

Erzeugung von künstlichen Rissen mittels der Wasserstrahltechnologie

René GANSEL, Markus MLINARIC, Thomas HASSEL, Hans Jürgen MAIER,
Sebastian BARTON

Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover, Garbsen

Kontakt E-Mail: gansel@iw.uni-hannover.de

Kurzfassung. Zur Kalibrierung oder zur Qualifizierung der Prüftechnik werden in der zerstörungsfreien Prüfung Bauteile oder Proben mit Fehlern benötigt, welche in ihrer Ausprägung real auftretenden Bauteilfehlern soweit möglich entsprechen. Da die notwendige Anzahl an repräsentativen fehlerbehafteten Proben zumeist für eine Abschätzung einer Entdeckungswahrscheinlichkeit nicht zur Verfügung stehen, werden häufig künstliche Referenzfehler zur Überprüfung dieser verwendet. In Bezug auf die Wirbelstromprüfung fungieren typischerweise Nuten als Referenzfehler für Risse. Diese werden in der Regel erodiert oder gesägt. Erodierete Nuten weisen eine abgerundete Geometrie auf und es können durch die thermische Belastung ungewollte Gefügeveränderungen entstehen. Gesägte Nuten verfügen hingegen über eine im Querschnitt rechteckige, vergleichsweise breite Nutgeometrie. Die Geometrieabweichung im Vergleich zu realen Rissen beeinflusst die Wirbelstromausbreitung im Bauteil und damit das Prüfsignal. Hierdurch kann es bei der Bestimmung der Defektgröße zu starken Abweichungen kommen. Gleichbedeutend sind hieraus abgeleitete Aussagen über die Entdeckungswahrscheinlichkeit realer Risse wenig belastbar.

Eine neuartige Methode zur reproduzierbaren Erzeugung von Referenzfehlern nutzt das erosiv wirkende Hochdruck-Wasserstrahlen. Im Rahmen der Untersuchungen wurde Wasser auf 380 MPa verdichtet und für die Strahlerzeugung durch Düsen mit einem Durchmesser von 0,04 mm und 0,125 mm beschleunigt. Durch die Anpassung von Anlagentechnik und Prozessparametern können mit diesem Verfahren Nuten mit rissähnlichen Geometrien erzeugt werden. Hierdurch entsteht die Möglichkeit aussagekräftige PoD (Probability of Detection)-Studien durchführen zu können. Darüber hinaus ist die lokale Einbringung der Nuten auf Bauteilen mit komplizierten Geometrien möglich. Ein Anwendungsbeispiel für die Wirbelstromprüfung wird anhand von erosiv innerhalb der Wärmeeinflusszone einer Stumpfnah eingeleiteten Fehlern skizziert.

1. Einführung und Motivation

Bei der Anwendung von zerstörungsfreier Prüftechnik sind Kalibrierkörper mit definierten Referenzfehlern unumgänglich. Diese können für die Qualifizierung der Prüftechnik verwendet werden, um u. a. die mögliche Auflösungsgrenze zu bestimmen. Darüber hinaus können diese Fehler z. B. bei der Wirbelstromprüfung als Referenz dienen, um reale Fehler hinsichtlich der Größe und Geometrie einordnen zu können. Gleichmaßen lässt sich so das Prüfsystem auf kritische und damit notwendig zu findende Fehlergrößen kalibrieren.



Hinsichtlich der Qualifizierung von Prüftechnik anhand einer spezifischen Prüfaufgabe liegt eine weitere Herausforderung in der oftmals geringen Anzahl an repräsentativen, realen Fehlern. Hierbei stehen entweder keine Fehler in den realen Bauteilen zur Verfügung, oder diese werden bei den bestehenden Prüfungen nicht detektiert und können somit nicht zur Qualifizierung herangezogen werden. In der Literatur, wie z. B. in [1], wird eine theoretische Auflösengrenze des jeweiligen Verfahrens angegeben. Diese kann in der Praxis, aufgrund der komplexen Umgebungsbedingungen, grundsätzlich nicht erreicht werden. Eine PoD (Probability of Detection)-Studie hingegen wird für den Vergleich mehrerer zerstörungsfreier Prüfverfahren und zur Bestimmung der Zuverlässigkeit der genutzten Untersuchungsmethode durchgeführt, wobei das verwendete Prüfsystem mit allen Einzelkomponenten als sog. Black Box angesehen wird. Folglich ist das Ergebnis einer PoD-Studie ausschließlich für das verwendete Prüfsystem und die untersuchte Prüfaufgabe gültig. Die Durchführung einer PoD-Studie ist nicht normativ definiert. In der Literatur [2-7] sind folgende Voraussetzungen für eine valide PoD-Studie zu finden:

- 30 – 40 unabhängige Defekte; reale Defekte sind künstlich erzeugten Defekten immer vorzuziehen
- Es muss ein linearer Zusammenhang zwischen Kenngröße und Signal bestehen. Für die Wirbelstromprüfung bedeutet dies, dass die Fehlertiefen innerhalb der Wirktiefe des verwendeten Sensors liegen müssen.
- gleichmäßige Verteilung der Kenngröße über den erwarteten Bereich (z.B. Risstiefe)
- die Festlegung einer adäquaten Entscheidungsschwelle ist wichtig
 - zu niedrige Entscheidungsschwelle = viele Fehlanzeigen (falsch positiv)
 - zu hohe Entscheidungsschwelle = nicht gefundene Fehler (falsch negativ).

