

Robotergeführte Ultraschallprüfung von Gasturbinenschaufeln mit adaptiver TFM im ZfP 4.0-Umfeld

Christian HASSENSTEIN¹, Thomas HECKEL¹, Daniel VOEHRINGER², Torsten BERENDT³, Jens PRAGER¹

¹ **Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung**, Berlin

² **Siemens Energy Global GmbH & Co. KG**, Berlin

³ **KleRo GmbH Roboterautomation**, Berlin

Kontakt E-Mail: christian.hassenstein@bam.de

Kurzfassung. Leit- und Laufschaufeln stationärer Gasturbinen sind im Betrieb anspruchsvollen Bedingungen ausgesetzt. Die Prüfung, Wartung und Reparatur der hochbelasteten Teile sind notwendig, um Sicherheit und Effizienz über längere Zeiträume zu gewährleisten. Eine der in diesem Prozess angewandten Methoden ist die Ultraschallprüfung.

Im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung ist es das Ziel des Projektes MRO 2.0, den Aufbereitungsvorgang um digitale Prozesse zu erweitern und somit zu modernisieren. Eine der Aufgaben ist es, dabei anstelle der konventionellen Ultraschallprüfung eine Array-Technik mit rekonstruierenden Verfahren einzusetzen und eine automatisierte, digital eingebundene Methode im Rahmen von ZfP 4.0 zu entwickeln.

Um die Ist-Geometrie der Oberfläche und die verbleibende Wanddicke flächendeckend an den Turbinenschaufeln zu bestimmen, wird ein adaptives TFM-Verfahren (Total Focusing Method) in Tauchtechnik eingesetzt, welches die Brechung der Schallwellen an der Grenzfläche zum Prüfkörper in der Rekonstruktion berücksichtigt. In der hierfür entwickelten Prüfanlage führt ein Roboterarm einen Array-Prüfkopf und scannt das Bauteil normal zur inspizierten Oberfläche. Somit kann ein 3D-Modell des Ist-Zustandes des zu prüfenden Bauteils erstellt werden.

Spezielle Herausforderungen an die Aufgabe stellen die komplexe Geometrie des Prüfobjektes sowie dessen geringe und ortsabhängige Wanddicke dar. Ein weiterer Fokus liegt auf der Optimierung der Prüfparameter, Verbesserung der Prüfgeschwindigkeit sowie der Zuverlässigkeit der Methode.

In diesem Beitrag werden die während des Projektes entwickelte Methode und die im zweiten Projektjahr erarbeiteten Ergebnisse vorgestellt, mit dem Schwerpunkt auf die entwickelten Rekonstruktionsalgorithmen und den Versuchsaufbau.

1. Einführung

Im Rahmen des Projektes **MRO 2.0** (*Maintenance, Repair & Overhaul*) wird der Überholungsprozess von gebrauchten Turbinenschaufeln im Zuge der ZfP 4.0 selbst einer Generalüberholung unterzogen. Dabei soll die klassische Prüfungs- und Reparaturkette, die aus vielen einzelnen, größtenteils manuellen Schritten besteht, automatisiert und digitalisiert werden. Ein digitaler Zwilling, der für jedes Bauteil die aufgenommenen Daten, Befunde und Reparaturmaßnahmen miteinander vernetzt und verarbeitet, bildet dabei das Rückgrat für das



Upgrade der Teile, das die herkömmliche Reparatur ersetzen soll. Das vorliegende Arbeitspaket behandelt die Wanddickenmessung mit Ultraschall, welche benötigt wird, um die Möglichkeit der Weiterverwendung eines jeden Bauteils zu bewerten. Die konventionelle, punktuelle Handprüfung soll dabei mittelfristig durch ein automatisiertes, flächig messendes Verfahren ersetzt werden. Die komplexe, in zwei Ebenen gekrümmte Geometrie der untersuchten Bauteile macht eine flexible Ultraschallankopplung erforderlich, die hier durch die Tauchtechnik realisiert wird. Um sowohl Prüfgeschwindigkeit als auch die Ortsauflösung zu erhöhen, kommt ein Array-Prüfkopf zum Einsatz, der, um stets eine zur Bauteiloberfläche senkrechte Einschallung zu gewährleisten, von einem Roboterarm geführt wird. Dabei wird das etablierte FMC-TFM-Prinzip zur Datenaufnahme und -verarbeitung genutzt. Beim Übergang des Schallpulses vom umgebenden Medium (*Wasser*) in das Bauteil (*Ni-Basis-Hochtemperaturlegierung*) und zurück müssen in der Rekonstruktion die Änderung der Schallgeschwindigkeit und die dadurch auftretenden Grenzflächeneffekte berücksichtigt werden. Im Folgenden werden zunächst das als Demonstrator realisierte Prüfsystem und danach die Rekonstruktion der Außen- und Innenoberflächen der Turbinenschaufeln beschrieben, sowie bisherige Ergebnisse vorgestellt.

