

Bewertung der Ungenauigkeiten bei der Fehlergrößenbestimmung mit Ultraschall an Rissfeldern in großen Schmiedeteilen

Anne JÜNGERT¹, Jacobs OLIVER¹

¹ MPA Universität Stuttgart, Stuttgart

Kontakt E-Mail: anne.juengert@mpa.uni-stuttgart.de

Kurzfassung. Bei der Herstellung großer Schmiedekomponenten können sich bei unsachgemäßer Verarbeitung oder ungünstiger chemischer Zusammensetzung der Schmelze Risse, z. B. in Form von wasserstoffinduzierten Rissbildungen (sog. Wasserstoffflockenrisse), bilden. Derartige Rissbildungen wurden 2012 in den belgischen Kernkraftwerke Doel 3 und Tihange 2 bei einer Ultraschallprüfung in der drucktragenden Wand der Reaktordruckbehälter (RDB) entdeckt. Dabei handelte es sich um zahlreiche, quasi-laminar über den gesamten Umfang angeordnete, rissartige Anzeigen, die dann mit Ultraschallverfahren vermessen und kartiert wurden.

Zur genaueren Untersuchung und zur Bewertung derartiger Rissfelder werden die Risslagen und -ausdehnungen mithilfe von Ultraschallprüfungen bestimmt. Wird zur Bestimmung der Ausdehnungen der 6dB-Amplitudenabfall verwendet, führt das zu einer Überschätzung der Rissausdehnung, sofern die Rissausdehnung kleiner ist als die Schallbündelbreite des verwendeten Ultraschallprüfkopfs ist. Die Schallbündelbreite ist bekanntermaßen abhängig vom Schwingerdurchmesser, von der Prüfkopffrequenz und von der Entfernung. Bei dickwandigen Schmiedeteilen und Fehlstellen in größerer Tiefe ist die Schallbündelbreite nicht mehr zu vernachlässigen.

An einem Testkörper mit einem Wasserstoffflockenrissfeld wurden vergleichende Untersuchungen mit einem Senkrechtprüfkopf und mit Matrix-Array-Prüfköpfen durchgeführt, die eine gezielte Fokussierung des Schallbündels ermöglichen. Außerdem wurde beispielhaft TFM eingesetzt und Simulationen der jeweiligen Schallfelder mit CIVA berechnet. Ziel der Untersuchungen war es, herauszufinden, ob der Einsatz von Array-Prüfköpfen mit Fokussierung in die Fehlerebene einen entscheidenden Vorteil bei der Bewertung der Fehlerausdehnung liefert und die Berechnung POD-Kurven ermöglicht.

Einführung

In Reaktordruckbehältern belgischer Kernkraftwerke wurde im Zuge von wiederkehrenden Prüfungen 2012 eine große Anzahl von Ultraschallanzeigen detektiert [1,2]. Weitere Untersuchungen führten zur Hypothese, dass es sich bei den Anzeigen um Wasserstoffflocken handelt [3,4]. Die Reaktordruckbehälter werden aus geschmiedeten Ringen zusammengefügt. Bei der Herstellung von zwei dieser Ringe, wurde atomarer Wasserstoff in der Schmelze belassen, der nach der Abkühlung zur Ausbildung charakteristischer Fehlstellen, den Wasserstoffflocken, führte. Die Lage und Orientierung der Anzeigen in den RDB-Ringen stimmt gut mit der theoretischen Lage von Wasserstoff in der Ursprungsschmelze überein.



Die Anzeigen wurden weitergehend untersucht und die Ultraschalluntersuchungen wurden 2015, 2017 und 2019/20 wiederholt, um eventuelle Veränderungen zu dokumentieren. Die Ultraschallanzeigen zeigen seit den ersten Untersuchungen 2012 keine nennenswerten Veränderungen [5].

Die MPA Universität Stuttgart untersucht vor dem Hintergrund der Rissfeldproblematik neue Bewertungsverfahren für Komponenten mit Mehrfachrissen. Hierfür kommen neben künstlich erzeugten Rissen auch Reststücke einer Bramme zum Einsatz, die in den 1980er Jahren im Rahmen des Forschungsvorhabens Komponentensicherheit (FKS) hergestellt wurde [6]. Hierfür wurde eine Schmelze erzeugt, die in der chemischen Zusammensetzung typischen Reaktordruckbehälterstählen ähnelt, aber dahingehend modifiziert wurde, dass die Bildung von Wasserstofflocken begünstigt wird. Mithilfe einer entsprechend ungünstigen Wärmebehandlung wurden Wasserstofflocken im Material provoziert und das Material für weitere Untersuchungen im FKS-Programm verwendet. Vorhandene Reststücke wurden zunächst zerstörungsfrei untersucht. Hierbei kamen aufgrund der Dimensionen der Testkörper zunächst Ultraschalluntersuchungen und Magnetpulverprüfungen zum Einsatz. Im späteren Verlauf wurden Teile weiter zerlegt und erlaubten zusätzliche Untersuchungen an den Schnittkanten und mithilfe von Durchstrahlungsprüfungen. Teile der Ergebnisse wurden bereits bei der DGZfP Jahrestagung 2018 vorgestellt [7].

