeigt haben. Dabei handelt es sich zum einen um die Legierung AlMgTy80 der Firma Fehrmann, die zu Heißrissen bzw. Mikrorissen neigt, sowie eine sich noch in der Entwicklung befindende Aluminiumlegierung mit erhöhtem Magnesiumanteil, die zu größeren Spannungsrissen neigt. Zunächst wurde mit diesen beiden Legierungen eine Parameterstudie durchgeführt, die die Fertigung von 422 Würfel umfasst, die mit unterschiedlichen Prozessparametern gefertigt und mittels Schliffbild analysiert wurden, um ein geeignetes Parameterfeld für die Fertigung rissbehafteter Impeller zu ermitteln.

Im Anschluss wurden 38 Impeller mit unterschiedlichen Parametern gefertigt. Da die Vorversuche zeigten, dass die Rissausbildung abhängig von der Bauteilausrichtung ist, wurden die Impeller teilweise mit 45 Grad Neigung, stehend und liegend gefertigt.



Abbildung II-73: Mikroschliffbild von Probewürfel aus AlMgTy80 mit Mikrorissen.

Tabelle II-6: Übersicht gefertigte Impeller mit zu Rissen neigenden Aluminiumlegierungen

Benennung	Anzahl	Legierung	Ausrichtung
200Series	14	AlMgTy80	45 Grad
300Series	9	Al mit erhöhtem Mg Anteil	45 Grad
400Series-L	6	Al mit erhöhtem Mg Anteil	liegend
400Series-S	9	Al mit erhöhtem Mg Anteil	stehend

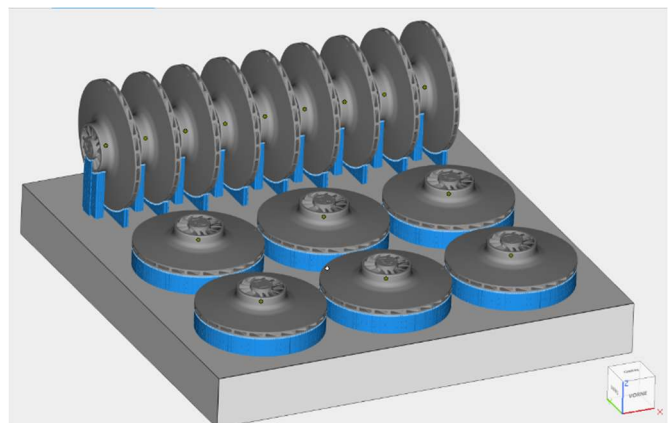


Abbildung II-74: Links: Foto von Baujob mit Impellern mit 45 Grad Neigung. Rechts: Schematische Darstellung von Baujob mit stehenden und liegenden Impellern.



Abbildung II-75: Spannungsriß auf der Impellerunterseite

Der erste Baujob mit AlMgTy80 bekam bei FTTD 200ter Seriennummern (gemäß Tabelle II-6) zugeordnet, um eine deutliche Trennung vom Hauptprojektrahmen sicherzustellen. Für die 200Series wurde das Modell nochmals um das übliche Fertigungsoffset aufgedickt, um die Möglichkeit der Nacharbeit nicht erneut auszuschließen. Um die SIR Tests zu ermöglichen, wurde die Spannvorrichtung angepasst. Die Messungen auf der SIR Maschine zeigten jedoch keine Indikationen.

Zum einen kann das daran liegen, dass die adaptierte Spannvorrichtung zum Ende des Projektes nicht vollends auf die angepasste Geometrie optimiert werden konnte. Zum Anderen ergibt sich aus den Schliffbildern, dass die Heißrisse eine Länge von ca. 500 μm besitzen und die Spannungen sich in den Poren lösen. Beratend im Unternehmensverbund FTTInc. und basierend aus früheren Erfahrungen werden Heißrisse aufgrund ihrer kleinen Ausprägung als nicht-detektierbar für das SIR eingestuft.

Für den zweiten Baujob aus Arbeitspaket 4.4 wurde daher die Legierung gewechselt. Die Baujobs der 300Series (Tabelle II-6) orientierten sich in Geometrie und Ausrichtung (45°) wieder dem Hauptprojektrahmen. Fünf der neun Probekörper (303, 306, 307, 308 & 309) wiesen deutlich optisch erkennbare Spannungsrisse auf der Unterseite auf, welche ausgehend von der Nabe bis teilweise zum äußeren Durchmesser wachsen. Leichte Delaminationen bzw. Verzugslinien konnten bei fast allen Probekörpern beobachtet werden.

Für die SIR-Messungen konnten die im Hauptprojekt erarbeiteten Spannvorrichtungen und Prozesse (siehe II.1.4.1, II.1.4.2) erneut genutzt werden. Trotz der optisch sichtbaren Risse (Abbildung II-75) können die entwickelten Algorithmen aus dem Forschungsprojekt (siehe Kapitel II.1.4.5) die Risse nicht erkennen. Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass sich die Wärme ausgehend vom Ort der Anregung schnell im Bauteil verteilt (hohe Wärmeleitfähigkeit des Grundlegierungselementes Aluminium). Da die Algorithmen nach hohen Amplituden bzw. einem hohen Delta des IR Signals je Pixel sucht, entsteht ein Rauschen im Post-Processing, welches keinem Riss zugeordnet werden kann. In der Videosequenz der IR-Aufnahme ist jedoch zu erkennen, dass die Risse eine unterbrochene Wärmeleitung darstellen (Abbildung II-76). Die folgenden Auswertungen müssen daher händisch an der Videosequenzen durchgeführt werden. Für zukünftige Verbesserung der Defekterkennung kann an Algorithmen zur unterbrochenen Wärmeleitung gearbeitet werden.



Abbildung II-76: Links: Riss auf der Unterseite des Probekörpers 308; Rechts: Unterbrochene Wärmeleitung an der Stelle des Risses bei einer Al-Legierung

Für die 400Series (3.Baujob) wurden Impeller liegend und stehend gefertigt. Diese Impeller verfügen über keine Wellenbohrung, wodurch das Zwischenbauteil (Stempel) für die SIR-Tests entfällt. Dadurch breitet sich die Wärme noch schneller im Bauteil aus als bei der 300Series.

Von Außen lassen sich bei dem Baujob keine Defekte erkennen. Dies wird zudem durch die Reste der Supportstruktur auf der Unterseite der liegenden Impeller erschwert.

Im SIR-Bild lassen sich ähnlich wie bei der 300Series bei einigen der stehenden Impeller eine unterbrochene Wärmeleitung erkennen (siehe Abbildung II-77). Besonders die Bereiche um die Nabe sind betroffen. Es besteht die Vermutung, dass die Risse tiefer im Bauteil liegen. Des Weiteren sind einige runde, von der Erwärmung nicht betroffene Stellen zu erkennen.

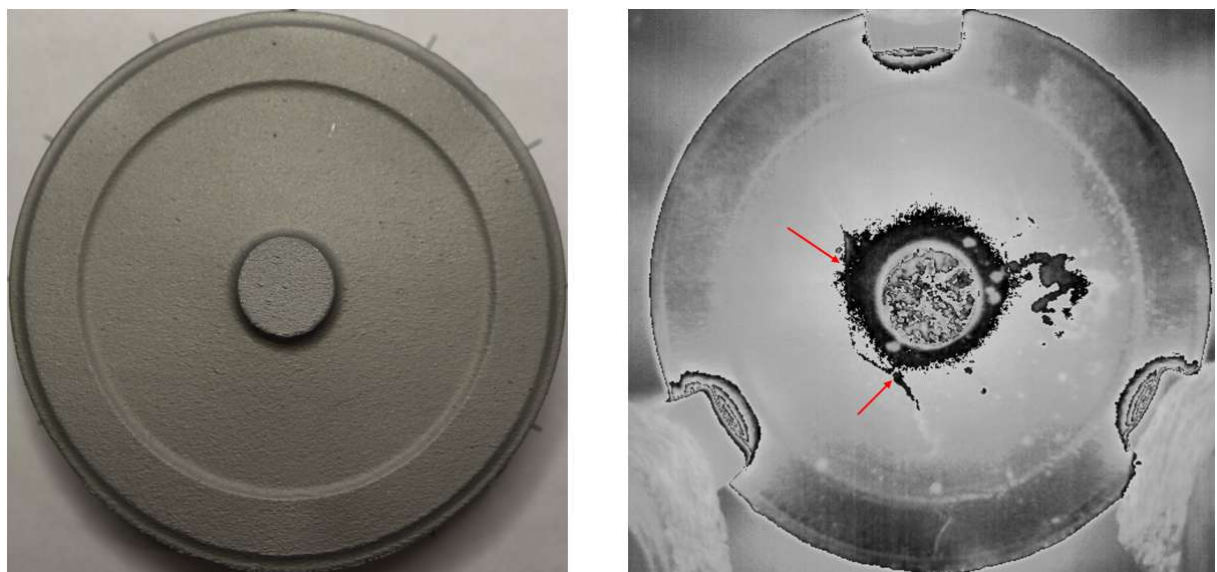


Abbildung II-77: Links: Unterseite des Probekörpers 403 ohne sichtbaren Defekt; Rechts: Infrarotaufnahme mit unterbrochener Wärmeleitung an der Stelle des Risses

Auch bei dem liegenden Impeller weisen einige Impeller Risse auf. Aufgrund der Supportreste ist äußerlich nichts zu erkennen. Durch Reibung an den Rissflanken bei der Anregung entdeckt zeigt der Impeller 415 zwei ausgeprägte Risse, 90 Grad zueinander versetzt und ausgehend von der Nabe bis zum äußeren Durchmesser.

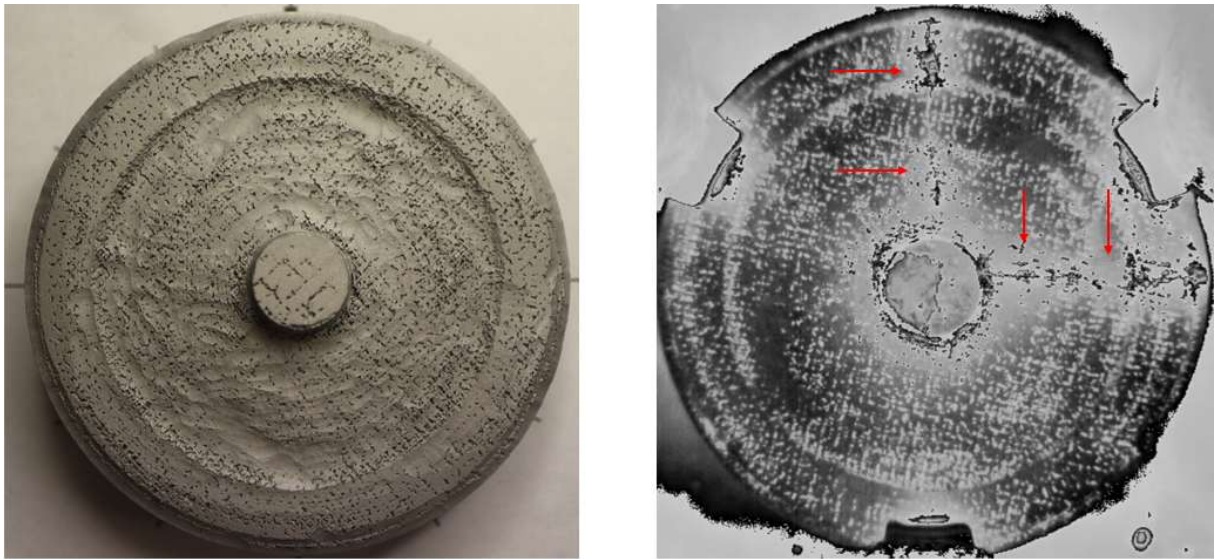


Abbildung II-78: Links: Unterseite des Probekörpers 415 ohne sichtbaren Defekt; Rechts: Infrarotaufnahme mit zwei erkennbaren Rissen

Abschließend lässt sich sagen, dass die Entscheidung zum Änderungsantrag und die Ergebnisse als sehr positiv eingestuft werden können.

Mit dem verbleibenden Budget aus Pos. 0850 (5k €) wurde ein Unterauftrag an REM Surface Engineering erteilt, um einige Probekörper (Impeller) mit dem Verfahren des chemischen Polierens nachzubearbeiten. Das Verfahren erzielt einen gleichmäßigeren Abtrag im Vergleich zum gängigen AFM-Prozess. Das Abtragsmedium kann besser in die inneren Strukturen eindringen und lässt sich problemlos rückstandsfrei entfernen. Diese Technologie adressiert somit ein für FTTD wesentliches Problem der Nachbearbeitung innerer Strukturen und unterstützt den Demonstrator auf den Weg zur Produktreife.

II.1.4.5 Arbeitspaket 4.5

Titel: Einbindung der PCRT Inspektionsdaten zur spezifischen Aufbereitung der SIR-Inspektionsdaten.

In diesem Arbeitspaket sollen die PCRT Inspektionsergebnisse für eine bessere Defekterkennung mittels SIR genutzt werden. Ähnlich wie in HAP3 werden Algorithmen zu Weiterverarbeitung der SIR-Rohdaten entwickelt, um den Anwender mittels unterstützender Algorithmen zur Defekterkennung (DRA) auf Fehlstellen mit hoher Wahrscheinlichkeit hinzuweisen. Die Rohdaten sollen in Vorbereitung auf AP5 auf wenige beschriebene Kenngrößen reduziert werden.

Für die Aufarbeitung der SIR-Rohdaten ist es entscheidend die Videosequenzen in einzelne Bildausschnitte (Frames) zu zerlegen. Dies ermöglicht eine zeitliche Auflösung des IR-Signals im Gegensatz zu der Extremwertbetrachtung und Downscaling des IR-Signals zum Maximalwert. Somit kann die Erwärmung jedes einzelnen Pixels über der Messzeit ausgewertet werden. Aus der Auflösung der IR-Kamera ergibt sich eine Genauigkeit aus der Pixelgröße von ca. 0,16mm. Die Schwelle für die Rissdetektion wird auf 3-5 Pixel, also >0.5mm geschätzt.

