

## **Ultraschalluntersuchungen an elektronenstrahl- und reibrührgeschweißten Kupfer-Proben**

**G. Brekow, C. Müller, U. Tessaro, BAM Berlin**

### **Einleitung**

Um die langlebigen radioaktiven Abfallprodukte sicher aufzubewahren, plant SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB - schwedische Kernbrennstoff und Abfall Management Gesellschaft) ein Endlager einzurichten, das keine Überwachung durch künftige Generationen erfordert. Die Brennelemente werden in gusseiserne Einsatzhülsen eingekapselt, die zum Korrosionsschutz wiederum von einem 30-50 mm dicken Kupferzylinder ummantelt sind. Der kritischste Teil des Einkapselvorgangs ist das Versiegeln der Kanister, was dadurch geschieht, dass der Kupferdeckel an den zylindrischen Teil des Kanisters angeschweißt wird.

Die im weichen Lehm eingebetteten Kanister werden dann im felsigen Untergrund in einer Tiefe von 500 Metern deponiert.

Die Sicherheit und Zuverlässigkeit des gesamten Systems der verschweißten eingelagerten Kupferbehälter mit dem radioaktiven Inhalt wird mit modernen Methoden des Risikomanagements unter allen möglichen Einfluss szenarios garantiert.

### **Schweißprozesse und Risikoabschätzung**

Ein Teilaspekt der Risikoabschätzung für die Endlagereinrichtung ist die Risikobetrachtung eines vorzeitigen Kanisterlecks, das durch einen Schweißnahtfehler verursacht werden kann. Ein Schweißnahtfehler, der während des Schweißprozesses entsteht, macht sich als Wanddickenminderung in der Risikoabschätzung bemerkbar. Eine mögliche zusätzliche Reduzierung der Wanddicke durch Grundwasserkorrosion ist dahingehend zu berücksichtigen, dass eine minimale Restwanddicke von 15 mm unbedingt eingehalten werden muss. Daraus ergibt sich die Konsequenz, dass alle kritischen Fehler, die die Wanddicke bis nahe an den 15 mm Grenzwert verringern würden, mit einer hohen Zuverlässigkeit nachweisbar sein müssen.

Bei den beiden untersuchten Schweißtechniken handelt es sich um Elektronenstrahlschweißen (EBW) und Reibrührschweißen (FSW). Beide Techniken werden parallel bei SKB in Oskarshamn entwickelt. Aufgrund des unterschiedlichen metallurgischen Schweißprozesses können unterschiedliche Schweißnahtfehler in der Werkstoffmikrostruktur auftreten, die mit zfP-Techniken nachzuweisen sind.

Beim Elektronenstrahlschweißen ist ein feingebündelter Elektronenstrahl auf den Deckelrand ausgerichtet. Der Kupferkanister dreht sich am fest ausgerichteten Elektronenstrahl vorbei. Die Strahlleistung beträgt hier 100 kW.

Beim Reibrührschweißen wird durch Rotation eines speziell geformten Rührstabes bei einer Werkstofftemperatur von 800 bis 900 °C das zu verschweißende Material flüssig, wobei gleichzeitig verhindert wird, dass es aus der Schweißnaht herausgedrückt wird. Die Schweißfortschrittsgeschwindigkeit beträgt hierbei 4 m in 45 Minuten. Die Spindelantriebsleistung beträgt beim Schweißvorgang 35 kW.

Die spätere Fehlernachweisfähigkeit der in Schweden eingesetzten Prüftechniken wird durch die BAM mit Referenzuntersuchungen quantitativ ermittelt und liegt dann in Form einer POD - (probability of detection) Berechnung vor [1]. Hierfür sind in der BAM radiographische Untersuchungen und Ultraschallmessungen an Cu-Proben mit entsprechenden Schweißnähten durchgeführt worden, die in identischer Ausführungsform dann auch an den Cu-Kanistern für die Endlagerung in Schweden verwendet werden. Aufgrund eingehender Untersuchungen und inzwischen vorliegender Erfahrungen ist schließlich die Reibrührschweißtechnik für die Versiegelung der Cu-Kanister ausgewählt worden.