Da selten 30-40 Risstiefen gleichmäßig über den erwarteten Bereich verteilt vorliegen, ist eine alternative Möglichkeit die gezielte Erzeugung von rissähnlichen Nuten. Diese werden typischerweise erodiert oder gesägt. Erodierete Nuten weisen am Boden der Nut eine abgerundete Geometrie auf und es können durch die thermische Belastung ungewollte Gefügeveränderungen entstehen. Gesägte Nuten verfügen hingegen über eine im Querschnitt rechteckige, zumeist vergleichsweise breite Nutgeometrie. Die Geometrieabweichung im Vergleich zu realen Rissen, welche häufig eine geringe Rissöffnung und –breite sowie eine kantige Rissflanke als auch scharfkantige Risspitze aufweisen, beeinflusst die Wirbelstromausbreitung im Bauteil und damit das Prüfsignal. Hierdurch kann es bei der Bestimmung der Defektgröße zu erheblichen Abweichungen kommen. Gleichbedeutend sind hieraus abgeleitete Aussagen über die Entdeckungswahrscheinlichkeit realer Risse wenig belastbar. Ein neuartiges Verfahren zur Erzeugung von Referenzfehlern ermöglicht es, Nuten ohne diese Nachteile zu erzeugen. Dazu werden diese durch Hochdruck-Wasserstrahlen erzeugt. Die resultierenden Nuten weisen durch die Ausspülung des Wassers eine breitere Nutöffnung auf, wobei die Nutbreite mit der Tiefe abnimmt und in einer „Spitze“ endet. Die aus den unterschiedlichen Methoden resultierenden Nutgeometrien sind in Abbildung 1 anhand einer annähernd 1 mm tiefen Nut in Proben aus S355 Baustahl verdeutlicht. Hinsichtlich der mittels Wasserstrahl erzeugten Nuten gilt, dass die Geometrie schmaler und scharfkantiger wird, umso kleiner die Nuttiefe ist.

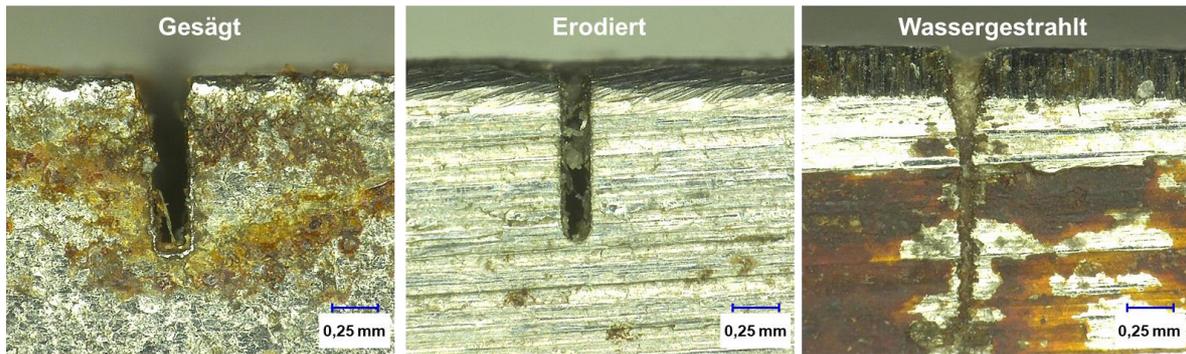


Abb. 1. Vergleich unterschiedlicher Nutgeometrien resultierend aus der Herstellungsmethode

Mit dem Verfahren können reproduzierbar Nuten unterschiedlicher Tiefe, auch bei komplizierten Bauteilgeometrien, erzeugt werden. Insbesondere bei sehr kleinen Risstiefen können sehr geringe Nutbreiten erreicht werden. In Abbildung 2 ist exemplarisch eine 0,55 mm tiefe Nut mit einer rissähnlichen Geometrie dargestellt.

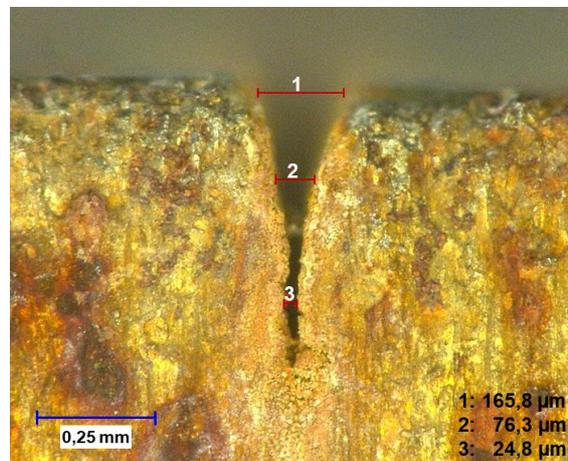


Abb. 2. Rissähnliche Nutgeometrie mit Breitenabmessungen in μm , hergestellt mit Wasserstrahltechnologie und einem Düsendurchmesser von 0,04 mm