Inzwischen wurde die Zuverlässigkeit der Ultraschallprüfungen weiter untersucht. Die Anzeigengrößen in den untersuchten Testblöcken wurden über den 6 dB Amplitudenabfall bestimmt. Die Methode ist geeignet die Größe von Anzeigen zu bestimmen, die größer sind als das Schallbündel. Sind die Anzeigen kleiner als das Schallbündel, werden sie systematisch überschätzt. Für die Bewertung der Integrität der Komponente spielt das eine untergeordnete Rolle, da lediglich eine Unterschätzung der Anzeigen problematisch wäre. Im Hinblick auf die Beobachtung eines möglichen Risswachstums mithilfe wiederkehrender Prüfungen, ist es dennoch ein Punkt, der im Folgenden genauer untersucht wird.

1. Untersuchungen an Testkörpern mit Rissfeldern

1.1 Verwendete Testkörper

Die vorgestellten Untersuchungen fanden an zwei verschiedenen Testkörpern, die aus derselben Bramme der Schmelze mit der Bezeichnung KS07C entnommen sind. Im Folgenden werden sie zur Unterscheidung mit TK1 und TK2 bezeichnet. Die Abmessungen der Testkörper sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Testkörperabmessungen

Testkörper	TK1	TK2
Länge [mm]	375	360
Breite [mm]	233	258
Höhe [mm]	773	790

Der TK1 wurde nach den Untersuchungen zerlegt, so dass die Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen anhand anderer Verfahren verifiziert werden konnten. Drei hier betrachtete Scheiben aus dem TK1 sind mit ABA, ABB, ABC bezeichnet (Abbildung 1). TK2 steht aktuell für Untersuchungen zur Verfügung. Beide Testkörper enthalten je ein Rissfeld, das in Höhenrichtung etwa in der Mitte der Testkörper liegt. Die genauere Lage der Rissfelder wird aus den Ultraschalluntersuchungen deutlich.

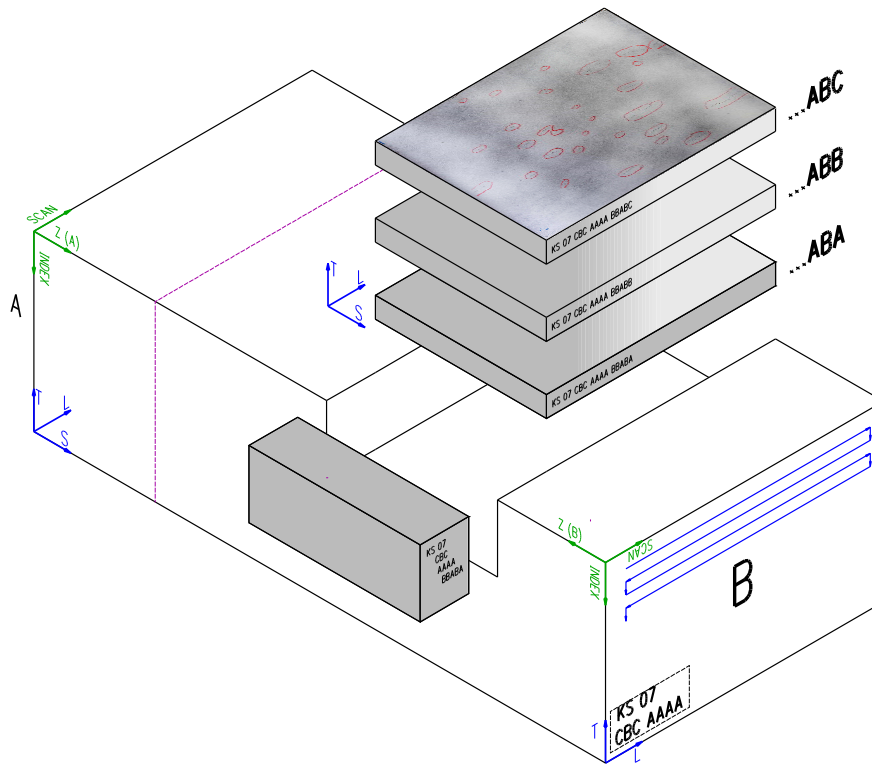


Abbildung 1: TK1 mit Darstellung der herausgesägten Platten

1.2 Ultraschalluntersuchungen

An den Testkörpern wurden Ultraschalluntersuchungen mit Senkrechteinschallung von den Flächen A und B durchgeführt. Die Fläche B des TK1 ist in Abbildung 1 als Stirnfläche zu sehen, Fläche A bezeichnet die gegenüberliegende Fläche. Im Laufe der Untersuchungen kamen verschiedene Ultraschallprüfköpfe zum Einsatz, die in Tabelle 2 aufgelistet sind. Die Schallschwächungseigenschaften von TK1 ließen eine Prüfung mit höheren Prüfkopffrequenzen zu, als am TK2 möglich war.

