Methode zur Qualifizierung eines manuell geführten indirekten visuellen Prüfsystems

Philip KICHERER [1], Mark HAGENBRUCH [1], Michael SCHERRER [1]
[1] SVTI - Swiss Association for Technical Inspections
Nuklearinspektorat, Wallisellen, Schweiz

Kurzfassung. Die visuelle Prüfung ist ein einfaches, aber effektives Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung. Eine ausreichend hohe Leistungsfähigkeit, besonders von indirekten visuellen Prüfsystemen, ist Voraussetzung für die richtige Beurteilung von Komponenten. Es ist notwendig, die massgeblichen Prüfparameter zu quantifizieren, einzuschränken und zu kontrollieren. Während die tatsächliche Leistungsfähigkeit von indirekten visuellen Prüfungen oftmals unbekannt ist, bietet ein qualifiziertes Prüfsystem eine gesicherte Aussage zum Zustand der Komponente.

Für ein indirektes visuelles Prüfsystem für Kernkraftwerke wurde erstmalig eine Qualifizierung nach schweizerischem kerntechnischem Regelwerk durch die Qualifizierungsstelle ZfP Schweiz mit Unterstützung des Electric Power Research Institute (USA) durchgeführt. Eines der Ziele dieser Prüfung ist die frühzeitige Feststellung von Spannungsrisskorrosion. Das manuell an Seilen und Stangen geführte Kamerasystem mit zunächst nicht quantifizierbaren Prüfparametern stellte dabei eine Herausforderung dar. Es müssen Vorgehensweisen zur Kameraführung angewendet werden, durch die Prüfparameter nachvollzogen werden können.

Dieser Beitrag beschreibt neben den prüftechnischen Voraussetzungen die realitätsnahe und quantifizierbare Umsetzung dieser Qualifizierung an Testkörpern mit repräsentativen Fehlern und, obwohl es sich um ein manuell geführtes Kamerasystem handelt, durch die praktische Demonstration mithilfe eines 5-Achs-Manipulators. Die Reduzierung der Qualifizierung auf die wesentlichen Herausforderungen der Prüftechnik ermöglicht dabei die Anwendbarkeit an vielen Bauteilen und Geometrien.

Lizenz: http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/

1 Qualifizierung von ZfP für schweizerische Kernkraftwerke

Die vorgeschriebenen wiederkehrenden Prüfungen in schweizerischen Kernkraftwerken werden, je nach Komponente, im 1-jährigen bis hin zum 10-jährigen Intervall durchgeführt. Prüfsysteme, die für diese Prüfaufgaben verwendet werden, müssen vor ihrem ersten Einsatz durch eine Qualifizierung den Nachweis erbringen, dass sie für die Prüfaufgabe geeignet sind.

Die Anforderungen an eine solche Qualifizierung sind im kerntechnischen Regelwerk ENSI-B07 festgelegt. Die Durchführung der Qualifizierungen erfolgt durch die Qualifizierungsstelle ZfP Schweiz (QSt), einem Teil des SVTI Nuklearinspektorates. Das Nuklearinspektorat besitzt eine Akkreditierung nach EN ISO 17020, Inspektionsstelle Typ A.

Die Qualifizierung eines Prüfsystems besteht im Wesentlichen aus praktischen Demonstrationen. Dazu werden Testkörper und Modelle verwendet, die die realen Prüfbedingungen nachbilden. Die Testkörper enthalten Testfehler, deren Art sich nach dem anzunehmenden Fehlermechanismus für die Komponente richtet. Die Grösse der Testfehler richtet sich nach der zulässigen Fehlergrösse.

In praktischen Demonstrationen muss die Leistungsfähigkeit des Prüfsystems an den Testkörpern unter Beweis gestellt werden. Praktische Demonstrationen werden sowohl für die ZfP-Prüftechnik, die Manipulatoren als auch für das Personal durchgeführt.

Ein Prüfsystem ist nur dann qualifizierbar, wenn die Prüfparameter bekannt und kontrollierbar sind. Durch die Einhaltung vorgegebener Prüfparameter kann dann die nötige Fehlernachweisfähigkeit im realen Prüfeinsatz sichergestellt werden.