## Ultraschalluntersuchungen

Für die Untersuchung der Cu-Ringsegmente sind zuvor Referenzmessungen an zylindrischen Cu-Proben durchgeführt worden, um an kleinen Testfehlern das Auflösungsvermögen der Ultraschallprüftechnik zu testen.

Für das Impuls-Echo-Verfahren in Kontakttechnik wurde ein Cu-Referenzkörper eingesetzt, der eine Flachbodenbohrung mit 3 mm Durchmesser in 20 mm Tiefe aufwies. Dies entspricht den Randbedingungen für die Messungen an den Cu-Ringsegmenten. Es wurde dafür ein MSEB-Prüfkopf mit einer Prüffrequenz von 4 MHz benutzt. Das Bild 1 zeigt das C-Bild mit der Anzeige des Reflektors.

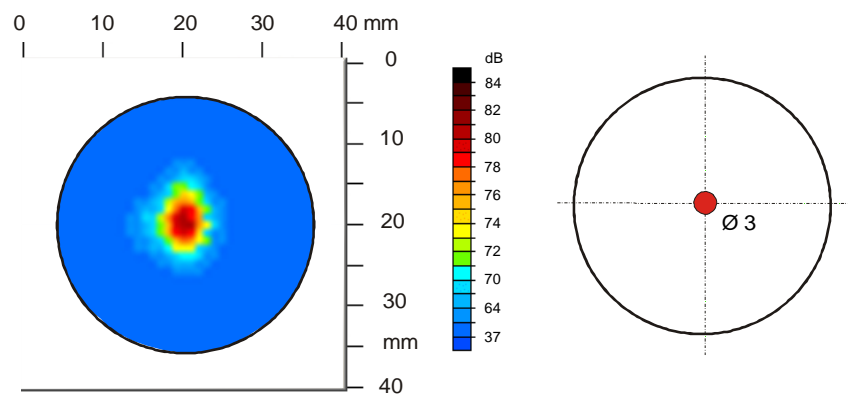


Bild 1 C-Bild mit Anzeige des Referenzreflektors bei Einsatz der Impuls-Echo-Methode in Kontakttechnik

Für die Tauchtechnik in Durchschallung wurde ein Referenzkörper benutzt, der drei Flachbodenbohrungen mit einem Durchmesser von 1,5 mm aufwies. Die Bohrungen sind jeweils 2,3 und 3,7 mm voneinander entfernt und haben eine Tiefe von 20 mm.

Die fokussierten 10 MHz-Tauchtechnik-Prüfköpfe hatten eine Fokusslänge von 75 mm. Der Abstand der beiden zueinander ausgerichteten Prüfköpfe war dabei so gewählt, dass die Reflektoren in 20 mm Tiefe im Fokusbereich lagen. In Bild 2 sind die Abmessungen der Bohrungen und das aufgenommene C-Bild wiedergegeben.

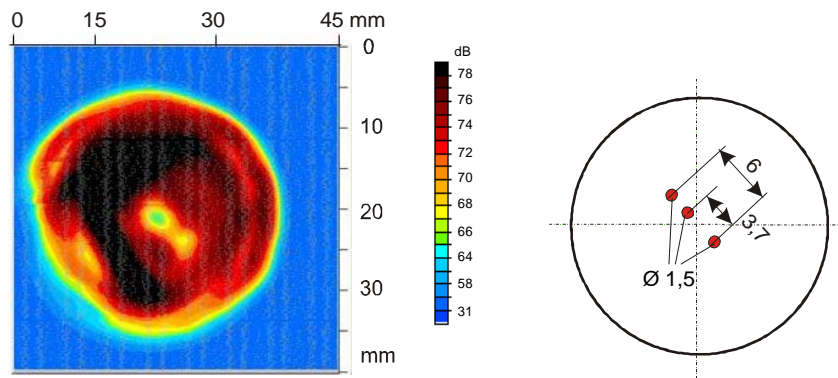


Bild 2: C-Bild mit Anzeige der Referenzreflektoren bei Durchschallung in Tauchtechnik

Aufgrund des Gefügeeinflusses des Kupfers kann von den drei einzelnen Bohrungen nur die im Abstand von 3,7 mm zur benachbarten getrennt aufgelöst werden.