2. Prüfsystem

Der im Labor der BAM aufgebaute Demonstrator besteht aus den Komponenten Phased-Array-Ultraschallprüfgerät vom Typ Verasonics Vantage 64, einem Array-Ultraschallprüfkopf, einem Roboterarm ABB IRB-1660ID, einem von der BAM und KleRo konstruierten Gestell, sowie einem von der BAM hergestellten Tauchbecken. Die gesamte Demonstratoranlage ist in Abb. 1 zu sehen. Der Roboter und das Tauchbecken sind gemeinsam auf dem Gestell befestigt und bilden eine fest verbundene Einheit, im Gestell untergebracht sind auch der Vorratsbehälter für das Wasser und die Pumpenanlage. Vor der Durchführung von Messungen wird das mit Zusätzen zum Korrosionsschutz und Reduzierung der Oberflächenspannung versehene Wasser vom Vorratsbehälter in das Tauchbecken gepumpt und durchläuft dabei mehrere Filter. Das stets vorrätige Wasser dient somit zugleich als Zusatzgewicht für die Roboteranlage. Das jeweilige Prüfobjekt wird im Tauchbecken auf eine Anschlagplatte aufgebracht und an definierte Punkte angelegt. Dabei sind an die Anschlagplatte Referenzpunkte angebracht, die zum Einmessen ihrer Position und Orientierung mit dem Roboter verwendet werden. Somit kann die Platte mit dem Prüfobjekt individuell für die jeweilige Prüfaufgabe positioniert werden. Eine Verstiftung der Platte im Lochraster der Grundplatte gewährleistet eine wiederholgenaue Positionierung. Der Endeffektor des Roboters besteht aus einem Flansch, an den ein für diesen Zweck hergestellter Anbau angebracht wird, der, im Gegensatz zum Endeffektor, in Wasser getaucht werden kann. Dieser Anbau fixiert seinerseits die individuell konstruierten, additiv gefertigten Halterungen, die die benutzten Prüfköpfe aufnehmen. Anbau und Halterungen sind so konstruiert, dass die jeweilige Mitte des Array-Prüfkopfs in der z-Achse des Grund-Werkzeugkoordinatensystems liegt, sodass der Werkzeugpunkt im Idealfall nur in der z-Koordinate angepasst werden muss. Hier wurde in erster Näherung angenommen, dass die Konstruktionsgenauigkeit ausreicht, um die gleiche Orientierung von Sensor und Endeffektor zu erreichen. Insgesamt besitzt die Anlage drei aktive Komponenten, die Robotersteuerung, die Hardware des Ultraschallgeräts, und den Messrechner, der die übergeordnete Steuerung übernimmt und die Kommunikation zwischen den Systemen herstellt, welche in Abb. 2 schematisch dargestellt ist. Auf dem Messrechner werden in der Software Matlab die Ultraschall-Messprozedur und in der Software RobotStudio die Roboterbahn vorgegeben. Die Roboterbahn, inkl. gewünschter Sensor und Abstand, wird am Handgerät des Roboters ausgewählt und die Messprozedur in Matlab gestartet. Daraufhin

wartet das Ultraschallgerät auf ein Synchronisationssignal, das vom Roboter bei Erreichen des Messorts gesendet wird. Die notwendige Messzeit von einigen Millisekunden wird vom Roboter abgewartet und dann mit der Anfahrt des nächsten Punktes fortgefahren. Die Übergabe der Positionsdaten erfolgt synchron über eine Netzwerkverbindung. Diese Prozedur wiederholt sich, bis eine vorab festgelegte Anzahl an Messpunkten absolviert ist. Hier greift die Speicherroutine und pausiert Roboter- und Messgerätroutinen über ein Hardwaresignal, während das Datenpaket abgespeichert wird. Diese Prozedur wird bis zum Ende der Messfahrt fortgesetzt, und der Roboter kehrt automatisch in seine Ausgangsposition



Abb. 1: Demonstrator-Prüfanlage im Prüflabor der BAM

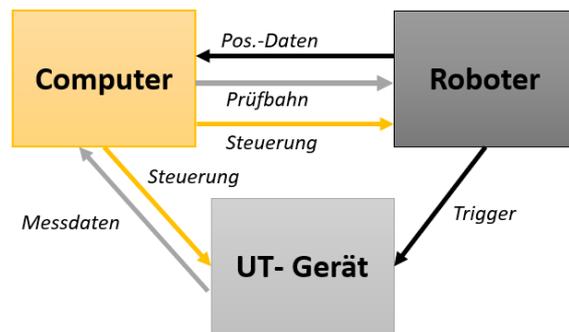


Abb. 2: Schematische Darstellung der Kommunikation der aktiven Elemente

zurück. Die Erstellung der Prüfbahnen, auf denen sich der robotergeführte Sensor bewegt, erfolgt durch die Software RobotStudio, in der ein vollständiges Modell der Anlage inkl. Prüfobjekt als Simulation vorliegt. Zur Erstellung der Bahnen wird die zusätzliche Softwareoption *MachiningPowerPac* genutzt. Dabei wird über dem zu prüfenden Bereich des Prüfobjektes ein Linienraster erzeugt, das sich in Dichte und Ausrichtung variieren lässt. Diese Anordnung wird dann auf die Oberfläche des Prüfobjektes projiziert, wobei die Orientierung des Werkzeugs stets der Oberflächennormalen entspricht. Nach der Erstellung der Bahnen werden diese virtuell getestet und somit auf Erreichbarkeit und Kollisionen geprüft und schließlich in die Robotersteuerung geladen.

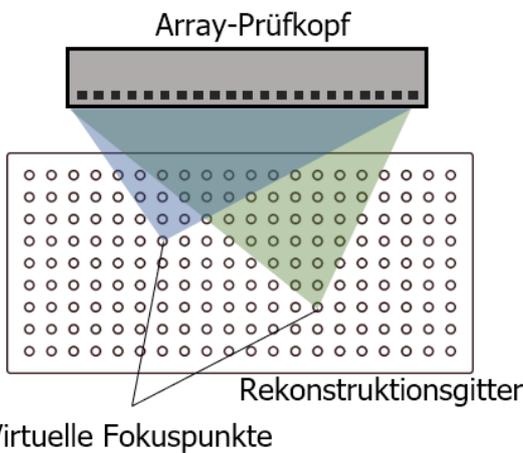
3. Messprinzip und Rekonstruktionsverfahren