2 Indirekte visuelle Prüfung von Einbauten des Reaktordruckbehälters

Visuelle Prüfungen müssen in Kernkraftwerken oftmals mit Hilfe von Kameras erfolgen. Die Zugänglichkeit für eine direkte Prüfung ist aufgrund von Umgebungsbedingungen, Strahlung und Komponentengeometrie für diese Fälle nicht gegeben.

Die Kameras werden idealerweise durch Manipulatoren geführt, die eine Kontrolle der Prüfbedingungen zulassen. Die Führung der Kameras durch U-Boote, Stangen, Kabeln oder Seilen lässt hingegen diese notwendige Kontrolle der Prüfbedingungen nicht ohne weiteres zu.

Die indirekte visuelle Prüfung der Einbauten des Reaktordruckbehälters (RDB) von Siedewasserreaktoren wird mit Kameras an Stangen, Kabeln und Seilen durchgeführt. Die nötige Beweglichkeit zum Erreichen schwer zugänglicher Bereiche macht dies nötig. Der geringe Abstand zwischen Kernmantel und RDB-Wand in über 10m Wassertiefe mit einigen Störkanten ist ein Beispiel dafür.

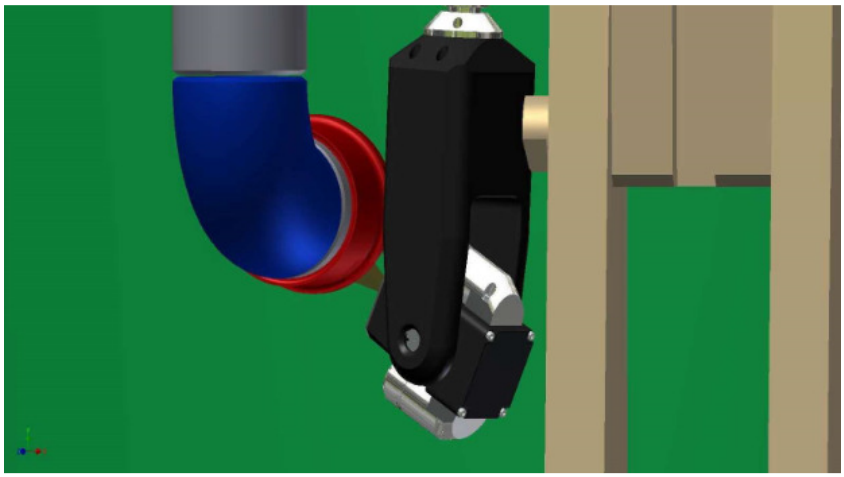

Abbildung 1: Ahlberg MegaRadS bei erschwerter Zugänglichkeit (Quelle: GE-H)

Für die Prüfungen wird die Farbkamera Ahlberg MegaradS mit Schwenk- und Neigefunktion verwendet. Die Beleuchtung ist direkt am Kameragehäuse angebracht. Eine Beleuchtung zur genauen Interpretation von Auffälligkeiten muss durch zusätzliche externe Lichtquellen erfolgen.

Im Bereich höherer Strahlung wird die S/W-Röhrenkamera Diakont D40 verwendet. Ohne Schwenk- und Neigefunktion, lediglich am Kabel und einem zusätzlichen Seil geführt, ist die Führung dieser Kamera jedoch schwieriger.

3 Funktionstest

Für jedes qualifizierte Prüfsystem muss durch einen Test die Funktionsfähigkeit vor, während und nach der Prüfung kontrolliert werden. Im Falle der indirekten visuellen Prüfung sollte dies möglichst unter Prüfbedingungen geschehen.

Die Kalibrierung findet unter Wasser möglichst nahe der zu prüfenden Komponente statt. Damit sind eine Trübung des Wassers und die aktuellen Einflüsse der Strahlung berücksichtigt. Im strahlenden Umfeld werden optische Linsen mit der Zeit bräunlich verfärbt und Bildsensoren beschädigt. Die Daten selbst zeigen im strahlenden Umfeld ein vermehrtes Rauschen.

Die Kalibrierung erfolgt an einer stufenlosen Referenz. Ausserdem werden Farbdarstellung und Graustufen überprüft. Zusätzlich werden feine horizontale und vertikale Nuten auf ihre Erkennbarkeit hin beurteilt. Die Nuten besitzen, in Anlehnung an die Qualifizierungsfehlergrösse, eine Breite von 30 µm.