Ein weiterer Referenzkörper wurde benutzt, um das Auflösungsvermögen der 10 MHz-Prüfköpfe in Tauchtechnik ohne den Gefügeeinfluss des Kupfers zu ermitteln. Dieser Referenzkörper wies zwei 5 mm tiefe Flachbodenbohrungen im Abstand von 3,5 mm auf, wobei die Durchmesser der Bohrungen jeweils 1,5 mm betragen. Das entsprechende C-Bild ist in Bild 3 dargestellt.

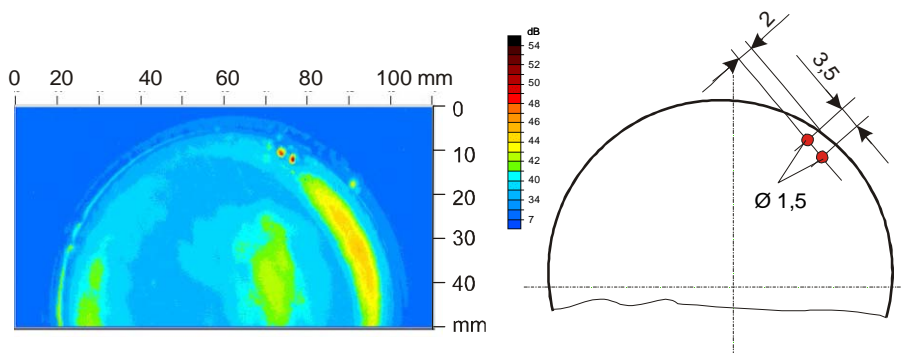
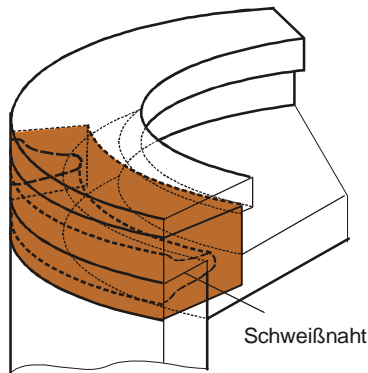


Bild 3: C-Bild mit Anzeige der beiden Referenzreflektoren zum Nachweis des Auflösungsvermögens ohne Cu-Gefügeeinfluss

Insgesamt sind 19 Cu-Ringsegmente untersucht worden, da für beide Schweißverfahren der gesamte Deckelrand jeweils in Segmente unterteilt worden ist.

Die Lage eines Ringsegmentes im Deckelrand und die räumliche Orientierung der Schweißnaht ist schematisch in Bild 4 zu sehen.



Deckelrand vom Kupfer-  
Kanister  
Bild 4 Lage eines  
Ringsegmentes im  
Deckelrand

Die Schweißnähte in den Cu-Proben zeichnen sich hierbei nicht durch eine angestrebte Fehlerfreiheit aus, sondern sind mit Referenzfehlern behaftet, die es gestatten, die Übereinstimmung zwischen dem schwedischen und deutschen Prüfergebnis möglichst umfassend abzusichern.

Die untersuchten Cu-Proben mit elektronenstrahlgeschweißten Nähten hatten eine Wanddicke von 40 mm. Wie bei den Referenzmessungen an den Referenzkörpern sind fokussierte 10 MHz-Prüfköpfe in Tauchtechnik und ein MSEB-Prüfkopf (4 MHz) in Kontakttechnik eingesetzt worden, um in Durchschallungs- bzw. Impuls-Echo-Technik die eingebrachten Testfehler nachzuweisen. Die Messanordnungen für Kontakt- und Tauchtechnik sind in den Bildern 5 und 6 dargestellt.