Die weitere Verarbeitung der SIR-Rohdaten orientiert sich an den beschriebenen Algorithmen von Holland [9]. Dabei werden die ermittelten Temperaturverläufe an normierte Kurven zur Beschreibung der Risseigenschaften angenähert. In der Abhandlung von Holland [9] werden drei Szenarien für die Wärmeleitung der Reibungswärme auf der Oberfläche in der Nähe eines Risses nach der dynamischen Anregung des Bauteils beschrieben (siehe Abbildung II-79).

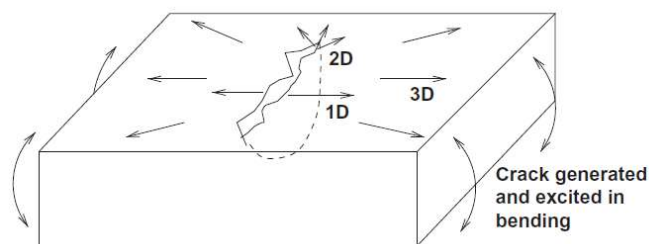


Abbildung II-79: Wärmeübertragungsprofile nach Holland [9, S. 505]

Die Wärmeübertragung an den Rissflanken verhält sich demnach eindimensional (1D), an der Risspitze zweidimensional (2D) und in den umliegenden Bereichen dreidimensional (3D).

Die realen Temperaturverläufe je Pixel werden an die normierten Temperaturverläufe angenähert (siehe Abbildung II-80).

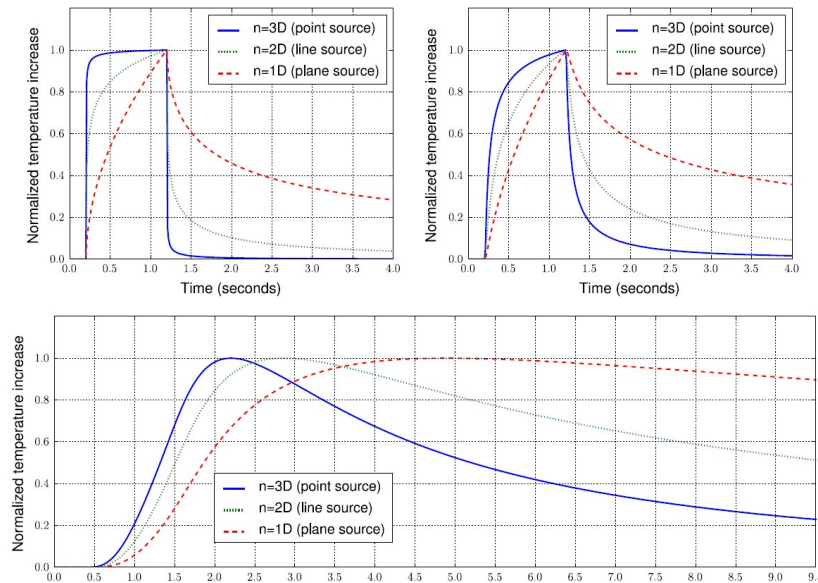


Abbildung II-80: Beispiele für Wärmeübertragungsprofile für unterschiedliche Reff-Werte [9, S.504]

Das Ergebnis ist ein normierter Reff-Wert, der eine dimensionslose Tiefe des Defektes darstellt. Bezogen auf die Parameterstudie aus II.1.4.3 ist der Algorithmus unabhängig von den gewählten Anregungsparametern, solange der Schwellwert für die Erzeugung der Reibungswärme erreicht wird.

Abbildung II-81 zeigt die Stufen des Defekterkennungsalgorithmus über die Projektlaufzeit anhand des Impeller 28. Zu Projektbeginn war die Software in der Lage zwei Risse festzustellen. Durch die zeitliche Betrachtung der Temperaturverläufe konnte die detektierbare Anzahl an Rissen zur Projekthalbzeit auf fünf gesteigert werden. Der finale Algorithmus findet selbstständig zehn Risse im Impeller 28.

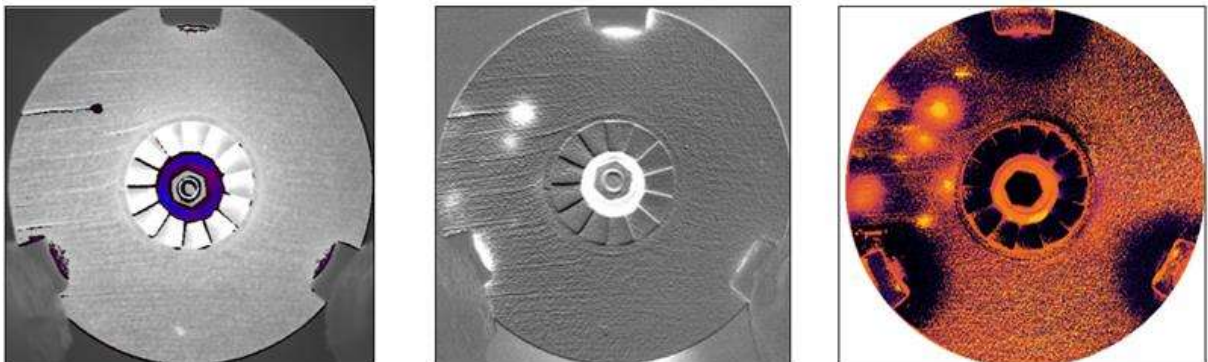


Abbildung II-81: Stufen des Defekterkennungsalgorithmus (DRA);
Links: initialer DRA; Mitte: Zwischenstand zur Projekthalbzeit; Rechts: Finaler DRA zum Projektende

Unter Berücksichtigung der Wärmeleitfähigkeit des jeweiligen Materials kann die dimensionslose Kennzahl in einen Wert R für die Beschreibung der Tiefe umgerechnet werden. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Tiefe des Defekte in Millimeter angegeben wird, jedoch mit Ist-Werten aus Schriftbildern oder CTs kalibriert werden müsste. Dies wird in den Ausblick des Projektes bzw. weiterer Arbeiten gestellt.

Das SIR bietet den entscheidenden Vorteil, dass es eine Aussage über die Defektposition geben kann. Diese liegt nach Abschluss der Messung in Pixelkoordinaten (kartesische Koordinaten) vor. Da die Impeller ausschließlich in einer Draufsicht (top, bottom) getestet wurden, kann ein Kreis an den Außendurchmesser angefügt (siehe Abbildung II-82) und somit ein Polarkoordinatensystem aufgebaut werden. Zusätzlich werden alle Bereiche außerhalb des Kreises für die Defektsuche und das Bestimmen

der normierten Defekttiefe R nicht berücksichtigt. Somit kann die Leistungsfähigkeit des Defekterkennungsalgorithmus gesteigert werden.

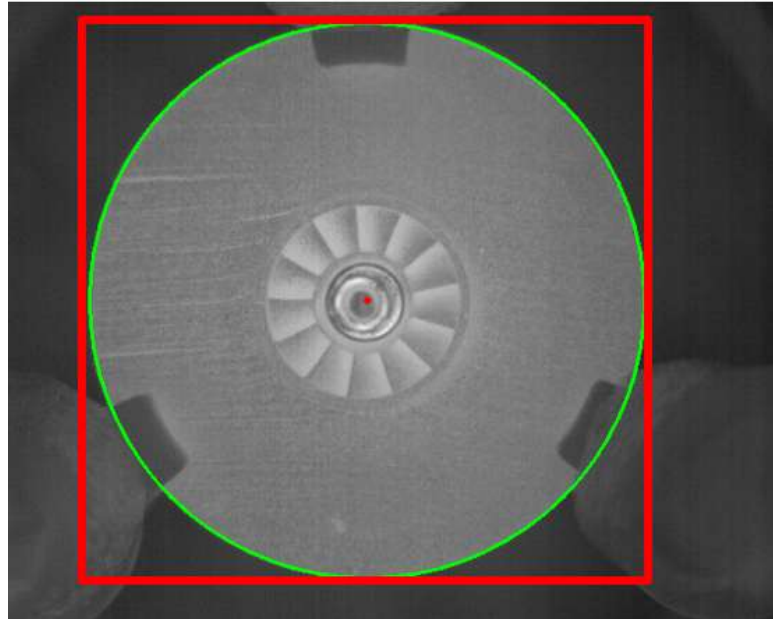


Abbildung II-82: Circle Detection und Reduzierung des Bildausschnitts (Datenmenge)

Da der Außendurchmesser (nominal) bekannt ist und die Impeller immer nach TDC (Top Dead Center) bzw. $TDC+60^\circ$ ausgerichtet sind, können die Defektpositionen in Polarkoordinaten (Winkel θ , Radius r zum Mittelpunkt) mit einer Defekttiefe R und einer Anpassungsgüte an die normierten Kurven ausgeschrieben werden. Diese Kennzahlen werden an Arbeitspaket 5 (Kapitel II.1.5) übergeben.

II.1.5 AP 5 - Digitale Fusion der zwei Qualitätsmetriken für eine neuartige umfängliche kombinierte Inspektion mittels SIR & PCRT

II.1.5.1 Arbeitspaket 5.1

Titel: Zusammenführung und Überlagerung der Qualitätsmetriken zur Qualitätsbewertung.

Der Antrag sieht eine Überlagerung der Qualitätsmetriken aus PCRT und SIR in einer Datenbank vor. Dazu werden die komplexen Messdaten auf wenige beschriebene Kenngrößen kondensiert. Das AP soll die Synergieeffekte aus PCRT für eine ganzheitliche Bauteilbewertung und SIR für oberflächennahe Defekte aufzeigen. Dem Fehler werden anhand hochbeanspruchter, kritischer Bereiche Fehlerkennzahlen (Kritikalität) zugeordnet, um eine Einteilung in Gut- und Schlechteile zu ermöglichen.

FTTD überführt die Position der Defekte aus dem SIR in eine repräsentative Defektkennzahl (DK), welche anhand der Endanwendung das strukturelle Risiko des Defektes bewertet. Bewertungsgrundlage ist eine vorangegangener Festigkeitsnachweis des Demonstrators.

Die Erläuterungen der definierten Defektkennzahlen 1 bis 4 erfolgt in den kommenden Absätzen. Ein Ampelsystem – grün, gelb und rot – soll eine schnelle visuelle Einordnung der Defekte ermöglichen. Liegt kein Defekt vor für das Bauteil, so wird eine leere Defektmatrix erzeugt, welche mit der Defektkennzahl „0“ gleichzusetzen ist.

DK = 1 - grün:

Der gefundene Defekt liegt auf dem äußeren Radius des Impellers und innerhalb des üblichen Fertigungsaufmaßes. Da kein tragender Querschnitt durch die Defektposition beeinflusst wird, fällt das strukturelle Risiko gering aus. Durch die Lage des Defektes innerhalb des Fertigungsaufmaßes besteht zudem eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass der Defekt durch die Endbearbeitung beseitigt wird. Somit stellt die Einteilung durch die mögliche weitere Nutzung des Rohlings einen ressourcenschonenden Ansatz und einen wirtschaftlichen Mehrwert dar.

DK = 2 - gelb:

Der gefundene Defekt liegt auf dem äußeren Radius des Impellers, jedoch tiefer als das vorgesehene Fertigungsaufmaß. Die Einteilung in die gelbe Kategorie erfordert eine Einzelbewertung in Form einer bruchmechanischen Analyse, sofern eine weitere Nutzung erwünscht ist. Im Prototypenbau ist das eine übliche Vorgehensweise für Bauteile mit limitierten Lebenszyklen. Solange das Zykluslimit des Bauteils vor dem Versagen durch den mit SIR gefundenen Defekt erreicht wird, ist der Riss aus dem SIR weniger kritisch.

Die Chance auf Defektfreiheit nach der Endbearbeitung ist bei dieser Defektkennzahl gering bis ausgeschlossen.

DK = 3 - gelb:

Der gefundene Defekt liegt unterhalb des tragenden Querschnitts und stellt ein hohes strukturelles Risiko für das Bauteil dar. Es besteht jedoch eine hohe Wahrscheinlichkeit für Defektfreiheit nach der Endbearbeitung. Als Defekt der gelben Kategorie ist hier eine Einzelbewertung des Bauteils erforderlich.

DK = 4 - rot:

Der Defekt liegt innerhalb des tragenden Querschnitts und ist tief im Bauteil platziert. Es besteht ein hohes Risiko für die strukturelle Integrität des Bauteils und praktisch keine Möglichkeit für Defektfreiheit durch nachgelagerte Fertigungsschritte. Dies ist ein klares Ausschussteil.

Die beschriebenen Defektkennzahlen sind für den Prototypenbau und Kleinserien ein akademischer Ansatz zur Bewertung der Defekte mittels SIR. Hierfür müssen bauteilspezifische Versagenskriterien und Nachbearbeitungsschritte hinterlegt werden. Für eine Produktlinie bzw. einen Kundenauftrag im Bereich der Luftfahrt wird jedoch ein nachweislicher Indikator bereits zum Ausschuss des Bauteils führen. Dieses Feedback hat FTDD während der Projektlaufzeit von (assoziierten) Partnern mehrerer SIR-Projekte gesammelt.

Vibrant stellt für die Zusammenführung der Qualitätsmetriken die VIPR- und z-Plots zur Verfügung.

Im Gegensatz zur Intention aus der Antragsstellung wurde keine technologieübergreifende Defektkennzahl erstellt. Auch mit der Verlängerung der Projektlaufzeit lag das komplette Datenpaket aus PCRT und SIR zu spät vor, um eine technologieübergreifende Kennzahl zu entwickeln. Die Metriken beider Technologien könnten jedoch mit geringem Aufwand genutzt werden, um eine kombinierte Defektkennzahl zu erstellen.

II.1.5.2 Arbeitspaket 5.2

Titel: Prototypische Entwicklung einer Analyseoberfläche zur Auswertung der spezifischen sowie kombinierten PCRT- und SIR-Metriken für eine umfängliche Qualitätssicherung.