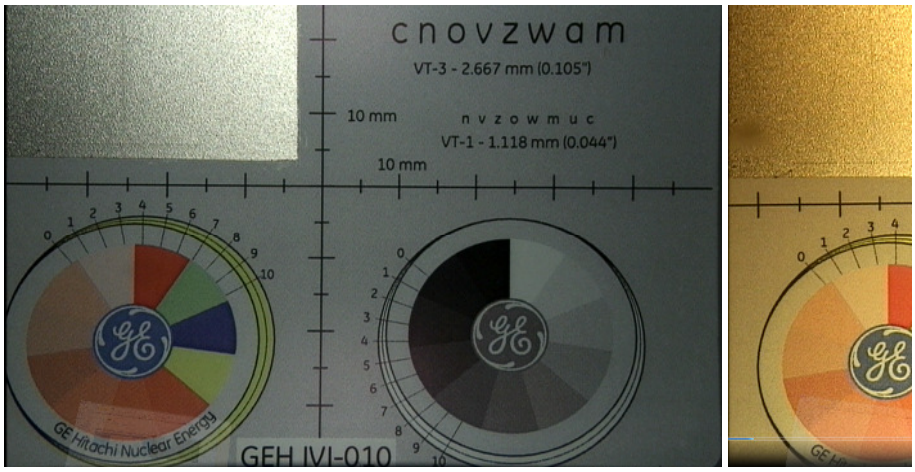

Abbildung 2: Sensitivity, Resolution and Contrast Standard, bräunliche Färbung (Quelle: GE-H)

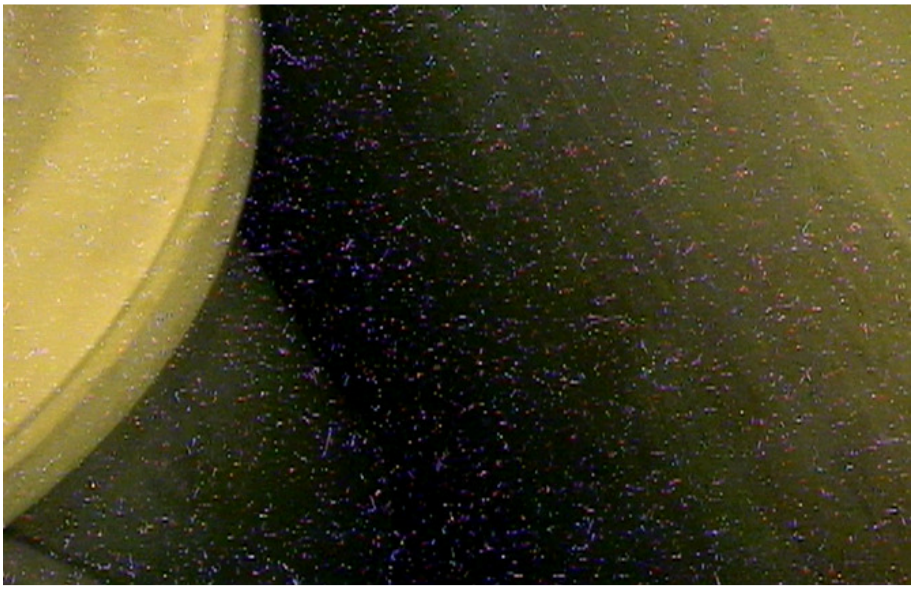

Abbildung 3: Rauschen durch Strahlung (Quelle: GE-H)

4 Testkörper

4.1 Material

Für die Qualifizierung wurden verschiedene Testkörpermaterialien verwendet. Die Auswahl erfolgte durch den Vergleich von Videoaufnahmen realer RDB-Einbauten und Videoaufnahmen von Testkörpern. Der Vergleich mit dem direkten visuellen Erscheinungsbild der Testplatten erwies sich nicht als zielführend, da die Beleuchtung, das umgebende Medium Wasser, das Empfindlichkeitsspektrum der Kamera und weitere Bedingungen die Wiedergabe der Oberfläche verfälschen. Die Oberfläche der RDB-Einbauten erscheint in der Videoaufnahme im Allgemeinen rötlich braun und matt. Es wurden Keramikplatten ausgewählt, die eine entsprechende matte Färbung in den Videoaufnahmen ausweisen.

Herausfordernd für die indirekte visuelle Prüfung ist ausserdem die Prüfung reflektierender Oberflächen. Es wurden deshalb zusätzlich rostfreie Stahlplatten als Testkörper verwendet.

