

Kalibrierung des TFM-Verfahrens mittels additiv gefertigter Kalibrier-Reflektoren und Vergleich mit Simulationen

Oliver NEMITZ¹, Till SCHMITTE¹, Marcel CEMBROWSKI¹, Thomas ORTH¹,
Sebastian ROTT², Joachim BAMBERG²

¹ Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Duisburg

² MTU Aero Engines AG, München

Kontakt E-Mail: o.nemitz@du.szmf.de

Kurzfassung. Das TFM-Verfahren (Total Focusing Method) eignet sich besonders zur Prüfung auf kleine, innere Ungängen in verschiedenen Orientierungen. Für eine Kalibrierung stehen aber normalerweise nur einfache Kalibrierreflektoren wie Nuten und Flachbodenbohrungen zur Verfügung, die die komplexe Geometrie von realen inneren Ungängen in metallischen Bauteilen teilweise nur unzureichend annähern.

Zum weiteren Verständnis des TFM-Verfahrens wurde ein Quader mit einer Serie von verschiedenen inneren Ungängen als 3D-Modell entworfen und mittels des additiven Fertigungsverfahrens „Laser Powder Bed Fusion“ aus der Legierung Inconel 718 im Pulverbett aufgebaut. Dieser so entstandene Testkörper wurde dann mittels konventioneller Ultraschallprüfung und dem TFM-Verfahren untersucht, wobei das TFM-Verfahren in senkrechter Einschallung und mit Winkeleinschallung zum Einsatz kam.

Des Weiteren wurden Simulationen der TFM-Prüfung in CIVA als Vergleich an einem Teil der künstlichen inneren Ungängen durchgeführt.

In diesem Konferenzbeitrag werden die verschiedenen Ergebnisse verglichen und auf die daraus folgenden Möglichkeiten der Kalibrierung des TFM-Verfahrens eingegangen.

1. Einführung

Mittels pulverbettbasiertem Laserstrahlschmelzen (LPBF – engl. Laser Powder Bed Fusion) können durch einen schichtweisen Aufbau metallische Bauteile mit komplexer Geometrie additiv hergestellt werden. Die resultierenden konstruktiven Freiheiten können erhebliche Gewichtseinsparung am Bauteil ermöglichen. Daher gewinnt das LPBF-Verfahren in Bereichen wie der Medizin-, Automobil- und Luftfahrttechnik zunehmend an Bedeutung für die Serienproduktion [1].

In der vorliegenden Arbeit wurde das LPBF-Verfahren zur Herstellung einer Probe mit Testfehlern (Schweißnahtfehler) für die Ultraschall-Prüfung verwendet (s. auch [2]), insb. für bildgebende Verfahren, in unserem Fall für die Total Focusing Method (TFM, [3], [4], [5] und Referenzen darin). Solche bildgebenden Verfahren erlauben eine umfassendere Charakterisierung einer Ungänge als die konventionelle, rein amplitudenbasierte Ultraschallprüfung.



Um die Rekonstruktionen von bildgebenden Verfahren zuverlässig interpretieren zu können, werden Testfehler benötigt, die charakteristische Fehlstellen möglichst realistisch darstellen und die in ihrer Position und ihrem Ausmaß bekannt sind. Herkömmliche Testfehler wie Seitenbohrungen, Flachbodenbohrungen oder Nuten sind zwar üblicherweise leicht und günstig herzustellen, repräsentieren reale innenliegende Schweißnahtfehler wie Poren, Stege, Schlauchporen, Flankenbindefehler etc. aber teilweise nur bedingt.

Auf der anderen Seite sind natürliche Fehler nicht beliebig verfügbar und ihre exakte Gestalt ist bis zu ihrer Zerstörung, üblicherweise durch Erstellen eines Schliffbildes, unbekannt. Weiterhin lassen sie sich nicht beliebig variieren, um zum Beispiel Auswirkungen von Größe, Lage oder Orientierung systematisch untersuchen zu können.

Dieses Dilemma soll durch Verwenden einer additiv gefertigten Probe gelöst werden. In einer quaderförmigen Platte wurden diverse bekannte Schweißnahtfehler in unterschiedlichen Ausrichtungen und Größen eingebracht. In der vorliegenden Arbeit wurde diese Probe umfänglich mit dem TFM-Verfahren vermessen, um zu untersuchen, wie gut sich das additiv gefertigte Material schallen lässt und wie gut einzelne künstliche Schweißnahtfehler in den Rekonstruktionen erscheinen. In zukünftigen Arbeiten können hieran und an ähnlichen Proben Algorithmen entwickelt und/oder getestet werden, die unterschiedliche Fehler klassifizieren und Größenbewertungen vornehmen.

2. Herstellung der Probe

2.1 Design

Die Probe wurde als quaderförmige Platte mit einer Breite von 200 mm (x), einer Länge von 170 mm (y) und einer Höhe von 25 mm (z) ausgelegt. In der Probe wurden fünf verschiedene Arten von Schweißnahtfehlern modelliert: Stege, gedrehte Stege, Poren, Flankenbindefehler und Schlauchporen. Für jeden Fehlertyp gibt es eine Reihe (entlang der y-Richtung), in der dieser Fehler in Größe und evtl. Orientierung und Position variiert wird (s. Abb. 1). Die verschiedenen Fehlertypen werden im Folgenden näher beschrieben.

Stege

Die erste Reihe der Probe enthält Stege, d.h. Quader, die sich in der Höhe (1 bis 3 mm) und Breite (0.1 bis 0.3 mm) unterscheiden. Die Länge beträgt jeweils 5 mm.