Als Anwendungsbeispiel wird die Durchführung einer PoD-Studie an dickwandigen Schweißnähten, wie sie auch bei Offshore-Windenergieanlagen (WEA) vorzufinden sind, vorgestellt. Hierbei sollten Nuten als Referenz für Ermüdungsriss in der Wärmeeinflusszone in unterschiedlichster Tiefe erzeugt werden. Für die Untersuchung der PoD und gleichzeitig für die Bestimmung der Wirktiefe der verwendeten Wirbelstromprüftechnik wurde ein S355J2+N Blech mit einer Materialstärke von 20 mm und einer Länge von 1 m mittels Unterpulverschweißen gefügt und anschließend in der Wärmeeinflusszone Nuten mit einer Länge von 15 mm und Tiefen zwischen 0,05 mm und 10 mm eingebracht. Die Decklage der Stumpfnäht bestand aus 3 Schweißraupen und besaß eine Breite von 40 mm. Die rechte Schweißraupe wurde mit einer Schweißnahtüberhöhung, die entlang der Schweißnaht zwischen 1-2 mm variierte, geschweißt. Hierdurch sollten typische Störeffekte in Form von Abstandseffekten simuliert werden. Auf Basis einer bekannten PoD in Abhängigkeit der Prüfaufgabe und verwendeten Prüftechnik sind belastbare Informationen zum IST-Zustand von WEA erzielbar. Weiterführend können die Prüfergebnisse, die u. a. Aussagen zur Risstiefe beinhalten, als Datengrundlage für eine Verlängerung der Nutzungsdauer und ein probabilistisches Lebensdauermodell genutzt werden. Hierdurch können effizientere Reparaturmaßnahmen und effizientere Prüfintervalle resultieren.

2. Erzeugung von rissähnlichen Fehlern

2.1 Wasserstrahltechnologie

Eine Wasserhochdruckanlage besteht aus drei wesentlichen Komponenten: Eine Hochdruckpumpe, einem Schneidkopf sowie einer Führungsmaschine. Durch die Hochdruckpumpe wird Wasser auf einen Druck von bis zu 600 MPa verdichtet [8]. Über ein Rohrleitungssystem wird dieses dann zum Schneidkopf transportiert, welcher in der Regel auf einer Führungsmaschine montiert ist. Der Schneidkopf enthält ein Schaltventil sowie die Wasserdüse (vgl. Abb. 3). Durch die Düse wird das verdichtete Wasser auf atmosphärischen Druck entspannt und dabei auf Geschwindigkeiten von bis zu 900 m/s beschleunigt. Industriell übliche Düsen verfügen über einen Durchmesser zwischen 0,25 und 0,35 mm. Bei der Verwendung kleinerer Düsen wird das Verfahren als Mikrowasserstrahlschneiden bezeichnet. Übliche Düsendurchmesser liegen hier zwischen 0,1 und 0,2 mm [9]. Zur Abgrenzung von weiteren Verfahrensvarianten wird das Trennen durch die alleinige erosive Wirkung des Hochgeschwindigkeitswasserstrahls als Reinwasserstrahlschneiden bezeichnet. Diese Verfahrensvariante zeichnet sich durch einen besonders geringen Strahldurchmesser und damit eine hohe Fertigungsgenauigkeit aus.

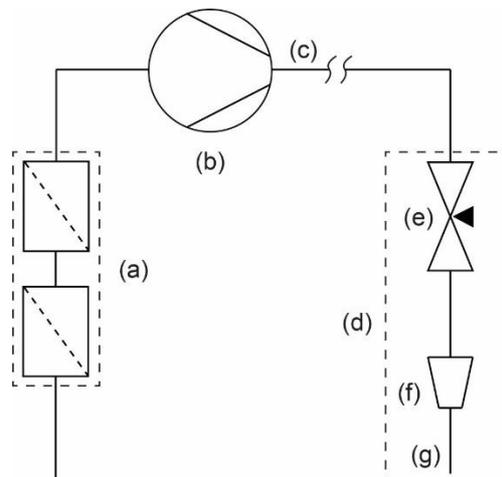


Abb. 3. Schematischer Aufbau eines Wasserhochdrucksystems; (a) Speisewasserfiltration, (b) Hochdruckpumpe, (c) HD-Rohrleitungssystem, (d) Schneidkopf, (e) Schaltventil, (f) Wasserdüse, (g) Wasserstrahl [10]

Bei der Erzeugung von Nuten als Referenzfehler für die Kalibrierung zerstörungsfreier Prüftechnik ist eine möglichst geringe Nutbreite und entsprechend ein möglichst geringer Strahldurchmesser anzustreben. Kommerziell verfügbar sind Wasserdüsen mit einem Bohrungsdurchmesser von 0,04 mm. Zur Gewährleistung einer hohen Strahlqualität sowie einer hinreichenden Düsenstandzeit und daraus resultierender Prozesssicherheit werden höchste Anforderungen an das Düsensteinmaterial gestellt. Die beschriebenen Feinstrahldüsen verfügen entsprechend über einen Düsenstein aus Diamant. Zur Nuterzeugung wird der Reinwasserstrahl bei einem Betriebsdruck der Hochdruckpumpe von 380 MPa mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 5 m/min wiederholt über das Werkstück verfahren. Dabei entsteht ein geringer Abtrag entlang der Wasserstrahltrajektorie. Die gewünschte Nuttiefe wird durch die Wiederholung des Verfahrenswegs erzeugt. Ein langsames Verfahren mit geringer Wiederholungsanzahl begünstigt die breite Auswaschung der Nutgeometrie und wurde daher nicht durchgeführt.

2.2 Methode

Bevor in die 1 m lange Stumpfnah definierte Nuten eingebracht werden konnten, erfolgte die Modellierung der Anzahl an notwendigen Überfahrten für eine gezielte Einstellung der Nuttiefe. Da der Wasserstrahl mit zunehmender Nuttiefe an kinetischer Energie verliert, sinkt mit zunehmender Nuttiefe ebenfalls der erzielbare Abtrag. Die Untersuchungen wurden an Stahlzuschnitten aus S355J2+N durchgeführt. Die jeweilige Nuttiefe wurde mittels Lichtmikroskop an der Querschnittsfläche ermittelt.