4.2 Geometrie

Die Testkörper wurden als ebene Platten mit einer Kantenlänge von 250x250mm hergestellt. Auf den Platten wurden Schweissnähte mit verschiedenen Breiten simuliert. Weitere Oberflächenauffälligkeiten wie Kratzer, Schleifspuren und Einbrandkerben sind ebenfalls abgebildet. Insbesondere Fehler, die einer solchen Oberflächenstruktur folgen, sind schwer zu detektieren. Fehler, die solche Oberflächenstrukturen durchkreuzen, sind hingegen gut erkennbar.

4.3 Testfehler

Als relevanter Schadensmechanismus wurde Spannungsrisskorrosion postuliert. Es sollen Fehler mit einer Länge von 25mm und einer Klaffung von 30µm sicher nachgewiesen werden können. In die Testplatten wurden sowohl Testfehler eingebracht, die dieser Fehlergrösse entsprechen, als auch grösser und kleiner sind.

Die für die Qualifizierung verwendeten Testfehler sind mit Laser erzeugte Nuten. Um eine Verfärbung des angrenzenden Grundmaterials zu vermeiden, wurde das Pico-Laser-Verfahren eingesetzt. Der Wärmeeintrag dabei durch sehr kurze Pulse minimiert. Die Nuten wurden in ihrer Form dem Abbild realer Risse nachempfunden. Die Breite der verwendeten Nuten orientiert sich an den Untersuchungen des Berichts SKI Report 2006:24, „Crack Characterisation for In-service Inspection Planning – An Update“ (Jan Wåle, Schweden). Es wurden Nuten mit einem Breiten- zu Tiefenverhältnis von ca. 1/10 verwendet. Der Kontrast zwischen Grundmaterial und Nut wird dadurch einem realen Riss angenähert.

Die Orientierung der Testfehler richtet sich nach den Hauptspannungsrichtungen. Sie liegen grösstenteils in der Wärmeeinflusszone der simulierten Schweissnaht.