Gedrehte Stege / Schlacken

Die zweite Reihe der Probe enthält wiederum Quader verschiedener Höhen (3 bis 5 mm), die um die y-Achse gedreht wurden (20°, 45° und 70° Drehwinkel) und verschieden orientierte Schlacken repräsentieren.

Poren

Die dritte Reihe beginnt mit einem Porennest, welches aus einem Gitter von $3 \times 5 \times 3$ Poren mit Durchmesser von jeweils 0,5 mm besteht. Darauf folgen mehrere Einzelporen in verschiedenen Tiefen mit Durchmessern von 0,3 bis 4 mm.

Flankenbindefehler

Die vierte Reihe besteht aus sechs frei modellierten Flankenbindefehlern, die sich an der realen Geometrie einer Schweißnaht orientieren.

Schlauchporen

In der fünften Reihe finden sich schließlich Schlauchporen, die durch Kapseln, d.h. unten und oben abgerundete Zylinder dargestellt werden. Diese Kapseln variieren sowohl im Durchmesser (1 bis 2 mm) als auch in der Höhe (6 bis 8 mm).

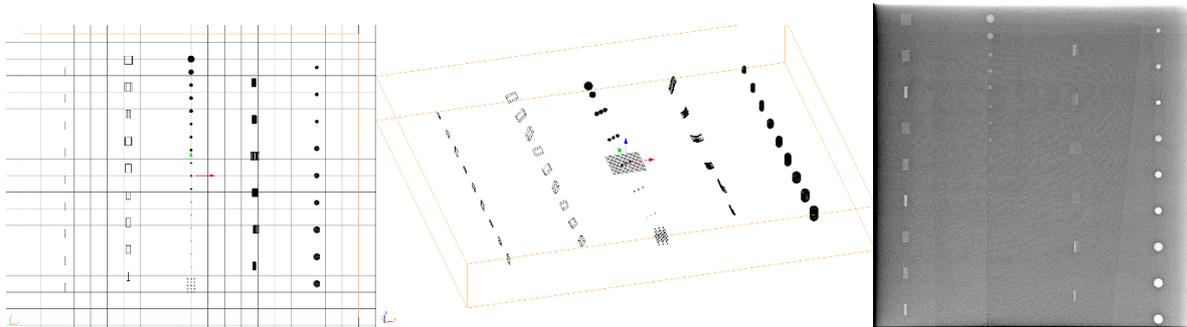


Abb. 1. CAD-Design (links Draufsicht, Mitte 3D-Ansicht) und Röntgenbild eines Teils der Probe mit diversen künstlichen Schweißnahtfehlern.

2.2 Additive Fertigung: Material und Methode

Die Herstellung des additiven Testkörpers erfolgte an einem EOS M290 System der Firma EOS GmbH. Innerhalb der Anlage wird ein Ytterbium Faserlaser mit einer Wellenlänge von circa 1070 nm und einer maximalen Laserleistung von 400 W verwendet. Die Fokussierung des Laserstrahls erfolgt unter Verwendung einer f- Θ -Linse mit einem resultierenden Fokusdurchmesser von circa 85 μm . Die Positionierung des Lasers wird mittels zwei galvanometrisch gelagerten Scannerspiegeln mit einer absoluten Positioniergenauigkeit von 60 μm erreicht. Der Fertigungsprozess erfolgt unter Argonatmosphäre mit einem maximalen Sauerstoffanteil von unter 0,10 %. Die Schutzgasatmosphäre innerhalb der Prozesskammer wird mit einem Volumenstrom von circa 70 m³/h zirkuliert und durch unterschiedliche Filterstufen geführt um Prozessnebenprodukte zu entfernen.

Für den schichtweisen Aufbau des additiven Testkörpers werden vom Anlagenhersteller empfohlene Parameter für den Werkstoff 2.4668 (Inconel 718) mit einer Schichtdicke von 40 μm eingesetzt. Das verwendete Pulvermaterial für den Aufbau ist Amdry 1718 der Firma OC Oerlikon Corporation AG. Die Pulverchemie ist ähnlich der oxidations- und korrosionsresistenten Nickelbasislegierung Inconel 718.

2.3 Eigenschaften der additiv gefertigten Probe

In Abb. 1, rechts ist eine Röntgenaufnahme eines Teils der Probe abgebildet. Es lassen sich die gedrehten Stege, die größeren Poren, die Flankenbindefehler und die Schweißnahtporen klar erkennen. Die Probe ist in allen Richtungen ca. 1 mm kürzer als nominell angegeben, was an Schrumpfung in xy-Richtung liegt, die durch den Herstellungsprozess eingebracht werden. Zusätzlich ist eine Änderung der nominellen z-Höhe durch den Trennvorgang mittels Drahterodieren erklärbar. Bei Senkrechteinschallung liegt die Longitudinalgeschwindigkeit bei 5730 m/s, die Dämpfung ist etwas höher als in Stahl.

3. Messaufbau

Als Ultraschallgerät für die TFM-Messungen kam ein Micropulse 5 von der Firma PeakNDT mit dem Phased-Array-Prüfkopf Olympus 10L64 (64 Elemente, Pitch 0,5 mm, 10 MHz) zum Einsatz. Die TFM-Rekonstruktionen wurden mit einer bei der SZMF in Matlab entwickelten

Software durchgeführt, wobei der TFM-Algorithmus selbst in CUDA programmiert wurde und auf der GPU (NVIDIA GeForce GTX 1080) läuft. Nähere Informationen zu dieser Software und weitere Referenzen finden sich in [4].