Die TFM (Total Focusing Method) [1] ist ein bildgebendes Verfahren zur Auswertung von Ultraschalldaten, die nach FMC (Full Matrix Capture) aufgenommen wurden. FMC ist ein Messprinzip, das bei Array-Ultraschallsensoren zur Anwendung kommt, indem es sämtliche Elemente einer Messmatrix erfasst, welche aus den Kombinationen von Sende- und Empfangsfällen der im Sensor verbauten Ultraschallelemente gebildet wird. In der Praxis heißt das, dass jeweils ein Element einen Ultraschallimpuls sendet, während mit sämtlichen Elementen gemessen wird, und dieses Szenario für alle Elemente als Einzelsender wiederholt wird. Da das Prinzip der linearen Superposition gilt, kann die Strahlformung auch im Nachhinein aus den Daten erzeugt werden, wenn die einzelnen Summanden (d.h. die Elemente der Messmatrix) bekannt sind. Das Prinzip der TFM lässt sich nun einfach greifen: An jedem Bildpunkt eines vorab definierten Rekonstruktionsgitters unter dem Sensor werden alle zur Verfügung stehenden Daten so zeitversetzt und aufsummiert, dass sie dort einen virtuellen Fokus erzeugen (vgl. Abb. 3). Es entsteht ein Bild, das bei Anwesenheit eines geeigneten Reflektors hohe Amplituden zeigt, die deutlich gegenüber dem Hintergrund hervortreten. In diesem Bild ist noch die Wellencharakteristik der Ultraschalldaten sichtbar, weshalb die Einhüllende (bestehend aus dem Betrag des mit Hilfe der Hilbert-Transformation gebildeten analytischen Signals) entlang der Schallausbreitungsrichtung

betrachtet wird. Die Intensität I an einem Rekonstruktionsort (x, z) unter dem Sensor wird durch die folgende Gleichung beschrieben[1]:

$$I(x, z) = \left| \sum h_{tx,rx} \left(\frac{\sqrt{(x_{tx} - x)^2 + z^2} + \sqrt{(x_{rx} - x)^2 + z^2}}{c} \right) \right|$$

Hier steht $h_{tx,rx}(t)$ für das komplexwertige analytische Signal der Kombination von Senderelement tx und Empfängerelement rx ausgewertet für den Zeitwert, der sich aus der Klammer berechnet, für die Ortskoordinaten $(x_{tx}, 0)$ und $(x_{rx}, 0)$ der Sensorelemente. Zur Berechnung dieser virtuellen Verzögerungszeiten wird außerdem die Schallgeschwindigkeit c im Medium benötigt, die in Anwendungsfall (Longitudinalwelle in Wasser) ca. 1480 m/s beträgt. Mit dem TFM-Verfahren lässt sich also zunächst eine Rekonstruktion für ein



Virtuelle Fokuspunkte

Abb. 3: Schematische Darstellung der virtuellen Fokussierung (TFM) der FMC-Daten

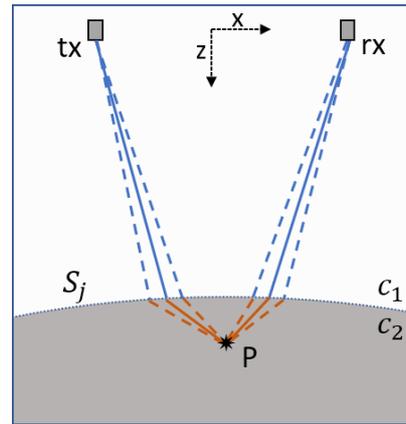


Abb. 4: Skizze zur Bestimmung der angepassten Laufzeiten für die adaptive TFM mit exemplarischer konvex gekrümmter Oberfläche

Medium berechnen, welche benutzt wird, um die Grenzfläche zwischen Wasser und Prüfobjekt zu lokalisieren. Um mit der TFM Rekonstruktionen für Volumen innerhalb des Prüfobjektes zu berechnen, müssen die bei einem Wechsel des Mediums auftretenden Grenzflächeneffekte in Betracht genommen und die TFM für diese in einer zweiten Stufe *adaptiert* werden[2, 3]. Der entsprechende Effekt ist hier die unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten hervorgerufene Brechung. Zugrundeliegend für die Schalllaufzeiten ist hier das Fermat'sche Prinzip, das die kürzeste Gesamtlaufzeit präferiert. Abb. 4 zeigt dazu eine Skizze. Bei Kenntnis der Oberflächenposition und -form lassen sich für ein neues Rekonstruktionsgitter für Punkte innerhalb des Bauteils die Summen für alle möglichen Schallwege durch die Grenzfläche ermitteln, minimieren und damit die angepassten Laufzeiten bestimmen. Die angepasste Laufzeit für eine Kombination aus Sensorelement e und Bildpunkt P im Material berechnet sich somit durch folgende Gleichung unter Minimierung der Laufzeit bezüglich aller bekannten Oberflächenpunkte S_j :

$$t_e^P(x_P, z_P) = \min_{S_j} \left(\frac{\sqrt{(x_{S_j} - x_e)^2 + z_{S_j}^2}}{c_1} + \frac{\sqrt{(x_P - x_{S_j})^2 + (z_P - z_{S_j})^2}}{c_2} \right)$$

Sind die t_e^P für alle Elemente und Bildpunkte berechnet, lassen sich die Laufzeiten von Element zu Bildpunkt zu Element als Summe von jeweils zwei Laufzeiten $t_{tx,rx}^P = t_{tx}^P + t_{rx}^P$ für die jeweilige Kombination tx,rx von Elementen und dem gleichen Bildpunkt P bestimmen. Dies geschieht unter der Annahme, dass Reflektoren im Material den Schall richtungsunabhängig reflektieren. Als Winkeleinschränkung wird in erster Näherung angenommen, dass nur solche Schallwege einen signifikanten Beitrag leisten, deren

Durchstoßpunkte in der Grenzfläche innerhalb der von der Elementgeometrie vorgegebenen Schallkegel liegen. Die Oberflächenpunkte S_j und ihre Koordinaten können auf verschiedene Weisen aus den TFM-Bildern der ersten Stufe extrahiert werden. Im Vergleich der erprobten Methoden erwies sich die Technik, jede Bildspalte auf ihr Maximum zu normieren, als vielversprechend, da die Oberflächenanzeigen in den TFM-Bildern nahezu horizontal verlaufen. Da die TFM zunächst ohne Wichtungsfaktoren implementiert wurde, stellt diese Technik eine Möglichkeit dar, die Problematik des durch eine höhere Anzahl verfügbarer Daten überbewerteten mittleren Bildbereichs zu umgehen. Anschließend wird ein morphologisch öffnender Filter über das Bild gelegt, der große, zusammenhängende Anzeigen gegenüber punktwisen Erhebungen verstärkt. Im verbleibenden Bild werden dann für jede Spalte die Maxima ausgewählt, sofern sie über einem bestimmten Schwellwert liegen. Ihre Koordinaten werden zunächst im Sensorkoordinatensystem gespeichert und mit Hilfe der Roboterposition und -orientierung in das Werkobjektkoordinatensystem transformiert.