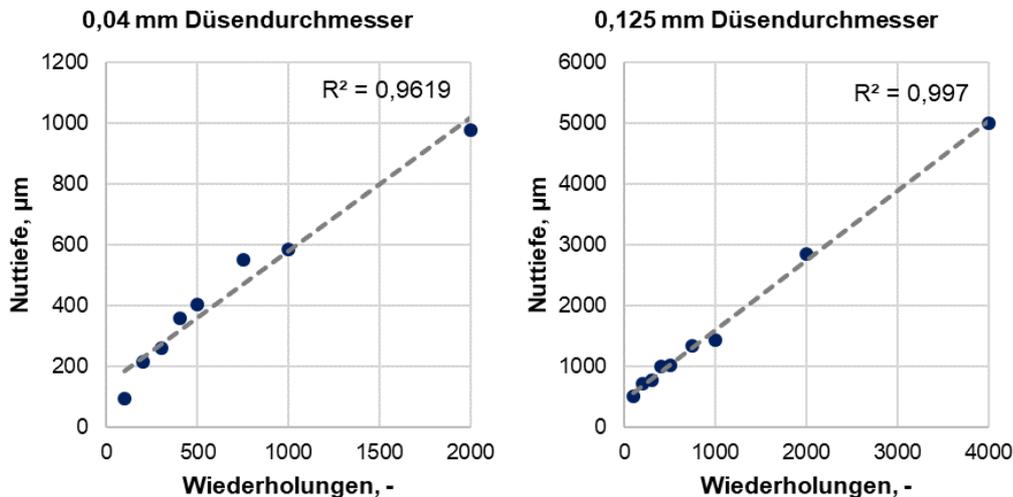


Abb. 4. Nuttiefe in Abhängigkeit der Wiederholungen

Anhand von Abbildung 4 ist zu erkennen, dass ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen der Anzahl der Wiederholungen und der Nuttiefe besteht. Die Grenze an für die Qualifizierung der Prüftechnik verwendbaren Nuten lag bei der Düse mit einem Durchmesser von 0,04 mm bei etwa 1 mm. Darüber hinaus können zwar mit der kleinen Düse größere Nuttiefen erzeugt werden, allerdings sinkt dort der erosive Abtrag und gleichzeitig steigt die Nutbreite deutlich. Im Anschluss muss daher zur Steigerung der Leistung und damit zur Erhöhung der Nuttiefe ein größerer Düsendurchmesser verwendet werden. Zu beachten ist, dass mit der Verwendung der größeren Düse auch deutlich größere Nutöffnungen und – breiten einhergehen. Die Nutöffnungen bei der kleinsten und größten Anzahl an Wiederholungen sind in Tabelle 1 jeweils dargestellt.

Tabelle 1. Vergleich der Nutöffnung in Abhängigkeit der Düse und der Anzahl an Wiederholungen

Düse	Wiederholungen	Nutöffnung	Wiederholungen	Nutöffnung
Ø 0,04 mm	100	0,13 mm	2000	0,22 mm
Ø 0,125 mm	100	0,33 mm	4000	0,55 mm

Bei Tabelle 1 muss berücksichtigt werden, dass die Nutöffnung die maximale Breite der Nut darstellt. Entsprechend Abbildung 2 wird die Nutbreite in größerer Tiefe deutlich kleiner. Die Nutöffnung beträgt hier nach 750 Wiederholungen mit der kleinen Düse 166 µm, in der mittleren Höhe der Nut beträgt die Breite noch 76 µm und kurz vor der Spitze 25 µm.

Auf Basis der Voruntersuchungen wurde für das Einbringen der Nuten in die Wärmeinflusszone der Stumpfnah von 0,05 bis 1 mm Nuttiefe eine Wasserdüse mit einem Durchmesser von 0,04 mm verwendet. Zur Erzeugung von Nuten mit größerer Tiefe wurde eine Düse mit einem Durchmesser von 0,125 mm verwendet. Hiermit konnten Tiefen bis 10 mm erzeugt werden. Die Nuten wurden mit einer Länge von 15 mm entlang der

Wärmeeinflusszone eingebracht. Zwischen den Nuten wurde ein Abstand von 10 mm eingestellt. Insgesamt lagen somit 30 unterschiedliche Nuten innerhalb der Wärmeeinflusszone der Stumpfnah als Referenzfehler für Ermüdungsrisse vor. In Abbildung 5 sind das erste Drittel der Schweißnahtlänge sowie die kleinsten Nuten von 0,05 bis 0,2 mm im Detail abgebildet.



Abb. 5. Stumpfnah mit rissähnlichen Nuten in der Wärmeeinflusszone und detaillierte Darstellung der Nuten mit Tiefen von 0,05 bis 0,2 mm

Für die Erzeugung der Nuten eignen sich grundsätzlich duktile Materialien. Für den Abbau der durch die Wasserstrahlbearbeitung entstehenden Spannungen an der Nutspitze sind entsprechende plastische Verformungen notwendig. Versuche zur Erzeugung von Nuten in Vollglaskörpern, welche sich aufgrund ihrer Schallgeschwindigkeit, die ähnlich zu der von Stahl ist, ebenfalls als Kalibrierkörper für die Ultraschallprüfung eignen, bestätigen diesen Zusammenhang. Durch das defektgetriebene, sporadische Versagen des spröden Werkstoffs, ist die Nuterzeugung hohen statistischen Schwankungen unterworfen. Eine reproduzierbare Nuterzeugung mittels Reinwasserstrahl war in Vollglas damit nicht möglich.