Die durchgeführten Messungen wurden größtenteils in Tauchtechnik mit einem Wasservorlauf von 20 mm durchgeführt, einige wenige auch in direktem Kontakt mit der Probe (s. Abb. 2).

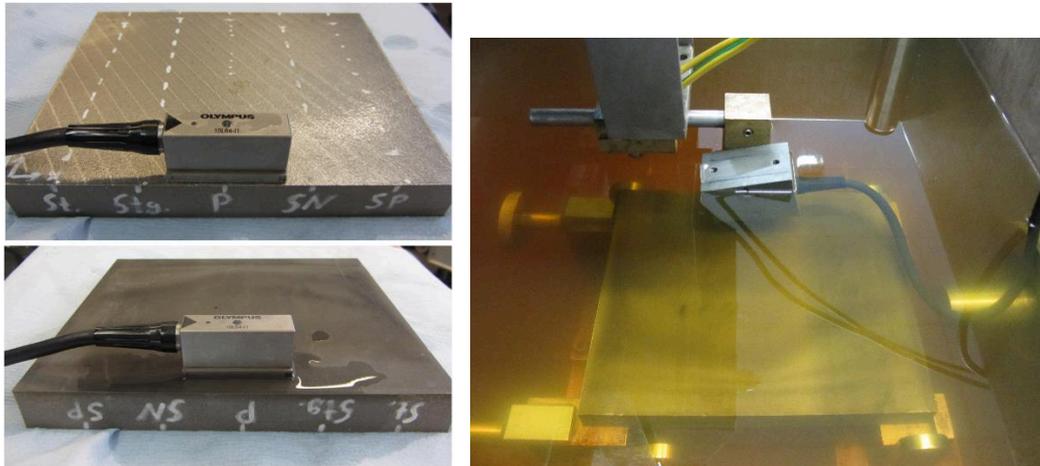


Abb. 2. Messaufbau: Links: Messungen an der Probe in Kontakttechnik auf der Oberseite (oben) und auf der Unterseite (unten). Rechts: Für Messungen in Tauchtechnik ist der Prüfkopf an einem Arm installiert, der in drei Koordinatenrichtungen über der Probe verfahren werden kann. Hier im Bild ist eine Winkeleinschaltung zu sehen.

4. Messresultate

Im Folgenden sind nun einige ausgewählte TFM-Rekonstruktionen zu den verschiedenen Fehlertypen dargestellt.

4.1 Porennest

Die neun Poren einer Querschnittsebene des Porennests sind in den Rekonstruktionen mit Wasservorlauf klar erkennbar. Auffällig ist jedoch, dass ihre Lage nicht mittig ist, wie nominell vorgegeben, sondern etwas zu weit unten liegt. Dies kann durch die vorgegebenen Toleranzen beim Drahterodieren erklärt werden. In Abb. 3 ist das Porennest einmal mit Wasservorlauf und in Abb. 4 in Kontaktprüfung zu sehen. In den Rekonstruktionen der Kontaktprüfung sind die unteren Poren deutlich schlechter trennbar.

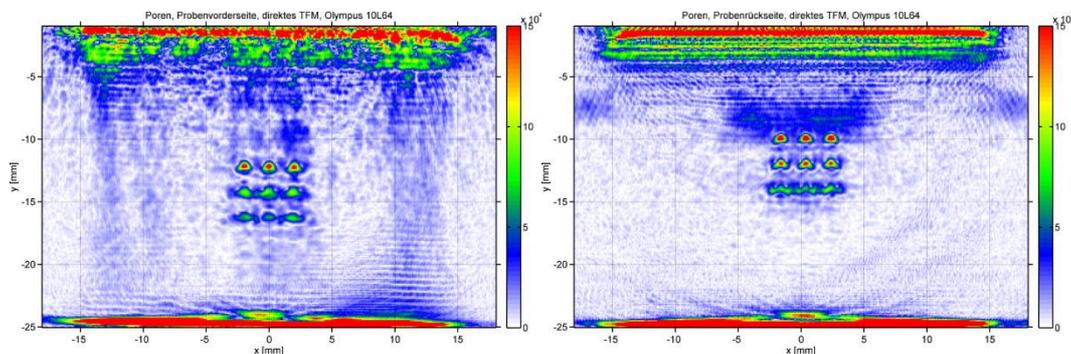


Abb. 3. Das Porennest mit einem Wasservorlauf von 20 mm einmal von der Oberseite (links) und einmal von der Unterseite (rechts) aus rekonstruiert. Die Ober- und Unterkante der Probe ist jeweils an der gleichen Stelle, die y-Position des Porennests unterscheidet sich jedoch deutlich.

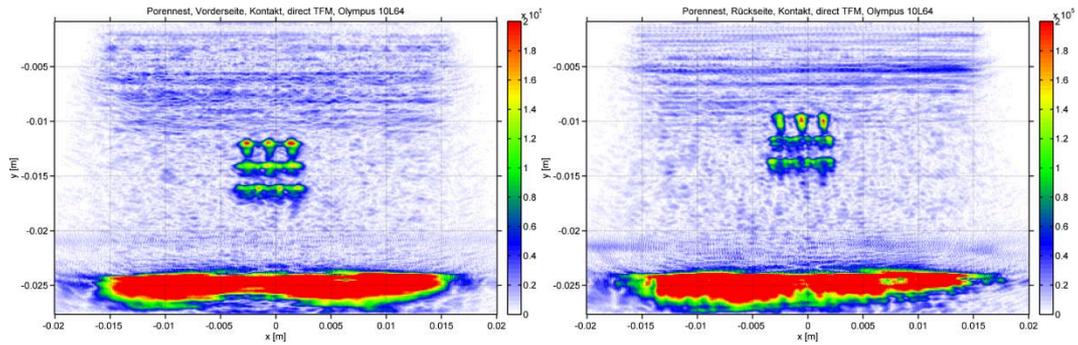


Abb. 4. Das Porennest ohne Wasservorlauf (Kontakt) einmal von der Oberseite (links) und einmal von der Unterseite (rechts) aus rekonstruiert. Auch hier lassen sich die unterschiedlichen Positionen des Nestes erkennen. Die einzelnen Poren in den unteren Reihen sind weiterhin deutlich schwerer trennbar als mit Wasservorlauf.