Am IAPT wurde eine prototypische Analyseoberfläche entwickelt, die eine Visualisierung der kombinierten Datenmengen aus Fertigungsinformationen, SIR-Messungen und PCRT-Messungen ermöglicht. Wie in Abbildung II-83 zu sehen ist, ist die Oberfläche in drei Abschnitte unterteilt. Links sind die allgemeinen Bauteil- und Fertigungsinformationen einsehbar, wie z.B. eine interaktive 3D-Darstellung des CAD-Modells, die Seriennummer des Bauteils, die Nummer des Baujobs, das Fertigungsdatum und zusätzliche Kommentare. In der Mitte werden die Ergebnisse der SIR-Messung visualisiert. Hierbei können unterschiedliche thermale und reale Bilder angezeigt werden, die während der Messung aufgenommen wurden. Zudem werden alle mit dem Messverfahren detektierten Defekte mit Positionsangabe in Polarkoordinaten sowie eine Einstufung der Kritikalität aufgelistet. Kritische Defekte werden farblich hervorgehoben.

Rechts werden die Ergebnisse der PCRT-Messung visualisiert. Dazu werden der zPlot und die unterschiedlichen VIPR-Plots mit allen eingepflegten Bauteilen angezeigt und dabei farblich markiert, ob sich die Bauteile innerhalb oder außerhalb der Grenzwerte befinden, wobei das aktuell angezeigte Bauteil hervorgehoben wird.

Zudem besitzt die Oberfläche eine Reportfunktion, die die wichtigsten Kenndaten aller eingepflegten Bauteile in eine Excel-Datei exportiert und die Bauteile entsprechend der kombinierten SIR- und PCRT-Ergebnisse in Gut- und Schlechteile einstuft.

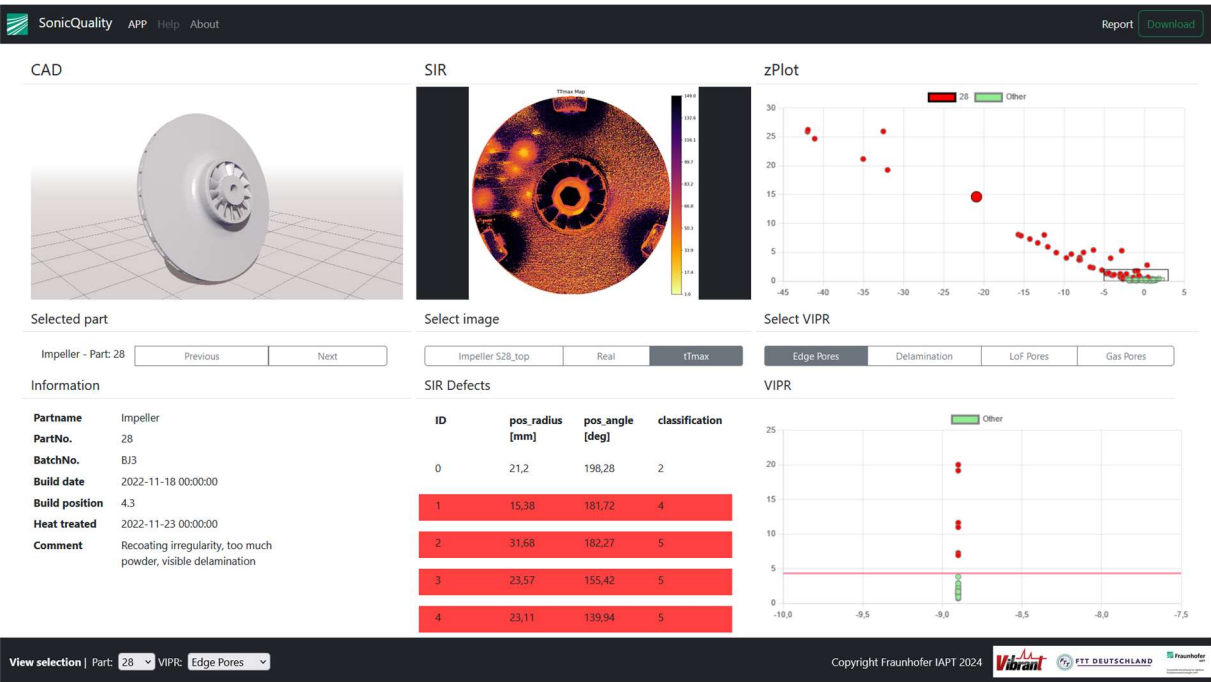


Abbildung II-83: Prototypische Analyseoberfläche zur Visualisierung der Daten aus PCRT und SIR.

II.1.6 AP 6 - Validierung der effizienten akustischen Prüfmethodik in der Serienfertigung & Einbindung der Ergebnisse in den pränormativen Bereich

II.1.6.1 Arbeitspaket 6.1

Titel: Validierung durch prototypische Serienfertigung des Demonstrators

Das Paket der Validierung soll durch eine prototypische Serienfertigung des Demonstrators durchgeführt werden. Neben der Fertigung von 30 Demonstratorbauteilen (inkl. Wärmebehandlung und Nacharbeit) erfolgt die nachgelagerte Prüfung mittels des PCRT- und SIR-Verfahrens sowie mit konventionellen Prüfansätzen (bspw. Schliffbilder, CT, Farbeindringprüfung, Zugprüfung der Begleitproben, usw.)

Da der Informationsgewinn durch die Fertigung weiterer Gut-Bauteile im Rahmen einer prototypischen Serienfertigung zu dem geplanten Zeitpunkt vom Konsortium als gering eingeschätzt wurde, wurde ein Änderungsantrag für das AP 6.1 eingereicht. Die Fertigung weiterer Bauteile mit gezielt eingebrachten, realitätsnahen Defekten, anhand derer die Sensitivität der beiden Messverfahren SIR und PCRT validiert und eine Weiterentwicklung der Messverfahren erfolgen kann, wurden von allen Partnern als zielführender betrachtet.

Daher wurden statt eines Baujobs, der eine prototypische Serienfertigung des Demonstrators dienen soll zwei weitere Baujobs mit gezielt eingebrachten Defekten gefertigt, wobei die Anzahl der Impeller reduziert wurde und stattdessen eine große Anzahl von zylindrischen Proben gefertigt wurde, wodurch der Probenumfang insbesondere für die PCRT-Untersuchung stark vergrößert werden konnte. Zudem wurde ein Baujob normal wärmebehandelt und einer bei geringerer Temperatur wärmebehandelt, wodurch die Sensitivität des PCRT-Systems gegenüber einer bisher noch nicht betrachteten Fehlerursache in der additiven Fertigung untersucht werden konnte. Auch wurden Zylinderproben und Zugbegleitproben mit 45 Grad Neigung gefertigt, entsprechend der Neigung der Demonstratorbauteile, um die Auswirkungen der Ausrichtung auf das Resonanzverhalten zu analysieren. Die Ergebnisse sind mit den Untersuchungen an den anderen Baujobs unter AP3 zusammengefasst.

Zuzüglich zu der Fertigung weiterer Proben wurde eine Stichprobenauswahl an Impellern nach dem kombinierten Prüfprozess aus PCRT und SIR nochmals mit dem PCRT Verfahren gemessen. Somit lassen sich Einflüsse auf das Bauteil zwischen den einzelnen PCRT Messwertaufnahmen bestimmen. Als wesentlicher Prozessschritt ist hier das SIR-Messverfahren zu nennen. Auch weitere Zwischenprozessschritte wie der (mehrmalige) Versand sowie auch die CT-Messung sind der Vollständigkeit halber aufzuführen, auch wenn deren Einfluss gering einzuschätzen ist.

Für die Untersuchung der Einflüsse zwischen den PCRT-Messungen muss zunächst die Wiederholgenauigkeit des PCRT-Verfahrens ermittelt werden. Abbildung zeigt die Wiederholgenauigkeit des PCRT-Verfahren innerhalb einer 2-Sigma Grenze.

Abweichungen außerhalb der Hüllkurve lassen sich eindeutig auf ein verändertes Resonanzverhalten und somit eine Änderung der Bauteileigenschaften zurückführen.

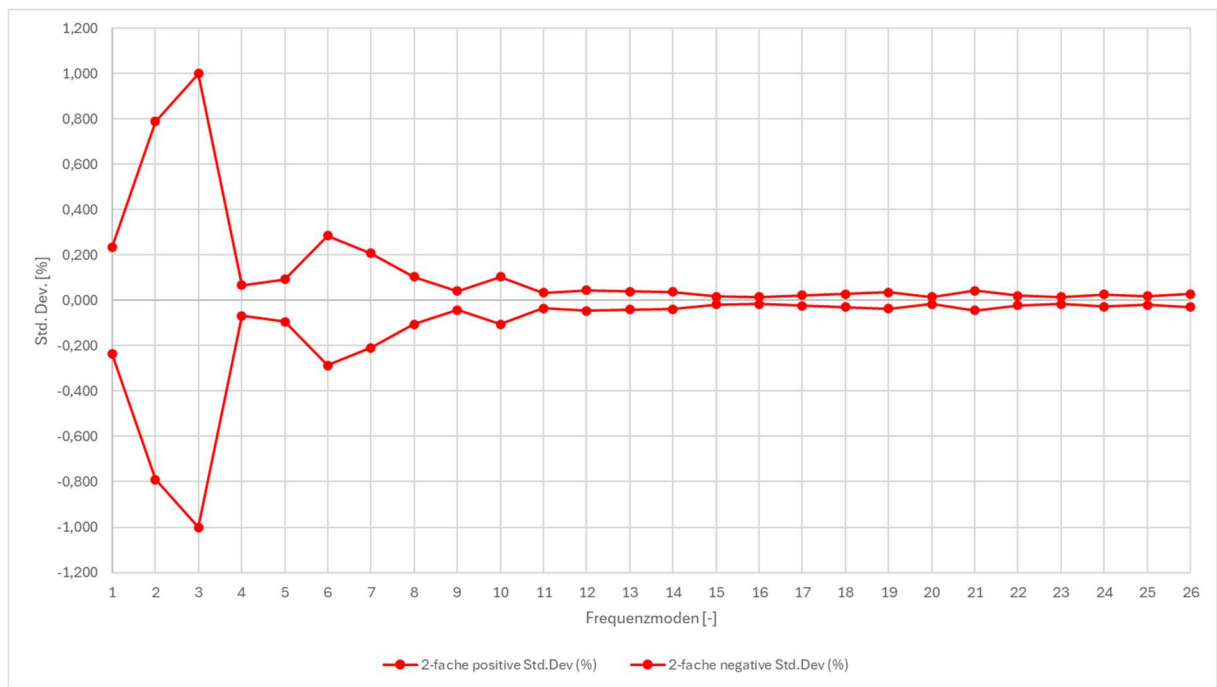


Abbildung II-84: Hüllkurve der 2-fachen Standardabweichung zwischen den PCRT-Messungen

Vibrandt und FTT haben zusammen den Einfluss des SIR Verfahrens auf das Frequenzspektrum untersucht. Es konnte beobachtet werden, dass die Streuungen für die Stichprobenmessungen aus BJ2 und BJ3 am größten waren.

Einige Bauteile zeigen einen generellen Shift des Resonanzspektrums (siehe Abbildung II-85). Dies deutet gemäß der Beschreibung aus Abbildung II-6 auf eine Änderung der Bauteilmasse hin. Geringere Bauteilmassen führen zu einem Shift zu höheren Resonanzfrequenzen. Dies deckt sich mit Beobachtungen von FTT, die bei einigen Seriennummern nach dem SIR Test Rückstände von Pulverpartikeln um das Bauteil herum verteilt bemerkt haben.

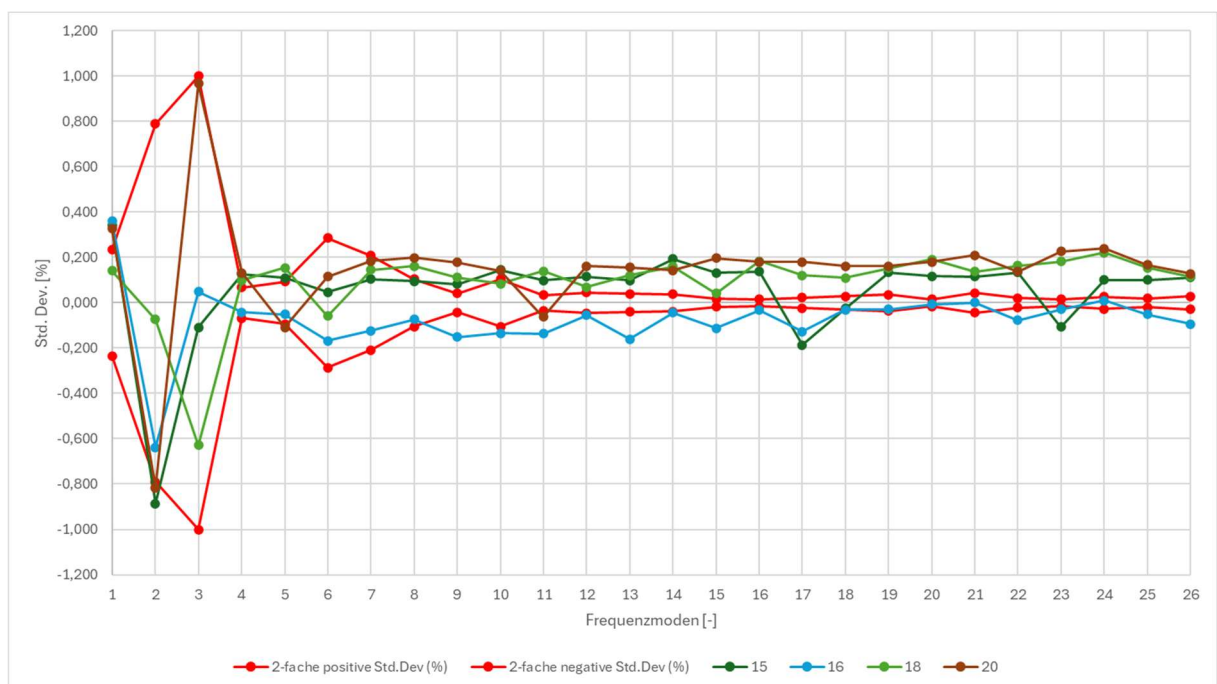


Abbildung II-85: Shift des Resonanzspektrums für Stichproben aus BJ2 und BJ3

Eine andere Auswahl an Stichproben aus BJ2 und BJ3 zeigt ein eher zufälliges Verhalten (positive und negative Peaks). Dies kann auf eine Änderung der Steifigkeit des Bauteils hindeuten. Beispiele dafür sind Impeller 17 und 19 (siehe Abbildung II-86).