Tabelle 2: Verwendete Prüfköpfe für die Ultraschallprüfung am TK1 und TK2

Bezeichnung	Frequenz [MHz]	Einsatz am TK1	Einsatz am TK2	
B2SN	2	-	+	Einzelschwinger
B4SN	4	+	-	Einzelschwinger
DMA	2,25	-	+	Matrix Array
3L64	3,5	-	+	Linear Array
5L64	5	+	-	Linear Array

In Abbildung 2 sind die Ergebnisse der Ultraschallprüfung, jeweils mit einem Einzelschwinger Senkrechprüfkopf am TK1 und TK2 zu sehen. Auf der Oberseite ist die

Draufsicht und zu sehen, auf den Seitenflächen jeweils die B-Scan Projektionen auf die jeweilige Fläche. So kann man gut die Lage der Rissfelder in den Testkörpern erkennen. Im TK1 beschränkt sich die Lage des Testfelds auf die Mitte der vordere Hälfte des Testkörpers. Im TK2 liegt das Testfeld in der vorderen Ecke des Testkörpers. Es ist anzumerken, dass in dieser Darstellung nur die Ergebnisse der Prüfungen von der jeweiligen Oberseite dargestellt sind. Die Ausdehnung der Rissfelder in Z-Richtung ist größer als in Abbildung 2 dargestellt. Risse, die tiefer im Rissfeld liegen, werden durch Abschattungseffekte und durch den langen Laufweg der Ultraschallwellen nicht mehr abgebildet. Die Prüfung von der Gegenseite liefert zusätzliche Rissanzeigen und es kommt zu einer Überlappung der Anzeigen in der Mitte des Testfelds.

Die Rissfelder beginnen jeweils bei einer Tiefe von mehr als 120 mm. Die Schalllaufwege sind vergleichsweise lang und die Schallbündelaufweitung entsprechend groß.

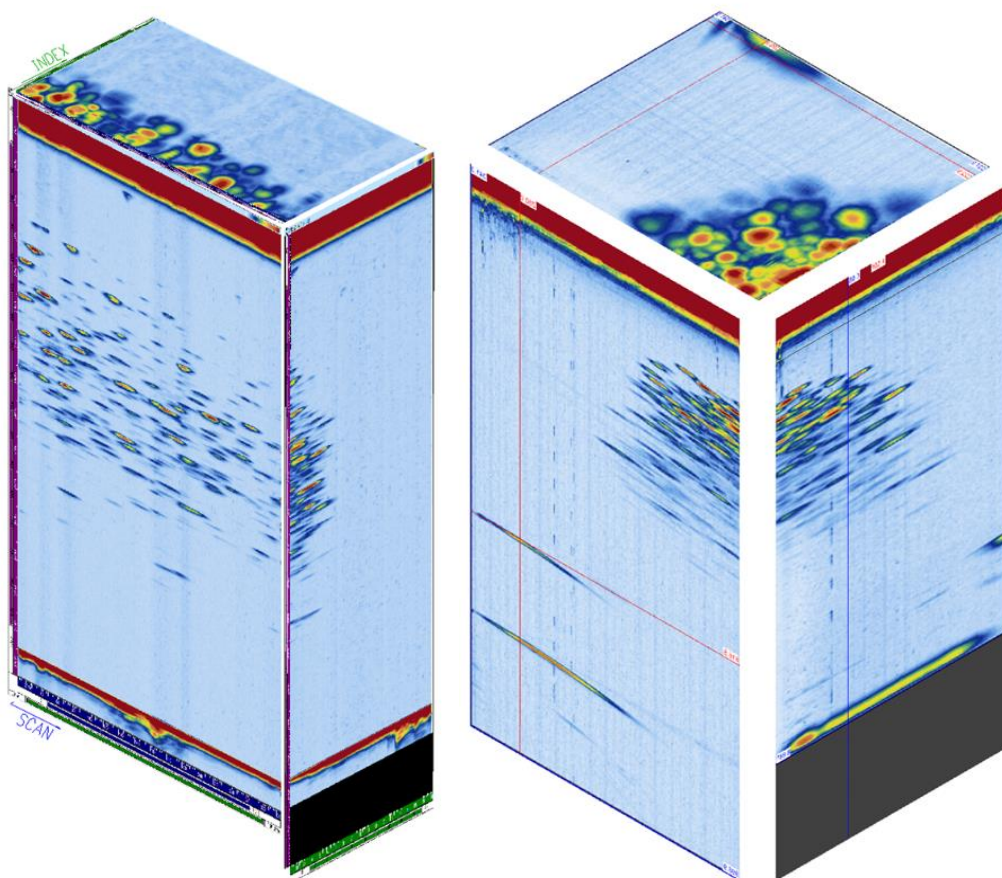


Abbildung 2: Ultraschallprüfung an TK1 (links) und TK2 (rechts) von der Oberseite

1.3 Verifikation der Anzeigen an TK1

TK1 wurde entsprechend der Schnittdarstellung in Abbildung 1 zerlegt. Dadurch wurde es möglich, die herausgeschnittenen Platten weiterführend zu untersuchen. An den entstandenen Schnittflächen konnten MT-Prüfungen durchgeführt werden. Außerdem erlaubte die Wanddicke von 28 mm eine Durchstrahlungsprüfung. Die Anzeigen, die mit RT und MT gefunden wurden, sind in Abbildung 3 für die oberste Platte mit der Bezeichnung ABC gemeinsam dargestellt. Die blauen Anzeigen sind MT-Anzeigen, die an der ursprünglichen Testkörperoberseite gefunden wurden, die rosafarbenen Anzeigen sind die MT Anzeigen von der Rückseite der Schnittplatte. Die RT-Anzeigen sind in grün dargestellt. Die MT und RT-Anzeigen decken sich in manchen Fällen (z.B. Anzeigen Nr. 7, Nr. 45). Es

gibt aber auch RT Anzeigen ohne MT Anzeigen (z.B. Nr. 68, Nr. 22), wenn die Risse keine der beiden Oberflächen erreichen. MT-Anzeigen ohne RT-Anzeigen (z.B. Nr. 19, Nr. 15) sind dadurch zu begründen, dass Rissanzeigen bei RT Prüfungen nur gefunden werden, wenn die Risse ideal zum Strahlengang liegen. Die Wanddicke von 28 mm ist für die Untersuchung mit Röntgenstrahlen außerdem vergleichsweise groß, so dass die Aufnahmebedingungen nicht optimal sind. Demensprechend weichen auch die Anzeigenlängen voneinander ab. Bei Anzeigen, die mit beiden Verfahren detektiert wurden, wurde die jeweils längere Anzeige als Referenzanzeigenlänge festgelegt.