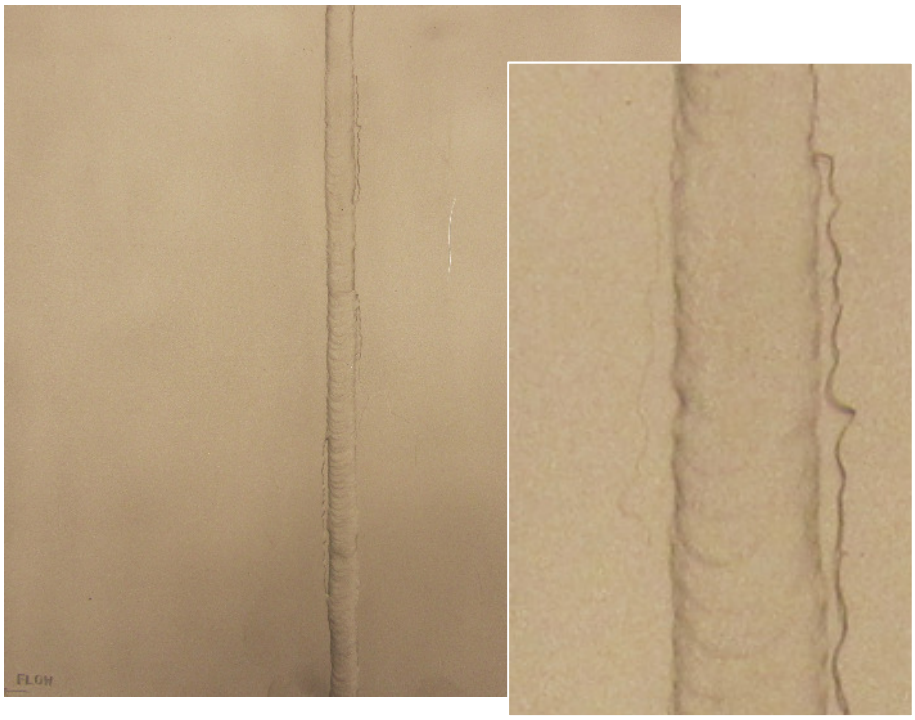

Abbildung 4: Testplatte aus Keramik

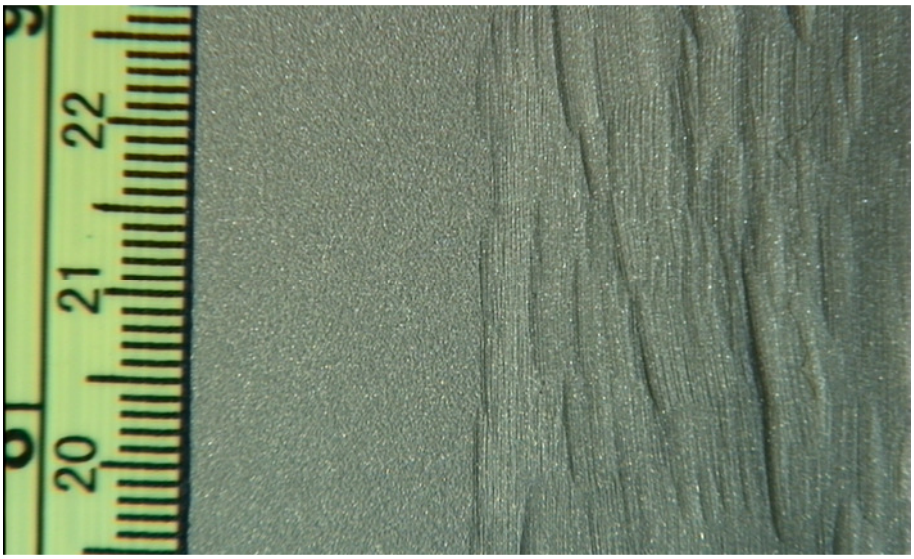

Abbildung 5: Testplatte aus rostfreiem Stahl mit Schleifriefen und Testfehler

5 Prüfparameter – Abstand, Winkel und Beleuchtung

Um die Nachweisbarkeit von Fehlern sicherzustellen, ist die Kenntnis über die Parameter nötig. Die Untersuchungen fanden an einem Testkörper mit verschiedenen Testfehlergrössen statt.

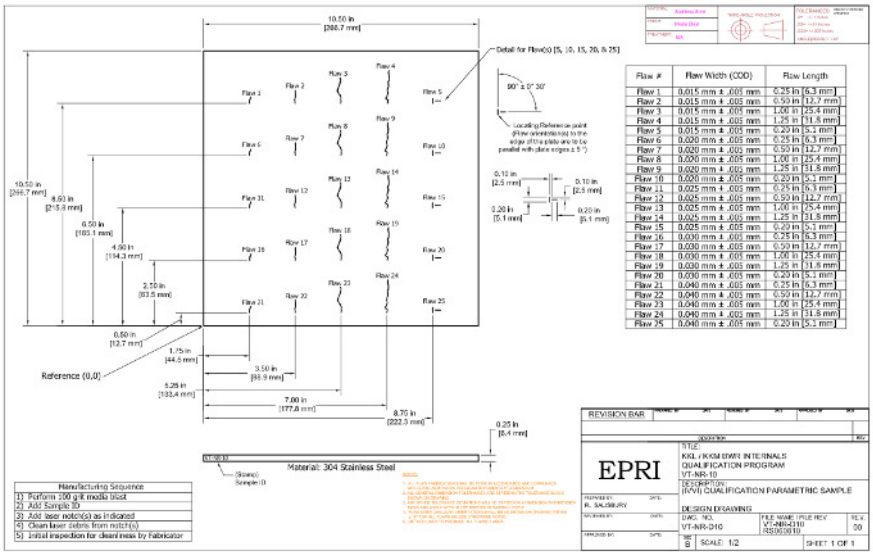

Abbildung 6: Testkörper für Parameterstudie (Quelle: EPRI)

Für die Kamera Ahlberg MegaRadS hat sich herausgestellt, dass zur Feststellung eines Testfehlers mit 30µm Klaffung ein Blickwinkel von 0°±20° bei einem Objektabstand von <150mm erforderlich ist. Bei der S/W-Röhrenkamera Diakont D40 ist bei dieser Testfehlergrösse ein Objektabstand von <200mm zur Detektion erforderlich. Beleuchtung und Blende werden so abgestimmt, dass die bestmögliche Wiedergabe der Oberflächenstruktur erreicht wird.

Eine weitere Optimierung ist spezifisch für die jeweilige Auffälligkeit. Flache Blickwinkel und Schattenwurf werden ausgenutzt, sobald unter den oben genannten Prüfbedingungen eine Auffälligkeit festgestellt wird.