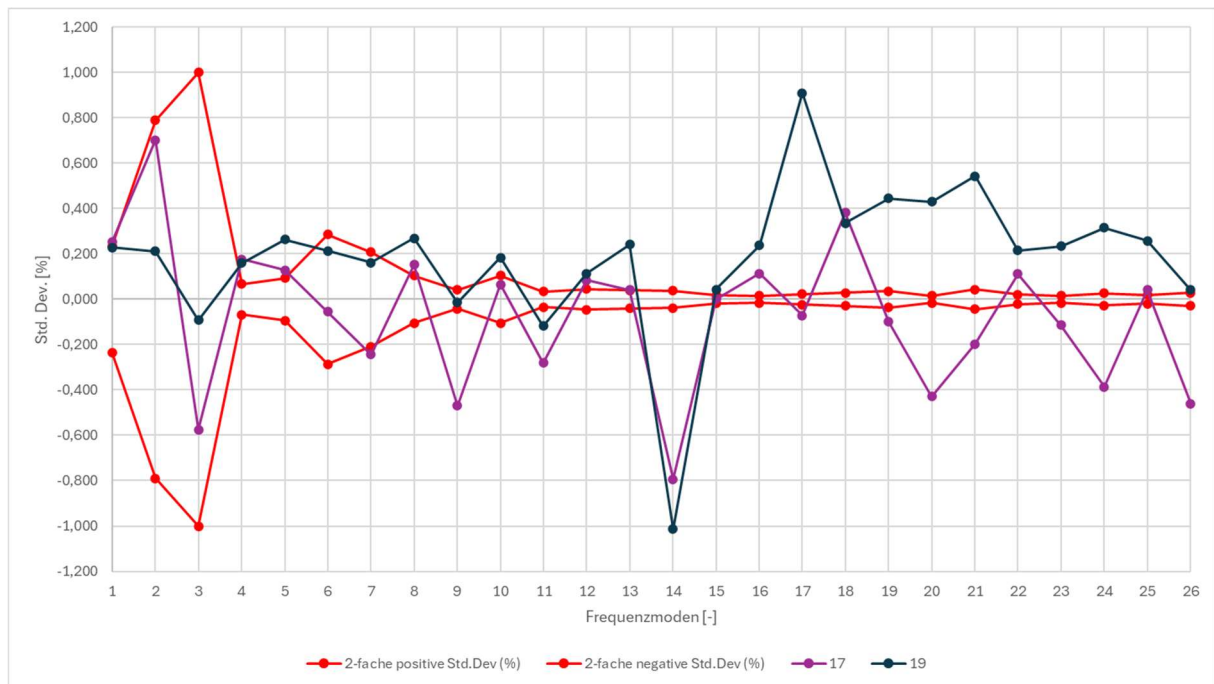


Abbildung II-86: Steifigkeitsänderung anhand des Resonanzspektrums

Nach der Reparatur SLM500 werden fallen die Deltas im Resonanzspektrum deutlich geringer aus. Die übrigen Stichprobenmessungen sind in Abbildung II-87 dargestellt. Auffällig hier sind der Impeller 121 (Steifigkeitsänderung) und 150 (positiver Resonanzshift, Massereduktion). Bei beiden Impellern handelt es sich um defektprovokativ hergestellte Bauteile. Impeller 121 wies eine künstliche Delamination im Inneren auf, während Impeller 150 mit einer Scan Velocity von 50% gedruckt wurde. Die restlichen Probekörper liegen weitestgehend innerhalb des definierten 2-Sigma-Intervalls. Somit kann eine Schädigung durch das SIR für Gutteile ausgeschlossen werden, während für stark ausgeprägte Defekte eine weitere Schädigung nicht ausgeschlossen ist.

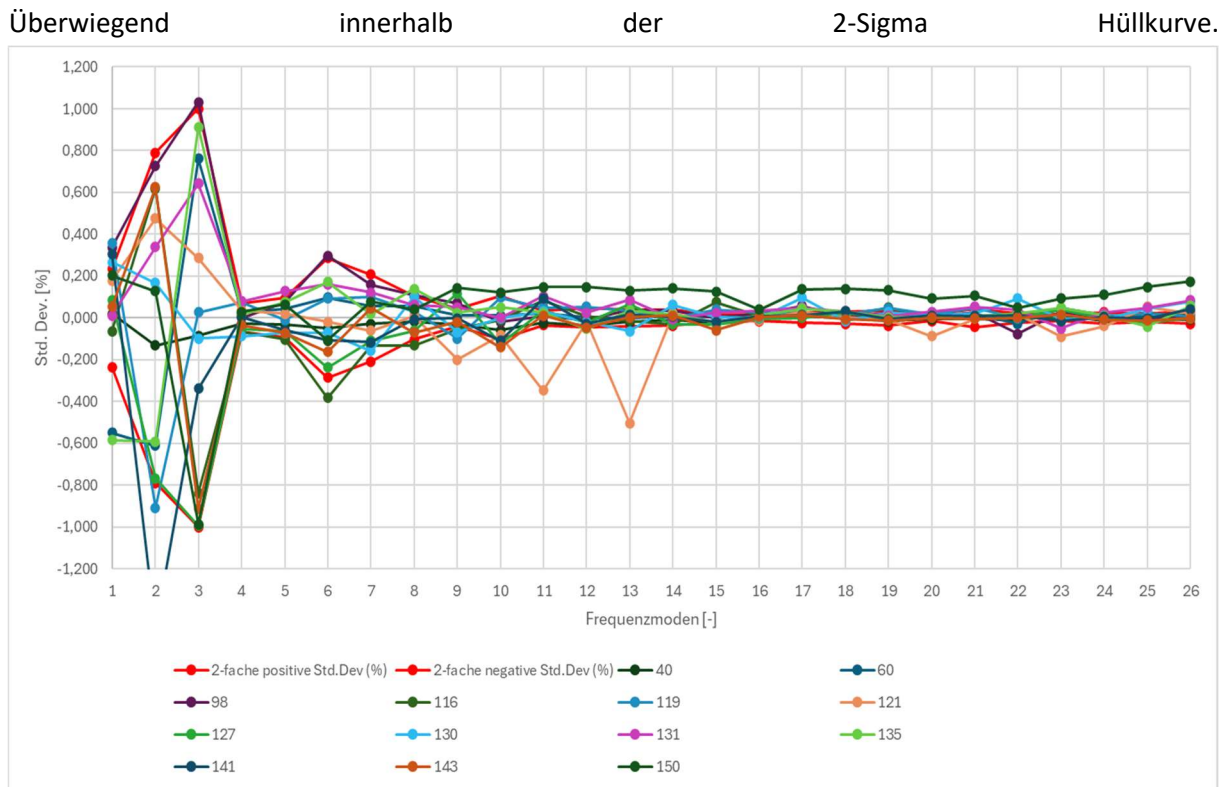


Abbildung II-87: Änderung des Resonanzspektrum für den eingefahrenen AM-Prozess mit Gut- und Schlechteilen

II.1.6.2 Arbeitspaket 6.2

Titel: Entwicklung von pränormativen Ansätzen zur Standardisierung der prozessnachgelagerten Bauteilprüfung mittels kombinierter PCRT- und SIR-Prüfung

Das Teilarbeitspaket sieht die Erstellung eines Leitfadens für die Prüfung, Analyse und Beurteilung von 3D-gedruckten Bauteilen vor. Pränormative Ansätze für den Einsatz der gemeinsam entwickelten Prüfmethode sollen abgeleitet werden.

Wie in AP5.1 bereits beschrieben, konnte Zuge der Projektlaufzeit keine kombinierte Zusammenführung der PCRT- und SIR-Prüfung erfolgen, da die vollständigen Datensätze zu spät vorlagen. Entsprechend konnten auch keine Pränormativen Ansätze für den Einsatz der kombinierten Prüfmethode erarbeitet werden. Die Projektpartner sehen aber noch immer ein großes Potential in der kombinierten PCRT- und SIR-Prüfung und planen den Ansatz in der Zukunft weiter zu verfolgen.

II.1.6.3 Arbeitspaket 6.3

Titel: Validierung der Leistungsfähigkeit am industriellen Demonstrator im Vergleich zum Standard Prüfprozess (wirtschaftliche Validierung).

Es ist die Erarbeitung einer Handlungsrichtlinie sowie die weiterführende nationale und internationale Verbreitung der Technologie geplant. Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit sollen bewertet werden.

Eine Handlungsrichtlinie wurde in diesem Projekt aufgrund der Teil- und Endergebnisse nicht erarbeitet.

Der Aspekt der Leistungs- und wirtschaftlichen Bewertung ist in diesem Projekt nicht so leicht zu bewerten. Zum einen kann kein konventionelles Prüfverfahren und auch nicht die Kombination mehrerer Verfahren eine Defektfreiheit am Bauteil ausschließen. Lediglich das Risiko würde durch die Anwendung geeigneter Technologien minimiert.

Zum anderen zeigen beide Verfahren, dass sie für eine wirtschaftliche Betrachtung nicht pauschal generalisierbar sind. Das PCRT benötigt eine große Stückzahl (100-150) von nachweislich guten Bauteilen für die Entwicklung des Goldstandards. Das SIR-Verfahren ist sehr von der Geometrie und dem Material abhängig.

Um dennoch eine Bewertung zu ermöglichen, wird sich in diesem Kapitel ausschließlich auf die Demonstratorgeometrie und die durchgeführten Baujobs bezogen.

Überlegungen für den Einsatz von PCRT

Bei der Herstellung von Bauteilen im 3D Pulverbettverfahren werden in der Regel Begleitproben gedruckt. Die Begleitproben werden genutzt, um die mechanischen Kennwerte des Baujobs anhand von ausgewählten Mustern zu bestätigen. Für die Validierung müssen die mechanischen Kennwerte der Begleitproben ermittelt werden, wozu aus den zylindrischen Begleitproben zunächst durch mechanische Bearbeitung ein Probenkörper Typ A oder B hergestellt werden muss, siehe Abbildung II-88.



Abbildung II-88: Probenkörper Typ B Ø 12 x L 86

Dieser Prozess kann leicht durch PCRT ersetzt werden, indem ein PCRT Trainingset aus Proben mit akzeptablen mechanischen Kennwerten verwendet wird. In Tabelle II-7 sind exemplarische Kennwerte gegenübergestellt.

Tabelle II-7: Vergleich Begleitproben Validierung

Parameter	Konventionell	PCRT
Prozesszeit	Tage	< 5min
Kosten	100-150€	ca. 30€

- PCRT kann die Prüfung schneller absolvieren, der Aufwand für die Prüfung reduziert sich deutlich weil die aufwendige mechanische Bearbeitung entfällt.
- Die PCRT Prüfung kann an mehreren Begleitproben in Druckrichtung Z (von der Bauplatte weg) durchgeführt werden um sicherzustellen, dass die Druckparameter homogen über die gesamte Bauraumhöhe eingehalten werden.
- Die PCRT Prüfung erfordert kein speziell zertifiziertes Personal.
- Die PCRT Prüfung kann sehr schnell nach Ende des Druckvorgangs erfolgen, wodurch die Freigabebeschleunigt und der Durchsatz in der Produktion verbessert wird.

Überlegungen für den Einsatz von SIR

Die SIR-Technologie ermöglicht eine Prüfung auf Risse im eigentlichen Bauteil. Im Gegensatz zum etablierten FPI-Verfahren wird bei der SIR-Prüfung nicht nur die Oberfläche auf Risse untersucht, sondern es können auch Risse im Inneren des Bauteils gefunden werden. Für den SIR Defektnachweis fließen mehrere Parameter ein (Größe des Bauteils, Material, Spannkonzent). Die genannten Prozesszeiten beziehen sich auf das Prüfen eines Demonstratorbauteils (Impeller) inkl. der Auswertung mit dem vorhandenen Spannkonzent. Ein wesentlicher Kostenanteil kommt durch die Umlage der Anschaffungskosten für die IR-Kamera zustande.

Tabelle II-8: Vergleich Rissprüfung pro Bauteil

Parameter	Konventionell	SIR
Prozesszeit	Stunden	< 10 min
Kosten	ca. 500€	ca. 100€

- die SIR-Technologie ist im Vergleich zum konventionellen FPI Ansatz 10 mal schneller und 5 mal kostengünstiger
- SIR kann im Gegensatz zum FPI auch Risse im Inneren detektieren
- Es werden keine umweltschädlichen Chemikalien verwendet
- SIR kann ohne Nachbearbeitung des Bauteils verwendet werden, während FPI eine glatte, meist überarbeitete und gut zugängliche Oberflächen benötigt

Überlegungen zum Einsatz der kombinierten Prüfmethodik SIR und PCRT

Die Kombination aus SIR und PCRT kann eine ähnliche Aussagekraft wie ein CT-Scan ermöglichen. Auch das CT-Verfahren birgt Unsicherheiten, die von der Geometrie, dem Material und der erreichbaren Auflösung abhängen. CT gilt generell als sehr aufwendig und kostenintensiv auf Grund der langen Messdauer und da die Auswertung trotz Algorithmen viel Zeit in Anspruch nimmt.

Parameter	Konventionell	SIR+PCRT
Prozesszeit	8 Stunden	20 min
Kosten	1.500€	ca. 150€

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Verwendungsnachweises

Vibrant

Nach den Personalkosten sind folgende wesentliche Kostenpositionen angefallen:

Nr	Bezeichnung	Kategorie	Begründung
1	Mathworks MATLAB Master License	Software	Berechnung von Moden und Korrelationen.
2	ANSYS Mechanical Pro	Software	Zur Vorbereitung des 3D FEM Modells zur Verwendung in der Simulation.
3	ANSYS Discovery Modelling	Software	Zur Berechnung einer FEM Simulation eines bestehenden Modells.
4	ANSYS Optislang	Software	Zur Invers-Berechnung der Eigenschaften eines Modells basierend auf seinen Modalfrequenzen.