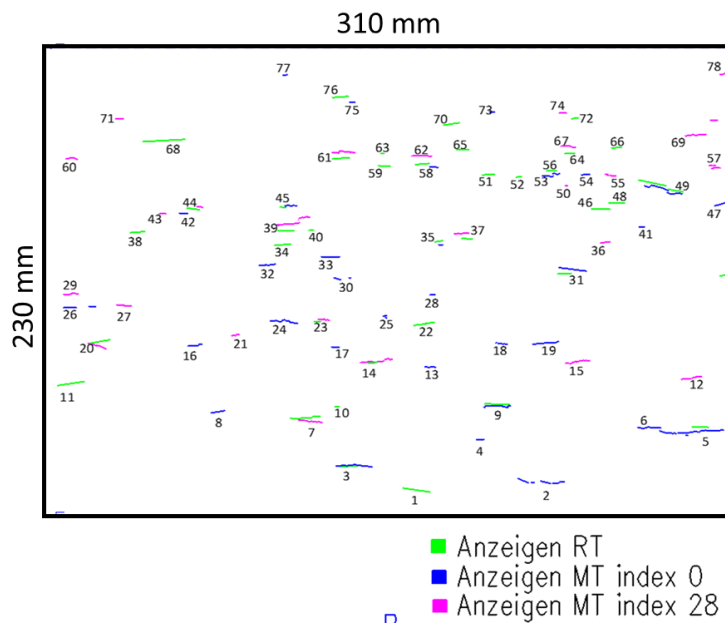


Abbildung 3: Darstellung der mit MT (blau, pink) und RT (grün) detektierten Anzeigen an der Platte ABC Testkörpers TK1

2. Bestimmung der Anzeigenlängen

Die Anzeigenausdehnungen der Anzeigen, die bei den Ultraschalluntersuchungen detektiert wurden, wurden über den 6 dB Amplitudenabfall bestimmt. Die Ränder der Anzeige werden dort festgelegt, wo die maximale Amplitude um 6 dB abgenommen hat. Die Methode ist ein Standardverfahren, jedoch weicht die Anzeigengröße mitunter von der realen Fehlergröße stark ab. Für Fehlerstellen, deren Ausdehnung größer sind als die Breite des Schallbündels, das der Ultraschallprüfkopf aussendet, ist die Größenbestimmung der Anzeigen vergleichsweise gut. Ist die Schallbündelbreite größer als die Fehlergröße, wird mit der 6 dB Methode statt der Fehlerstelle das Schallbündel ausgemessen. Das führt zu einer systematischen Überschätzung dieser Anzeigen. Je weiter die Entfernung der Fehlerstelle vom Fokuspunkt des Prüfkopfs entfernt liegt, umso weiter ist das Schallbündel aufgeweitet.

Die Größe der Ultraschallanzeigen am TK1 wurde über den 6 dB Abfall bestimmt. Die mittlere Anzeigenlänge beträgt 17 mm. Wie bereits erläutert, konnten die Anzeigen über Referenzuntersuchungen verifiziert werden und Ultraschallanzeigen wurden den MT und RT Anzeigen zugeordnet. Die mittlere Länge der Anzeigen, die mit RT und MT ausgemessen wurden, beträgt lediglich 7 mm. Die Ultraschallanzeigen werden erwartungsgemäß deutlich überschätzt. Die untersuchten Testkörper sind mit mehr als 700 mm einfachem Laufweg und Fehlerlagen zwischen 150 mm und 600 mm sehr groß. Die Schallfeldaufweitung ist in dieser Tiefe bereits sehr groß, deshalb ist die Bestimmung der Anzeigenausdehnungen über den 6 dB Abfall stark fehlerbehaftet.

2.1 Schallfeldsimulationen

Anhand von Simulationen mit CIVA wurden Unterschiede in den Schallbündelbreite für unterschiedliche Fokussierungen mit Array-Prüfköpfen untersucht. In Abbildung 4 sind die Simulationen für ein 2 MHz Lineararray mit 64 Elementen dargestellt. Es wurden verschiedene Fokustiefen von 10 mm bis 400 mm simuliert. An den Bildern wird deutlich, dass ab einer Fokustiefe von 100 mm nur noch sehr geringe Änderungen des Schallfelds zu erkennen sind.