4. Ergebnisse

Zunächst wurde das Verfahren an einem Stufenkeil nach DIN EN ISO 16946 [4] getestet. Dabei wurde mit einem 32-Elemente-Lineararray mit Mittenfrequenz 10 MHz eine lineare Messfahrt über die gestufte Seite des Stufenkeils durchgeführt, um zunächst die Außengeometrie zu rekonstruieren. Der Messpunkt Abstand betrug 0,5 mm bei insgesamt 261 Messpunkten. Als z-Koordinate wurde ein fester Abstand von 100 mm über der Grundplatte gewählt. Die resultierenden TFM-Bilder wurden programmatisch ausgewertet

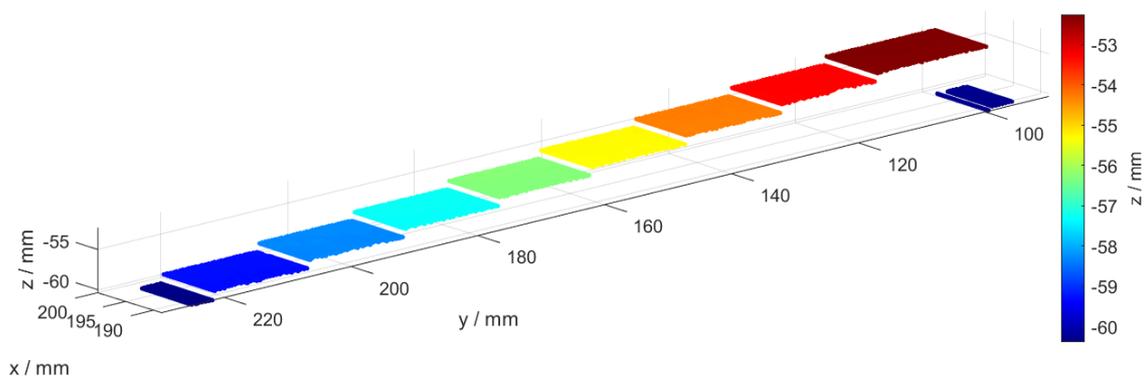


Abb. 5: 3D-Darstellung der aus dem Scan am Stufenkeil extrahierten Außenoberfläche. Die Farbkodierung stellt die z-Koordinate dar.

und dem Werkobjektkoordinatensystem zugeordnet. Abb. 5 stellt das Ergebnis der Oberflächenrekonstruktion grafisch dar, wobei die z-Koordinate zusätzlich als Farbkodierung herausgestellt ist. Die Rekonstruktionsrichtung der Einzelbilder liegt hier parallel zur x-Achse, die Scanrichtung zur y-Achse. Alle acht Stufen des Prüfobjekts und ein Teil der Anschlagplatte sind in der Rekonstruktion sichtbar. Für eine statistische Auswertung wurden die z-Werte der Oberflächenpunkte in x-Richtung gemittelt, und die Höhe zwischen den einzelnen Stufen bestimmt. Über alle Stufen gemittelt beträgt die Stufenhöhe 0,98 mm, mit einer Standardabweichung von 0,02 mm. Dabei ist zu beachten, dass die Fertigungstoleranz des Stufenkeils laut Norm im Bereich [1,0 - 0,02] mm liegt. Ebenfalls bei 0,02 mm liegt die gewählte Pixelgröße des Rekonstruktionsgitters, die erkannte Oberfläche schwankt also im Mittel um einen Pixel, was darauf hinweist, dass sich die mögliche Genauigkeit durch eine Erhöhung der Bildauflösung noch erhöhen lässt.

Da die Scanrichtung senkrecht zur Rekonstruktionsrichtung gewählt wurde, existieren an Positionen direkt über den Stufen, also dem treppenförmigen Wechsel der Wanddicke, TFM-Bilder, in denen Oberflächen aus beiden Höhen rekonstruiert und erkannt wurden. Diese Bilder wurden aus der statistischen Auswertung herausgelassen, da es sich im untersuchten Anwendungsfall der Turbinenschaufeln um stetige Außenoberflächen handelt, und somit die treppenförmigen Stellen der Oberfläche des Stufenkeils hier nicht relevant sind. Aus diesem Grund wurde für die Betrachtung der Rekonstruktion der Rückwand von der anderen Seite gescannt. Abb. 6 zeigt die Ergebnisse der Außenoberflächen- und Rückwandrekonstruktion als Projektion der Daten auf die y - z -Ebene. Die Rückwandrekonstruktion wurde für jeden Messpunkt für einen Bereich von 1 mm bis 8,5 mm hinter der erkannten Außenoberfläche angesetzt. Analog zur Außenoberfläche wurden die Punkte der Rückwand aus den TFM-Bildern automatisch identifiziert und in das gemeinsame Koordinatensystem transformiert. Die Rekonstruktion der Rückwände liegt für alle Stufen vor, wobei für die Stufen drei und vier teilweise die ersten Wiederholungsechos als Rückwand identifiziert wurden. Auch hier beobachtet man am Wechsel zwischen den Stufen Artefakte, die durch die nicht eindeutig bestimmbare Rückwandanzeige hervorgerufen werden. In einer numerischen Auswertung wurden für jede Stufenhöhe die Bereiche an