FTTD

Nach den Personalkosten sind die wichtigsten Positionen entsprechen den größten Positionen aus der Antragsstellung für Sach- und Unteraufträge.

Nr	Bezeichnung	Kategorie	Begründung
1	IR-Kamera, Linsen, Aufnahme	Sachkosten	Der Aufbau der SIR Inspektionszele erfordert ein hochauflösendes Infrarotmesssystem.
2	Anregungssystem	Sachkosten	Für die Anregung der Probekörper ist ein entsprechendes System erforderlich.
3	Mechanische Nacharbeit	Unteraufträge	Gemäß eines Änderungs-antrages wurde stattdessen ein Unterauftrag an das Fraunhofer IAPT für die Herstellung weiterer Probekörper vergeben.

IAPT

Nach den Personalkosten beziehen sich die wichtigsten Positionen auf die Bauteilfertigung sowie Nachbehandlung.

Nr	Bezeichnung	Kategorie	Begründung
1	Metallpulver und Verbrauchsmittel in der AM-Fertigung	Sachkosten	Für die Fertigung der Probekörper benötigtes Material.
2	Wärmebehandlung und Probennachbearbeitung	Unteraufträge	Industireübliche Nachbehandlung der Probekörper und Begleitproben

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Vibrant

Im Rahmen dieses Projektes wurden Untersuchungen angestellt, die nur durch die Unterstützung der Förderung durchgeführt werden konnten. Mithilfe der Unterstützung in diesem Projekt war es möglich, den Bereich der Simulation wesentlich detaillierter zu betrachten. Durch die Unterstützung der Projektpartner war es möglich, speziell präparierte Proben zu drucken, die mit gezielten Fehlern und Eigenschaften ausgestattet wurden. Diese Proben haben uns erlaubt, die Einflüsse unterschiedlicher Fehler sehr gezielt zu betrachten. Der Projektumfang wäre ohne Förderung nicht möglich gewesen.

FTTD

FTTInc. verfügte über die grundlegende Möglichkeit die SIR Technologie zu nutzen. Dennoch hatte sie nur einen sehr kleinen Anwendungsbereich. Die Unterstützung des Förderrahmens hat es erst möglich gemacht, das FTTD ein solches System am Standort Wildau, Deutschland aufbauen konnte. Durch die geleisteten Arbeiten konnte die SIR-Technologie an sich, aber auch das additive Fertigungsverfahren und deren Qualitätsprozesse viel besser verstanden. Durch das Förderprogramm konnten Stellen geschaffen werden, welche den Standort in Deutschland stärken. Das aufgebaute Netzwerk innerhalb des Projektes bietet eine gute Basis für weitere Zusammenarbeit mit Verbundpartnern und assoziierten Partnern.

IAPT

Die durchgeführten Arbeiten sowie die dafür aufgewendeten Ressourcen waren notwendig, um die im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich zu bearbeiten.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen

IAPT

Das Fraunhofer IAPT konnte im Rahmen des Projektes SonicQuality umfassende Kenntnisse und Kompetenzen zur Erzeugung realitätsnaher Defekte in der Laserbasierten Pulverbettfertigung erlangen. Diese Expertise ist von großer Bedeutung, da sie es ermöglicht, Defekte zu simulieren, die in der Praxis während des Fertigungsprozesses auftreten können. Solches Wissen ist entscheidend zur Verbesserung der Qualitätssicherung (QS) in der additiven Fertigung, da realitätsnahe Defekte eine realistische Bewertung der Messverfahren und deren Sensitivität ermöglichen. Das erlangte Know-How wurde bereits erfolgreich in anderen Projekten eingesetzt, insbesondere zur Entwicklung von in-situ Messverfahren, die in der Lage sind, während des Fertigungsprozesses Daten zu sammeln und Abweichungen in Echtzeit zu identifizieren. Neben der internen Verwendung kann dieses Wissen auch Verwertet werden, um externen Stellen Proben mit realitätsnahen Defekten zur Verfügung zu stellen.

Des Weiteren konnten wertvolle Erkenntnisse hinsichtlich der Grenzen und Potentiale im Bereich der Thermografie und akustischen Resonanzverfahren als mögliche QS-Methodiken in der additiven Fertigung gewonnen werden. Die weitere Untersuchung der Messverfahren sowie die Übertragung auf weitere AM Technologien, wie Binderjet und DED im Rahmen von Folgeprojekten wird als sinnvoll angesehen.

Zukünftig werden die gewonnenen Erkenntnisse dazu beitragen, neue Projektideen zu entwickeln und Industrieprojekte zu initiieren. Dadurch wird ein umfassenderer Wissensschatz geschaffen, der den Anwendern der additiven Fertigung direkten Nutzen bietet.

FTTD

FTTD konnte sich über das Forschungsvorhaben mit dem Bereich der Vibro-Thermografie vertraut machen. Das Unternehmen wird auf die gewonnenen Erkenntnisse aus SonicQuality in zwei weiteren Forschungsvorhaben (LuFo VI-2, VII-1) aufbauen können.

Durch die Einblicke in die additive Fertigung und deren Qualitätssicherung kann FTTD viel Input für eine bessere Auslegung additiv gefertigter Bauteile im Kerngeschäft einfließen lassen.

Durch das Projekt wurden zwei äquivalente Vollzeitstellen geschaffen, die auch dauerhaft erhalten bleiben.

Wir sind bestrebt die gewonnenen Kontakte zur Forschung aber auch zu den Industriepartnern langfristig aufrecht zu erhalten und gemeinsame Kooperationen oder Folgeprojekte zu definieren.

Vibrant

Das Forschungsprojekt hat ermöglicht, wesentliche Aspekte von additiv gefertigten Metallbauteilen systematisch zu untersuchen. Die systematische Herstellung und Bewertung von kritischen Defekten bis zur Erkennung in einer zerstörungsfreien Prüfung bilden eine Grundlage für den praktischen Einsatz. Vibrant hat daraus Erkenntnisse in der Simulation solcher Bauteile gewonnen, die in kommerziellen Applikationen Anwendung finden sollen.

Derzeit hat Vibrant keine weiteren Forschungsvorhaben dazu geplant, wäre aber interessiert die Synergie mit der SIR Prüfung weiter zu entwickeln. Auch ist Vibrant interessiert, die Erkenntnisse in weiteren Forschungsprojekten zu vertiefen.

Vibrant wird die PCRT für additiv gefertigte Metallteile aktiv weiter als Lösung anbieten.

II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind keine Fortschritte auf dem Gebiet an dritter Stelle bekannt.

II.6 Geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Aufgrund der Verzögerungen im Projektablauf und dem Stand der Zwischenergebnisse wurde die Thematik der Veröffentlichung der Ergebnisse erst zum Projektende bzw. innerhalb des Verwendungszeitraums angegangen.

Art der Veröffentlichung	Verbund-partner	Zeitraum
Zugang zu den Ergebnissen des Verbundprojektes	Alle	unmittelbar nach Vorhabensende
Fachvortrag auf der Additive Alliance Conference, Hamburg	Vibrant, FTTD	16/10/2024
Fachvortrag auf der ASTM International Conference	Vibrant	27/10/2024

(ASTM ICAM 2024), Atlanta		
Messeauftritt Formnext	IAPT	2025
Nennung auf der Website und in Folgeprojekten	FTTD, IAPT	2025-2026
Social Media Posts	IAPT, FTTD	2025
Veröffentlichung zur Defektprovokation in AM	IAPT	2026

III. Literatur

- [1] Klein, C. *Titan-Teil: Bugatti bringt Bremssattel aus dem 3D-Drucker*. <https://www.automobilproduktion.de/technik-produktion/produktionstechnik/titan-teil-bugatti-bringt-bremssattel-aus-dem-3d-drucker-120.html>. Accessed 23 August 2018.
- [2] Matthews, M. J., Roehling, T. T., Guss, G., Wu, S. Q., Crumb, M. F., Roehling, J. D., and McKeown, J. T. 2018. Spatial Modulation of Laser Sources for Microstructural Control of Additively Manufactured Metals. *LANE 2018 - 10th Conference on Photonic Technologies*, 00 (2018) 000–000.
- [3] Ampower GmbH & Co. KG. 2019. *AMPOWER Report 2019*. AM Power GmbH & Co KG, Hamburg.
- [4] Wohlers, T. 2017. *Wohlers Report 2017. 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry*. Fort Collins: Wohlers Associates.
- [5] Möller, M., Vykhart, B., Emmelmann, C., Li, C. Huang, J., Ed. 2019. *Carbon Footprint and Cost Potential of Additive Manufacturing in Aircraft Systems*.
- [6] Wohlers, T. 2019. *Wohlers Report. 3D printing and additive manufacturing state of the industry*. WOHLERS ASSOCIATES, FORT COLLINS.
- [7] Roland Berger, Ed. 2016. *Additive Manufacturing - next generation. Study 2016*.
- [8] Wohlers, T. 2018. *Wohlers Report. 3D printing and additive manufacturing state of the industry*. WOHLERS ASSOCIATES, FORT COLLINS.
- [9] Holland, S. D. (2011). Thermographic signal reconstruction for vibrothermography. *Infrared Physics & Technology*, 54(6), 503-511.

A Anhang

Tabelle A-1: Defektprovokationsmatrix, erstellt mit pbA

Nr.	Provocation Method		Wirkprinzip			
1	Designgestützte Defektinduzierung		z.B. Konstruktion von Rillen zur Nachahmung von Beschichterschäden			
2	Variation der Stützstrukturen		Ändert Wärmeabführung und mechanischen Halt			
3	Atmosphäre (Schutzgas, Sauerstofflevel)		Oxidprodukte, Nitrierung, Spritzverhalten, Oberflächenspannung des Schmelzbades			
4	Gasstrom		Absorption und Streuung des Lasers durch Schmauch bei geringem Gasstrom			
5	Schichtdicke		Erhöhung/Verringerung der schichtdicke bei gleichbleibendem Energieeintrag			
6	Bauteilpositionierung im Bauraum		Änderung der Pulverzusammensetzung, des Einfallwinkels und des Gasstroms			
7	Druck mehrerer Bauteile bzw. umgebender Strukturen		Beeinflusst Spritzmuster und Schichtauftrag			
8	Verwendung eines beschädigten Recoaters		Auftragung teilweise zu dicker Pulverschichten			
9	Baujob pausieren		Beeinflusst thermische Historie und erzeugt Temperaturgradienten			
10	Temperaturschwankungen des Baujobs nach Fertigstellung		Verstärkt Spannungen im Bauteil			
11	Schläge gegen Baujob nach Fertigstellung		Wandelt Spannungen in Risse			
12	Arbeiten am Maximum des Prozessfensters		Zu große oder zu kleine Energieeinbringung			
13	Verwendung von schlechtem/zu häufig recycletem Pulver		Ungünstige Pulvergrößenverteilung führt zum Verdampfen oder ungenügenden Aufschmelzen			
Defect	Established Detection Method	Provocation Method	Industrial relevance (1 = very low, 10 = very high)	Temporal flexibility (i.e. when in respect to the build job can the defect be provoked, during the whole build job, once per build	Spacial flexibility (i.e. throughout the whole build area, in one line, in one specific location,...)	Expected Effectiveness (1 = very low, 10 = very high,

				job, every several layers, per layer,...)		based on literature and knowledge)
Gas pore	μ CT, Cross Sections, Archimedes (density)	1	3	by layer	In one line	8
		2	5	By build job	In one part	5
		4	5	By build job	Certain region of the build job	5
		5	8	In specific locations up to the whole build job	In specific locations up to the whole build job, thickness increase must be a multiple of the initial layer thickness	6
		7	8	By several layers, influence depending on the geometry of the nearby structure	in several layers and regions of the part (accuracy of several mm?), influence depending on the geometry of the nearby structure	3
		12	8	In specific locations up to the whole build job	In specific locations up to the whole build job	8
		13	7	By build job	By build job	7
Lack of fusion pore	μ CT, Cross Sections, Archimedes (density)	1	3	Provokable by layer	In one line	8
		2	5	By build job	In one part	3
		4	5	By build job	Certain region of the build job	3
		5	8	In specific locations up to the whole build job	In specific locations up to the whole build job, thickness increase must be a multiple of the initial layer thickness	9
		7	8	By several layers, influence depending on the geometry of the nearby structure	in several layers and regions of the part (accuracy of several mm?), influence depending on the geometry of the nearby structure	8

		12	8	In specific locations up to the whole build job	In specific locations up to the whole build job	9
		13	7	By build job	By build job	7
Crack	Dye Penetrant testing	1	3	Provokable by layer	In one line	3
		2	5	By build job	In one part	8
		3	5	By build job	By build job	4
		4	5	By build job	Certain region of the build job	6
		5	8	In specific locations up to the whole build job	In specific locations up to the whole build job, thickness increase must be a multiple of the initial layer thickness	7
		6	8	By build job	By build job	4
		7	8	By several layers, influence depending on the geometry of the nearby structure	in several layers and regions of the part (accuracy of several mm?), influence depending on the geometry of the nearby structure	5
		8	9	By build job	Lines where damage on recoater is located	7
		9	8	By layer	Several layers per Pause	8
		10	7	By build job	By build job	7
		11	7	By build job	By build job	6
		12	8	In specific locations up to the whole build job	In specific locations up to the whole build job	8
		13	7	By build job	By build job	6
Delamination	Dye Penetrant testing	1	3	Provokable by layer	In one line	3
		2	5	By build job	In one part	8
		3	5	By build job	By build job	4
		4	5	By build job	Certain region of the build job	6
		5	8	In specific locations up to the whole build job	In specific locations up to the whole build job, thickness increase must be a multiple of the initial layer thickness	8
		6	8	By build job	By build job	4

		7	8	By several layers, influence depending on the geometry of the nearby structure	in several layers and regions of the part (accuracy of several mm?), influence depending on the geometry of the nearby structure	5
		8	9	By build job	Lines where damage on recoater is located	7
		9	8	By layer	Several layers per Pause	8
		10	7	By build job	By build job	7
		11	7	By build job	By build job	6
		12	8	In specific locations up to the whole build job	In specific locations up to the whole build job	8
		13	7	By build job	By build job	6