4.2 Einzelporen

In Abb. 5 sind Rekonstruktionen von Einzelporen zu sehen, wobei jeweils drei Rekonstruktionen von Poren mit gleichem Durchmesser aber unterschiedlicher Tiefe in einem Bild überlagert sind. Diese Überlagerung, die auch in Abb. 6 und Abb. 8 verwendet wird, geschieht durch Bilden eines pixelweisen Maximums. Man kann deutlich erkennen, dass die Fokussierung mit zunehmender Tiefe schlechter wird. Bemerkenswert ist auch, dass zumindest die oberen beiden Poren mit Durchmesser 0,3 mm noch erkennbar sind - anders als im Röntgenbild. Für die unterste Pore ist die Fokussierung offensichtlich zu schwach.

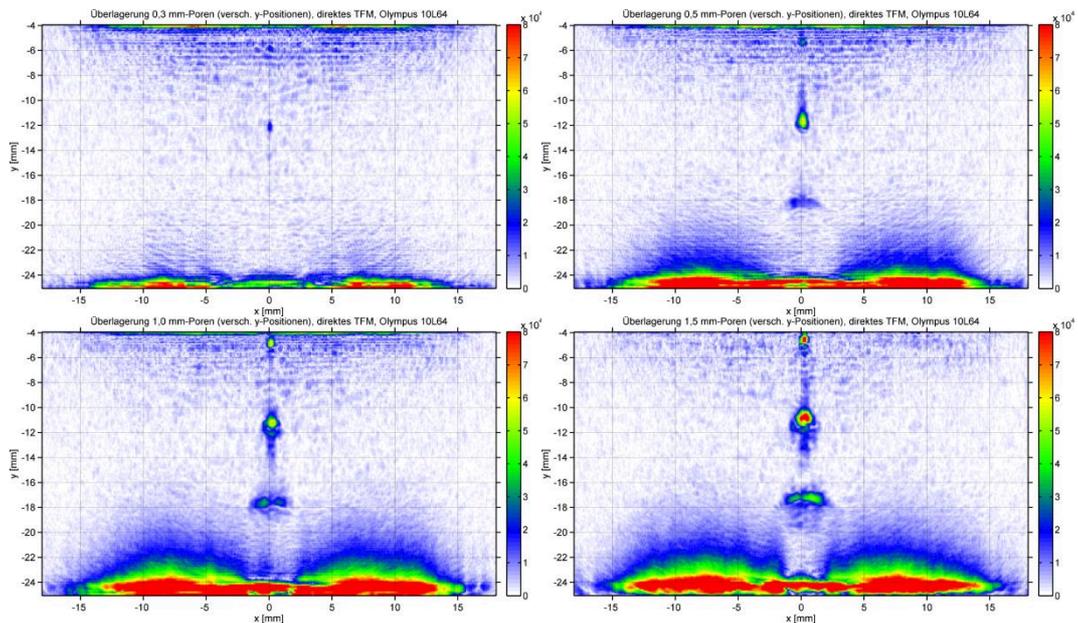


Abb. 5. Rekonstruktionen von Einzelporen verschiedenen Durchmessers (oben links 0,3 mm, oben rechts 0,5 mm, unten links 1,0 mm, unten rechts 1,5 mm). Für jeden Durchmesser sind jeweils drei Einzelrekonstruktionen durch Bilden eines pixelweisen Maximums überlagert.

Abb. 6 zeigt die Überlagerung von 21 Einzelrekonstruktionen der 1,5 mm-Poren. Hierbei wurde der Prüfkopf in x-Richtung bewegt und an sieben definierten x-Positionen an allen drei Poren verschiedener Tiefe eine Rekonstruktion durchgeführt. Hierdurch ergibt sich eine Art Abbildung, wie gut an verschiedenen Stellen unter dem Prüfkopf fokussiert werden kann. Die Fokussierung liefert im oberen Bereich mittig unter dem Prüfkopf die besten Ergebnisse und wird zu den Rändern hin schwächer. An den Rändern des Rekonstruktionsgebietes sind die unteren Poren besser zu erkennen als die oberen. Dies kann dadurch erklärt werden, dass

der untere Bereich noch vom Schallkegel der Prüfkopf-Elemente des gegenüberliegenden Randes erfasst wird, während dies bei oberen Elementen nicht der Fall ist. Unklar ist dagegen, warum die untere Pore in der Mitte so schlecht fokussiert wird. Zusätzlich liegen die einzelnen Poren nicht auf einem regelmäßigen Rechteck-Gitter, sondern eher auf gekrümmten Bahnen, was möglicherweise auf Verzug des Testkörpers durch Eigenspannungen oder Anisotropie im Herstellungsprozess zurückzuführen ist.