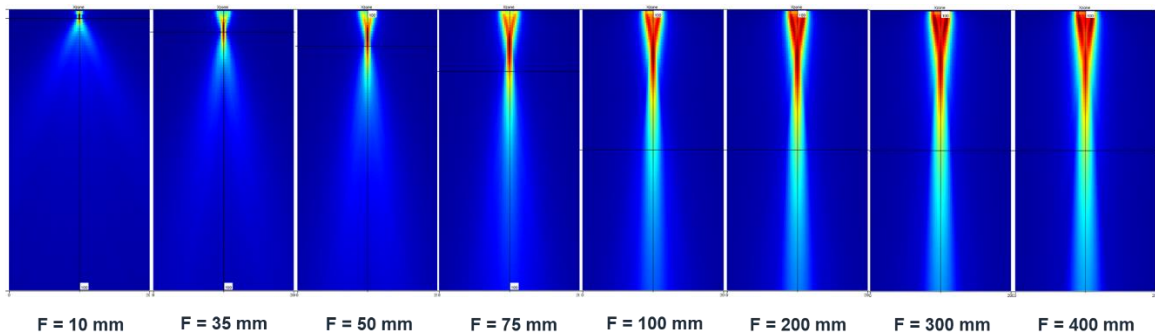


Abbildung 4: Schallfeldsimulationen für ein 2 MHz Lineararray mit 64 Elementen mit unterschiedlichen Fokustiefen

Als nächstes wurde ein Sende-Empfänger-Prüfkopf mit je einem Sender-Empfängerarray betrachtet. Im linken Bild in Abbildung 4 ist das Schallfeld für den Dual Matrix Arrayprüfkopf für einen Fokus von 25 mm zu sehen. Im mittleren Bild ist das Schallfeld für eine Fokussierung in 126 mm zu sehen. Das simulierte Schallfeld unterscheidet sich nur wenig für beide Einstellungen. Deshalb wurde versucht, den Fokuspunkt nach unten zu verschieben, indem die Prüfköpfe weiter voneinander entfernt wurden. Im rechten Bild in Abbildung 5 ist eine Simulation gezeigt, bei der die beiden Prüfkopfarrays mit einem Abstand von 25 mm aufgesetzt wurden. Hier ist eine Verschiebung des Schallbündelfokus in größere Tiefe zu erkennen.

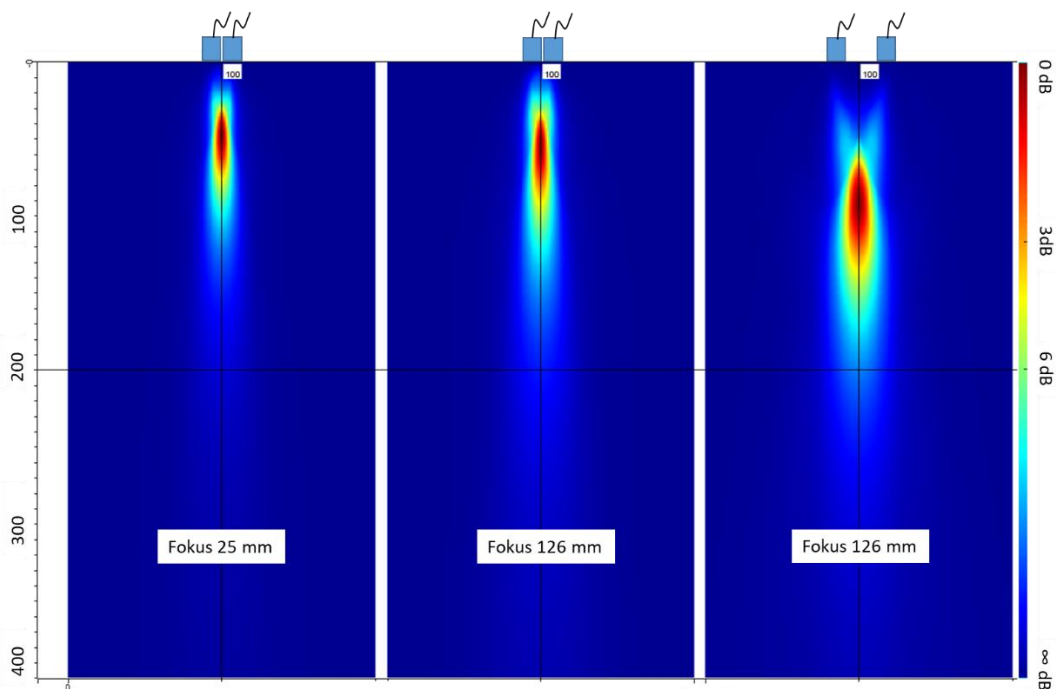


Abbildung 5: Schallfeldsimulationen mit 2,25 MHz Dual Matrix Array Prüfkopf

2.2 Bestimmung von Anzeigenlängen mit angepasster Fokussierung

Wie sich die Schallfeldfokussierung auf die Fehlergrößenbestimmung auswirkt, wurde ebenfalls in Simulationen untersucht. Hierfür wurden Fehlstellen mit einer Länge von 5 mm, 10 mm und 20 mm und jeweils einer Breite von 10 mm in drei unterschiedlichen Tiefenlagen eingebracht. Die Tiefenlagen wurden auf 50 mm, 126 mm und 175 mm festgelegt (siehe Abbildung 6). Die Ultraschallprüfungen wurden mit drei verschiedenen Prüfköpfen simuliert, einem 2 MHz Senkrechtprüfkopf, einem 2,25 MHz Matrix Array ohne Abstand der Prüfköpfe und einem 2,25 MHz Matrix Array mit 25 mm Abstand zwischen den beiden Prüfköpfen, mit einem theoretischen Fokus in 126 mm Tiefe. Die Fehlerstellengrößen wurden anschließend über den 6dB-Abfall bestimmt.