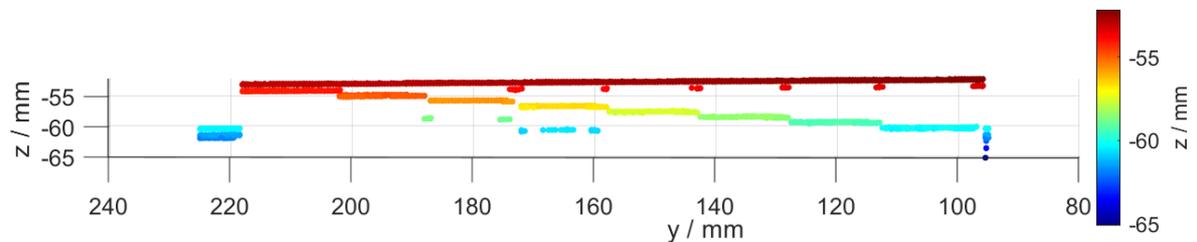


Abb. 6: Darstellung der Ergebnisse des Scans von der planaren Seite des Stufenkeils mit Außenoberfläche und Rückwand, projiziert auf die y - z -Ebene.

rekonstruierten Punkten ausgewählt, die eindeutig zu der jeweiligen Stufe gehören und die Wanddicken dementsprechend ausgewertet. Die so ermittelten Werte der eindeutig identifizierten Wanddicken weicht im Mittel um $-0,06$ mm vom jeweiligen Sollwert ab, wobei die Standardabweichung davon $0,02$ mm beträgt. Die Stufe mit Wanddicke 1 mm wurde hierbei nicht gewertet, da für eine zuverlässige Bestimmung der Bildbereich dichter hinter der Außenoberfläche hätte gewählt werden müssen. Durch die räumliche Ausdehnung des Wellenpaketes und das Verhältnis der beiden Schallgeschwindigkeiten lässt sich allerdings in diesem Wanddickenbereich prinzipiell keine Rückwand rekonstruieren, da sich dort Oberflächen- und Rückwandechos bereits in den Rohdaten überschneiden. Zielführend hierfür wäre wahrscheinlich die Auswahl eines kürzeren Anregungspulses. Nach der Verifizierung am einfachen Testkörper wurden verschiedene Scans am realen Bauteil, einer Leitschaufel für stationäre Gasturbinen der Firma Siemens Energy, durchgeführt. Zunächst erfolgte dies mit einem konventionellen fokussierenden Tauchtechnikprüfkopf und engem Messpunktabstand von ca. 1 mm auf der Schaufeloberfläche. Die so aufgenommenen Daten sollen als Vergleich zu den später mit dem Array-Prüfkopf aufgenommenen Daten dienen. Der Scan mit diesem Prüfkopf liefert statt der Messmatrix und der aufwendigen Rekonstruktion pro Messposition nur ein A-Signal, was die Auswertung auf die Bestimmung der Maxima für Eingangs- und Rückwandanzeigen beschränkt. Im Gegenzug muss das Scanraster deutlich feiner gewählt werden, da keine Raumrichtung von einer Apertur abgedeckt wird. Abb. 7 zeigt die resultierenden 3D-Punktwolken für konvex (links) und konkav (rechts) gekrümmte Oberflächenbereiche der Turbinenschaufel. Die Position der dargestellten Punkte entspricht der erkannten Außenoberfläche, die Farbkodierung der ermittelten zugehörigen Wanddicke. Da der Fokus auf der Wanddicke liegt, werden Punkte mit unzureichender Rückwandamplitude in der Darstellung weggelassen, obwohl auch an

diesen Punkten eine Außenoberfläche erkannt wurde. Hieraus wird ersichtlich, in welchen Bereichen keine Rückwand bestimmbar ist, da das Bauteil dort durchgehende Strukturen besitzt, die bis zur gegenüberliegenden Außenoberfläche reichen (in den Abbildungen ungefähr parallel zur x-Achse). Die schräg verlaufenden, dünneren Linien zeigen die Turbulatoren, die zur Innenoberfläche gehören. Diese stellen durch ihre

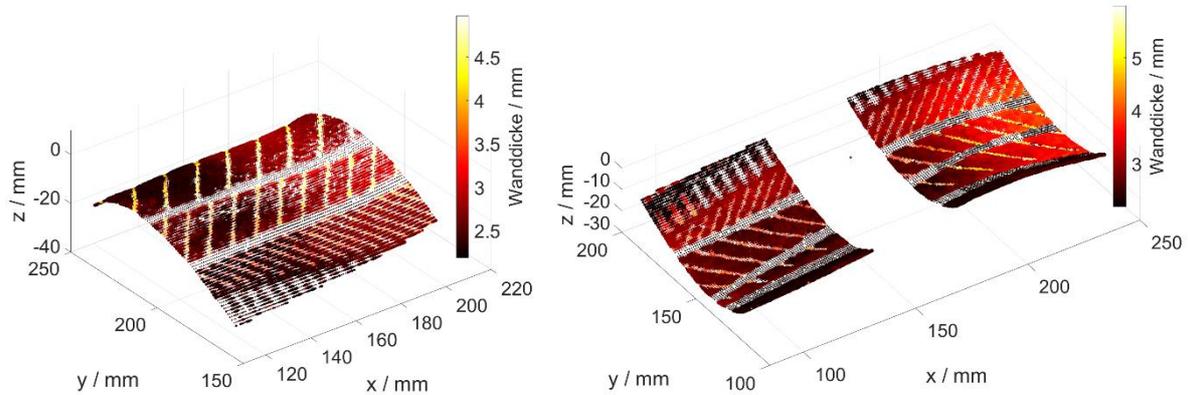


Abb. 7: Scans an der realen Turbinenschaufel mit konventionellem Tauchtechnikprüfkopf. Die Position der Punkte zeigt Außenoberflächen, die Farbe der Punkte stellt die lokale Wanddickeninformation dar. Links: Konvex gekrümmte Saugseite, rechts: konkav gekrümmte Druckseite. Die Lücke im rechten Bild resultiert aus der teilweisen Entfernung der Außenoberfläche am Bauteil.