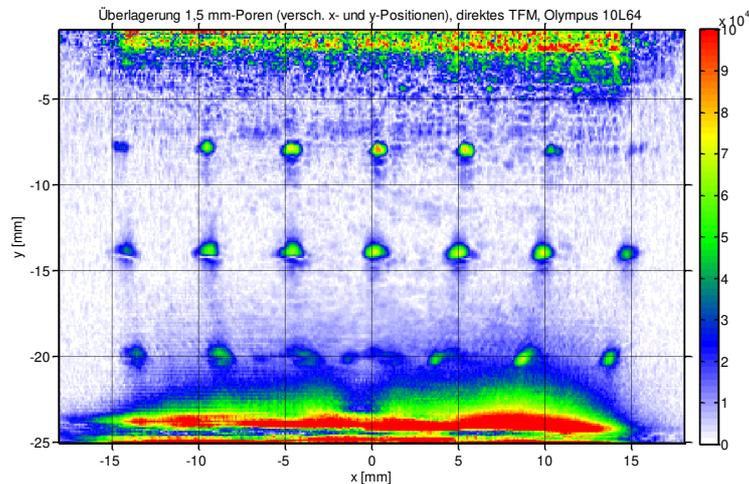


Abb. 6. Überlagerung von 21 Einzelrekonstruktionen von Poren mit Durchmesser 1,5 mm: Es gibt drei Poren mit diesem Durchmesser, die in verschiedenen Tiefen und unterschiedlichen y-Positionen eingebracht wurden, d.h. pro Einzelrekonstruktion ist jeweils nur eine Pore zu sehen. Alle drei Poren wurden an sieben verschiedenen x-Positionen vermessen.

4.3 Stege und gedrehte Stege

In Abb. 7 sind beispielhafte Rekonstruktionen der senkrechten und gedrehten Stege zu sehen. Hier, und auch in Abb. 9, sind die Rekonstruktionen jeweils mit der nominellen Fehlergeometrie überlagert, die von der Gestalt und Größe her maßstabsgetreu eingezeichnet wurde. Wie bei dem Porennest jedoch gesehen wurde, ist die Lage der Fehler im Material nicht genau bekannt. Daher wurde die Position jeweils manuell so gewählt, dass die nominelle Geometrie gut mit der Rekonstruktion übereinstimmt.

Interessant ist, dass bei den senkrechten Stegen neben der Oberkante auch die Unterkante zu erkennen ist. Bei den gedrehten Stegen stimmen die Orientierung und auch die Größe gut mit den Nominalwerten überein.

Abb. 8 zeigt die Überlagerung von jeweils acht Rekonstruktionen von gedrehten Stegen, wobei der Prüfkopf in einem Winkel von $9,5^\circ$ im Wasser zu den Stegen hin gekippt ist. Für die einzelnen Rekonstruktionen wurde der Prüfkopf jeweils an verschiedene x-Positionen gefahren. Man erkennt zum einen, dass die Rekonstruktionsamplitude der Stege im linken Bild (Kippung des Stegs um 45°) höher ist als bei der Senkrecht-Einschallung, da der Steg fast senkrecht getroffen wird. Die Rückwand wird dagegen nicht mehr senkrecht getroffen, daher nimmt ihre Amplitude gleichzeitig ab.

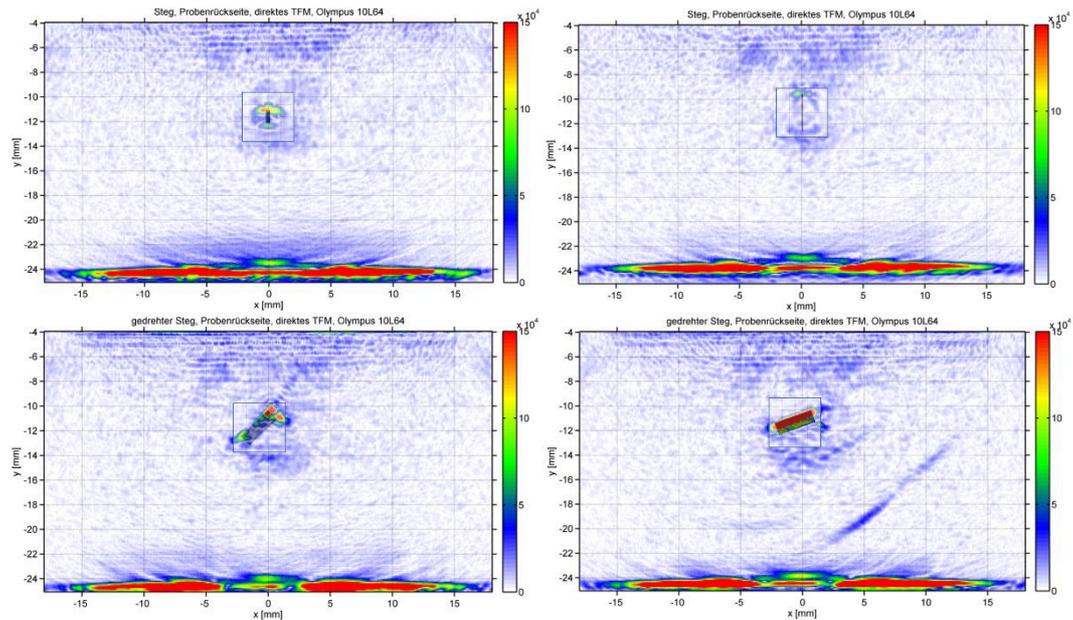


Abb. 7. Oben: Senkrechte Stege mit Höhe 1 mm und Breite 0,3 mm (links) und Höhe 3 mm und Breite 0,1 mm (rechts). Unten: Gedrehte Stege mit Breite 1 mm, Höhe 3 mm und Kippwinkel 45° (links) und 70° (rechts).