Part-No.	Build-job	Build date	Parameterset	Convent. Test	PCRT	SIR	Comment
001	BJ1	2022-10-28	standard	Not tested	Not tested	Not tested	pretest
002	BJ1	2022-10-28	standard	Not tested	Not tested	pass	pretest
003	BJ1	2022-10-28	standard	Not tested	Not tested	Not tested	pretest
004	BJ1	2022-10-28	standard	Not tested	Not tested	Not tested	pretest
005	BJ1	2022-10-28	standard	Not tested	Not tested	pass	pretest
006	BJ2	2022-11-02	standard	pass	fail	pass	
007	BJ2	2022-11-02	standard	pass	fail	pass	
008	BJ2	2022-11-02	standard	pass	fail	pass	
009	BJ2	2022-11-02	standard	pass	pass	pass	
010	BJ2						abort due to collision with platform attachment
011	BJ2	2022-11-02	standard	fail (visible deformation)	fail	pass	Laser 3 focussshift of 6.8mm
012	BJ2	2022-11-02	standard	fail (visible deformation)	fail	fail	Laser 3 focussshift of 6.8mm
013	BJ2	2022-11-02	standard	fail (visible deformation)	fail	pass	Laser 3 focussshift of 6.8mm
014	BJ2	2022-11-02	standard	fail (visible deformation)	fail	pass	Laser 3 focussshift of 6.8mm
015	BJ2	2022-11-02	standard	fail (visible deformation)	fail	pass	Laser 3 focussshift of 6.8mm
016	BJ3	2022-11-18	standard	fail (tensile test)	fail	pass	Recoating irregularity, to much powder, visible delamination
017	BJ3	2022-11-18	standard	fail (tensile test)	fail	fail	Recoating irregularity, to much powder, visible delamination
018	BJ3	2022-11-18	standard	fail (tensile test)	fail	fail	Recoating irregularity, to much powder
019	BJ3	2022-11-18	standard	fail (tensile test)	fail	fail	Recoating irregularity, to much powder, visible delamination
020	BJ3	2022-11-18	standard	fail (tensile test)	fail	pass	Recoating irregularity, to much powder, visible delamination
021	BJ3	2022-11-18	standard	fail (tensile test)	fail	pass	Recoating irregularity, to much powder
022	BJ3	2022-11-18	standard	fail (tensile test)	fail	pass	Recoating irregularity, to much powder
023	BJ3	2022-11-18	standard	fail (tensile test)	fail	pass	Recoating irregularity, to much powder
024	BJ3	2022-11-18	standard	fail (tensile test)	fail	pass	Recoating irregularity, to much powder
025	BJ3	2022-11-18	standard	fail (tensile test)	fail	fail	Recoating irregularity, to much powder
026	BJ3	2022-11-18	standard	fail (tensile test)	fail	pass	Recoating irregularity, to much powder
027	BJ3	2022-11-18	standard	fail (tensile test)	fail	pass	Recoating irregularity, to much powder
028	BJ3	2022-11-18	standard	fail (tensile test)	fail	fail	Recoating irregularity, to much powder, visible delamination
029	BJ3	2022-11-18	standard	fail (tensile test)	fail	fail	Recoating irregularity, to much powder, visible delamination
030	BJ3	2022-11-18	standard	fail (tensile test)	fail	pass	Recoating irregularity, to much powder
031	BJ4	2022-12-16	standard	fail (visible LOF Pores on eroded surface, tensile test)	fail	pass	trickling powder, increased LoF porosity
032	BJ4	2022-12-16	standard	fail (visible LOF Pores on eroded surface, tensile test)	fail	pass	trickling powder, increased LoF porosity

033	BJ4	2022-12-16	standard	fail (visible LOF Pores on eroded surface, tensile test)	pass	pass	trickling powder, increased LoF porosity
034	BJ4	2022-12-16	standard	fail (visible LOF Pores on eroded surface, tensile test)	pass	pass	trickling powder, increased LoF porosity
035	BJ4						abort due to collision with platform attachment
036	BJ4	2022-12-16	standard	fail (visible LOF Pores on eroded surface, tensile test)	fail	pass	trickling powder, increased LoF porosity
037	BJ4	2022-12-16	standard	fail (visible LOF Pores on eroded surface, tensile test)	fail	pass	trickling powder, increased LoF porosity
038	BJ4	2022-12-16	standard	fail (visible LOF Pores on eroded surface, tensile test)	fail	pass	trickling powder, increased LoF porosity
039	BJ4	2022-12-16	standard	fail (visible LOF Pores on eroded surface, tensile test)	fail	pass	trickling powder, increased LoF porosity
040	BJ4	2022-12-16	standard	fail (visible LOF Pores on eroded surface, tensile test)	pass	pass	trickling powder, increased LoF porosity
041	BJ4	2022-12-16	standard	fail (visible LOF Pores on eroded surface, tensile test)	fail	pass	trickling powder, increased LoF porosity
042	BJ4	2022-12-16	standard	fail (visible LOF Pores on eroded surface, tensile test)	fail	pass	trickling powder, increased LoF porosity
043	BJ4	2022-12-16	standard	fail (visible LOF Pores on eroded surface, tensile test)	pass	pass	trickling powder, increased LoF porosity
044	BJ4	2022-12-16	standard	fail (visible LOF Pores on eroded surface, tensile test)	pass	pass	trickling powder, increased LoF porosity
045	BJ4	2022-12-16	standard	fail (visible LOF Pores on eroded surface, tensile test)	pass	pass	trickling powder, increased LoF porosity
046	BJ5	2022-12-21	standard	fail (machine error)	pass	pass	buildjob paused 4h just before finishing impeller, buildjob aborted by machine for unknown reason, trickling powder, increased LoF porosity
047	BJ5	2022-12-21	standard	fail (machine error)	pass	pass	buildjob paused 4h just before finishing impeller, buildjob aborted by machine for unknown reason, trickling powder, increased LoF porosity
048	BJ5	2022-12-21	standard	fail (machine error)	pass	pass	buildjob paused 4h just before finishing impeller, buildjob aborted by machine for unknown reason, trickling powder, increased LoF porosity
049	BJ5	2022-12-21	standard	fail (machine error)	pass	pass	buildjob paused 4h just before finishing impeller, buildjob aborted by machine for unknown reason, trickling powder, increased LoF porosity
050	BJ5	2022-12-21	standard	fail (machine error)	pass	pass	buildjob paused 4h just before finishing impeller, buildjob aborted by machine for unknown reason, trickling powder, increased LoF porosity
051	BJ5	2022-12-21	standard	fail (machine error)	fail	pass	buildjob paused 4h just before finishing impeller, buildjob aborted by machine for

							unknown reason, trickling powder, increased LoF porosity
052	BJ5	2022-12-21	standard	fail (machine error)	pass	pass	buildjob paused 4h just before finishing impeller, buildjob aborted by machine for unknown reason, trickling powder, increased LoF porosity
053	BJ5	2022-12-21	standard	fail (machine error)	pass	pass	buildjob paused 4h just before finishing impeller, buildjob aborted by machine for unknown reason, trickling powder, increased LoF porosity
054	BJ5	2022-12-21	standard	fail (machine error)	pass	pass	buildjob paused 4h just before finishing impeller, buildjob aborted by machine for unknown reason, trickling powder, increased LoF porosity
055	BJ5	2022-12-21	standard	fail (machine error)	pass	pass	buildjob paused 4h just before finishing impeller, buildjob aborted by machine for unknown reason, trickling powder, increased LoF porosity
056	BJ5	2022-12-21	standard	fail (machine error)	fail	pass	buildjob paused 4h just before finishing impeller, buildjob aborted by machine for unknown reason, trickling powder, increased LoF porosity
057	BJ5	2022-12-21	standard	fail (machine error)	pass	pass	buildjob paused 4h just before finishing impeller, buildjob aborted by machine for unknown reason, trickling powder, increased LoF porosity
058	BJ5	2022-12-21	standard	fail (machine error)	pass	pass	buildjob paused 4h just before finishing impeller, buildjob aborted by machine for unknown reason, trickling powder, increased LoF porosity
059	BJ5	2022-12-21	standard	fail (machine error)	pass	fail	buildjob paused 4h just before finishing impeller, buildjob aborted by machine for unknown reason, trickling powder, increased LoF porosity
060	BJ5	2022-12-21	standard	fail (machine error)	pass	pass	buildjob paused 4h just before finishing impeller, buildjob aborted by machine for unknown reason, trickling powder, increased LoF porosity
061	BJ5						Aborted due to too irregular powder coating
062	BJ5	2022-12-21	standard	fail (machine error)	fail	pass	buildjob paused 4h just before finishing impeller, buildjob aborted by machine for unknown reason, trickling powder, increased LoF porosity
063	BJ5	2022-12-21	standard	fail (machine error)	pass	pass	buildjob paused 4h just before finishing impeller, buildjob aborted by machine for unknown reason, trickling powder, increased LoF porosity
064	BJ5	2022-12-21	standard	fail (machine error)	pass	pass	buildjob paused 4h just before finishing impeller, buildjob aborted by machine for unknown reason, trickling powder, increased LoF porosity
065	BJ5	2022-12-21	standard	fail (machine error)	pass	pass	buildjob paused 4h just before finishing impeller, buildjob aborted by machine for unknown reason, trickling powder, increased LoF porosity
066	BJ6	2023-02-03	standard	pass	fail	pass	
067	BJ6	2023-02-03	standard	pass	fail	pass	
068	BJ6	2023-02-03	standard	pass	pass	pass	
069	BJ6	2023-02-03	standard	pass	pass	pass	
070	BJ6	2023-02-03	standard	pass	pass	pass	
071	BJ6	2023-02-03	standard	pass	fail	pass	
072	BJ6	2023-02-03	standard	pass	fail	pass	
073	BJ6	2023-02-03	standard	pass	pass	pass	
074	BJ6	2023-02-03	standard	pass	pass	pass	
075	BJ6	2023-02-03	standard	pass	pass	pass	

076	BJ6	2023-02-03	standard	pass	fail	pass	
077	BJ6	2023-02-03	standard	pass	fail	pass	
078	BJ6	2023-02-03	standard	pass	pass	pass	
079	BJ6	2023-02-03	standard	pass	pass	pass	
080	BJ6	2023-02-03	standard	pass	pass	pass	
081	BJ6	2023-02-03	standard	pass	fail	pass	
082	BJ6	2023-02-03	standard	pass	fail	pass	
083	BJ6	2023-02-03	standard	pass	pass	pass	
084	BJ6	2023-02-03	standard	pass	pass	pass	
085	BJ6	2023-02-03	standard	pass	pass	pass	
086	BJ7	2023-02-08	standard	pass	fail	pass	
087	BJ7	2023-02-08	standard	pass	fail	pass	
088	BJ7	2023-02-08	standard	pass	pass	pass	
089	BJ7	2023-02-08	standard	pass	pass	pass	
090	BJ7	2023-02-08	standard	pass	pass	pass	
091	BJ7	2023-02-08	standard	pass	fail	pass	
092	BJ7	2023-02-08	standard	pass	fail	pass	
093	BJ7	2023-02-08	standard	pass	pass	pass	
094	BJ7	2023-02-08	standard	pass	pass	pass	
095	BJ7	2023-02-08	standard	pass	pass	pass	
096	BJ7	2023-02-08	standard	pass	fail	pass	
097	BJ7	2023-02-08	standard	pass	fail	pass	
098	BJ7	2023-02-08	standard	pass	pass	pass	
099	BJ7	2023-02-08	standard	pass	pass	pass	
100	BJ7	2023-02-08	standard	pass	pass	pass	
101	BJ7	2023-02-08	standard	pass	fail	pass	
102	BJ7	2023-02-08	standard	pass	fail	pass	
103	BJ7	2023-02-08	standard	pass	pass	pass	
104	BJ7	2023-02-08	standard	pass	pass	pass	
105	BJ7	2023-02-08	standard	pass	pass	pass	
106	BJ8	2023-02-15	standard	fail (tensile test, cross-section)	fail	pass	EOS M290, cracking powder
107	BJ8	2023-02-15	standard	fail (tensile test, cross-section)	fail	pass	EOS M290, cracking powder
108	BJ8	2023-02-15	standard	fail (tensile test, cross-section)	fail	fail	EOS M290, cracking powder
109	BJ8	2023-02-15	standard	fail (tensile test, cross-section)	fail	pass	EOS M290, cracking powder
110	BJ8	2023-02-15	standard	fail (tensile test, cross-section)	fail	pass	EOS M290, cracking powder
111	BJ9	2023-02-24	5 Layer 5 mm top Delamination	fail (visible delamination)	fail	pass	
112	BJ9	2023-02-24	Contouroff. 0,1mm	fail (cross-section)	fail	pass	
113	BJ9	2023-02-24	standard	pass	fail	pass	
114	BJ9	2023-02-24	Contouroff. 0,12 mm	fail (cross-section)	fail	pass	
115	BJ9	2023-02-24	Contouroff. 0,14 mm	fail (cross-section)	fail	pass	
116	BJ9	2023-02-24	5 Layer 10 mm top Delamination	fail (visible delamination)	fail	pass	
117	BJ9	2023-02-24	SV 70% far surface 1mm cube	fail (cross-section, CT)	fail	pass	