Zur Kontrolle und Quantifizierung dieser Prüfparameter bei den an Stangen, Kabeln und Seilen frei geführten Kameras ist ein bestimmtes Vorgehen erforderlich. Der Objektabstand kann über das Sichtfeld festgestellt werden. Dazu ist eine Referenz mit bekannten Abmessungen im Bild notwendig. Eine nicht verschliffene Schweissnaht eignet sich hervorragend. Alternativ dazu wird die Zoom-Funktion der Kamera verwendet, um variierende Objektabstände zu kompensieren. Die Vergrösserung wird dabei derart eingestellt, dass eine vorgegebene Sichtfeldgrösse eingehalten wird. Auch dazu ist eine Referenz mit bekannten Abmessungen notwendig.

Der Blickwinkel muss anhand von perspektivischem Verhalten eingestellt werden. Durch Schwenken und Neigen der Kamera kann der Prüfer die Orientierung der Kamera abschätzen und innerhalb einer Toleranz von ±20° einstellen.

Erschwerend kommt allerdings hinzu, dass der Prüfer die Kamera nicht selbst führt, sondern eine weitere Person auf seine Anweisungen hin. Aufgrund des Arbeitsaufwandes sind die Datenaufnahme und Kameramanipulation getrennt.

6 Praktische Demonstration

Mit der Vorgabe der notwendigen Prüfparameter, einem Vorgehen für deren Kontrolle, einem kalibrierten Prüfsystem und geeigneten Testkörpern waren die Voraussetzungen für eine Qualifizierung des Prüfsystems erfüllt. Die Demonstration erfolgte im „Blindtest“, d.h. anhand von Testkörpern mit dem Prüfer unbekannten Testfehlern.

Es musste festgestellt werden, ob der Prüfer zum einen die Prüfparameter korrekt einstellt, was als Grundvoraussetzung zur sicheren Fehlerdetektion gilt. Zum anderen wurde vom Prüfer das Auffinden als auch die richtige Interpretation der Testfehler abverlangt.

Um die Prüfparameter zur Bewertung im Rahmen der praktischen Demonstration kontrollieren zu können, wurden die Kameras an einem 5-Achs-Manipulator in einem Wasserbecken bewegt. Die tatsächlichen Manipulatorkoordinaten standen weder dem Prüfer noch dem Kamerabediener zur Verfügung, sondern dienten ausschliesslich der Auswertung der Demonstration durch die QSt. Wie im realen Prüfeinsatz musste der Prüfer durch mündliche Anweisungen die Kamera durch eine zweite Person bewegen lassen. Daten wurden so mit den vom Prüfer selbst eingestellten Prüfparametern aufgenommen. Je besser der Prüfer die Kamera ausrichtete, desto einfacher war die Detektion von Testfehlern.