Zum anderen kann deutlich gesehen werden, dass der Steg im rechten Teil des Bildes besser rekonstruiert werden kann als im linken. Im rechten Teil liegt der Steg genau im Schallfeld der meisten Elemente und reflektiert den Schall gut zu ihnen zurück. Im linken Teil hingegen erreichen nur wenige Einzelschallfelder den Steg und der meiste Schall wird vom Prüfkopf weg reflektiert.

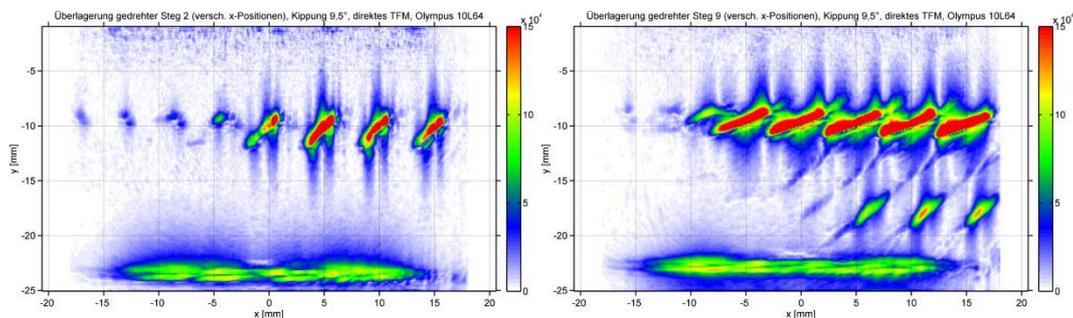


Abb. 8. Überlagerung von jeweils acht Rekonstruktionen von gedrehten Stegen (links 45° gekippt, Breite 1 mm, Höhe 3 mm, rechts 70° gekippt, Breite 1 mm, Höhe 5 mm). Der Prüfkopf ist in einem Winkel von 9,5° im Wasser zu den Stegen hin gekippt.

4.4 Flankenbindefehler und Schlauchporen

In Abb. 9 finden sich Rekonstruktionen von drei Flankenbindefehlern und einer Schlauchpore. Auch hier sind wie oben die Rekonstruktionen mit der nominellen Geometrie überlagert. Man sieht, dass die Rekonstruktionen der nominellen Form sehr gut folgen, auch wenn die Fehlerform der Rekonstruktion nicht immer durchgängig zu sehen ist. Je steiler der Fehler verläuft, desto geringer ist die Amplitude im Bild. Für eine vollständigere Geometriebeschreibung, gerade auch der Schlauchpore, bei der nur die obere Kappe zu sehen ist, müssten weitere Rekonstruktion-Modi wie Full-Skip-TFM, Half-Skip-TFM oder Moden-Konversionen in Betracht gezogen werden.

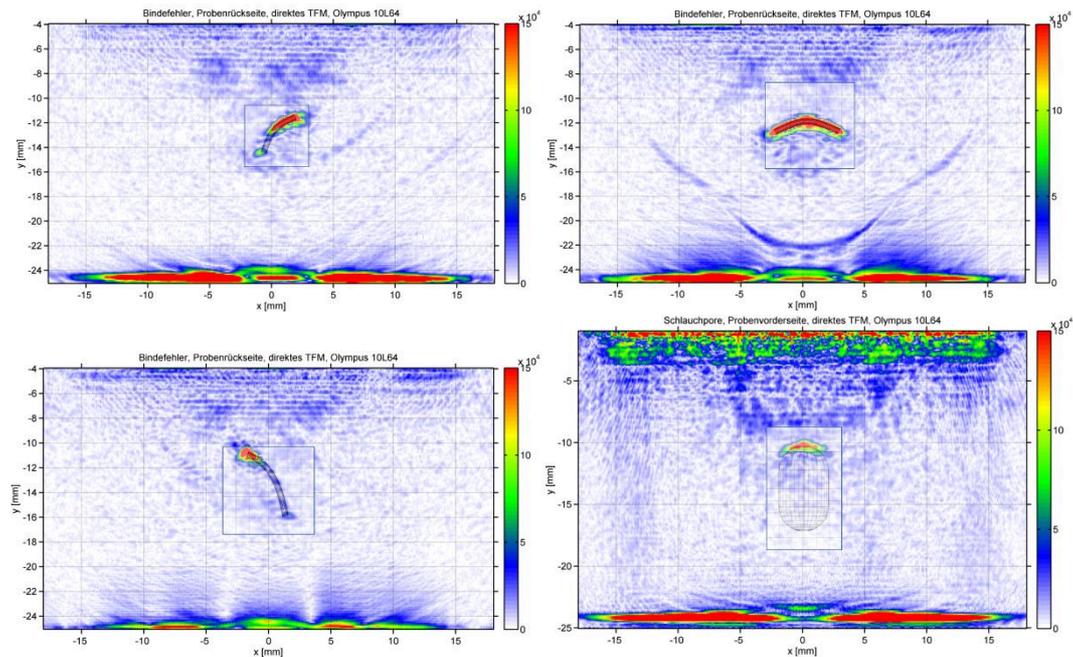


Abb. 9. Drei verschiedene Flankenbindefehler (oben und unten links) und eine Schlauchpore mit Durchmesser 4 mm und Höhe 7 mm (rechts).