118	BJ9	2023-02-24	standard	pass	pass	pass	
119	BJ9	2023-02-24	LP 50% far surface 1mm cube	fail (cross-section, CT)	pass	pass	
120	BJ9	2023-02-24	LaserPower 70%	fail (cross-section, CT)	fail	pass	
121	BJ9	2023-02-24	5 Layer 5 mm mid Delamination	fail (visible delamination)	fail	fail	
122	BJ9	2023-02-24	SV 60% far surface 1mm cube	fail (cross-section, CT)	fail	pass	
123	BJ9	2023-02-24	standard	pass	pass	pass	
124	BJ9	2023-02-24	LP 60% far surface 1mm cube	fail (cross-section, CT)	pass	pass	
125	BJ9	2023-02-24	LaserPower 60%	fail (cross-section, tensile test, CT)	fail	pass	
126	BJ9	2023-02-24	5 Layer 10 mm mid Delamination	fail (visible delamination)	fail	fail	
127	BJ9	2023-02-24	SV 50% far surface 1mm cube	fail (cross-section, CT)	pass	pass	
128	BJ9	2023-02-24	standard	pass	pass	pass	
129	BJ9	2023-02-24	LP 70% far surface 1mm cube	fail (cross-section, CT)	pass	pass	
130	BJ9	2023-02-24	Laserpower 50%	fail (cross-section, tensile test, CT)	fail	pass	
131	BJ10	2023-03-03	4 Layer small stepped Delamination	fail (visible delamination)	fail	pass	
132	BJ10	2023-03-03	Contouroff. 0,1mm	fail (cross-section)	fail	pass	
133	BJ10	2023-03-03	standard	pass	pass	pass	
134	BJ10	2023-03-03	Contouroff. 0,12 mm	fail (cross-section)	fail	pass	
135	BJ10	2023-03-03	Contouroff. 0,14 mm	fail (cross-section)	fail	pass	
136	BJ10	2023-03-03	4 Layer 10mm stepped top Delamination	fail (visible delamination)	fail	pass	
137	BJ10	2023-03-03	SV 70% near surface 1mm cube	fail (cross-section, CT)	fail	pass	
138	BJ10	2023-03-03	standard	pass	pass	pass	
139	BJ10	2023-03-03	LP 70% near surface 1mm cube	fail (cross-section, CT)	pass	pass	
140	BJ10	2023-03-03	ScanVelocity 70%	fail (cross-section, CT)	fail	pass	
141	BJ10	2023-03-03	4 Layer 5mm stepped mid Delamination	fail (visible delamination)	fail	pass	
142	BJ10	2023-03-03	SV 60% near surface 1mm cube	fail (cross-section, CT)	fail	pass	
143	BJ10	2023-03-03	standard	pass	fail	pass	
144	BJ10	2023-03-03	LP 60% near surface 1mm cube	fail (cross-section, CT)	fail	pass	
145	BJ10	2023-03-03	ScanVelocity 60%	fail (cross-section, CT)	fail	pass	
146	BJ10	2023-03-03	4 Layer 10mm stepped mid Delamination	fail (visible delamination)	fail	fail	
147	BJ10	2023-03-03	SV 50% near surface 1mm cube	fail (cross-section, CT)	fail	pass	
148	BJ10	2023-03-03	standard	pass	pass	pass	
149	BJ10	2023-03-03	LP 50% near surface 1mm cube	fail (cross-section, CT)	fail	pass	

150	BJ10	2023-03-03	ScanVelocity 50%	fail (cross-section, tensile test, CT)	fail	pass	
151	BJ11	2024-01-16	standard	fail (tensile-test)	fail	pass	
152	BJ11	2024-01-16	ScanVelocity 70%	fail (cross-section, tensile test, CT)	fail	pass	
153	BJ11	2024-01-16	Contouroff. 0,12 mm	fail (cross-section, tensile test, CT)	fail	pass	
154	BJ11	2024-01-16	LaserPower 70%	fail (cross-section, tensile test, CT)	fail	pass	
155	BJ11	2024-01-16	standard	fail (tensile-test)	pass	pass	
156	BJ12	2024-01-30	standard	fail (cross-section)	pass	pass	low gasflow, fume over melt pool, increased laser absorption and scattering
157	BJ12	2024-01-30	ScanVelocity 70%	fail (cross-section, CT)	fail	pass	low gasflow, fume over melt pool, increased laser absorption and scattering
158	BJ12	2024-01-30	Contouroff. 0,12 mm	cross-section	fail	pass	low gasflow, fume over melt pool, increased laser absorption and scattering
159	BJ12	2024-01-30	LaserPower 70%	fail (cross-section, CT)	fail	pass	low gasflow, fume over melt pool, increased laser absorption and scattering
160	BJ12	2024-01-30	standard	fail (cross-section)	fail	pass	low gasflow, fume over melt pool, increased laser absorption and scattering
161	BJ13	2024-03-13	standard	fail (tensile-test)	fail	pass	bad heattreatment (600°C instead of 720°C)
162	BJ13	2024-03-13	ScanVelocity 70%	fail (cross-section, tensile test, CT)	fail	pass	bad heattreatment (600°C instead of 720°C)
163	BJ13	2024-03-13	Contouroff. 0,12 mm	fail (cross-section, tensile test, CT)	fail	pass	bad heattreatment (600°C instead of 720°C)
164	BJ13	2024-03-13	LaserPower 70%	fail (cross-section, tensile test, CT)	fail	pass	bad heattreatment (600°C instead of 720°C)
165	BJ13	2024-03-13	standard	fail (tensile-test)	fail	pass	bad heattreatment (600°C instead of 720°C)

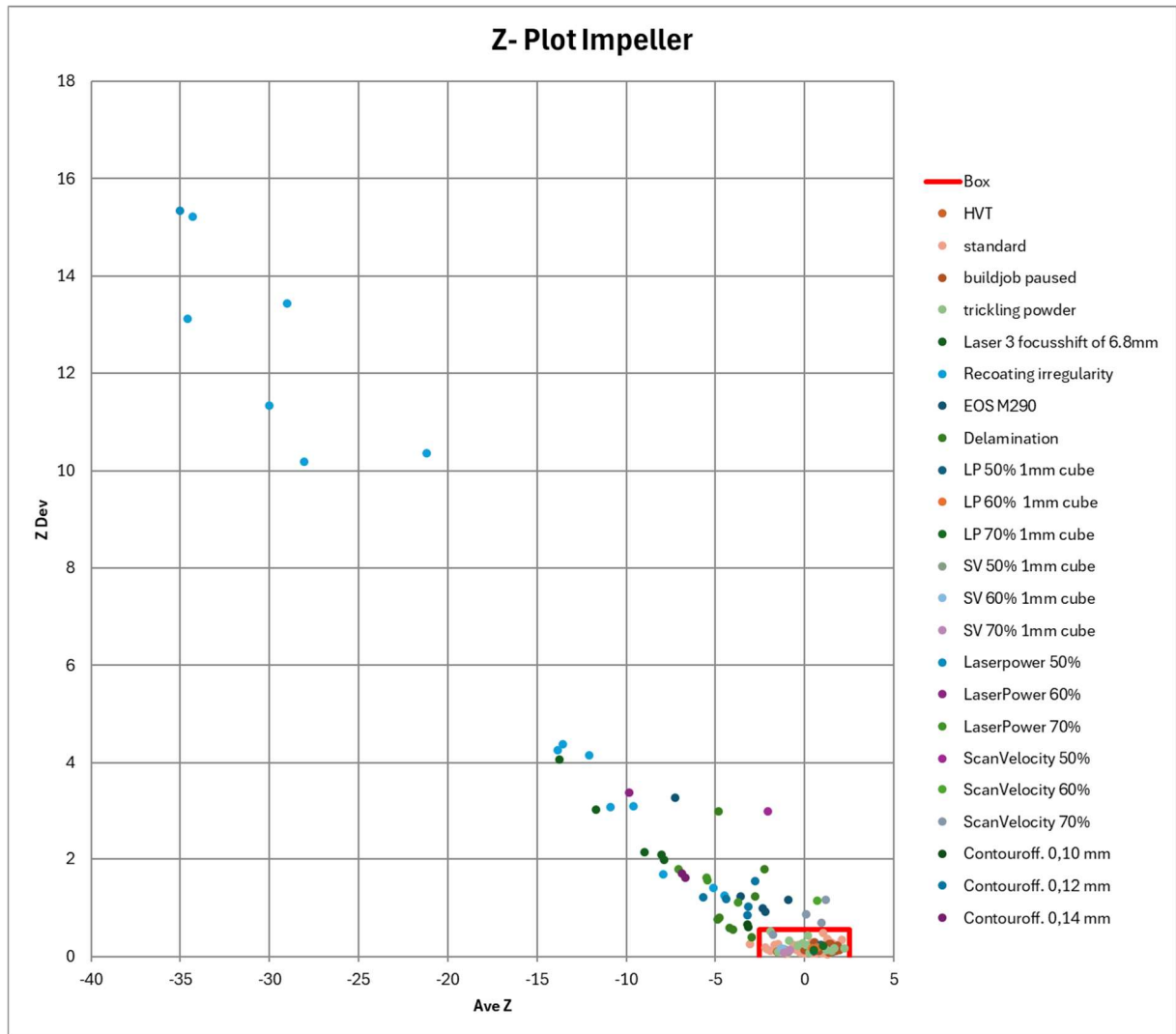


Abbildung A-1: Impeller Auswertung Z-Score

Tabelle A-2: Dokumentation Impeller

DB Column	4	12	15	16	17	18	19	20	22	23
avgRef (kHz)	20.456	52.406	61.02	62.571	63.874	66.401	69.93	71.846	74.216	75.978
sigRef(kHz)	0.112	0.265	0.349	0.258	0.124	0.339	0.44	0.298	0.401	0.315
medianRef(k	20.44	52.39	61.01	62.546	63.866	66.426	69.935	71.83	74.157	75.986
avgdevRef(H	0.09	0.211	0.28	0.205	0.099	0.261	0.351	0.236	0.318	0.252