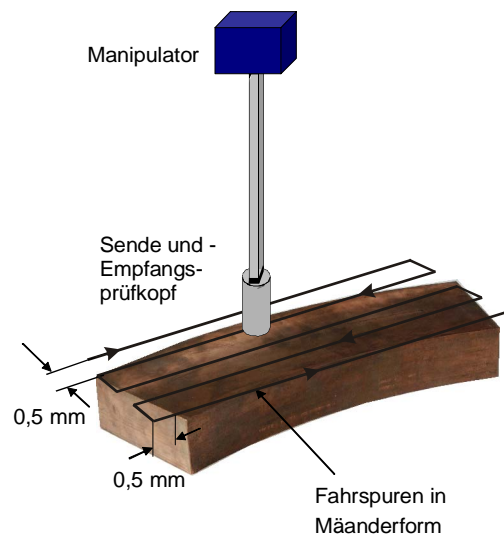


Bild 5: Prüfkopfführung bei der Impuls-Echo-Methode in Kontakttechnik

Die untersuchten Cu-Proben mit rührreibgeschweißten Nähten hatten eine Wanddicke von 60 mm. Es sind wiederum fokussierte 10 MHz-Prüfköpfe in Tauchtechnik eingesetzt worden, um in Durchschallungstechnik die eingebrachten Testfehler nachzuweisen. Die Messanordnung entspricht der in Bild 6.

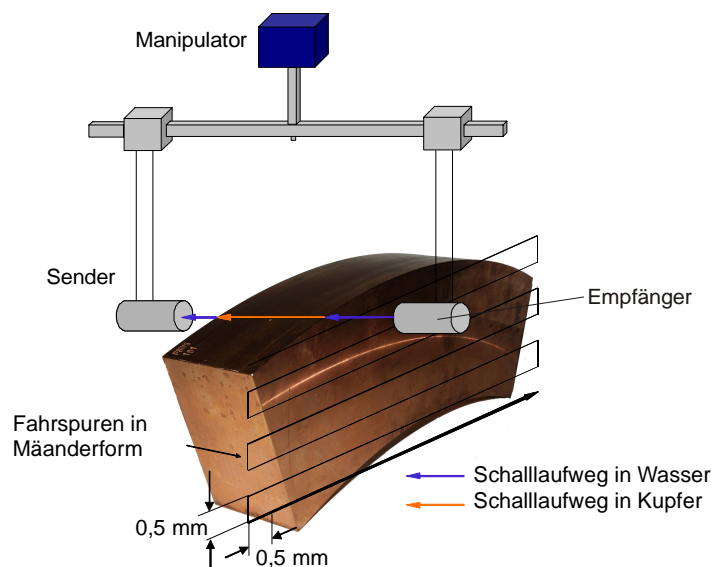


Bild 6: Anordnung der Prüfköpfe bei Durchschallung in Tauchtechnik

### Auswertung der Messergebnisse

Die Cu-Ringsegmente sind jeweils mäanderförmig abgetastet worden, um C-Bilder herstellen zu können. Die Messpunkt- und Spurabstände betragen dabei jeweils 0,5 mm. Beispielhaft sind C-Bilder der unterschiedlich geschweißten Cu-Ringsegmente in den Bildern 7, 8 und 9 dargestellt.