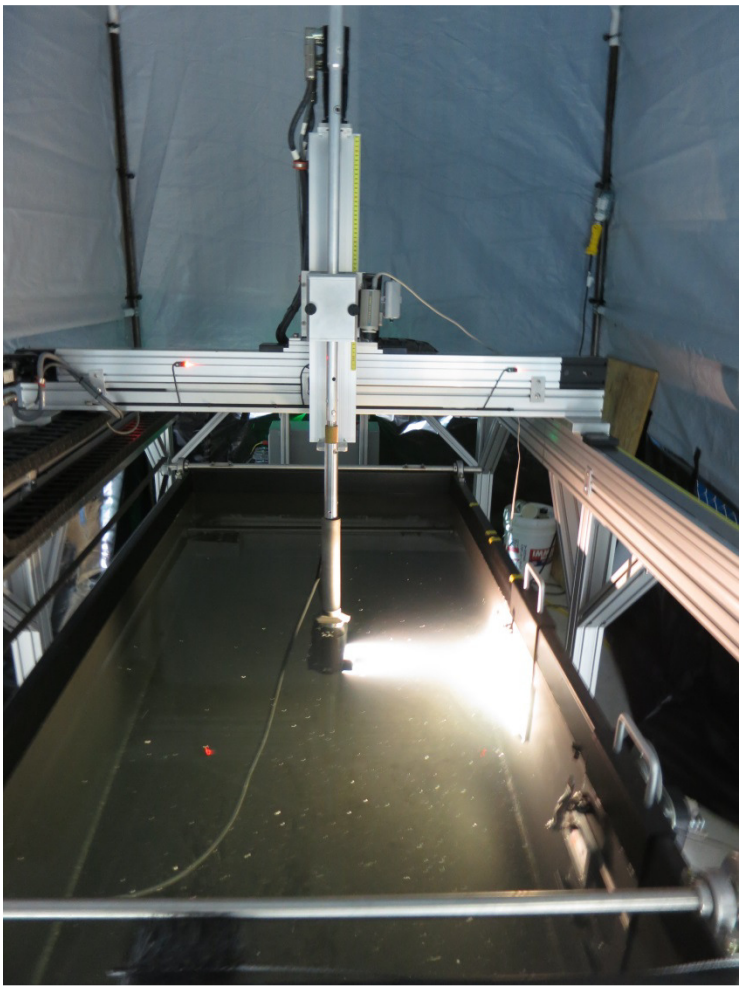

Abbildung 7: Praktische Demonstration mit Manipulator

Um den gesamten, als qualifiziert betrachteten Bereich abzudecken, wurden ausserdem Datenaufnahmen mit zusätzlichen am Manipulator fix eingestellten Blickwinkeln und Abständen durchgeführt. Unter diesen Grenzbedingungen musste der Prüfer ebenfalls die Testfehler erkennen können.

Zur bestmöglichen Interpretation von Auffälligkeiten sollte die Zoom-Funktion verwendet werden. Für eine praktische Demonstration bedeutet das allerdings, dass der Prüfer mehr als im realen Prüfeinsatz von der Zoomfunktion Gebrauch macht. Um dies in der praktischen Demonstration einzuschränken, wurden ein Detektionsmodus und ein Interpretationsmodus eingeführt. Im Detektionsmodus ist die Verwendung des Zooms aber auch anderer Hilfsmittel wie Zusatzbeleuchtungen nicht möglich. Ergebnis des Detektionsmodus ist die Identifikation von Bereichen auf den Testplatten, die von begründetem Interesse sind. Der Prüfer muss dieses Interesse plausibel erklären. Erst dann kann zum Interpretationsmodus gewechselt werden, in dem alle Möglichkeiten einer realen Prüfsituation zur Verfügung stehen.

Die Auswertung der Ergebnisse der praktischen Demonstration erfolgte unterstützt durch ein Auswertedatenblatt.