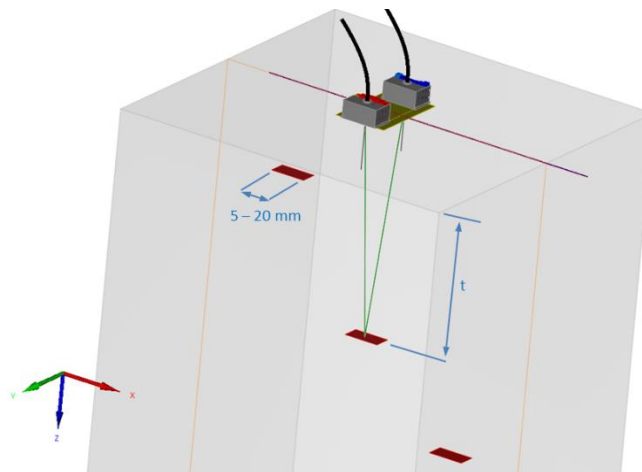


Abbildung 6: Simulationsmodell für verschiedene Testfehlerlagen und -größen

Die Ergebnisse der Fehlerlängenbestimmung sind in **Tabelle 3** zusammengefasst. Mit dem Senkrechtprüfkopf werden die kleinsten Fehlstellen (5 mm) in allen Tiefenlagen um mindestens 100 % überschätzt. Die größten Fehlstellen (20 mm) hingegen werden in allen drei Tiefenlagen und nahezu exakt bestimmt. Der Einsatz der Matrix Array Prüfköpfe mit einem Fokus von 126 mm Tiefe, verbessert die Größenbestimmung des 5 mm und des 10 mm Testfehlers in allen Tiefenlagen. Für die Tiefe 50 mm und 126 mm macht es hierbei keinen Unterschied, ob die Matrix-Prüfköpfe mit einem Abstand oder direkt nebeneinander verwendet werden. Die Anordnung mit 25 mm Abstand verbessert die Fehlergrößenbestimmung in der größten Tiefe von 175 mm gegenüber der Anordnung ohne Abstand. Auch mit den Matrix-Array-Prüfköpfen wurden die Fehlergrößen von 20 mm exakt bestimmt.

Tabelle 3: Ergebnisse der Längenbestimmung der simulierten Testfehler in unterschiedlicher Tiefenlage

	l [mm]	t = 50 mm			t = 126 mm			t = 175 mm		
		l [mm] gemessen	Diff. [mm]	Diff. [%]	l [mm] gemessen	Diff. [mm]	Diff. [%]	l [mm] gemessen	Diff. [mm]	Diff. [%]
B2 SN	5	10	5	100	17	12	240	22	17	340
	10	14	4	40	16	6	60	22	12	120
	20	20	0	0	19	-1	5	20	0	0
DMA ohne Offset	5	8	3	60	14	9	180	20	15	300
	10	12	2	20	14	4	40	17	7	70
	20	20	0	0	20	0	0	20	0	0
DMA 25mm Offset	5	8	3	60	14	9	180	18	13	260
	10	12	2	20	14	4	40	16	6	60
	20	20	0	0	20	0	0	20	0	0

2.3 Anwendung am Testkörper

Die Simulationen gehen von exakt rechteckigen Reflektoren parallel zur Oberfläche aus. In den verwendeten Testkörpern liegen die Fehlstellen teilweise mit einer leichten Neigung zur Oberfläche und die Rissoberflächen sind nicht eben. Die Ergebnisse lassen sich also nicht direkt auf die Anwendung am Testkörper übertragen. Dennoch wurden erste Versuche mit der vorgeschlagenen Prüfkopfpanordnung am TK2 durchgeführt. Durch die Breite der Prüfkopfpanordnung mit 25 mm Abstand, konnte nur ein Teil des Testkörpers bei der Prüfung erfasst werden.

In Abbildung 7 sind die Ergebnisse der Prüfung als B-Scan Projektion und Draufsicht dargestellt. Zum Vergleich wurden daneben die Ergebnisse mit einem 2 MHz Senkrechtprüfkopf dargestellt.