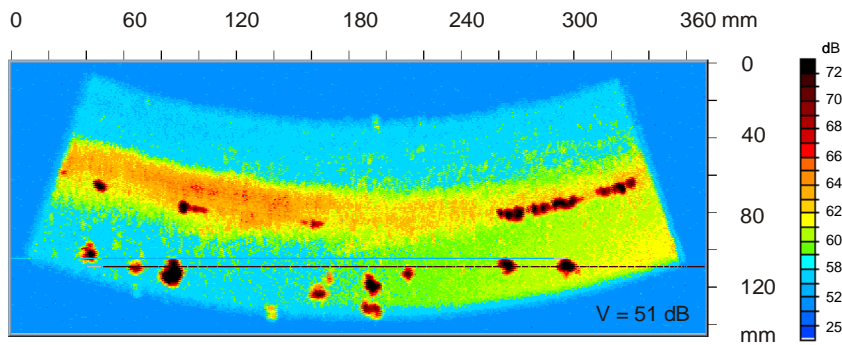


Bild 7: C-Bild eines elektronenstrahlgeschweißten Ringsegmentes (Umfangsposition:  $32^\circ$ - $72^\circ$ ) bei Einsatz der Impuls-Echo-Methode in Kontakttechnik

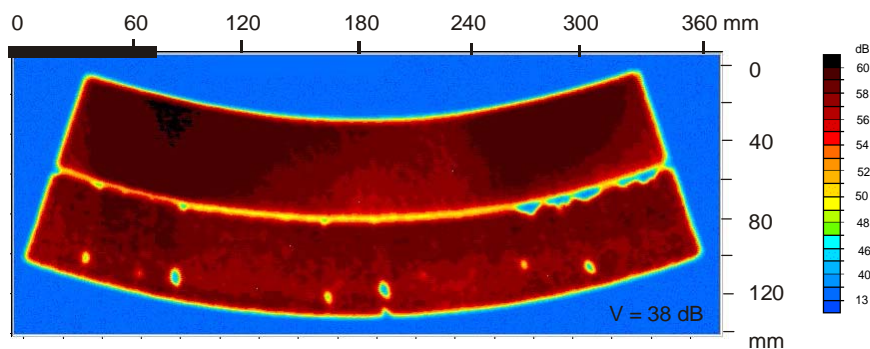


Bild 8: C-Bild eines elektronenstrahlgeschweißten Ringsegmentes (Umfangsposition:  $32^\circ$ - $72^\circ$ ) bei Durchschallung in Tauchtechnik

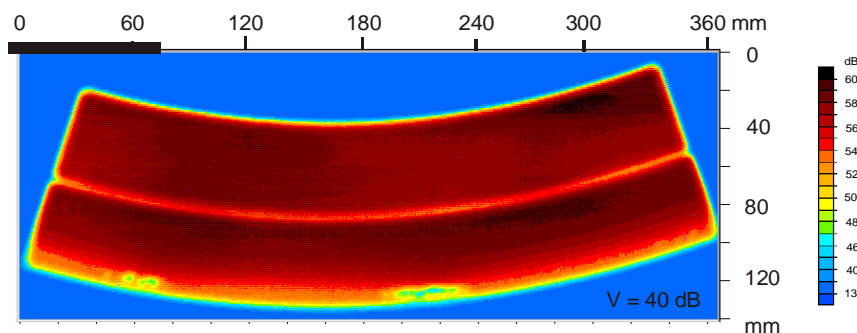


Bild 9: C-Bild eines reibrührgeschweißten Ringsegmentes (Umfangsposition:  $201^\circ$ - $241^\circ$ ) bei Durchschallung in Tauchtechnik

Die C-Bilder in den Bildern 7 und 8 zeigen beispielhaft elektronenstrahlgeschweißte Nähte mit einer Reihe von Schweißnahtfehlern. Die Position der Fehler erklärt sich mit Hilfe des Bildes 4, in dem schematisch die Lage der Schweißnaht im Deckelrand dargestellt ist.