Querschnittsgeometrie und geringe Ausdehnung die größte Herausforderung für die Rekonstruktion dar. Da hier viele verschiedene Schallwege möglich sind, ist eine zuverlässige Bestimmung der Wanddicke an den Turbulatoren mit dieser Art des Scans noch nicht durchführbar. Allerdings lassen sich die Positionen der Turbulatoren durchaus bestimmen, da sie sich in den Daten deutlich von den *glatten* Teilen der Rückwand unterscheiden, deren Wanddickenbestimmung beim vorgestellten Verfahren im Fokus liegt. Als Referenz zu den Ultraschallmessungen dienen mit einem optischen Streifenlichtprojektions-Sensor erstellte 3D-Scans, die in Abb. 8 mit den Ultraschalldaten verglichen werden. Hierfür wurden Teilerflächen der Schaufel entfernt, um mit dem

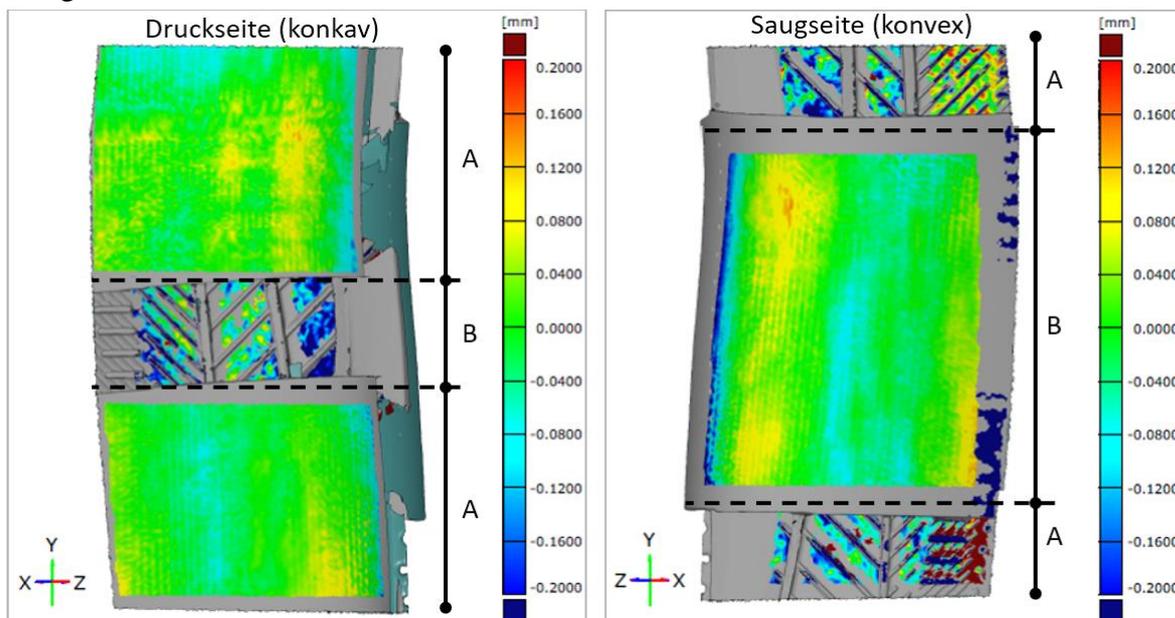


Abb. 8: Vergleich der rekonstruierten Oberflächen mit dem konventionellen Tauchtechnikprüfkopf mit Daten aus einem optischen 3D-Scan nach Best Fit. Die in A und B dargestellten Bereiche beziehen sich auf zwei verschiedene Datensätze, zwischen deren Aufnahme das Bauteil auf die andere Seite gedreht wurde.

optischen Scan die Innenoberfläche (=Rückwand) erfassen zu können. In den Grafiken stellen die grauen Flächen die Daten des optischen Scans dar, während die Farbkodierung

die lokale Abweichung der rekonstruierten Oberflächen von diesen Flächen zeigt. Hierbei ist zu beachten, dass die rekonstruierten Oberflächen als Punktwolken vorliegen, die für diesen Vergleich polygonisiert werden mussten. Des Weiteren beziehen sich die in den Grafiken markierten Bereiche A und B auf Datensätze zweier Messungen, zwischen denen die Schaufel im Becken auf die andere Seite gedreht wurde. Die Außenoberflächen von A im linken und B im rechten Bild wurden jeweils mit einem *Best Fit* an die Außenoberflächen des optischen Scans positioniert und liefern dann die Darstellungen der Abweichung zu den Rückwänden auf der jeweils anderen Seite (die rekonstruierten Rückwandbereiche A im rechten Bild beziehen sich also auf die Außenoberflächen A im linken Bild, und dementsprechend umgekehrt für die Bereiche B). Die farblich dargestellte Abweichung wurde als Abstand zwischen dem Netz des optischen Scans zu dem Netz der polygonisierten rekonstruierten Oberfläche dargestellt. Die Abstandswerte wurden bezogen auf die jeweiligen Flächennormalen des Netzes des optischen Scans berechnet. Es wurde die gleiche Berechnungsmethode für Abweichungen der Außen- und der Innenoberflächen verwendet, daher stellt die Farbkodierung in beiden Fällen die Abweichungen zwischen der Ultraschallrekonstruktion und dem 3D-Scan dar. Die Abweichungen der Außenoberflächen liegen nach dem *Best Fit* größtenteils in einem Bereich von unter einem Zehntel Millimeter, während die Werte für die Rückwände stärker streuen. Erkennbar ist unter anderem, dass die Turbulatoren in ihrer Position noch nicht exakt wiedergegeben werden.