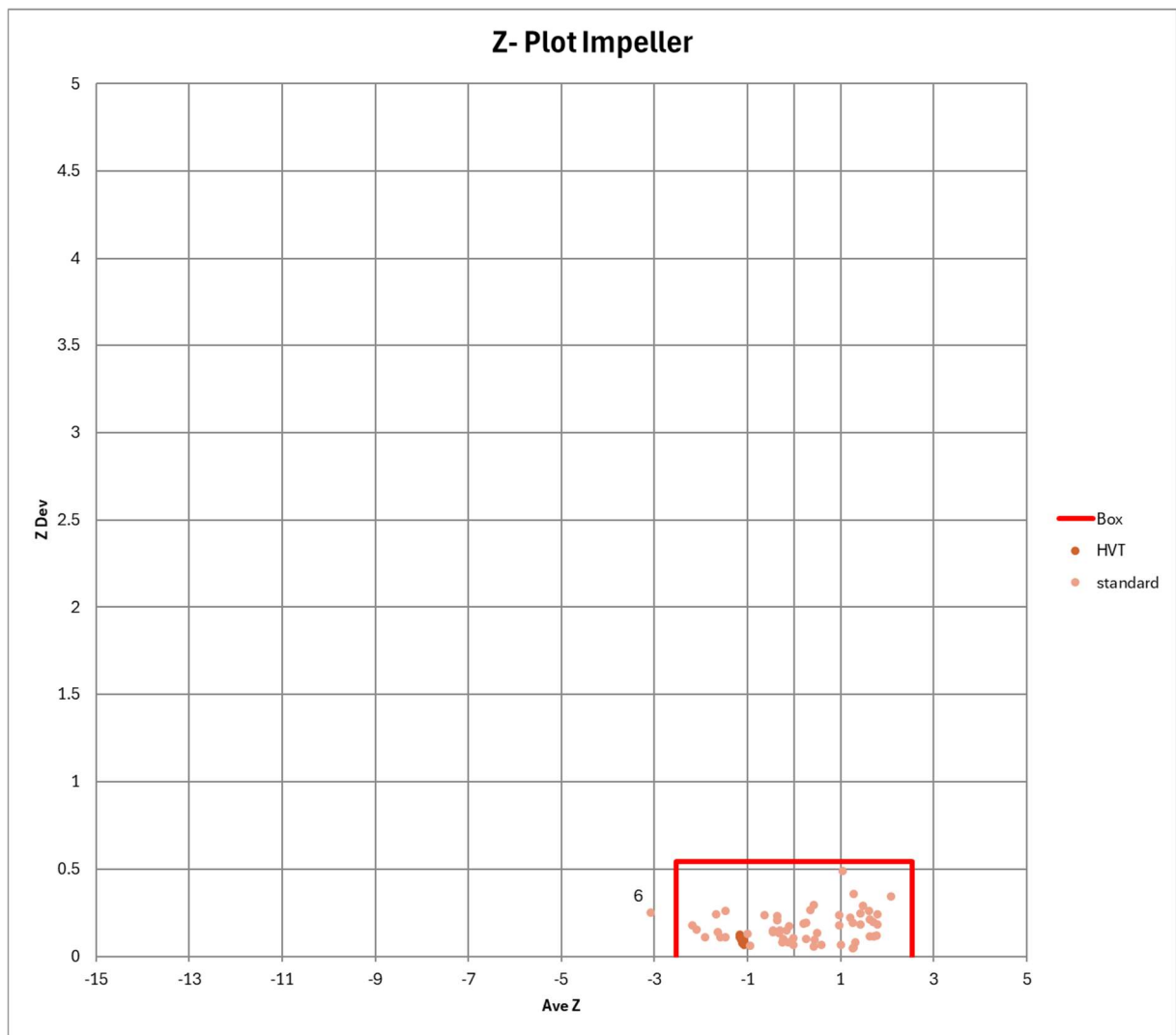


Abbildung A-2: Impeller Wiederholbarkeit (HVT) verglichen mit Population

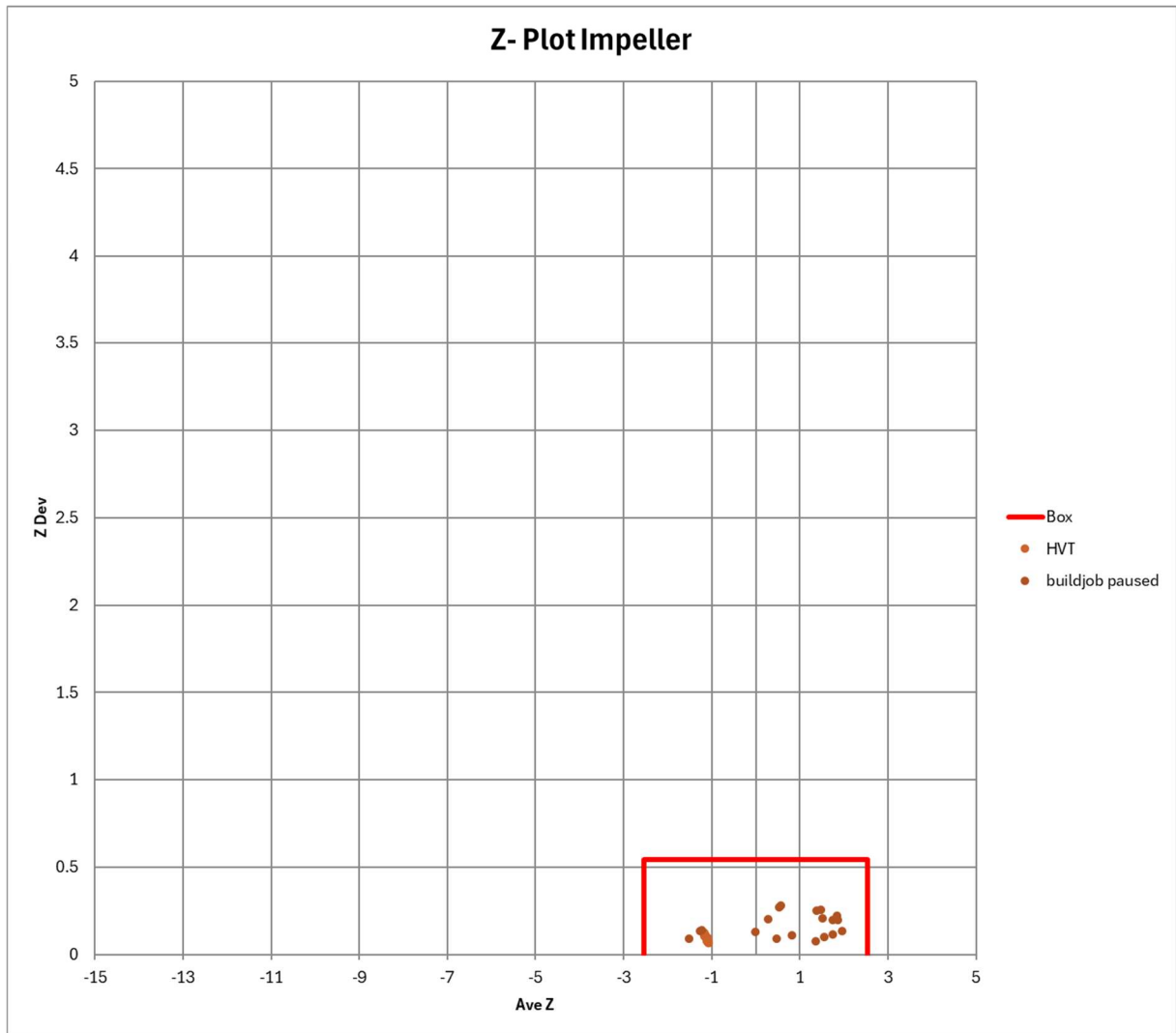


Abbildung A-3: Impeller Baujob pausiert/unterbrochen

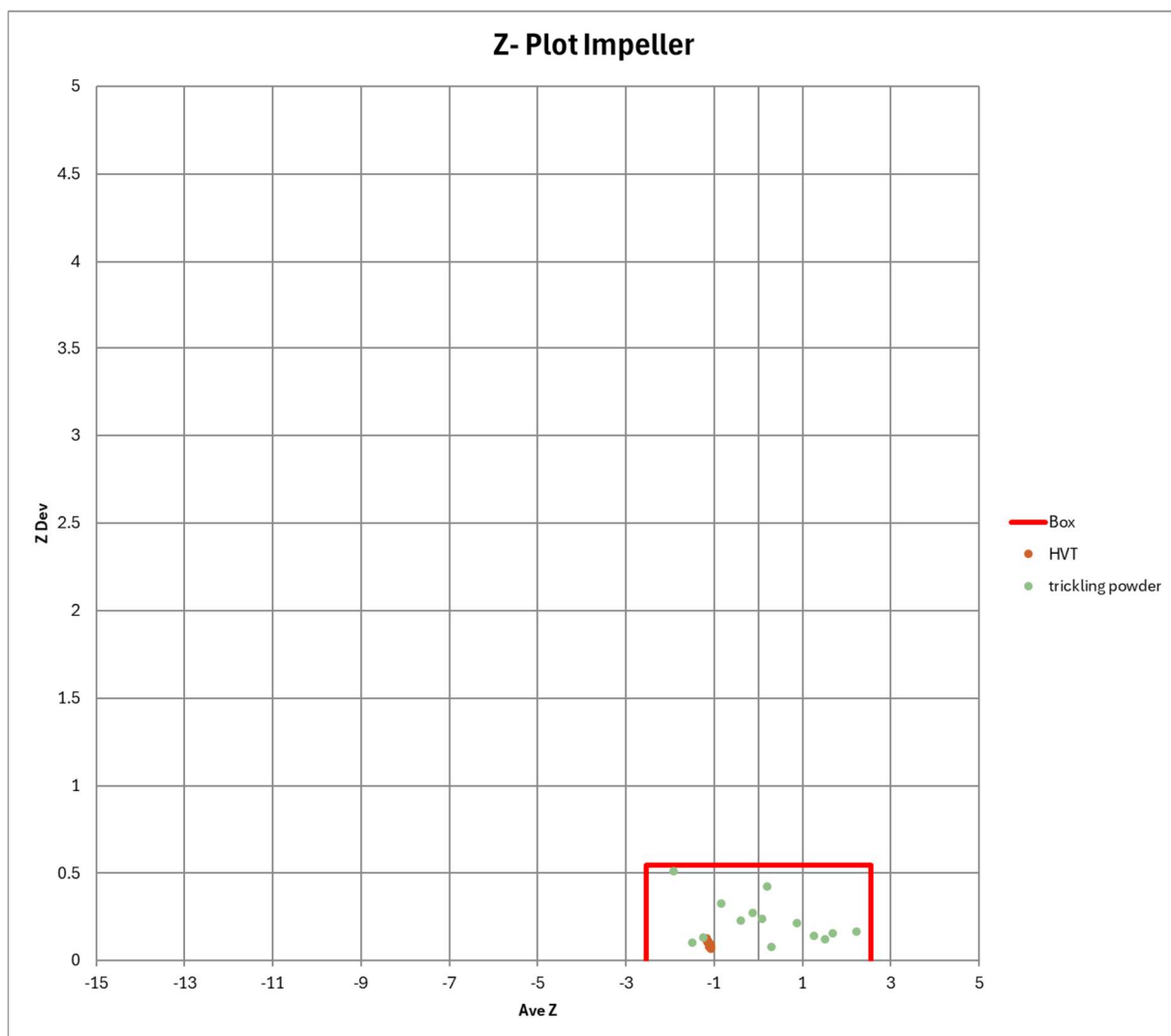


Abbildung A-4: Impeller: Trickling Powder

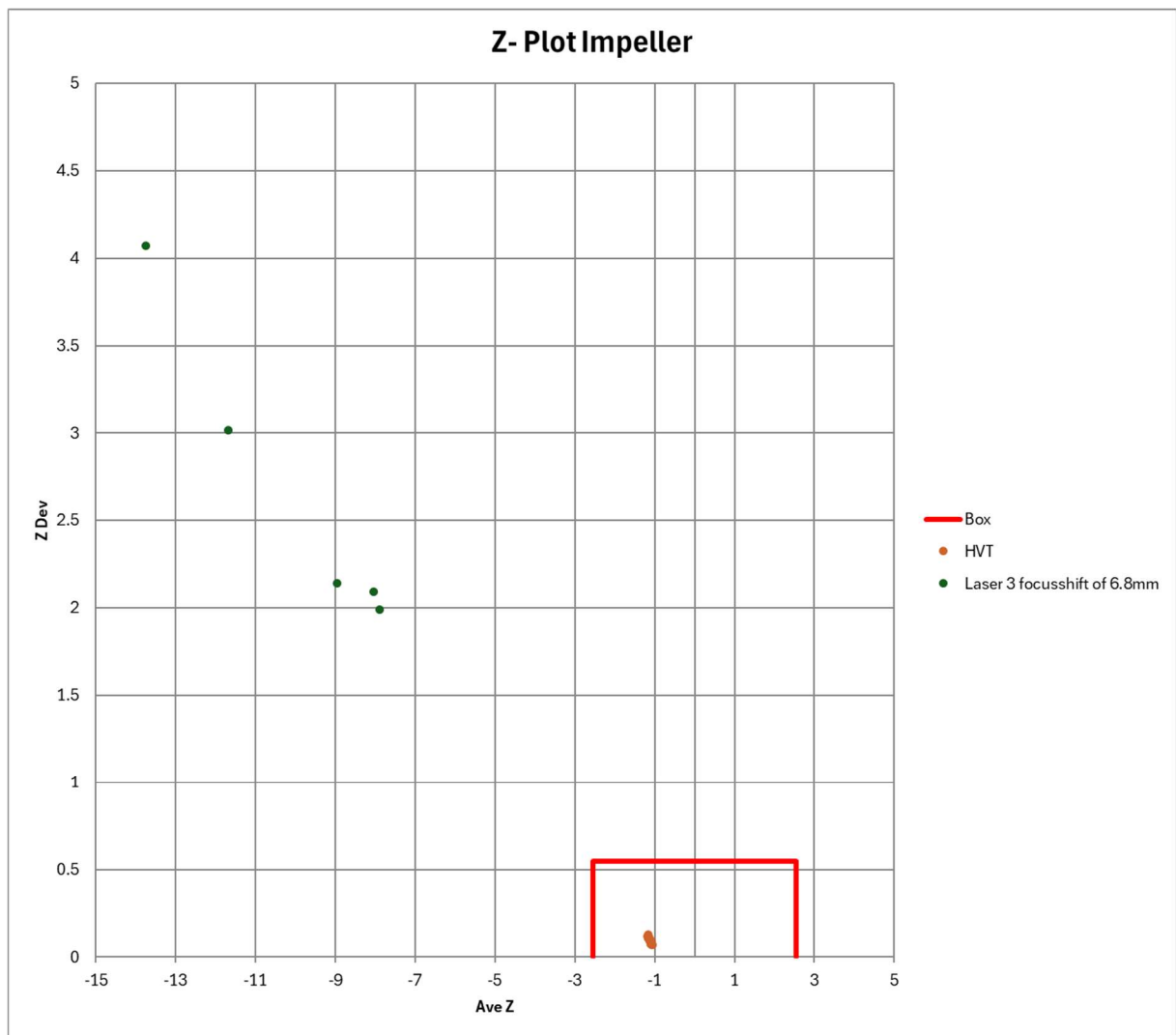


Abbildung A-5: Impeller Laser 3 focus shift 6,8mm

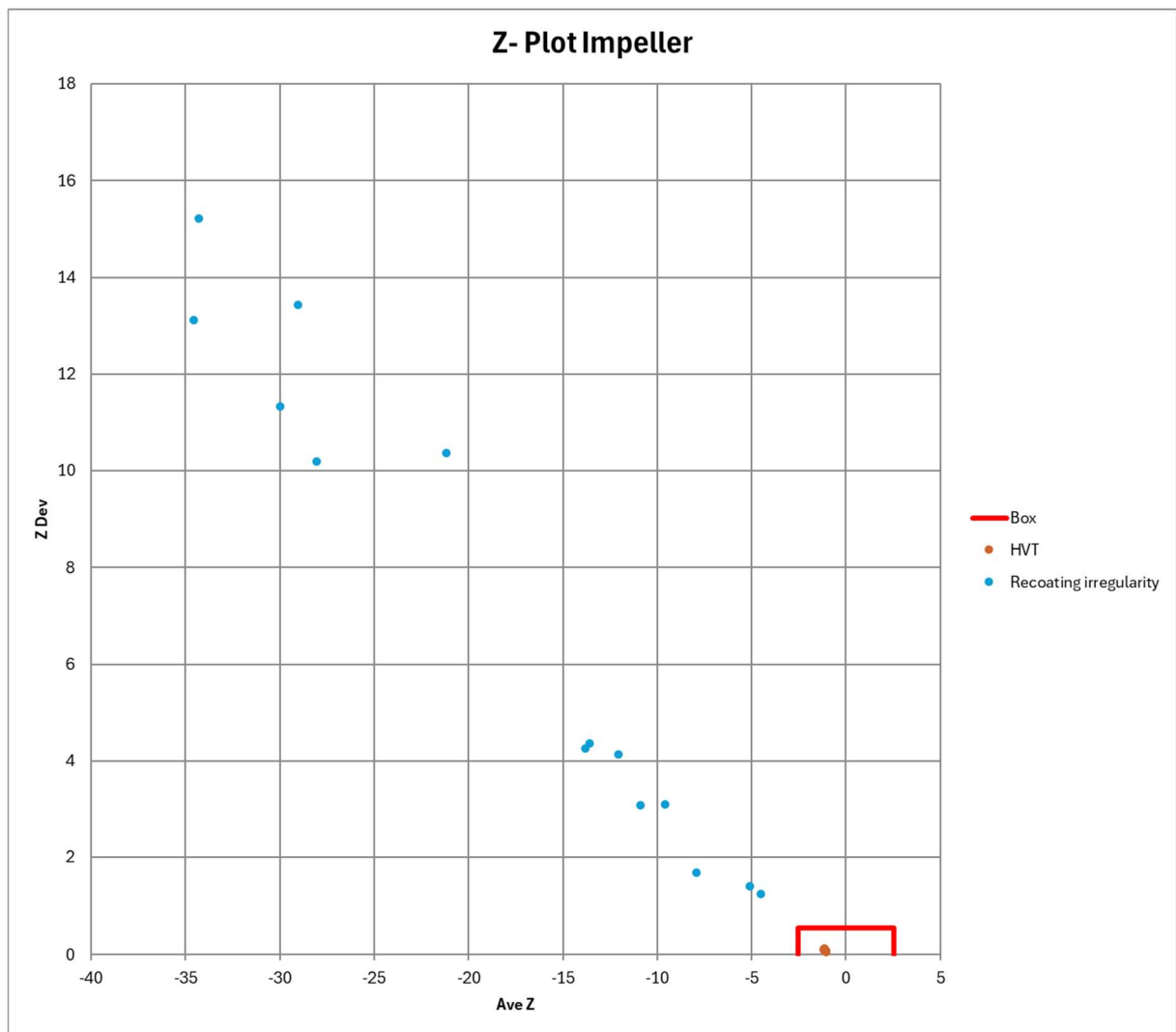


Abbildung III-6: Impeller Recoating irregular