Als weiteres Demonstratorbauteil wurde die Einbringung von Nuten an einer Ritzelwelle erprobt (vgl. Abb. 6). Es wurden Nuten auf einem zylindrischen Umfang der Welle sowohl längs als auch orthogonal zur Rotationsachse, innerhalb einer Passfedernut sowie auf den Zahnflanken eingebracht. Insbesondere die Einbringung von Nuten in der schwer zugänglichen Zahnflanke demonstriert die Flexibilität der Wasserstrahlmethode. Hier konnten auf einer Zahnflanke drei Nuten in unterschiedlicher Höhe eingebracht werden. Die unterste Nut war dabei sehr nah am Zahnfuß positioniert. Diese Nuten sowie die Nut in der Passfederaussparung zeigen, dass die Erzeugung von Nuten auch bei einem größeren Abstand zwischen Düsenkopf und Bauteil möglich ist.

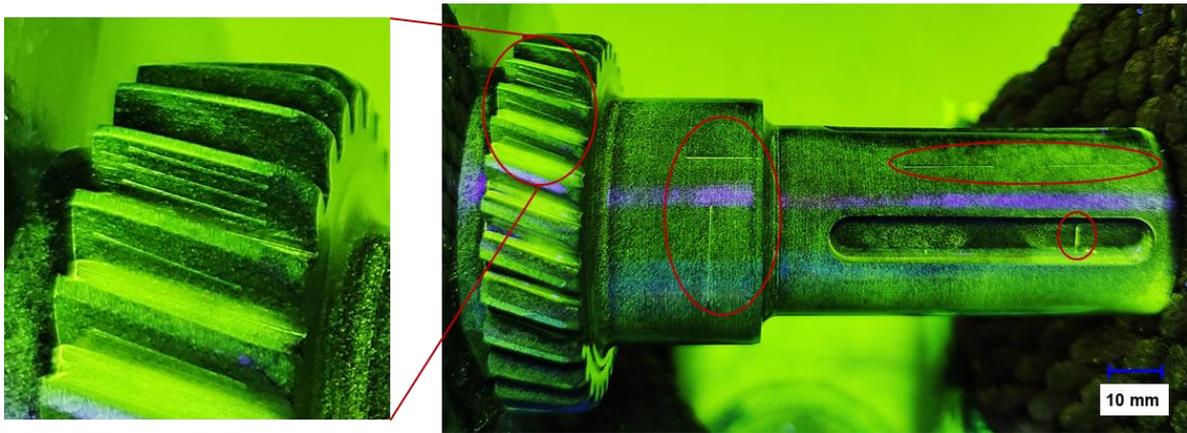


Abb. 6. Visualisierung unterschiedlicher Nuten mithilfe der Magnetpulverprüfung an einer Ritzelwelle

3. Wirbelstromprüfung an einer mit rissähnlichen Nuten versehenen Stumpfnabt

3.1 Wirbelstromprüftechnik

Bei der Wirbelstromprüfung, die auf dem Prinzip der elektromagnetischen Wechselwirkung zwischen der mit Wechselstrom angeregten Spule und dem elektrisch leitfähigem Prüfobjekt beruht, stehen grundsätzlich zwei Sensortypen zur Verfügung. Absolutsensoren werden häufig für die Materialcharakterisierung eingesetzt. Differenzsensoren, bei denen zwei gleichartige Messspulen zum Einsatz kommen, sind für die Fehlererkennung besonders geeignet. Durch die in Differenz geschalteten Messspulen (z. B. mittels Wheatstone-Brücke) kann das Rauschen im Signal reduziert werden, welches durch das Abheben des Sensors oder signifikante Schwankungen der Materialeigenschaften entstehen kann [11-13].

Die Signalauswertung bei der Fehlerprüfung mittels Differenzsensor kann durch Berücksichtigung der Spannungsänderung in der jeweiligen Spule erfolgen. Wird der Sensor über einen Defekt geführt, ändert sich die Spannung der Spulen aufgrund der lokalen Sekundärfeldänderung sukzessive. Daraus resultiert eine Spannungsdifferenz mit einer charakteristischen Phasendifferenz. Diese beiden zeitabhängigen Parameter können in Polarkoordinaten transformiert und anschließend in der Impedanzebene in Form eines Arbeitspunktes dargestellt werden, der Amplitude und Phase widerspiegelt [12-14].

Grundsätzlich verursacht bei der Prüfung ein größerer Riss eine größere Störung der Wirbelstromausbreitung und damit ein kleineres Sekundärfeld aufgrund der geringeren lokalen elektrischen Leitfähigkeit des Prüfobjekts. Wenn keine Störsignale vorhanden sind, kann die Amplitude des Differenzsignals zur Interpretation der Defektgröße und die Phasenverschiebung zur Abschätzung der Defekttiefe verwendet werden. Folglich können unter Ausschluss von Störeffekten diese beiden Parameter nach vorheriger Kalibrierung an einem Kalibrierblock mit geeigneten künstlichen Defekten verwendet werden, um auf die Rissgeometrie zu schließen. Darüber hinaus sind Kriterien wie das Signal-Rausch-Verhältnis und die Definition eines Schwellenwerts, ab dem das Signal als Defektsignal interpretiert wird, für die Defektprüfung wesentlich [11, 12, 15].