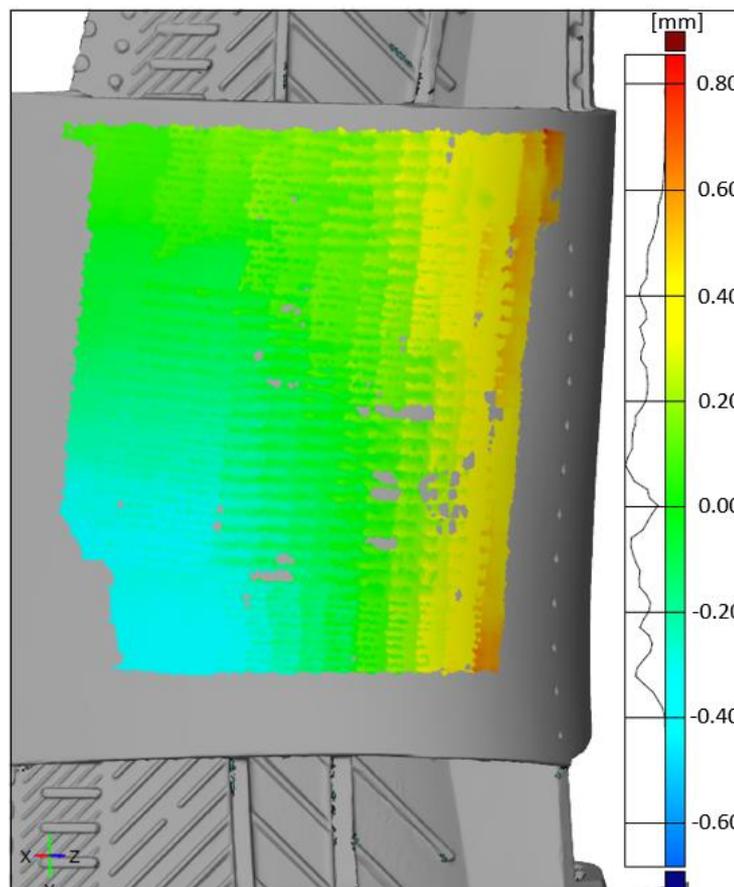


Abb. 9: Vergleich der rekonstruierten Außenoberfläche eines Scans mit Array-Prüfkopf auf der Saugseite der Turbinenschaufel mit Daten aus dem optischen 3D-Scan. Die Farbkodierung stellt die absolute Abweichung der Flächen in mm dar.

Des Weiteren liegen erste Ergebnisse von Scans mit Array-Prüfköpfen an den Turbinenschaufeln vor. Hierfür wurde ein Bereich auf der konvex gekrümmten Saugseite der vorliegenden Turbinenschaufel mit einem Sensor mit 64 Elementen (Elementbreite 1 mm) und Prüffrequenz 7,5 MHz ausgewählt. Ausgewertet wird hier die Rekonstruktion der

Außenoberfläche im Vergleich zum 3D-Scan. Abb. 9 zeigt die Abweichung der polygonisierten rekonstruierten Oberfläche von der Referenzoberfläche in der ursprünglichen Ausrichtung, also ohne Anwendung des *Best Fit*. Im Vergleich zu den Einzelprüfkopf-Scans, deren ursprüngliche Ausrichtung noch nicht optimal zur Referenzposition ausgerichtet war, konnte hier nach einer Justage der Sensor- und Werkobjektpositionierung dieser systematische Fehler auf unter einen Millimeter verringert werden. Zur weiteren Optimierung können aus diesen Abweichungen nun auch Erkenntnisse über die Fehlorientierung des Werkobjektes gewonnen werden. Die rekonstruierte Fläche zeigt im Gegensatz zum Einzelprüfkopf-Scan eine Art Wellenstruktur, die ein Artefakt der sich überlappenden Aperturen für benachbarte Prüfbahnen ist: Bei einer minimalen Fehlorientierung des Sensors werden zwar die Oberflächen in den einzelnen TFM-Bildern noch korrekt rekonstruiert, die extrahierten Oberflächenpunkte werden jedoch basierend auf den jeweiligen Positions- und Orientierungsdaten des Roboters in das 3D-Modell transformiert und die resultierende Oberfläche wird im Ganzen nicht stetig abgebildet. Um diesen Fehler zu minimieren, können die extrahierten Oberflächen also zum Einen auf kleinere Aperturen beschränkt werden, in denen der Einfluss der Fehlorientierung

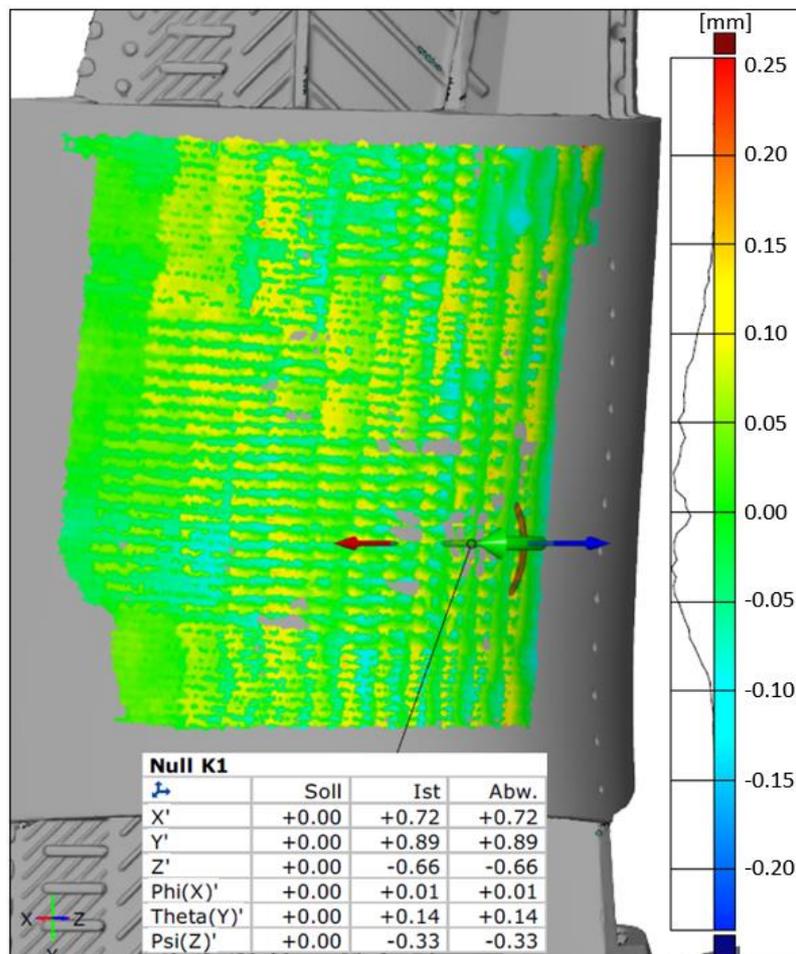


Abb. 10: Vergleich der rekonstruierten Außenoberfläche eines Array-Prüfkopf-Scans von der Saugseite der Turbinenschaufel mit Daten aus dem optischen 3D-Scan nach Best Fit. Die Farbkodierung stellt damit Abweichungen in der Form der Flächen in mm dar.