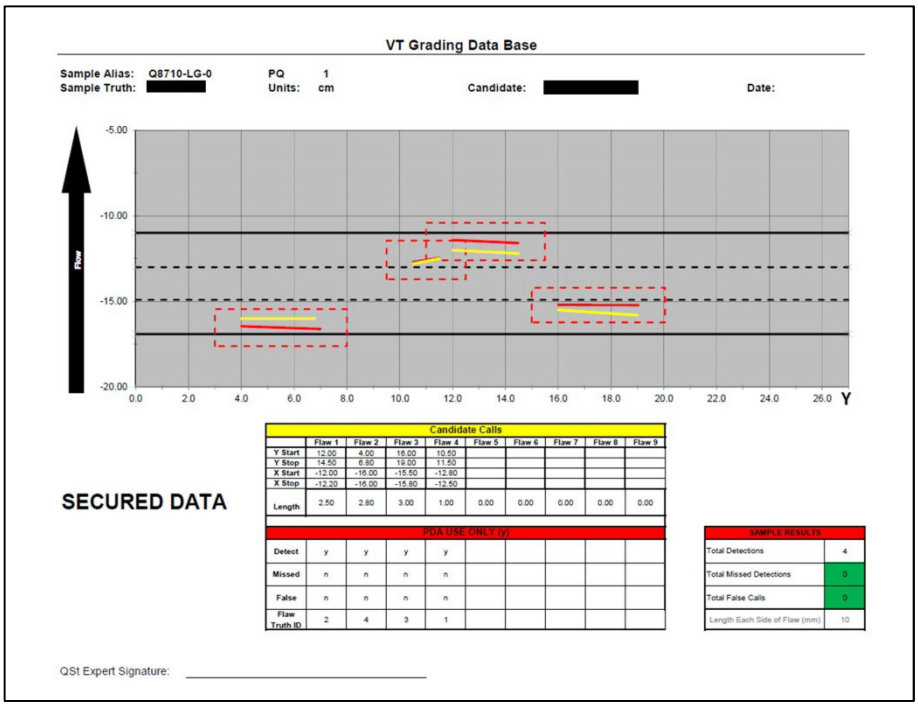

Abbildung 8: Auswertedatenblatt zur praktischen Demonstration

7 Ebener Fall und komplexe Geometrien

Die Leistungsfähigkeit des Prüfsystems wurde anhand ebener Platten nachgewiesen. Eine Qualifizierung an allen vorkommenden Geometrien wäre aufgrund der Menge nicht umsetzbar gewesen. Solange die für den ebenen Fall ermittelten Prüfbedingungen durch ein geeignetes Vorgehen sichergestellt werden können, ist die Prüfung an allen denkbaren Geometrien einsetzbar. Für jede Prüfposition wird deshalb ein Detailprüfblatt erstellt, in dem Prüfvorgehen und Prüfeinschränkungen vorgegeben sind.

Zum Beispiel für die Prüfung von Rohrleitungsrundnähten müssen dieselben qualifizierten Prüfbedingungen, 0°±20° Blickwinkel und <200mm Abstand, im gesamten Prüfbereich eingehalten werden. Im Ebenen Fall gilt, bei Einhaltung der vorgeschriebenen Prüfbedingungen, der gesamte Bildbereich als qualifiziert auswertbar. Bei Rohrleitungsrundnähten muss hingegen durchmesserabhängig der qualifizierte Bildbereich berücksichtigt werden.

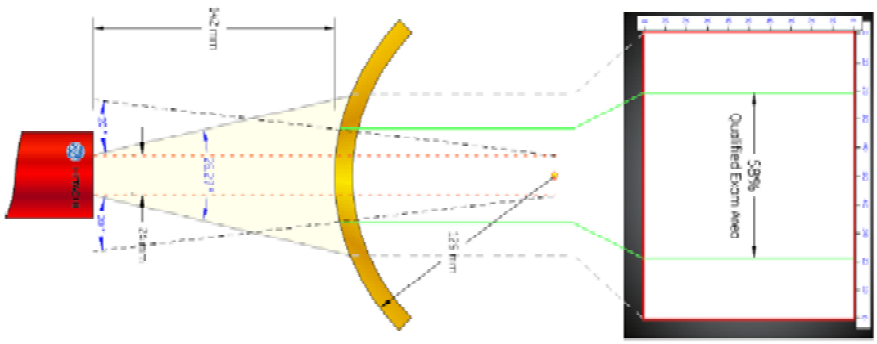

Abbildung 9: Qualifiziert auswertbarer Bildschirmbereich bei Rohrleitungen (Quelle: GE-H)

Der senkrechte Blickwinkel am Beispiel von Rohrleitungsrundnähten ist hingegen einfach herzustellen, wenn der Rohrleitungsdurchmesser vollständig im Sichtfeld abgebildet werden kann. Zunächst wird die Längsachse der Rohrleitung in Bildmitte gelegt. Durch Schwenken der Kamera ist dann der perspektivische Effekt sehr gut auszunutzen. Es ist ein annähernd senkrechter Blickwinkel herstellbar. Die Toleranzen für diesen Fall liegen erfahrungsgemäss bei ±5°.

Äquivalente Betrachtungen für andere Geometrien sind möglich. Das notwendige Vorgehen zur Prüfung muss für jede Prüfposition in Detailprüfblättern festgelegt werden.

8 Prüfeinsatz

Die Qualifizierung des Prüfsystems sorgt für eine gleichbleibend hohe Datenqualität. Die Nachvollziehbarkeit der Daten und Prüfbedingungen ist auch für nachträgliche Auswertungen durch Dritte gegeben. Der zeitliche Aufwand zur Prüfungsdurchführung steigt allerdings um ca. 50%, nimmt mit zunehmender Prüfpraxis aber wieder ab.

Dem Prüfpersonal wird eine eindeutige Vorgehensweise zur Prüfungsdurchführung zur Verfügung gestellt. Detailprüfblätter zeigen schon im Vorfeld Möglichkeiten als auch Schwierigkeiten der Prüfungsdurchführung.

Sind keine qualifizierten Prüfbedingungen umsetzbar, werden diese Bereiche als „Best Effort“ Prüfung bezeichnet. Die qualifizierten Prüfbedingungen sollten dabei so gut wie möglich eingestellt werden.