Auf Basis von Untersuchungen hinsichtlich des Detektionsvermögens von Ermüdungsrissen in Schweißnähten in Abhängigkeit der Spulenorientierung wurde die Entdeckungswahrscheinlichkeit für zwei unterschiedliche Differenzsensoren erarbeitet [16]:

- Sensor A: zwei rechteckige Luftspulen, die parallel zur Prüfoberfläche angeordnet sind. Der Abstand zwischen den Spulenmittelpunkten beträgt 1 mm.
- Sensor B: zwei D-förmige Ferritkernspulen, die senkrecht zur Prüfoberfläche angeordnet sind. Der Abstand zwischen den Spulenmittelpunkten beträgt 3 mm.

Bei der Wahl der Prüffrequenz ist darauf zu achten, einen möglichst großen Phasenunterschied zwischen Lift-Off-Signal und Defektsignal zu erzeugen. Im besten Fall beträgt dieser 90° , entsprechend der Norm DIN EN ISO 17643 werden Lift-Off-Signale in den Realteil gelegt. Signalausschläge in Richtung Imaginärteil können dadurch detailliert betrachtet und interpretiert werden. Zur Unterdrückung niederfrequenter Störsignale durch Permeabilitätsänderungen im Baustahl und Abstandsänderungen zwischen dem Prüfkopf und der Schweißnaht ist ein geeigneter Hochpassfilter zu wählen. Die Schweißnahtprüfung wurde mit einem Hochpassfilter von 3 Hz durchgeführt. Für die Bestimmung der Entdeckungswahrscheinlichkeit wurden die Messspuren mit Überfahrt über die Schweißnaht so gewählt, dass der jeweilige Sensor mittig halbautomatisch über die Nut bewegt wird. Hiermit sollte eine größtmögliche Signalantwort gewährleistet werden.

3.2 Prüfergebnisse

Der maximale Imaginärteil in Abhängigkeit der Nuttiefe bei der Verwendung von Sensor A ist in Abbildung 7 abgebildet. Eine Standardabweichung ist aufgrund des geringen Stichprobenumfangs in dieser Machbarkeitsstudie nicht ermittelbar.

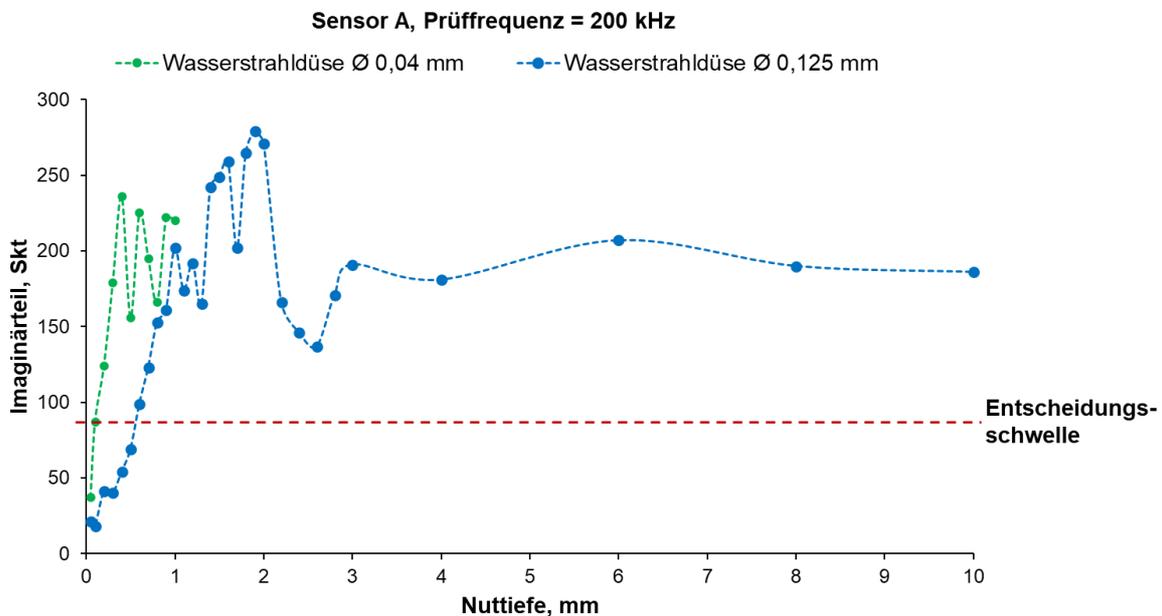


Abb. 7. Maximaler Imaginärteil des Prüfsignals in Abhängigkeit der Nuttiefe; Sensor A

Wie zu erkennen ist, unterscheiden sich die Signalantworten zwischen den Nuten der 0,04 mm und der 0,125 mm Düse beträchtlich. Dies liegt hauptsächlich an der deutlich spitzer ins Material zulaufenden Nutgeometrie bei der kleineren Düse. Die Entscheidungsschwelle entspricht dem insgesamt gesehen größten auf der Stumpfnahnt detektierten Störsignal. Bei den Nuten der größeren Düse können somit Nuttiefen ab 0,6 mm und bei den Nuten der kleineren Düse ab etwa 0,1 mm detektiert werden. Bei den breiteren Nuten ist eine Nuttiefendifferenzierung mit Sensor A bis 1 mm möglich und bei den kleineren Nuten bis lediglich 0,4 mm. Gleichbedeutend ist die Voraussetzung für eine valide PoD-Studie nicht erfüllt, da kein linearer Zusammenhang über die 30 Nuten bzw. bis zu einer Nuttiefe von 10 mm vorliegt.