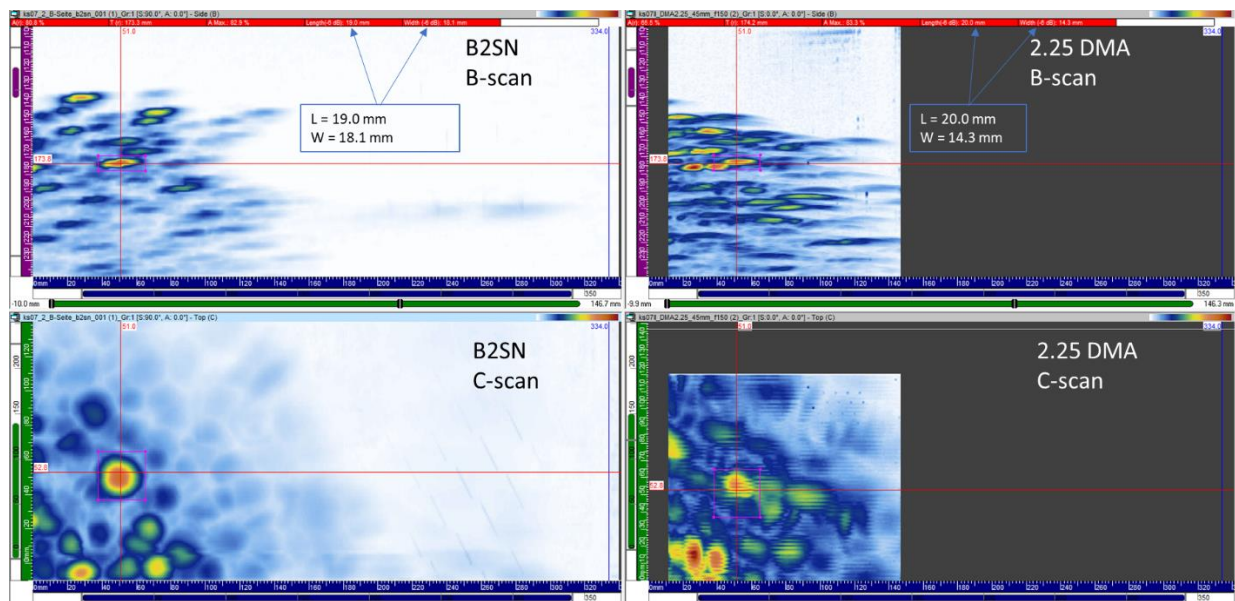


Abbildung 7: Vergleich der Ultraschallprüfung mit 2 MHz Senkrechtprüfkopf (links) und 2,25 MHz Dual Matrix Array mit 25 mm Abstand (rechts)

Zunächst fällt auf, dass mit der Matrix-Array-Anordnung mehr Anzeigen mit höherer Amplitude (rot und gelb) detektiert wurden als mit dem 2 MHz Senkrechtprüfkopf. Dies kann darauf zurück zu führen sein, dass mit der Matrix-Array-Anordnung die Fokussierung des Schallfelds im Prüfbereich verbessert wird. Es ist aber nicht auszuschließen, dass es sich bei den zusätzlichen Anzeigen um komplexere Reflexionsmuster handelt, die aufgrund der Einschallung im Winkel in des Rissfeld nicht mehr ohne weiteres nachvollzogen werden können.

Eine Anzeige, die in beiden Prüfungen identifiziert werden konnte ($x = 51$ mm, $y = 53$ mm, $z = 173$ mm), wurde mit dem 6 dB Amplitudenabfall ausgemessen. Für den 2 MHz Senkrechtprüfkopf ergab sich eine Ausdehnung von 19 mm x 18 mm. Mit der Dual Matrix Anordnung wurde die Ausdehnung auf 20 mm x 14 mm ermittelt. Es kann anhand dieser Messungen nicht ermittelt werden, was die tatsächliche Fehlerausdehnung ist und ob die geringere Fehlstellenbreite bei der Matrix-Array-Anordnung auf die verbesserte Schallfeldfokussierung zurück zu führen ist. Um hier genauere Aussagen zu erhalten, muss der Schritt zurück zu einfacheren Testobjekten mit bekannten Fehlstellen gemacht werden. Der Testkörper mit dem Rissfeld bietet zu viele Unbekannte, um eine Interpretation zu ermöglichen.

2.4 Untersuchungen mit TFM/FMC

Die Verwendung von TFM/FMC ermöglicht ebenfalls eine besser fokussierte Darstellung von Ultraschallanzeigen. Bei „Full Matrix Capture“ (FMC) werden die einzelnen Elemente eines Array-Prüfkopfs nacheinander zur Erzeugung einer Ultraschallwelle als Punktquelle verwendet; alle anderen Elemente dienen als Empfänger. Es entsteht so eine Matrix, die alle Sender-Empfänger-Konstellationen enthält und aus der über die Verwendung von Rekonstruktionsalgorithmen, z.B. der Total Focusing Method (TFM) ein Bild erzeugt wird. Der entscheidende Vorteil ist, dass Fehlstellen im ganzen Prüfvolumen mit ähnlich guter Fokussierung dargestellt werden, wohingegen bei Standard-Ultraschallverfahren der Bereich, der im Fokuspunkt des Prüfkopfs liegt, am besten dargestellt wird. Ein Nachteil des TFM Verfahrens ist allerdings, dass die Schallenergie, die ein einzelnes Element des Prüfkopfs aussendet, begrenzt ist. Bedingt durch die Schallschwächung im Materials ist die Eindringtiefe des Verfahrens entsprechend limitiert. Dies ist für die hier betrachteten Testkörper relevant und macht das Verfahren nur bedingt einsetzbar.

Dennoch wurden ein Bereich zwischen 120 und 240 mm Tiefe am TK2 mit dem Verfahren untersucht. In Abbildung 8 links sind die Ergebnisse eines Linienscans mit einem 3,5 MHz Lineararray zu sehen. Der gleiche Prüfkopf wurde verwendet um ein TFM-Bild zu erzeugen, das in Abbildung 8 rechts zu sehen ist. Es ist zu sehen, dass die Anzeigen, die im Linienscan sehr lange gezogen erscheinen, im TFM Bild kürzer sind und mit höherer Amplitude dargestellt werden. Der TFM-Algorithmus ist also in der Lage eine bessere Fokussierung zu erreichen. Untersuchungen am ganzen Testkörper, sowie die Auswirkungen auf die Bestimmungen der Anzeigenlängen stehen noch aus.