vernachlässigbar wird. Zum Anderen kann eine Bewertung der extrahierten Oberflächenpunkte anhand ihrer Amplitude im TFM-Bild erfolgen oder lokal zwischen diesen gemittelt werden. Ein weiterer Ansatz ist es, die Fehlorientierung aus der Lage der Oberflächen in den TFM-Bildern zu bestimmen und dementsprechend in der Koordinatenstransformation zu korrigieren. Um die Qualität der rekonstruierten

Oberflächenform unabhängig von den systematischen Fehlern zu betrachten, wurde auch hier eine Auswertung mit *Best Fit* zur Referenzoberfläche durchgeführt, die in Abb. 10 zu sehen ist. Hier ist die rekonstruierte Wellenstruktur deutlicher zu erkennen, die aus dem grün markierten Bereich ($\pm 0,05$ mm) heraustritt, und etwa 0,1 mm bis 0,14 mm vom Referenzwert abweicht. Der überwiegende Teil der Werte liegt allerdings im grün markierten Intervall, was auf eine korrekt rekonstruierte globale Krümmung hindeutet. Die Tabelle in der Grafik zeigt die translatorischen und rotatorischen Parameter, die durch den *Best Fit* auf die polygonisierte rekonstruierte Oberfläche angewendet wurden und ist damit ein Maß für die *absolute* Abweichung der Daten im Vergleich zu den Bauteilbezugsflächen, also den systematischen Fehler.

Der Vergleich zwischen Array- und Einzelprüfkopf-Scans für die Außenoberflächen deckt schließlich einige Herausforderungen für die Arrayprüfung auf. Dazu ist zu bemerken, dass es sich beim Array-Scan um 600 Messpositionen in 2 Minuten Messzeit handelt, während der Einzelprüfkopf-Scan über 10000 Messpositionen und etwa 30 Minuten benötigt. Die Datenverarbeitung ist für die Array-Scandaten deutlich komplexer, jedoch auch von höherem Potential für die Ergebnisqualität, welche scheinbar bei der Arrayprüfung sensibler von der Genauigkeit der Positionierung des Sensors und Prüfobjektes abhängt. Während die Algorithmen zur Erkennung der Oberflächen aus den TFM-Bildern zum derzeitigen Stand des Projektes noch nicht vollständig ausentwickelt sind, ergibt sich qualitativ bereits eine gute Übereinstimmung, quantitativ soll diese im weiteren Verlauf des Projektes allerdings noch optimiert werden. Der Fokus weiterer Arbeiten sind hier die Weiterentwicklung der Algorithmen sowie die weitere Erhöhung der Positioniergenauigkeit, um schließlich zuverlässig die Wanddicken an den Bauteilen bestimmen zu können.

5. Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes MRO 2.0 wurde ein Demonstrator zur robotergeführten Array-Ultraschallprüfung von Turbinenschaufeln aufgebaut, mit dem Ziel, flächige Wanddickenmessungen an den realen Bauteilen mit komplexer Oberflächengeometrie durchzuführen. Das Verfahren wurde zunächst am Stufenkeil verifiziert, hier wurden Oberflächenfeatures und die Wanddicke mit einer Abweichung von unter 0,1 mm rekonstruiert. Zusätzlich wurden an der Anlage Messungen am realen Bauteil mit einem konventionellen fokussierenden Tauchtechnikprüfkopf durchgeführt, wobei sich in der visuellen Darstellung die erkannten Oberflächen und Wanddicken, sowie Geometriemerkmale gut erkennen ließen. Es erfolgte eine Auswertung durch einen Vergleich mit Referenzdaten eines optischen 3D-Scans. Hier lag die Abweichung für die Außenoberfläche in der Größenordnung 0,1 mm, die bestimmte Rückwandposition schwankte um bis zu 0,2 mm, wobei die Geometriemerkmale der rekonstruierten Innenoberfläche räumlich noch nicht exakt zuzuordnen waren. Erste Messungen und Rekonstruktionen mit Array-Prüfköpfen zeigten, dass sich hier die Außenoberfläche mit einer Toleranz um 0,1 mm rekonstruieren lässt, wobei die deutlich höhere Komplexität der Datenverarbeitung einerseits eine höherauflösende und skalierbare Abbildung erlaubt, andererseits eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Rekonstruktions- und Prüfparametern mit sich bringt.

Förderhinweis

Dieses Projekt wurde kofinanziert durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE).

Referenzen

1. Holmes, C., B. Drinkwater, and P. Wilcox, *The post-processing of ultrasonic array data using the total focusing method*. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2004. **46**(11): p. 677-680.
2. Le Jeune, L., et al. *Adaptive ultrasonic imaging with the total focusing method for inspection of complex components immersed in water*. in *AIP Conference proceedings*. 2015. American Institute of Physics.
3. Zhang, J., B.W. Drinkwater, and P.D. Wilcox, *Efficient immersion imaging of components with nonplanar surfaces*. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, 2014. **61**(8): p. 1284-1295.
4. ISO 16946, *Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung - Beschreibung des Stufenkeil-Kalibrierkörpers (ISO 16946:2017); Deutsche Fassung EN ISO 16946:2017*. 2017.