Analog ist die entsprechende Zuordnung des maximalen Imaginärteils zur Nuttiefe von Sensor B in Abbildung 8 dargestellt. Wie zu erkennen unterscheiden sich die Signalantworten zwischen den Nuten der 0,04 mm und der 0,125 mm Düse bei Sensor B im Vergleich deutlicher.

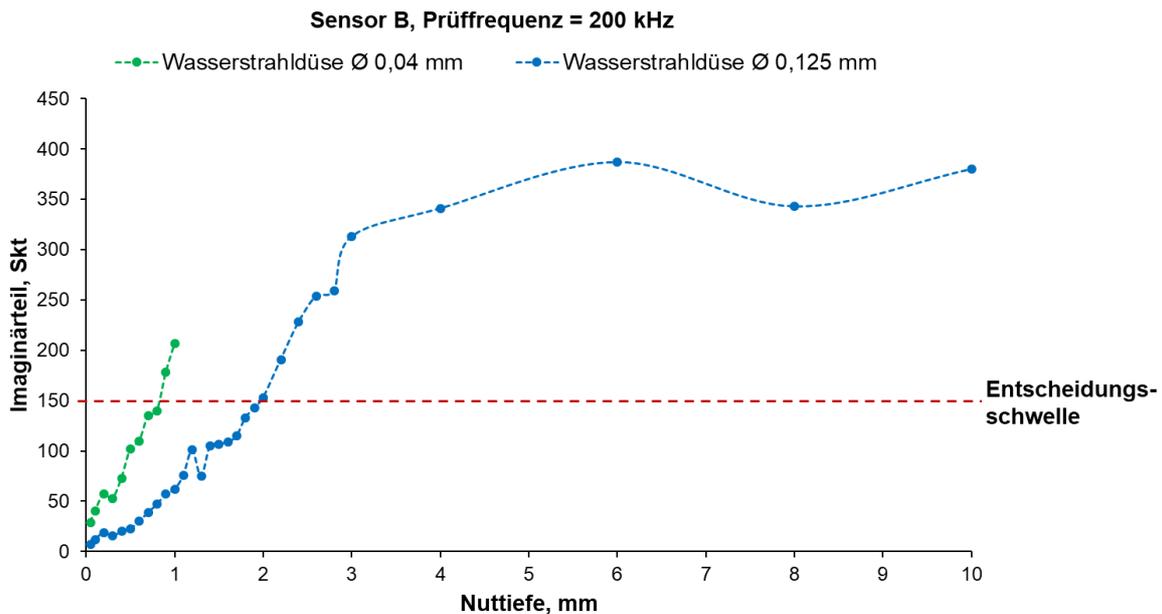


Abb. 8. Maximaler Imaginärteil des Prüfsignals in Abhängigkeit der Nuttiefe; Sensor B

Die Entscheidungsschwelle entspricht dem insgesamt gesehen größten auf der Stumpfnahnt detektierten Störsignal, wobei bei Sensor B eine vergleichsweise hohe Schwelle aufgrund der starken Sensitivität gegenüber Abstandseffekten resultiert. Bei den Nuten der größeren Düse können somit Nuttiefen ab 2 mm und bei den Nuten der kleineren Düse ab etwa 0,8 mm detektiert werden. Bei den breiteren Nuten ist eine Nuttiefendifferenzierung mit Sensor B bis 4 mm möglich und bei den kleineren Nuten bis 1 mm, wobei jedoch keine größeren Nuttiefen hierbei realisierbar waren.

Die Untersuchungen zur Erzeugung einer rissähnlichen Geometrie und der Verwendung dieser für eine Qualifizierung der Wirbelstromprüftechnik wurden im Rahmen einer Machbarkeitsstudie anhand einer Stumpfnahnt durchgeführt. Hinsichtlich der Durchführung einer validen PoD-Studie konnte abgeleitet werden, dass sich die Verteilung der Nuttiefe innerhalb der Wirktiefe des Sensors befinden muss. Für eine statistisch abgesicherte Aussage zur Entdeckungswahrscheinlichkeit von Sensor B müssten daher auf Grundlage der Machbarkeitsstudie mit der 0,04 mm Düse z. B. 40 Nuten mit Nuttiefen zwischen 0,05 und 1 mm erzeugt und geprüft werden. Des Weiteren ist zu beachten, dass mit steigender Nuttiefe die Nutöffnung ebenfalls ansteigt. Somit variieren gleichzeitig zwei charakteristische Defektparameter, siehe z. B. Tabelle 1. Je kleiner der erwartete Bereich an Risstiefen eingegrenzt werden kann, umso geringer fallen die Unterschiede in der Breite aus und umso größer wird die Aussagekraft bezüglich der Entdeckungswahrscheinlichkeit.

Zusammenfassend muss das Sensordesign auf die Prüfaufgabe angepasst werden, da hier die hohe Entdeckungswahrscheinlichkeit von Sensor A dem Potenzial von Sensor B zur Nuttiefenbestimmung gegenübersteht. Bei kombinierter Nutzung der beiden Sensoren z. B. als Array kann Sensor A zur Rissdetektion und Sensor B anschließend zur Risscharakterisierung verwendet werden.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Mithilfe von erosiv wirkenden Hochdruck-Wasserstrahlen konnte eine neuartige Methode zur reproduzierbaren Erzeugung von künstlichen Rissen vorgestellt werden. Im Vergleich mit Nuten, die gesägt oder erodiert wurden, entsteht durch den erosiven Abtrag eine rissähnlichere Geometrie, bei der auf eine größere Nutöffnung eine sehr kleine Nutbreite

folgt. Das Ende der Nut weist dabei eine vergleichsweise scharfe Spitze auf. Mit Verwendung einer Wasserstrahldüse, die einen Durchmesser von 0,04 mm besitzt, können Nuttiefen zwischen 0 und 1 mm reproduzierbar erzeugt werden. Wie in Abbildung 2 verdeutlicht, kann so z. B. eine 0,55 mm tiefe Nut realisiert werden, die in der Öffnung eine Breite von 166 µm, in der mittleren Höhe der Nut eine Breite von 76 µm und kurz vor der Spitze eine Breite von 25 µm aufweist. Überdies konnte an den zwei Anwendungsfällen dickwandige Schweißnaht und Ritzelwelle die Einbringung von Nuten an komplizierten Geometrien demonstriert werden. Auch bei einer erschwerten Zugänglichkeit zur Bauteiloberfläche können Nuten erzeugt werden.