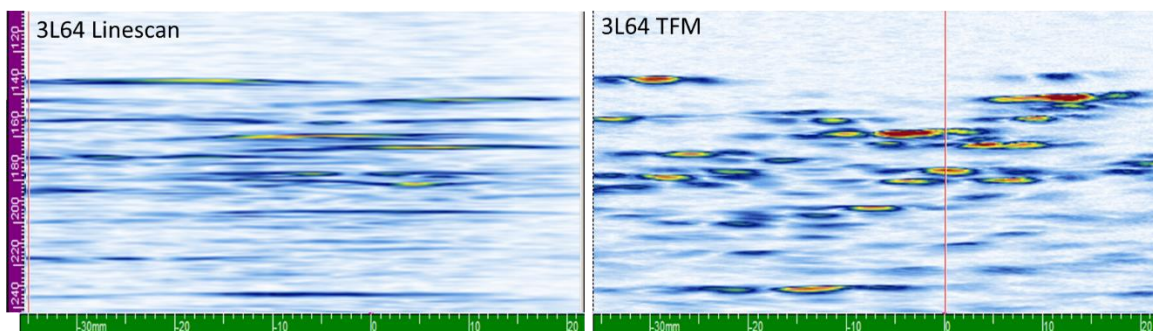


Abbildung 8: TFM/FMC im Vergleich zu UT-Linienscan am TK2

3. Zusammenfassung

Im Beitrag wurden verschiedene Untersuchungen vorgestellt, die sich auf Untersuchungen an zwei Testkörpern mit Wasserstofflockenrissen bezogen. An beiden Testkörpern wurden Ultraschalluntersuchungen durchgeführt, um die Rissfelder zu kartieren. Am TK1 wurden außerdem Anzeigenlängen über den 6 dB Amplitudenabfall bestimmt. Der TK1 wurde für weiterführende Untersuchungen zerlegt. An den Schnittkörpern konnten MT Untersuchungen und RT Untersuchungen durchgeführt und zur Verifikation der UT Anzeigen verwendet werden. Hierbei fiel auf, dass die mit Ultraschall ausgemessenen Anzeigenlängen von durchschnittlich 17 mm, die mit den Referenzverfahren ausgemessenen Fehlstellenlängen von durchschnittlich 7 mm deutlich überschätzen. Der Grund hierfür ist die Schallbündelaufweitung bei der Ultraschallprüfung, die sich bei großen Laufwegen auf die Bestimmung der Anzeigenlängen auswirkt.

Im Folgenden wurden verschiedene Versuche unternommen, die Schallfeldfokussierung zu verbessern. Zunächst wurde versucht die Schallfeldfokussierung über den Einsatz von Phased Array Prüfköpfen zu verbessern. Die Simulationen zeigten aber,

dass eine Fokussierung in mehr als 100 mm Tiefe sich mit einzelnen Lineararrays nicht mehr erreichen lässt. Alternativ wurde eine Sende-Empfangs-Anordnung mit Matrix Array Prüfköpfen vorgeschlagen, bei der Sender und Empfänger mit Abstand platziert werden. Dadurch konnte in den Simulationen eine Verschiebung des Fokuspunkts in größere Tiefen erreicht werden. Die Bestimmung der Anzeigenlängen simulierter Testfehler konnte für kleine Anzeigen in großer Tiefe (170mm) über diese Prüfkopfanzordnung ebenfalls verbessert werden.

Die erste praktische Umsetzung zeigte, dass die Anzeigenmuster aus dem Testkörper mit Rissfeld zu komplex sind, um eine Verbesserung zu quantifizieren. Hier sind weitere Untersuchungen an weniger komplexen Testkörpern mit bekannten Fehlstellenausdehnung notwendig.

Im letzten Schritt wurden Untersuchungen mit TFM/FMC durchgeführt, da diese ebenfalls eine verbesserte Fokussierung von Anzeigen versprechen. Das Verfahren stößt allerdings aufgrund der Testkörperausdehnungen hier an seine Grenzen. Dennoch konnte gezeigt werden, dass im TFM Bild gegenüber einem Linienscan die Anzeigenfokussierung verbessert werden kann. Weitere Untersuchungen dazu stehen jedoch ebenfalls noch aus.

Referenzen

- [1] Doel 3 Reactor Pressure Vessel Assessment, Safety Case Report, Electrabel GDF Suez, 5.12.2012
- [2] Tihange 2 Reactor Pressure Vessel Assessment, Safety Case Report, Electrabel GDF Suez, 5.12.2012
- [3] Doel 3 Reactor Pressure Vessel Assessment, Safety Case Report, Electrabel GDF Suez, 28.10.2015
- [4] Tihange 2 Reactor Pressure Vessel Assessment, Safety Case Report, Electrabel GDF Suez, 28.10.2015
- [5] AFCN: Indications de défauts dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et Tihange 2. Available online: <https://afcn.fgov.be/fr/dossiers/centrales-nucleaires-en-belgique/actualite/indications-de-defauts-dans-les-cuves-des>, last checked 16/03/2021 (Französisch)
- [6] Unterlagen zur Reaktorsicherheitsforschung (u.a. Forschungsvorhaben Komponentensicherheit - FKS der Materialprüfungsanstalt) 1977-1997. Online verfügbar: https://www.archiv.ub.uni-stuttgart.de/Online-Findbuecher/Bestand_200_20150504/index.htm, online seit 2015, zuletzt überprüft 15/01/2021
- [7] Jüngert, A.; Swacek, C.; Gauder, P.; Schuler, X. (2018): Ultraschalluntersuchungen an Rissfeldern in großen Schmiedekomponenten. In: DGZfP (Hg.): Jahrestagung 2018. Leipzig, 7.-9. Mai.