5. Vergleich mit Simulationen

Für einen Vergleich wurde die Senkrechteinschallung auf das künstliche Porennetz mit dem Prüfkopf Olympus 10L64 und einer Wasservorlaufstrecke von 20 mm in CIVA simuliert. Alle Prüfkopf-Elemente schossen nacheinander, wobei bei jedem Schuss jeweils alle Prüfkopf-Elemente die simulierten Ultraschallsignale empfangen (sog. Full-Matrix-Capture, FMC). Diese Simulation wurde sowohl mit Reflexion an der Oberfläche als auch ohne durchgeführt. Auf Basis dieser Daten wurden TFM-Rekonstruktionen anschließend sowohl in CIVA als auch mit der SZMF-Software durchgeführt.

Die Ergebnisse sind in Abb. 10 dargestellt. Insbesondere lässt sich erkennen, dass die Berücksichtigung von Oberflächenreflexionen in der Simulation zu Streifenmustern und einem niederfrequenten Untergrund im oberen Teil des Bildes führt. Dies stimmt gut mit der realen Rekonstruktion von der Unterseite aus überein (s. Abb. 3, rechts). In den Kontakt-Messungen (s. Abb. 4) ist der niederfrequente Untergrund zwar verschwunden, die Streifen sind aber immer noch vorhanden.

6. Automatische Kalibrierung von Parametern

Die Güte der TFM-Rekonstruktionen ist abhängig von diversen Parametern der Prüfsituation, z. B. vom Winkel und Pitch des Prüfkopfs, vom Wasservorlauf, von Schallgeschwindigkeiten etc. Je nach Prüfsituation kann der Einfluss solcher Parameter signifikant sein, weshalb eine möglichst genaue Kenntnis der Parameterwerte wichtig ist.

Sind Fehlertypen und -positionen und somit auch das Ergebnis der Rekonstruktion im Material bekannt, so kann eine automatische Kalibrierung von nicht genau bekannten Parametern durchgeführt werden (s. z.B. [6]). Hierfür können Optimierungsalgorithmen verwendet werden, die ausgewählte Parameter so variieren, dass die sich ergebene Rekonstruktion möglichst gut mit dem bekannten Fehlerbild übereinstimmt. Hierzu muss eine sog. Zielfunktion definiert werden, die die Güte einer Rekonstruktion als reelle Zahl widerspiegelt und für eine Optimierung minimiert oder maximiert wird.

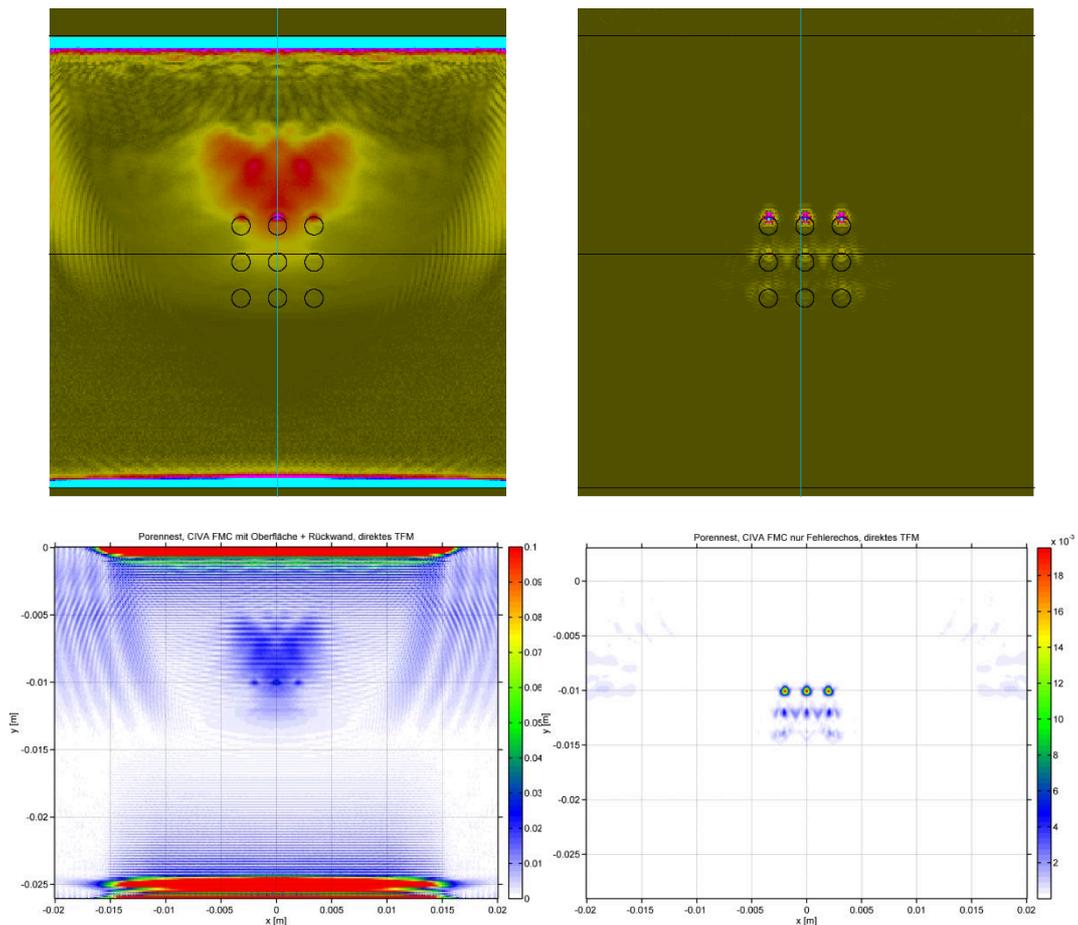


Abb. 10. Oben: CIVA-TFM auf den simulierten FMC-Daten mit (links) und ohne (rechts) Oberflächenreflexionen. Unten: Analog TFM mit der SZMF- Software auf den gleichen Daten. Die Rekonstruktionen stimmen gut überein. Durch unterschiedliche Farbgebung und Nachbearbeitungen können leichte Unterschiede in den Darstellungen entstehen.