Die vorgestellte Methode bietet durch die Erzeugung von rissähnlichen Nuten die Möglichkeit ein zerstörungsfreies Prüfsystem in Bezug auf die gewünschte Prüfaufgabe zu qualifizieren. Hinsichtlich der Bestimmung der PoD der verwendeten Wirbelstromprüftechnik ist zu beachten, dass der Bereich der Nuttiefen innerhalb der Wirtiefe des Wirbelstromsensors liegen muss. Mit der Wasserstrahltechnologie können lokal und reproduzierbar Nuten in variabler Tiefe erzeugt werden.

Danksagung

Das IGF-Projekt (20869N) der Forschungsvereinigung Schiffbau und Meerestechnik e.V. (FSM) wurde im Rahmen der Forschungsinitiative "Erfolgreiche Energiewende durch zukunftsweisende fügetechnische Innovationen für die Windenergie" über die AiF auf der Grundlage eines Beschlusses des Deutschen Bundestages zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) gefördert. Der Abschlussbericht kann bei der FSM, Steinhöft 11, 20459 Hamburg, angefordert werden.

Referenzen

- [1] Gevatter, H. J., Grünhaupt, U., 2006, "Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2. Auflage, 1-853, ISBN 978-3-540-21207-2.
- [2] Rummel, W. D., 2000, "Requirements for demonstrating nondestructive evaluation capabilities", AIP Conference Proceedings, 509, 2175-2181, <https://doi.org/10.1063/1.1291339>.
- [3] Matzkanin, G. A., Yolken, H.T., 2001, "A Technology Assessment of Probability of Detection (POD) for Nondestructive Evaluation (NDE)", Nondestructive Testing Information Analysis Center (NTIAC), ISBN 1-890596-20-5.
- [4] US Department of Defense, 2009, "MIL-HDBK-1823A-Nondestructive evaluation system reliability assessment", Handbook, 1-171.
- [5] Virkkunen, I., Koskinen, T., Papula, S., Sarikka, T., Hänninen, H., 2019, "Comparison of Hit/Miss POD-Estimation Methods: A European Viewpoint", Journal of Nondestructive Evaluation, 38, 89, 1-13, <https://doi.org/10.1007/s10921-019-0628-z>.
- [6] Pavlović, M., Takahashi, K., Müller, C., 2012, "Probability of detection as a function of multiple influencing parameters, Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring", 54, 11, 606-611, <https://doi.org/10.1784/insi.2012.54.11.606>.
- [7] Kanzler, D., 2016, „Zuverlässigkeitsanalyse von digitalen Radiographie-Systemen bei der Prüfung von realen Materialdefekten“, Dissertation, ISBN 978-3-9818270-1-9.
- [8] Kolb, M., 2006, "Wasserstrahlschneiden", Verl. Moderne Industrie Landsberg/Lech, ISBN 978-3-937-88947-4.
- [9] Fritz, A. H., Schulze, G., 2012, "Fertigungstechnik", Springer Vieweg Berlin Heidelberg, 10. Auflage, ISBN 978-3-642-29786-1.
- [10] Mlinaric, M., Jemaa, H., Hassel, T., Maier, H. J., 2022, "An Experimental and Numerical Study of Damage Due to Particle Impact on Sapphire Orifices Used in High-Pressure Water Jet Cutting", machines, 10 (9), <https://doi.org/10.3390/machines10090756>.
- [11] Bowler, N., 2019, "Eddy-Current Nondestructive Evaluation", Springer Series in Measurement Science and Technology, <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9629-2>.

- [12] Blitz, J., Willstätter, V. J., Oaten, S. R., Hajianc, N. T., 1987, "Eddy-current surface-crack sizing in steel with high lift-off", *NDT International* Volume 20, 2, 105-110, [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(87\)90333-6](https://doi.org/10.1016/0308-9126(87)90333-6).
- [13] García-Martín, J., Gómez-Gil, J., Vázquez-Sánchez, E., 2011, "Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing, Sensors", 11, 3, 2525-2565, <https://doi.org/10.3390/s110302525>.
- [14] Hansen, J., 2004, "Back to Basics: The eddy current inspection method", Part 1-4, *Insight*, 46, 5-8, 1-12, <https://doi.org/10.1784/insi.46.6.364.56389>.
- [15] Rao, B. P. C., 2011, "Eddy current testing: Basics", *Journal of Non Destructive Testing & Evaluation*, 10, 1-16.
- [16] Gansel, R., Maier, H. J., Barton, S., 2022, "Detection and Characterization of Fatigue Cracks in Butt Welds of Offshore Structures Using the Eddy Current Method", *ASME J Nondestructive Evaluation*, 2023 6(2), 1-8, <https://doi.org/10.1115/1.4056313>.