Die Ringsegmente haben eine radiale Ausdehnung von ca. 100 mm und die Schweißnähte erstrecken sich 50 mm in Richtung Kanisterachse. In einem Abstand

von ca. 50 mm liegt zwischen Deckel und Kanister parallel zur Kanisterachse eine nicht verschweißte Lücke vor, die sich in den C-Bildern als ringförmiger Spalt darstellt. (siehe Bild 10)

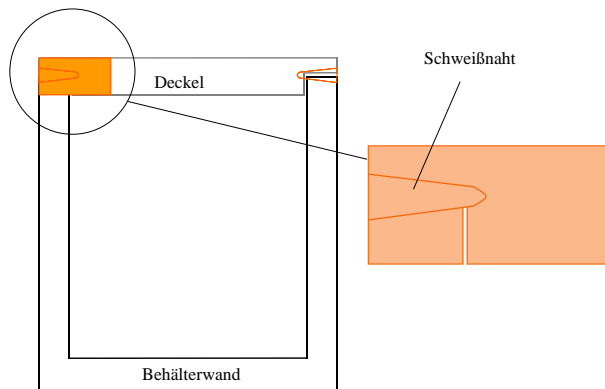


Bild 10 Lage des ringförmigen Spalts senkrecht zur Schweißnaht

Während das mit der Impuls-Echo-Technik erstellte C-Bild aufgrund der hoch eingestellten Nachweisempfindlichkeit alle Fehlerpositionen anzeigt, aber keinen Bezug zur wahren Fehlergröße zulässt, lassen die in Tauchtechnik und mit höherer Frequenz sowie mit fokussiertem Schallbündel ermittelten C-Bilder Rückschlüsse auf die Reflektorgröße zu. Die Fehler im elektronenstrahlgeschweißten Ringsegment haben in radialer Richtung Abmessungen bis zu 4 mm, in Umfangsrichtung aber Ausdehnungen bis zu 26 mm. Im rührreibgeschweißten Ringsegment (siehe Bild 9) liegen wesentlich weniger Fehler vor. Sie liegen dicht unter der Außenoberfläche, erstrecken sich in Umfangsrichtung bis zu 30 mm, haben aber in radialer Richtung nur bis zu 4 mm Ausdehnung. Bei der Reibrührschweißung kann ein Fehlertyp auftreten, der bei besserer Prozessführung vermeidbar, aber mit der Ultraschallprüfung nicht nachweisbar ist. Bei dem Fehler handelt es sich um sogenannte „line hooks“.

## Zusammenfassung

Die schwedische Kernbrennstoff und Abfall Management Gesellschaft (SKB) plant, verbrauchte Kernbrennstäbe in einem Granitfelsen in 500 m Tiefe in Betonkammern und Cu-Kanistern für mindestens 100 000 Jahre sicher endgültig einzulagern. Die zylinderförmigen Cu-Kanister werden dabei mit einem Deckel versiegelt. Nach dem Versiegeln werden die Schweißnähte dann mit zerstörungsfreien Prüftechniken auf Integrität untersucht.

Die spätere Fehlernachweisfähigkeit (POD) der in Schweden eingesetzten Prüftechniken wird durch die BAM mit Referenzuntersuchungen quantitativ ermittelt.

Hierfür sind in der BAM radiographische Untersuchungen und Ultraschallmessungen an baugleichen Cu-Proben mit entsprechenden Schweißnähten und Testfehlern durchgeführt worden. Die Ultraschalluntersuchungen zeigen, dass bei der Rührreibschweißung weniger Fehler als bei der Elektronenstrahlschweißung vorkommen. Die Rührreib-Fehler treten vor allem an der Oberfläche in Umfangsrichtung des Deckelrandes auf.

## Literatur

[1] Reliability Evaluation of NDT Techniques for Cu-Welds for Risk Assessment of Nuclear Waste Encapsulation  
Ch. Müller, H. Ryden, M. Elaguine, C. Bellon, U. Ewert, B. Redmer, U. Ronneteg  
BAM-Berlin, SKB –Sweden, Advances in Signal Processing for Nondestructive Evaluation of Materials, 4th International Workshop, 2-4 August 2005, Québec, Canada