In der vorliegenden Arbeit wurde beispielhaft das Porennest zur Kalibrierung verwendet. Die Zielfunktion bewertet die Tiefenlage der neun Poren und die Fokussierung, d.h. an neun Position in definierten Abstand zueinander muss eine möglichst hohe und dazwischen eine möglichst geringe Amplitude vorliegen. Als zu optimierende Parameter wurden der Prüfkopfwinkel und die Wasservorlaufstrecke gewählt.

In Abb. 11 ist das Ergebnis einer solchen Optimierung zu sehen. Links die Rekonstruktion mit initialen Parametern vor der Optimierung, in der das Porennest schräg und zu weit unten liegt und die Fokussierung nicht optimal ist. Nach der Optimierung (rechts) ist die Lage korrekt und die Fokussierung deutlich besser. Das Oberflächen- und das Rückwandecho sind noch leicht schräg, d.h. der Prüfkopfwinkel wurde noch nicht genau gefunden. Das Porennest liegt jedoch bereits gerade, weswegen die Optimierung hier automatisch beendet wurde. Hier kann die Zielfunktion noch angepasst werden, zum Beispiel könnten Oberflächen- und Rückwandecho mit einbezogen werden. Es ist aber jetzt schon zu sehen, dass eine solche automatische Kalibrierung möglich ist.

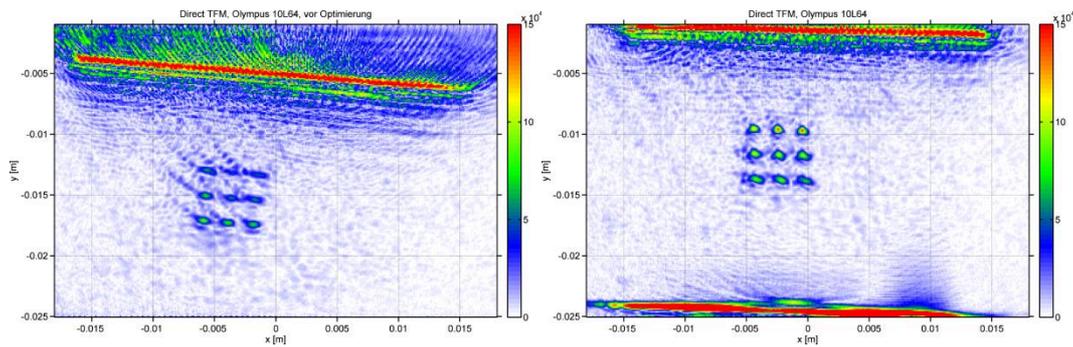


Abb. 11. Links: Rekonstruktion mit initialen Parametern vor der Optimierung, rechts: Rekonstruktion mit optimiertem Prüfkopfwinkel und optimierter Wasservorlaufstrecke.

7. Diskussion und Ausblick

Eine Testplatte mit diversen modellierten künstlichen Schweißnahtfehlern wurde additiv gefertigt und umfänglich mit dem TFM-Verfahren vermessen. Durch Schrumpf bedingt weichen die finalen Abmessungen der Platte von den nominellen ab. Zusätzlich ist durch Eigenspannungen im Herstellprozess ein Verzug des Testkörpers entstanden. Durch Anpassung des Testkörpers und der Anlageneinstellungen kann beidem jedoch vorgebeugt werden. Das Material dämpft stärker als Stahl, kann aber durchaus gut geschallt werden. Die definierten Testfehler sind auch bei kleinen Abmessungen von zum Beispiel 0,1 mm Breite noch gut in den Rekonstruktionen zu erkennen. Insofern bietet die additive Fertigung eine Möglichkeit, annähernd beliebige Testfehler für die Ultraschallprüfung zu erzeugen. Für vollständigere Beschreibungen der Fehlergeometrie müssen freilich noch weitere Rekonstruktion-Modi (Full-Skip, Half-Skip, Moden-Konversionen, ...) in Betracht gezogen werden.

Zukünftige Arbeiten zur Auswertung von Rekonstruktionen (z.B. Klassifizierung oder Größenbewertung) finden in der additiven Fertigung ein Werkzeug, um realistische Fehlerformen zu erzeugen und systematisch z.B. in Lage, Orientierung oder Größe zu variieren.

8. Referenzen

- [1] Giersberg, G. (2015): *Die ersten 3D-Teile gehen in die Luft*, Frankfurter Allgemeine Zeitung, Ausgabe 11.09.2015, Seite 22
- [2] Rieder, H. et al., *On- and Offline Ultrasonic Inspection of Additively Manufactured Components*, WCNDT 2016, Munich
- [3] Holmes, C; Drinkwater, B. W.; Wilcox, P. D.: *Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation*. NDT & E International, Vol. 38, No. 8, 01.12.2005, p. 701-711
- [4] Schmitte, T., Nemitz, O., Chichkov, N., Orth, T.: *Application of the Total Focusing Method for Improved Defect Characterization in the Production of Steel Tubes, Pipes and Plates*, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016
- [5] Orth, T. et. al., *Möglichkeiten und Grenzen beim Einsatz von TFM in der Prüfpraxis*, DGZfP-Tagung 2017, Koblenz
- [6] Hunter, A. J. et al., *Least-Squares Estimation of Imaging Parameters for an Ultrasonic Array Using Known Geometric Image Features*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol 58, No. 2, 2011, p. 414 - 426